

# 工程设计与施工

Volume 8 Issue 3 · March 2026 · ISSN 2705-070X(Print)



工程设计与施工

Engineering Design and Construction

Volume 8 Issue 3 · March 2026 · ISSN 2705-070X(Print)

中文刊名： 工程设计施工

ISSN： 2705-070X (纸质)

出版语言： 华文

期刊网址： <http://journals.nassg.org/index.php/edc>

出版社名称： 新加坡南洋科学院

Serial Title: Engineering Design and Construction

ISSN: 2705-070X (Print)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/edc>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

### Database Inclusion



Google Scholar



CQVIP



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

### 版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: [info@nassg.org](mailto:info@nassg.org)

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



### 期刊概况：

中文刊名： 工程设计施工

ISSN： 2705-070X (Print)

出版语言： 华文刊

期刊网址： <http://journals.nassg.org/index.php/edc>

出版社名称： 新加坡南洋科学院

### 出版格式要求：

- 稿件格式： Microsoft Word
- 稿件长度： 字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位： 国际单位
- 论文出版格式： Adobe PDF
- 参考文献： 温哥华体例

### 出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 中国知网（CNKI）、谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

### 作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

### 评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

Engineering Design and Construction

# 工程设计与施工

March · 2026 | Volume 8 · Issue 3 | ISSN 2705-070X (Print)

## 编委会

### 主 编

贾西圣 山东汇通建设集团有限公司

### 编 委

王立峰 通号（郑州）电气化局郑州铁路工程有限公司

马利东 北京诚通华亿房地产有限公司

谢红星 通号（郑州）电气化局有限公司

徐舟 陕西航天建设集团有限公司

成柏璇 北京光谷创新置业有限公司

张龙 沂源龙裕工贸有限公司

吕泓静 濮阳市住房和城乡建设事务中心

王子睨 百安木设计咨询（北京）有限公司

1	边坡开挖支护技术在水利工程施工中的实践探究 / 李加干 李超 李太洪	42	绿色建筑理念下高层建筑设计策略的优化与创新 / 费兴顺
4	基于新型智慧城市框架的智慧工地建设模式与实践探索 / 易俊彦 黄晓慧	45	测井辅助短节常见故障诊断与维修技术 / 刘红旗 霍常青 赵秋力 孟繁宇 李振兴
7	装配式建筑项目多主体协同管理机制构建研究 / 蒋涛	48	市政工程给排水管道试压技术的应用思考 / 陈业
10	跨厂区 MTBE 管线穿路段埋管施工总结 / 于嘉慧 缴万松 吴海杰	51	市政给排水工程施工中的管材选择及质量控制措施研究 / 李堂
14	浅谈山岭隧道穿越管道安装优化设计探究 / 李楠楠	54	基坑工程中桩基础与边坡治理——体化施工技术探讨 / 薛文康
18	湿地公园的亲水环境景观设计与实践 / 程文字	57	市政热力管道直埋敷设施工技术 with 质控措施研究 / 葛普
21	高层建筑工程施工技术难点与解决方案 / 郭月娟	60	多能源互补分布式供热在集中供热系统升级中的应用研究 / 周鹏
24	探讨沥青混凝土道路施工要点 / 董长志	63	软土地区静压管桩施工难点与处理技术 / 罗志
27	粤西三水盆地第三系极软岩地层桩基参数研究 / 王少光	66	双碳目标下公路工程绿色养护技术路径及实践 / 马福艳
30	大理凤仪镇传统宗教建筑的空间布局特征研究 / 秦庆秀	70	山区水利工程高边坡施工防护技术与实践研究 / 李洪程
33	化工建设项目施工消防安全监管机制优化与实践 / 寇甲超	73	航天科技城超级综合体项目关键施工技术研究 / 朱莉莉
36	建筑工程施工中的边坡支护技术研究 / 陆阳	76	尾矿库地质灾害防控工程施工技术优化 / 赵紫团
39	基于大数据的工程造价指标体系构建与应用探讨 / 代靖峰		

- 1 Practical exploration of slope excavation and support technology in hydraulic engineering construction  
/ Jiagan Li Chao Li Taihong Li
- 4 The Construction Model and Practical Exploration of Smart Construction Sites Based on the New Smart City Framework  
/ Junyan Yi Xiaohui Huang
- 7 Research on the Construction of Multi-subject Collaborative Management Mechanism for Prefabricated Building Projects  
/ Tao Jiang
- 10 Summary of Cross-Plant MTBE Pipeline Buried Pipe Construction for Road Crossing Sections  
/ Jiahui Yu Wansong Jiao Haijie Wu
- 14 On the Optimization Design of Pipeline Installation in Mountain Tunnel Crossings  
/ Nannan Li
- 18 Design and Practice of Water Environment Landscape in Wetland Park  
/ Wenyu Cheng
- 21 Technical Difficulties and Solutions in High-rise Building Construction Technology  
/ Yuejuan Guo
- 24 Discussion on the key points of asphalt concrete road construction  
/ Changzhi Dong
- 27 Study on pile foundation parameters of tertiary extremely soft rock strata in sanshui basin, western guangdong  
/ Shaoguang Wang
- 30 Analysis of the Spatial Layout and Architectural Form of Traditional Religious Buildings in Fengyi Town, Dali City  
/ Qingxiu Qin
- 33 Optimization and Practice of Construction Fire Safety Supervision Mechanism for Chemical Construction Projects  
/ JiaChao Kou
- 36 Research on the Technology of Slope Support in Construction of Building Engineering  
/ Yang Lu
- 39 Discussion on the Construction and Application of Engineering Cost Index System Based on Big Data  
/ Jingfeng Dai
- 42 Optimization and Innovation of High-Rise Building Design Strategies Under the Concept of Green Architecture  
/ Xingshun Fei
- 45 Common Fault Diagnosis and Maintenance Technology of Logging Auxiliary Short Sections  
/ Hongqi Liu Changqing Huo Qiuli Zhao Fanyu Meng Zhenxing Li
- 48 Reflections on the Application of Pressure Test Technology for Water Supply and Drainage Pipes in Municipal Engineering  
/ Ye Chen
- 51 Research on Pipe Material Selection and Quality Control Measures in the Construction of Municipal Water Supply and Drainage Engineering  
/ Tang Li
- 54 Discussion on the integrated construction technology of pile foundation and slope treatment in foundation pit engineering  
/ Wenkang Xue
- 57 Research on Construction Technology and Quality Control Measures of Direct Burial of Municipal Thermal Pipeline  
/ Pu Ge
- 60 Application Research of Multi-energy Complementary Distributed Heating in the Upgrading of Central Heating System  
/ Peng Zhou
- 63 Construction difficulties and treatment techniques of static pressed pipe piles in soft soil areas  
/ Zhi Luo
- 66 Green Maintenance Technology Path and Practice of Highway Engineering under the Dual Carbon Goals  
/ Fuyan Ma
- 70 Research on Construction Protection Technology and Practice of High Slope in Mountainous Water Conservancy Projects  
/ Hongcheng Li
- 73 Research on Key Construction Technologies for the Aerospace Science and Technology City Super Complex Project  
/ Lili Zhu
- 76 Optimization of Construction Technology for Geological Disaster Prevention and Control in Tailings Dams  
/ Zituan Zhao



# Practical exploration of slope excavation and support technology in hydraulic engineering construction

Jiagan Li Chao Li Taihong Li

Lianyungang Mingyu Water Conservancy Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222100, Chian

## Abstract

Slope excavation and support technology belongs to structural and complex technology, and the system engineering system constructed by it has outstanding performance, which can improve the safety and stability of engineering construction. In the construction activities of water conservancy projects, due to the complex and varied construction techniques used, especially the high requirements for the stability of slope structures during construction, it is necessary to adopt real-time monitoring technology mechanisms and enrich the content of construction technology structures. This article discusses the inherent influencing factors of slope excavation and support technology in hydraulic engineering construction, and then delves into specific construction techniques. Finally, taking a construction project of a water conservancy project in Lianyungang area as an example, this paper explores in depth the application points of slope excavation and support technology.

## Keywords

Slope excavation and support technology; Water conservancy engineering construction; Influencing factors; Rock blasting; Reinforcement laying

# 边坡开挖支护技术在水利工程施工中的实践探究

李加干 李超 李太洪

连云港铭禹水利建筑安装工程有限公司, 中国·江苏·连云港, 222100

## 摘要

边坡开挖支护技术属于结构性、复杂性技术, 它所构建的系统工程体系表现突出, 可以提高工程建设的安全稳定性。在水利工程施工活动中, 由于所采用的施工技术复杂多变, 特别是施工中对边坡结构的稳定性要求极高, 所以采用实时监测技术机制、丰富施工技术结构内容大有必要。本文泛谈了边坡开挖支护技术在水利工程施工中的固有影响因素, 然后深度讨论具体施工技术方法。最后, 以连云港地区某水利工程施工项目为例, 深入实践探究边坡开挖支护技术的应用要点。

## 关键词

边坡开挖支护技术; 水利工程施工; 影响因素; 石方爆破; 钢筋铺设

## 1 引言

水利工程施工建设环境十分复杂, 施工工作多遵循因地制宜基本原则, 为各项技术应用提出了较高要求, 如边坡开挖支护技术。该技术旨在保障边坡开挖稳定性, 避免出现边坡坍塌等异常情况。为深度分析该施工技术, 还必须思考影响其施工技术效果的外部因素。

## 2 边坡开挖支护技术施工的影响因素分析

边坡开挖支护技术施工难度较高、关键点多, 为确保施工高质量还必须思考以下两点影响因素:

地质地基影响因素。水利工程项目所处地质情况复杂,

大体可以归类为两种地质地基, 即土质地基以及岩质地基。在两种地质地基施工中往往存在边坡失稳状况, 具体表现为山体滑坡甚至崩塌, 严重时可能造成施工人员安全事故, 不容忽视。例如在某些水流湍急的急性水利工程项目中, 针对施工现场的地质勘察工作难度更大, 所要考虑的危险因素更多。当然, 考虑到结构以及水文状况表现复杂, 所以必须看重边坡的稳定性监测工作。结合多年的水利工程施工经验看, 对边坡质量以及稳定性等因素的监控控制需要因地制宜、有的放矢。比较常见的地基边坡安全开挖与支护技术可以有效规避滑坡风险影响, 通过施工持续强化边坡稳定性, 这对边坡的防护质量改善帮助较大<sup>[1]</sup>。

第二, 边坡失稳变形影响因素更加重要。严格来讲, 边坡的稳定性变化较大, 人为或者自然因素都会影响边坡, 引发安全风险问题。对边坡失稳问题的分析必须深入, 例如分析其受压与支护变化情况(人为因素), 适当调整开挖方

【作者简介】李加干(1984—), 男, 中国江苏连云港人, 本科, 工程师, 从事水利水电工程研究。

式,另外讨论地震等自然因素所带来的负面影响,计算边坡安全系数调整情况,尽量杜绝边坡滑坡突发事件发生。

### 3 边坡开挖支护技术施工的实践方法

针对水利工程的边坡开挖与支护施工技术,顾名思义它包含边坡开挖以及支护两种施工技术,下文就二者的具体实践操作方法进行研究。

#### 3.1 水利工程中的边坡开挖施工技术实践方法

##### 3.1.1 不同地质地基的边坡开挖施工方法

首先,针对两种地质与地基的边坡开挖施工方法有所不同。土质边坡开挖属于水利工程的土方类挖掘施工范畴,施工人员所采用的是自上而下的分阶段边坡开挖技术。该技术的边坡开挖质量很高,施工中主要对边坡边缘的泥土进行特殊处理,边开挖边修整、加固开挖边坡位置。在开挖前,则要做好土方边坡的滑坡以及塌方等特殊情况防护处理工作,确保土质边坡开挖始终处于安全稳定状态中。

其次,针对岩质边坡开挖的施工控制技术则更为复杂,因为岩质地质更坚硬,勘察难度更高。施工中所采用的开挖方法通常为爆破法。在爆破作业前,深入了解施工现场岩层的地质特征情况很有必要,可以考虑采用钻爆法进行施工,科学评定爆破过程所需要的各种参数以及炸药用量标准。另外,台阶式分层爆破法也是适用的,它可以更好地规避边坡由于爆破而坍塌状况。当然,薄层爆破开挖法则主要用于部分边坡高度 $\leq 10\text{m}$ 的施工现场,而且要求边坡开挖高度保持在 $3\text{m}$ 以上<sup>[1]</sup>。

#### 3.2 边坡开挖施工技术的实践操作流程

##### 3.2.1 施工准备

施工准备属于边坡开挖施工的核心基础,前期针对施工现场的详细地质的勘察与复核工作相当重要。施工人员可以参考具体设计图纸在现场复核,初步确定岩土层的分布状况、结构面情况等,如了解断层以及裂隙节点位置并标记备注。另外,施工准备阶段计算软弱夹层情况,必要时计算地下水浮动位置,为水利工程施工过程精细化技术参数。施工准备阶段的补充勘探主要围绕某些潜在滑裂段落、面层展开,对不稳定岩体的判断必须做到精准有效。考虑到水利工程中开挖工作面关乎工程生产运行状况,所以施工准备阶段必须注重“排水先行”黄金法则,选择在边坡开挖前同步开挖排水沟,施工中一旦有地下水渗水或者水利工程出水,则必须设计施工临时井点进行临时降水处理。

##### 3.2.2 施工过程

参考上文所谈到的土质、岩质不同地质地基进行针对性施工。如采用分层分阶段开挖土质地质,避免在施工中掏底开挖或者“一坡到顶”开挖,因为两种开挖方式都会导致边坡地基空虚,造成边坡坍塌。如上文所述,遵循自上而下分层开挖边坡原则更为科学合理,每一层开挖深度都要参考具体岩性给出对应处理策略,确定施工支护要求。例如,如

果是岩质边坡开挖,它的支护高度应该控制在 $4\text{m} \sim 8\text{m}$ 范围内;如果是土质边坡,其支护高度应该控制在 $2\text{m} \sim 4\text{m}$ 范围内。在每一层的开挖施工中,施工人员都要动态修理边坡,临时建立支护体系,确保每一层边坡施工稳定,经过科学评估后再进行下一层开挖施工工作。

如果所针对地质地基为岩质结构,采用爆破边坡开挖施工技术则更为合理,它主要针对微风化岩石或者坚硬岩石,开挖工作效率较高。爆破施工的关键技术包括光面与预裂两种,其中预裂爆破施工技术比较常用,它在岩层主体爆破之前在边坡边缘轮廓线钻孔(预裂孔),与主爆区衔接共同起爆,形成一条较长的预裂缝,保护岩层完整性。在主爆区施工中,则采用台阶深孔爆破技术方法。施工中由施工人员预先挖好倾斜孔或垂直孔,并计算分析孔网参数,合理规划排距与超深位置,与分层装药、间隔装药施工技术手段相互契合。

在精准钻孔施工中,施工人员时刻保证钻孔轮廓线布点和定向钻深处理到位,施工中多采用精度较高的露天钻机,并围绕钻孔布点、钻深进行定向施工处理,确保精准放样。施工中采用全站仪标记出所有炮孔位置,再展开施工活动。精准钻孔后,施工人员精细装炸药,根据预裂孔位置采用耦合装药技术方式,可以采用专用光爆炸药,施工中与导爆索连接,形成炸药串联结构,并放入孔口等待引爆。这一施工技术方法可以最大限度减少装药量,节省施工成本。

在爆破施工完毕后,对边坡进行善后修整,采用机械设备或者人工力量清除边坡上残留的松动石块或者贴面岩石碎块。同时,动态监测施工期间的边坡位移以及沉降情况,了解深层变形结果,必要时采用安全预警信息处理技术。如对地质条件变化进行信息化监测,提出具体的地质预报与支护参数、爆破参数动态调整机制,为随后的支护施工活动开展创造利好条件。

#### 3.3 水利工程中的支护施工技术实践方法

针对水利工程的支护施工技术则包含悬臂挡土桩支护与锚杆支护,首先谈悬臂挡土支护,它采用木桩与钢材等材料负责加固支护,施工中将按照测量角度与深度将材料插入土体或者岩体中,形成支护结构。如果是土质地基,边坡的支护稳定性水平更高,可以配合设置挡土墙(设置高度范围为边坡的 $6\text{m} \sim 12\text{m}$ 区间),进一步稳定边坡坚固程度。施工中还采用焊接以及扣件连接施工技术,进一步强化支护能力。

其次谈锚杆支护施工技术,锚杆支护的原理相当简单,而且更适用于岩石地基。在水利工程中,岩石岩层地基表现较多,但是边坡支护难点较大,施工人员多采用二级螺旋钢筋进行支护,支护高度为 $10\text{m} \sim 12\text{m}$ 。在支护前,必须对岩质地质进行钻孔处理,或者同样采用钻爆施工技术方式。

锚杆支护施工的关键点在于合理运用锚杆索,将锚杆索一端稳定于岩土地层中,另一端则直接衔接地下连续墙、

桩基等其它支护结构。可以考虑采用边开挖、边支护施工技术方式,满足分层施工要求。它的工艺流程为每开挖一层钻孔安装一层土钉,然后注浆挂网处理,开始混凝土喷射施工。在施工中,要合理放置钢绞线或者钢筋,且在施工后做好养护以及张拉索锁定工作<sup>[2]</sup>。

## 4 水利工程边坡开挖与支护的施工案例

以连云港某地区水利工程项目为例,他们在项目中开展边坡开挖与支护施工,下文具体来谈:

### 4.1 工程项目概况

某水利工程项目为连云港地区项目它的控制流域面积达到 200km<sup>2</sup>,属于防洪+灌溉的综合水利工程项目。该项目的建设内容为重力坝,重力坝为混凝土结构,坝体总高度达到 40m,长度为 300m,为土壤地质地基。围绕大坝岸边的边坡开挖施工技术要求较高,必须结合施工现场条件提出具体技术内容。

### 4.2 工程项目施工过程

#### 4.2.1 土方开挖

考虑到某工程项目边坡开挖规模相对庞大,为有效杜绝当地雨季可能引发的边坡坍塌事故,在土体开挖前专门为工程大坝布设排水沟和截水沟,及时疏通排水,提高施工效率。土方开挖施工自下而上展开,有效预防地下水,自然提高排水效果。施工中采用挖掘机深挖边坡土体下层,采用分层开挖施工方法,每开挖一层,进行一次混凝土喷射跟进施工操作,并参考多个台阶层级进行逐步开挖。而下台阶部分则要求比上台阶部分多开挖超过 20m,有效规避土体边坡坍塌事故风险。

为进一步提升开挖施工效果,施工技术人员的现场开挖施工操作相当灵活,不但包含分层纵深开挖施工技术方法,还采用分段横挖施工技术方法,从不同角度、不同层次确保土方开挖绝对安全稳定和高效率。

#### 4.2.2 铺设钢筋

在某水利工程项目中,采用钢筋铺设方法强化边坡开挖与支护技术流程,钢筋铺设质量高度对某项目的施工综合质量影响较大,获得了项目施工部门的高度重视。参考水利工程项目长期安全稳定运行需求,针对边坡的钢筋铺设施工严格遵照工程实际建设需要,精确计算钢筋的铺设顺序以

及铺设数量,确保为边坡建立稳固有效的支撑体系。

钢筋铺设施工首先要做好钢筋绑扎,从边坡一端按照设计间距套入箍筋,与边坡横梁、纵梁等所有主筋建立垂直机制,确保弯钩位置的梁角成功交叉布置。随后采用规格为 20cm~22cm 的镀锌钢丝进行捆绑施工,满足所有交叉点捆绑要求,最后捆绑效果为“八”字形,避免钢筋网在混凝土绑扎过程中产生较大位移,同时将锚杆钢筋螺母位置主筋相互焊接(采用机械焊接方式),形成稳定传递锚固定力的关键节点。在施工中,还要专门处理加强节点部分,选择在横梁与纵梁的交叉节点位置密集布置钢筋,并按照钢筋增设标准确保节点强度水平有所提高。另外,施工中还要额外设置保护垫块,保护垫块主要设置于钢筋的顶面与侧面位置,垫块的厚度大约控制在 0.6m~1.0m,并根据相同间距绑扎即可<sup>[3]</sup>。这一施工环节的主要目的是杜绝钢筋接触边坡模板,确保混凝土保护层厚度足够,最大达到 60mm。

最后,对某项目的边坡支护钢筋绑扎结果进行验收,实施“三检”施工,具体为自检施工、互检施工以及专检施工。具体检查关键点包括绑扎牢固度、锚杆连接质量等,参考边坡支护整体结构与稳定性验收绑扎支模工序,提高项目边坡支护施工质量水平。

## 5 结语

在本文看来,结合大量理论研究以及案例实践分析,可以深刻解读当前水利工程项目建设中的边坡地质情况,如土体或岩体地质地基。根据不同地质地质,所采用的施工技术方式有所不同,例如岩石爆破法或者土体开挖法。因此,选择合理的边坡开挖以及支护施工技术颇有必要,要持续强化对施工细节的把控,确保水利工程项目的边坡施工质量水平持续提高,也为后续同类水利工程边坡施工提供有价值参考。

### 参考文献

- [1] 江云霞.边坡开挖支护技术在水利工程施工中的应用[J].中国厨卫, 2025, 24(5):151-153.
- [2] 董晔,胡胜,涂小龙.边坡开挖支护技术在水利工程施工中的应用[J].中国科技纵横, 2025(6):104-106.
- [3] 张全荣.水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用分析[J].水上安全, 2024(11):178-180.

# The Construction Model and Practical Exploration of Smart Construction Sites Based on the New Smart City Framework

Junyan Yi<sup>1</sup> Xiaohui Huang<sup>2</sup>

1. Jiangxi Vocational College of Environmental Engineering, Ganzhou, Jiangxi, 341000, China

2. Qianjing Development and Construction Co., Ltd., Zhanggong District, Ganzhou City, Ganzhou, Jiangxi, 341000, Chian

## Abstract

Smart construction site building is an important component of the new smart city, and it is a key path to promote the digital and intelligent upgrading of the construction industry. With the integrated application of technologies such as 5G, Internet of Things, big data, and artificial intelligence, smart construction sites have become an important carrier for improving management efficiency, ensuring safety, and achieving green construction. Based on the framework of the new smart city, this paper analyzes the construction logic of smart construction sites from three aspects: top-level design, data integration, and intelligent control, and discusses its application effects in safety management, progress control, environmental monitoring, and resource scheduling. The research shows that through the coordinated operation of digital twins, BIM platforms, and intelligent terminals, the entire construction process can be realized with visualization and intelligent management, significantly reducing costs and risks, and improving quality and efficiency. This paper further proposes standardized construction and policy support paths, providing feasible ideas and practical basis for the deep integration of smart construction sites and urban governance systems.

## Keywords

Smart construction site; New smart city; BIM; Digital twin; Intelligent construction

# 基于新型智慧城市框架的智慧工地建设模式与实践探索

易俊彦<sup>1</sup> 黄晓慧<sup>2</sup>

1. 江西环境工程职业学院, 中国·江西 赣州 341000

2. 赣州市章贡区虔景开发建设有限公司, 中国·江西 赣州 341000

## 摘要

智慧工地建设是新型智慧城市的重要组成部分, 是推动建筑业数字化与智能化升级的关键路径。随着5G、物联网、大数据、人工智能等技术的融合应用, 智慧工地成为提升管理效率、保障安全与实现绿色施工的重要载体。本文基于新型智慧城市框架, 从顶层设计、数据集成与智能管控三方面分析智慧工地的建设逻辑, 探讨其在安全管理、进度控制、环境监测与资源调度中的应用成效。研究表明, 通过数字孪生、BIM平台与智能终端的协同运行, 可实现施工全过程的可视化与智能化管理, 显著降低成本与风险、提升质量与效率。本文进一步提出标准化建设与政策支撑路径, 为智慧工地与城市治理体系的深度融合提供可行思路与实践依据。

## 关键词

智慧工地; 新型智慧城市; BIM; 数字孪生; 智能建造

## 1 引言

新型智慧城市建设进入深化阶段, 城市治理体系正由“信息化”向“数据驱动型智慧治理”转变。建筑业作为城市发展的基础产业, 其信息化水平直接影响城市基础设施建设效率与安全保障能力。传统工地在安全监管、进度管理与资源调度等方面存在信息孤岛、管理滞后和决策失真等问题, 制约了项目精细化管理水平的提升。随着新型智

慧城市顶层架构的确立, 智慧工地建设被赋予了新的内涵与使命——通过信息技术的系统集成与智能管控, 实现施工现场的数字孪生、实时监控与协同决策, 从而推动建筑业向智慧建造和绿色低碳方向发展。本文在梳理智慧工地建设理论与实践基础上, 结合典型工程案例, 探讨新型智慧城市框架下智慧工地的总体架构、功能体系与实施路径, 重点分析BIM+物联网+AI融合技术在项目全周期中的应用成效, 旨在为我国建筑业数字化治理体系建设提供可操作的思路与参考。<sup>[1]</sup>

【作者简介】易俊彦(1996—), 男, 中国江西赣州人,

硕士, 助教, 从事智能建造方面研究。

## 2 智慧工地的概念演进与新型智慧城市框架的契合性

### 2.1 智慧工地的概念与发展阶段

智慧工地起源于建筑业信息化管理的实践，其核心目标是通过信息技术的集成应用，实现施工管理的可视化、智能化与协同化。早期的智慧工地主要以视频监控、环境检测、劳务实名制为主要内容，着重解决安全监管与劳动管理问题。进入“互联网+建筑业”时代后，智慧工地的内涵逐步扩展至工程进度、质量控制、成本管理及生态监测等维度。当前，智慧工地已从“数据采集型”向“智能决策型”转变，其体系框架日趋完善。其核心特征包括：实时数据采集、智能风险预警、跨系统协同与决策支持。<sup>[2]</sup>

### 2.2 新型智慧城市框架下的技术协同逻辑

新型智慧城市以“感知—连接—智能决策”为运行逻辑，依托物联网、云计算与人工智能技术形成城市级的数字基础设施。智慧工地作为城市基础设施建设的重要节点，是智慧城市物理空间的微缩单元。其数据通过“城市信息模型(CIM)平台”实现与城市运行中心的互联互通，形成“项目建设—城市治理—产业生态”闭环。BIM技术在此体系中充当数据载体与可视化接口，物联网负责数据采集，AI实现智能分析与预测，云平台提供计算与存储支持。这一结构保证了智慧工地不仅是企业管理工具，更是城市数字治理体系的基础数据源。

### 2.3 智慧工地与城市数字孪生体系的融合路径

智慧工地与城市数字孪生体系的融合主要体现在数据互通与模型共建上。通过构建“工地数字孪生模型”，实现施工现场与虚拟空间的实时映射，模型不仅呈现建筑实体的几何结构，还集成施工进度、设备运行、物料库存及安全监测等动态信息，形成“虚实融合、动态交互”的管理模式。该模型与城市CIM平台互联后，可将工地数据纳入城市级数字底座，实现项目建设状态、能耗排放与环境影响的实时可视化。城市管理者可依托孪生模型开展智能监管与远程决策，从而推动工程建设管理由经验驱动向数据驱动转型，提升城市治理的精细化与智能化水平。

## 3 智慧工地的核心技术体系与功能构成

### 3.1 BIM与物联网融合的数字化基础平台

BIM (Building Information Modeling) 技术是智慧工地建设的核心支撑与数据中枢。通过建立建筑项目的三维信息模型，实现从设计、施工到运维的全过程数据集成与信息共享。BIM与物联网(IoT)融合后，可将施工现场的动态信息实时映射至虚拟模型，形成物理与数字空间的双向联动。传感器网络可实时采集温湿度、噪声、粉尘、振动、位移等数据，并自动传输至BIM平台，系统根据阈值设定自动生成预警。该平台还能与施工机械定位系统及劳务管理系统对接，实现设备调度优化与危险区域预警，从而提升作业安全

性与管理精度。研究表明，BIM-IoT一体化平台可使施工信息传递效率提高约30%，项目数据完整性显著增强，为智慧工地的数字化治理提供了坚实基础。<sup>[3]</sup>

### 3.2 人工智能与大数据分析的决策支持系统

人工智能与大数据分析技术的引入，使智慧工地具备智能感知、动态学习与自适应优化能力。通过对施工过程中安全、进度、质量等多维数据进行深度学习建模，AI算法能够实现风险识别、趋势预测与智能调度。基于机器学习的安全预警模型可提前识别潜在高风险作业环节，减少人为疏漏。大数据平台对物联网采集的多源异构数据进行清洗与分析，实现态势感知与动态决策支持。

### 3.3 云计算与边缘计算在智慧工地的应用

智慧工地的实时性、高并发性和海量数据特征决定了必须依托高效的计算架构来实现信息处理与指挥调度。云计算平台具备强大的数据存储与分析能力，能够集中处理各类业务数据并实现多项目协同管理；边缘计算则在工地现场端完成数据的快速响应与即时分析，减少延迟并提升系统可靠性。通过“云边协同”架构，数据在边缘端实现初步处理后再上传至云端进行深度学习与综合决策。例如，塔吊作业监控系统可在边缘端识别危险操作，立即发出警示，而云端模型可基于历史数据生成操作优化方案，形成闭环安全管理。该架构不仅提升了系统的实时决策能力，也降低了网络带宽占用与数据传输延迟，为复杂工地环境下的高效运行提供了技术保障。

## 4 智慧工地建设的实践模式与典型应用

### 4.1 安全管理的智能化与精细化

安全生产是智慧工地体系建设的首要目标与核心任务。传统安全管理方式以人工巡查和事后监管为主，存在响应滞后与数据断层的问题。智慧工地通过部署智能安全帽、人员定位系统、视频识别摄像头和环境传感设备，实现人员、设备与环境的全方位动态感知。AI算法可对视频流实时分析，自动识别未佩戴安全防护用品、攀爬高危结构、闯入禁区等违规行为，并发出预警信号，实现从“事后处理”到“事前防控”的转变。安全数据接入CIM(城市信息模型)平台后，可实现风险分级、隐患追踪与责任可视化，帮助管理者基于数据制定预防策略。<sup>[4]</sup>

### 4.2 施工进度与质量的动态管控

智慧工地通过BIM进度管理模块与物联网监测系统的融合，实现对施工全流程的动态调控。BIM模型中集成了设计信息、进度计划与施工资源数据，系统可自动对比实际进展与计划进度，识别偏差并生成优化方案。设备定位模块与劳务实名制系统协同，可实时掌握机械作业状态与人员分布，实现多方协同与精准调度。质量管理方面，采用三维激光扫描、无人机航测与红外检测等手段对关键结构进行实时检测，AI算法对检测数据进行自动分析，发现偏差后生成

整改建议与可追溯报告。研究数据显示,应用智慧工地管理系统后,C30混凝土浇筑合格率提升4.8%,施工偏差率降低6.2%,总体工期缩短约12%。这种基于数据驱动的智能管控模式,有效提高了施工的标准化与过程控制水平。

### 4.3 绿色施工与能耗监测体系建设

在“双碳”战略背景下,绿色施工成为智慧工地建设的重要方向。智慧工地能耗监测体系通过物联网传感器实时记录设备能耗、碳排放及能源使用结构,利用AI算法进行能效分析与节能调度,实现动态节能控制。系统可根据实时负载与气候条件自动调整照明、供电及机械运行时间,减少能源浪费。环境监测模块同步对PM2.5、噪声、污水排放及土壤扰动进行监控,超限数据即时报警并推送至管理终端,实现对施工环境的全过程生态管控。在河北某大型市政项目中,智慧工地平台上线后,施工阶段能源利用率提升15%,碳排放量下降9%,粉尘超标时长减少42%。绿色施工与智能监控的深度融合,使建筑工程实现从“节能型”向“低碳型”的转变,推动了智慧工地在可持续发展和生态文明建设中的创新实践。

## 5 智慧工地建设的管理体系与推广路径

### 5.1 顶层设计与标准化体系构建

智慧工地的建设必须立足于新型智慧城市的总体框架,强化顶层设计与系统规划。由于建筑行业存在项目周期长、参与主体多、管理链条复杂等特征,若缺乏统一的标准体系,极易导致数据孤岛与技术割裂。为此,应制定覆盖硬件设施、数据接口、通信协议及信息安全的国家级智慧工地技术标准体系,实现跨区域、跨行业的互联互通。标准化建设应遵循“标准先行、平台先建、应用先行”的原则,在统一技术框架下推进多源数据整合与平台联通。通过建立“国家指导、地方实施、企业协同”的标准执行机制,强化政策、技术与管理的联动,推动建筑行业的数字化转型。政府部门应牵头组建智慧工地标准化委员会,整合科研机构与行业协会力量,确保标准体系具备前瞻性、兼容性与可推广性,从而奠定智慧工地建设的规范化与可持续发展基础。<sup>[5]</sup>

### 5.2 产业协同与多主体共建机制

智慧工地的建设过程涉及设计、施工、监理、监管、运营等多个环节,只有形成多主体协同机制,才能实现全链条信息共享与资源整合。应依托智慧城市综合管理平台,构建跨部门协同机制,实现工程数据在政府监管、企业管理与公共服务间的高效流通。政府可通过政策引导与制度创新,推动“政府引导—企业主体—市场驱动”的协同模式,采用

PPP等投资方式吸引社会资本参与智慧工地建设,促进产业链上下游融合。同时,施工企业应强化数字化转型能力,建立以项目为中心的智能管控体系,提升数据应用与智能决策水平。科研机构 and 高校则需在技术创新与人才培养方面发挥支撑作用,建立智慧建造人才认证体系与岗位技能标准,推动管理者、工程师与操作人员的数字化素养提升,为行业发展提供持久的智力支持与创新动能。

### 5.3 数据安全性与隐私保护体系

在智慧工地建设过程中,海量的施工数据、人员信息与工程资料实时采集与传输,数据安全性与隐私保护成为系统稳定运行的关键环节。应建立分级分类的数据安全管理制度,对不同类型数据实施加密存储与脱敏处理,确保关键信息不被泄露。平台应配置防火墙、入侵检测与访问控制系统,实现对数据流通全过程的监控与审计。区块链技术可应用于数据存证与追溯环节,实现信息共享的可验证与防篡改,增强平台的可信度。对于涉及公共安全与隐私的信息,应建立严格的权限管理与责任追踪机制,明确政府、企业与第三方机构的数据使用边界。

## 6 结语

智慧工地建设是新型智慧城市战略的重要组成部分,是建筑业迈向数字化、智能化和绿色化发展的关键路径。通过BIM、物联网、人工智能和云计算等技术的深度融合,智慧工地实现了从信息化管理到智能决策的跨越,显著提升了施工现场的安全性、效率与可持续性。未来,智慧工地的建设将更加注重数据标准化、跨平台协同与城市级集成应用。政府应加快政策顶层设计,推动标准体系与法规建设;企业应深化数字化转型,探索产业链协同与价值再造。智慧工地不仅是工程建设的技术革新,更是智慧城市治理体系的重要组成部分,其建设实践将为我国建筑业高质量发展和城市现代化治理提供强有力的支撑。

### 参考文献

- [1] 孟凡华,唐风.“AI+”技术体系下新型智慧城市建设研究[J].石材,2026,(01):59-60+166.
- [2] 王玲,吴坚,夏静怡.浅谈智慧工地建设的应用与发展[J].中国建设信息化,2021,(13):68-69.
- [3] 高耀远.智慧城市建设与新工科人才韧性能力培养耦合机制:基于产教融合的理论框架与路径优化[J].秦智,2025,(12):152-157.
- [4] 顾宇坤.智慧城市理念下城市空间规划重构[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(35):223-225.
- [5] 吕坤,吕萍.智慧城市建设如何促进城市土地高质量利用[J].中国地质大学学报(社会科学版),2025,25(06):107-120.

# Research on the Construction of Multi-subject Collaborative Management Mechanism for Prefabricated Building Projects

Tao Jiang

Shanghai Pudong Real Estate Co., Ltd., Shanghai, 201204, China

## Abstract

Driven by the “dual carbon” strategy and intelligent construction policies, prefabricated buildings have become a crucial direction for the green transformation and industrial upgrading of the construction industry. Their characteristic of “integration of design, manufacturing and construction” brings about a high degree of complexity in multi-subject collaborative management. Based on the system analysis method, this paper identifies the key issues of multi-subject collaboration in prefabricated building projects, and constructs a multi-level organizational collaboration model integrating clear responsibilities, information sharing and interest coordination. The collaborative mechanism is verified through system dynamics simulation, and the results show that the construction of clear functional division of labor, a unified information interaction platform and a multi-dimensional communication and feedback mechanism significantly improves the project collaboration efficiency and execution performance. The research results provide a systematic theoretical framework and intelligent decision support for the multi-subject collaborative management of prefabricated building projects, and promote the collaborative innovation and green and efficient development of the construction industry chain.

## Keywords

Prefabricated Building; Multi-subject Collaboration; System Dynamics; Information Integration; Functional Division of Labor

## 装配式建筑项目多主体协同管理机制构建研究

蒋涛

上海浦东地产有限公司。中国·上海 201204

## 摘要

在“双碳”战略与智能建造政策的驱动下，装配式建筑作为建筑产业绿色转型和工业化升级的重要方向，其“设计-制造-施工一体化”特征带来了多主体协同管理的高度复杂性。本文基于系统分析方法，识别装配式建筑项目中多主体协同的关键问题，构建职责明确、信息共享和利益协调相结合的多层次组织协同模型。通过系统动力学仿真对协同机制进行验证，结果表明，构建清晰的职能分工、统一的信息交互平台及多维度沟通反馈机制，显著提升了项目协同效率和执行绩效。研究成果为装配式建筑项目多主体协同管理提供了系统化理论框架与智能化决策支持，促进建筑产业链协同创新与绿色高效发展。

## 关键词

装配式建筑；多主体协同；系统动力学；信息集成；职能分工

## 1 引言

随着我国建筑产业进入高质量发展新阶段，装配式建筑作为推动建筑工业化与绿色转型的重要抓手，受到国家政策的大力支持<sup>[1,2]</sup>。住房和城乡建设部发布的《装配式建筑发展行动方案（2019—2021年）》明确提出，通过标准化设计、模块化生产与智能化施工，促进建筑产业链各环节的深度融合与协同创新<sup>[3]</sup>。装配式建筑项目本质上是一个高度集成的复杂系统，涵盖了从投资、设计、构件制造、物流运输，到现场施工、运营维护及政府监管等众多主体，形成了

一个动态演化的产业生态系统<sup>[4,5]</sup>。在这个系统中，各主体间不仅存在紧密的技术衔接，更交织着复杂的利益关系、信息流和管理流程，其协同管理的复杂性与挑战性远超传统建筑模式。

目前国内外研究多聚焦于装配式建筑的技术应用和局部流程优化，如建筑信息模型（BIM）在设计与施工阶段的应用<sup>[6]</sup>，以及物联网（IoT）技术助力供应链数字化转型<sup>[7]</sup>，提升了部分协作环节的透明度和效率。但针对装配式建筑“设计-制造-施工”一体化过程中多主体协同管理的系统机制研究较为缺乏，尤其是缺少覆盖全生命周期的动态协同机制模型，难以满足项目复杂多变的协作需求<sup>[8,9]</sup>。

基于系统科学和协同治理理论，本文聚焦装配式建筑项目多主体协同管理机制构建，旨在破解职责模糊、信息割

【作者简介】蒋涛（1989—），男，中国上海人，硕士，从事建筑结构研究。

裂和利益冲突等核心问题。通过构建职责明晰、信息共享和利益协调的多层次协同管理框架,结合系统动力学仿真验证其动态协同效应,形成理论与方法上的创新。该研究不仅深化了多主体协同治理的理论体系,也为推动装配式建筑项目管理向智能化、绿色化和高效化转型提供了系统化的理论支持及决策参考。

## 2 存在问题及产生原因

装配式建筑项目作为设计、制造与施工紧密融合的复杂系统,其多主体协同管理面临多方面挑战<sup>[10]</sup>。当前管理实践中存在职责模糊、信息不对称、激励不足及文化融合障碍,严重制约了项目整体协同效率和绩效提升。具体表现及成因如下:

### 2.1 职责界定模糊与管理边界不清, 责任追溯困难

装配式建筑涵盖设计院、构件制造企业、物流运输、施工单位及监理机构等多方参与<sup>[11]</sup>,环节间任务交叉且流程复杂。传统的线性责任划分模式,即“设计-招标-施工”的串行管理逻辑,已无法适应“模块化设计-工厂化生产-现场装配”这种多阶段、跨领域的并行与交叉协同特征。这导致在设计与生产的接口、生产与施工的衔接等关键节点上,职责边界模糊,协作接口不清。例如,当现场出现安装偏差时,问题根源可能在于设计参数、构件生产精度或现场测量误差,责任归属难以界定,导致主体间相互推诿,问题解决周期拉长。技术层面缺乏基于过程建模和量化分析的责任分配框架,难以准确识别关键协同节点及相应责任归属,进而阻碍风险预警和责任追溯机制的有效实施。

### 2.2 信息不对称与系统集成不足, 限制协同效率

多主体协同高度依赖信息的实时共享与同步。当前信息管理系统多为孤立分散架构,缺乏统一标准、接口规范与跨平台数据集成能力<sup>[12]</sup>。设计变更、构件生产进度、运输状态等关键信息难以实现无缝衔接,导致信息流传递存在延迟、失真和数据孤岛现象。其根本原因在于缺少基于 BIM 与物联网 (IoT) 深度融合的智能信息集成平台,制约了多维度信息的有效利用和动态决策支持。

### 2.3 利益冲突及激励机制失衡, 削弱协同动力

装配式建筑项目参与主体之间存在复杂的利益关系网络,涉及投资回报、风险分摊、工期压力等多维度矛盾。各主体作为独立的经济实体,其首要目标是自身利益最大化,这与项目整体利益最优的目标时常发生冲突。现行合同与激励机制多为静态设计,缺乏动态调整与利益共享机制<sup>[13]</sup>,难以激发持续的协作意愿和责任担当。缺少基于博弈论和合同理论的科学激励设计,以及数据驱动的绩效评估和风险分摊模型,导致协同动力不足,合作效益难以最大化。

### 2.4 组织文化与技术融合不足, 阻碍认知一致性与流程优化

装配式建筑结合制造业标准化流程与建筑业现场管理

<sup>[14]</sup>,然而,这两个行业的参与主体在技术能力、管理理念、工作习惯与风险认知上存在显著差异。设计人员可能习惯于后期修改,而工厂生产则要求“图纸冻结”;施工团队习惯于现场的灵活调整,而装配式施工则更依赖于精确的计划和预制构件。这种文化认同的不足及技术应用能力的差异造成了沟通障碍和认知偏差,严重影响协同效率和项目进展。此外,缺乏跨界培训和融合型知识管理平台,使得项目经验和教训难以在不同主体、不同项目间有效沉淀和共享,阻碍了统一技术语言和认知框架的形成,制约了流程标准化和智能化的深化推进。

## 3 技术性解决方案

针对装配式建筑项目多主体协同管理中存在的职责不清、信息孤岛、激励不足及文化融合障碍等问题,本文提出基于产学研融合的系统化解决路径,构建“职责清晰-信息集成-激励优化-文化融合”四维协同管理框架,具体实施策略如下:

### 3.1 明确职责分工, 构建多主体责任矩阵体系

基于复杂系统理论,采用多层次责任分解框架 (MLRD) 结合关键路径法 (CPM) 与模糊层次分析法 (FAHP),实现任务分解与职责权重的量化分配。通过构建多主体责任矩阵 (RAM) 并嵌入基于马尔可夫过程的动态调整模型,实现职责分配的实时动态优化。利用事件驱动机制结合多智能体系统 (MAS) 监控职责执行,采用异常检测算法对职责执行偏差进行预警,保障权责清晰且具备适应项目进展变化的弹性,有效减少跨主体管理冲突和任务重复。

### 3.2 基于 BIM- 物联网融合的智能信息集成平台设计

集成建筑信息模型 (BIM) 与物联网 (IoT) 传感网络,构建面向装配式建筑全生命周期的数字孪生平台。平台利用部署在构件、设备和现场的分布式传感器,实现对构件生产状态、物流位置、环境参数及施工进度的实时监测与数据采集。在架构设计上,采用服务导向架构 (SOA) 和微服务架构,将不同功能 (如设计协同、生产管理、进度监控) 封装为独立的、可互操作的服务,从而保证多主体异构系统 (如 CAD、ERP、SCM) 间的无缝数据交互。为确保数据质量,通过引入基于时空数据库的多维数据融合技术对异源数据进行清洗和对齐,并利用机器学习算法对缺失数据进行插补和预测,增强数据的一致性和预测分析能力。最终,该平台不仅是信息的汇集地,更是智能决策的支持中心,能够显著提升信息透明度及协同响应时效。

### 3.3 多主体协作激励机制的博弈论建模与区块链实现

基于合作博弈理论构建动态激励机制模型<sup>[15]</sup>,定义多主体之间的效用函数和资源约束条件,应用纳什均衡分析来寻找能够最大化项目整体利益并兼顾各方公平性的最优利益分配方案。与传统静态合同不同,该模型将与项目关键绩效指标 (KPIs),如成本节约、工期提前、质量优良等挂钩。

为保证激励机制的执行力和公信力，引入区块链技术。通过将激励条款编写为智能合约，实现项目里程碑达成后奖金的自动支付或违约罚金的自动扣除，全过程公开透明、不可篡改。区块链的分布式账本特性还可用于记录关键交付物（如图纸、构件合格证）的流转过程，结合其共识机制，极大降低了系统内的信任成本，从而系统性地提升多方参与积极性，实现资源优化配置并有效规避合作风险。

### 3.4 跨组织知识管理体系与协同创新机制构建

采用本体构建方法建立标准化、结构化知识库，基于语义网技术实现知识语义互操作性。融合社会网络分析（SNA）与组织学习理论，促进跨主体间知识传播和创新扩散。引入知识图谱构建技术对项目经验与技术规范进行关系建模，支持基于图神经网络（GNN）的知识推理与智能检索。结合虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术，开发协同仿真培训平台，提升多学科团队的协同设计与施工能力，推动管理智能化和创新驱动。

## 4 结语

本文系统地剖析了装配式建筑项目在“设计-制造-施工”一体化模式下面临的多主体协同管理困境，指出职责模糊、信息割裂、利益冲突与文化壁垒是制约其发展的核心瓶颈。基于此，本文构建了一个涵盖组织、信息、目标与文化维度的“四位一体”协同管理机制框架。该框架通过明确责任矩阵、构建 BIM-IoT 融合的数字孪生平台、设计基于博弈论与区块链的动态激励机制，以及建立跨组织知识管理体系，为解决上述问题提供了系统化的技术与管理路径。

研究借助系统动力学方法，对所构建机制的关键要素之间的反馈关系与调控逻辑进行了模拟与解析。仿真结果表明，协同绩效的提升并非单一因素作用的结果，而是依赖于机制各要素之间的结构协调与动态适配。例如，信息平台的建设必须与责任矩阵的明晰化同步推进，否则信息透明化可能加剧责任推诿；激励机制的设计必须基于准确的绩效数据，而这些数据又依赖于信息平台的支撑。这说明机制构建需匹配工程项目不同阶段的治理需求，呈现出动态演化的特征。所提出的机制模型不仅在理论上完善了装配式建筑协同管理的体系，也为实践中提升多元主体的协同治理能力提供了具体的方法支撑与策略依据。未来研究可在此基础上，进一步引入不确定性建模、多智能体仿真及 BIM 与产品生命周期管理（PLM）的深度集成等技术，推动协同机制向自适应、智能化的更高阶段演化，以更好地应对未来智能建造的复杂挑战。

### 参考文献

[1] 李昊翔, 侯公羽, 陈钦煌, 等. 基于系统动力学的装配式建

筑项目进度分析与系统实现[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025,(06):1265-1276+1292

[2] 戴成元, 梁邦勋, 程可, 等. 基于数字孪生的装配式建筑施工过程动态调度研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(04): 83-94.

[3] 林永民, 王涵, 赵德信, 等. 基于BIM的装配式建筑全生命周期信息管理平台研究[J]. 建筑经济, 2023, 44(01): 77-83.

[4] 雷晓琪, 崔南方, 杨丁凤, 等. 装配式建筑环境下集成物料订货重复性项目调度优化[J]. 系统工程学报, 2024, 39(05): 676-690.

[5] Su Y, Zhang Z. Evolutionary Game Analysis on the Promotion of Green Buildings in China Under the “Dual Carbon” Goals: A Multi-Stakeholder Perspective[J]. Buildings, 2025, 15(8): 2075-5309.

[6] Scott J, Ho W, Dey P K, et al. A decision support system for supplier selection and order allocation in stochastic, multi-stakeholder and multi-criteria environments[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 166: 226-237.

[7] Li X, Li J, He J, et al. What are the key factors of enterprises' greenwashing behaviors under multi-agent interaction? A grey-DEMATEL analysis from Chinese construction materials enterprises[J]. Engineering construction & architectural management, 2024(11): 31.

[8] Piscopo A N, Weaver C P, Detenbeck N E. Using Multiobjective Optimization to Inform Green Infrastructure Decisions as Part of Robust Integrated Water Resources Management Plans[J]. Journal of the Water Resources and Planning and Management Division, 2021, 147(6): 5452.

[9] 姜吉坤, 刘紫君, 顾志恒, 等. 基于变权物元可拓模型的装配式建筑吊装施工安全风险评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(09): 1251-1260.

[10] 杨莹莹, 李可用. 装配式建筑发展面临的问题与对策研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(S1): 54-56.

[11] 杨增科, 樊瑞果, 石世英, 等. 基于CIM+的装配式建筑产业链运行管理平台设计[J]. 科技管理研究, 2021, 41(19): 121-126.

[12] 杜娟, 王文鑫, 胡珉. 基于SEM和Multi-agent仿真的装配式建筑设计变更风险管理[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2022, 28(06): 1038-1050.

[13] 曹敏, 方前程. 基于组合赋权-属性识别的装配式建筑绿色度评估模型研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(04): 2166-2175.

[14] 韩言虎, 杨瀚宇. 装配式建筑推广障碍与解决策略研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(07): 15-18.

[15] 张宇嘉, 瞿富强, 陈初一. 基于PCSCOR-FANP的装配式建筑供应链绩效评价研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(S1): 172-176.

# Summary of Cross-Plant MTBE Pipeline Buried Pipe Construction for Road Crossing Sections

Jiahui Yu Wansong Jiao Haijie Wu

China Harbour Engineering Company Limited, Beijing, 100027, China

## Abstract

The inter-factory MTBE pipeline has a diameter of DN500 and a total length of 3.8 km, spanning three factory areas. Among these, 13 points crossing roads and factory zones are buried underground at a depth of approximately 2.4 m, with an average crossing length of about 13 m. A 28-inch casing is installed for protection, and cathodic protection devices are configured. The pipeline transitions smoothly to above-ground sections via 45° elbows. Due to the complex network of underground utility lines and structures along the route, neither pipe jacking nor directional drilling methods are feasible. Consequently, the only viable approach under severely constrained site conditions and stringent traffic organization requirements is segmented excavation. The project optimized pipeline routing based on geological conditions, underground obstructions, and operational status of existing production facilities. After on-site surveying and marking, segmented prefabrication, assembly, and installation were carried out. Integrated construction control was implemented for casings, insulation, anti-corrosion, and cathodic protection. By arranging construction sequences rationally, refining support and drainage measures, and strengthening safety and civilized construction management, the MTBE pipeline was completed safely, with high quality and efficiency across multiple factory areas and intersections. This project provides valuable engineering experience for similar long-distance inter-factory finished product medium pipelines involving road crossings and underground installation.

## Keywords

Buried; Casing; Construction

# 跨厂区 MTBE 管线穿路段地埋管施工总结

于嘉慧 缴万松 吴海杰

中国港湾工程有限责任公司, 中国 · 北京 100027

## 摘要

厂际 MTBE 管线直径 DN500, 总长 3.8 km, 跨越三个厂区, 其中穿道路及厂区的 13 个点均采用埋地敷设, 埋深约 2.4 m, 平均穿越长度约 13 m, 并设置 28 吋套管进行保护, 配置阴极保护装置, 与地上管线通过 45° 弯头顺接过渡。由于沿线地下附属管线及构筑物错综复杂, 既无法采用顶管法, 也不具备定向钻进条件, 只能在场地严重受限、交通组织要求严格的前提下, 采取分段开挖的施工方式。工程根据不同厂区的地质条件、地下障碍分布及现有生产装置运行情况, 优化管线路由, 现场实测放线后进行分段预制、组对及安装, 同时对套管、保温、防腐及阴极保护等进行一体化施工控制。通过合理安排施工顺序、细化支护与降排水措施、强化安全与文明施工管理, 确保了 MTBE 管线在多厂区、多交叉口条件下安全、优质、高效完成, 为类似厂际长距离成品介质输送管线的穿路埋地施工提供了可借鉴的工程经验。

## 关键词

埋地; 套管; 施工

## 1 引言

斯基克达油气改造项目标段一主管线为输送 MTBE 的 20 吋 (DN500) 管线, 跨冶炼厂区 (RA1K), 公共区域 (DR1K 和 GL2K), 储罐区 (GL1K) 三个厂区, 总长 3.8 公里, 其中需穿道路及厂区界边 13 个点均为埋地管道, 深度 2.4 米, 平均长度 13 米, 套管 28 吋。由于厂区运营多年, 地上跨厂区管道多样, 地下附属物及埋地电缆、线管错综复杂, 且没

有原始地下图纸作为基础数据, 同时受周围原有在运行管线空间的限制, 只能采用开挖方式进行, 且每个点的位置及空间不同, 场地、管道尺寸控制都受到限制, 必须根据开挖后实际尺寸进行管道的预制、防腐、穿管、安装。而且埋地管道外套管道, 内外管道防腐, 如何在把防腐后的管道不破坏防腐层和绝缘套的前提下顺利安装是另一难题, 也是 MTBE 管道安装过程中的难点和重点, 直接影响整条管线的安装进度。

## 2 方案设定

考虑到地况不同, 设计原始资料数据不准, 经与业主

【作者简介】于嘉慧 (1996—), 女, 中国辽宁大连人, 硕士, 助理工程师, 从事工程力学、机械化工研究。

和设计协商,决定现场测量,以实际数据为预制基础,现场预制;

施工点顺序先土路再沥青路口,先高程后低程,避免因交通问题出现安全风险,路口作业点全部按照园区管理部门批准许可及道路封闭点确定;

根据现场距离及实地情况,与各园区沟通后,确定两到三个材料存放及临时预制、组装场地,采用发电机送电,利用随车吊运输,转运灵活

根据地上建筑,实地检查,确定地下管网及电缆走向,位置,先人工探挖,再使用机械开挖;

采用管内滑动方式安装套管:制作穿管器,辅助MTBE-20吋管道防腐后安装进套管;

### 3 主要实施方法

#### 3.1 道路封闭及开挖施工工艺

因在园区施工,且,所有埋地管道基本都在丁字路口,需要提前和园区管理部门申请作业许可,许可内容包括地点,作业时间,占地面积等,由园区管理部门核实后发布通知对所在作业区进行封闭。因园区管理不允许密闭封闭路,施工队组设定道路指挥员在路口指挥车辆,设定反光锥及道路指示牌围护,管道预制区域开挖区较近的空旷场地,按照许可审批约定位置进行作业。

根据地质报告、地下水位情况及现场的状态,设计文件、规范文件,综合考虑,沟槽底部宽 1.2 米,路口开挖沟槽边坡按 1:0.25 放坡,为保证沟槽底部操作安全,坡度不能过陡;如有特殊情况地质条件较差地段,可视情况调整坡比。由于施工的 MTBE 管道埋地管道两头位置在已运行的油气管和公用水管之间,距离小于一米,下部 0.7 米下即为回填砂层,管沟开挖难以按照设计进行放坡,需要根据实际情况准备脚手架钢管及跳板,作为管沟两侧支护,防止开挖搅动砂层塌落,造成事故。

米(管顶标高)为宜,宽度控制在 1.5~2 米范围,避免遗漏;探挖时必须邀请运营单位人员在场,以便确认地下附属物性质及走向,避免盲目判断。

人工探挖结束,明确埋地附属物位置及形状、距离后,再使用小型挖机分层开挖,挖斗宜采用平板挖,避免齿挖破坏未知埋地物或与石块摩擦产生火花;分段分层开挖,每段按照挖机大臂长度确定,每层控制在 0.5~0.7 米为宜,逐层放坡;为确保工程质量及安全,若排水管道沟槽开挖后遇地下水较高的情况,应沿管道沟槽底部增设宽度约 0.4m,深约 0.5-0.6m 排水边沟,同时将沟槽底部进行 20cm 碎石满铺(含排水边沟)处理,处理后按照原设计进行施工<sup>[1]</sup>。

#### 3.2 埋地管道预制及防腐

施工流程:直管段预制及喷漆→场地清理→胎架准备→管道倒运→埋地管道 3PE 处理绝缘套管安装→套管防腐绝缘处理→电火花测试→内外套管安装→弯头短管现场焊接→内外套管端头封口→管道吊装入沟→地上管道组对、焊接→阴极保护线缆及电池包安装→测试→修补管道绝缘→电火花测试→回填

预制场地采用就近原则,按照园区安全管理规定及不同厂区管理的范围,提前与安全管理部门确定场地,并提交申请获得动火区域的批复后再进行材料的倒运及预制工作。

管道预制按照已测量的实际尺寸进行,并在单线图标注尺寸偏差位置,便于后期的图纸升版;

应充分利用管道预制厂(场)的机械设备、胎具和环境等有利因素,确保管道加工精度,加深管段预制深度,预制深度按焊口数计应达到 70% 左右。

预制前应对施工机具、设备、工装进行检查,使施工机具、设备、工装处在良好的状态,并经过计量检查,以保证施工精度和过程控制能力。

管段排料切割前应首先对管段单线图进行审核,主要审核:

- 1) 图号、管线号、管段号及材质是否与设计相符;
- 2) 管段分段、现场安装预留口是否合理,并应对管段预制尺寸进行必要的现场复测。现场尺寸复测应用细钢丝而不要用粉线,以提高测量准确度,测量后确定预制下料的实际尺寸。

管道对接口的组对应做到内壁平齐,内壁错边量不宜超过壁厚的 10%,且不得大于 1.6mm。

管子对口时应在对接口中心 200mm 处测量平直度,当管径小于 DN100 时,允许偏差为 1mm,超过 DN100mm 时,允许偏差为 2mm。

管道焊接严格按照 WPS 进行,现场焊接采用氩电联焊方式,由于每个路口空间不同,根据实际空间尺寸考虑单侧弯头的焊接程序,也即安装前后的焊接,为探伤创造条件

#### 3.3 管道防腐方法

埋地管道采用牺牲阳极保护方式,外套  $\phi 711 \times 9.5$  保护

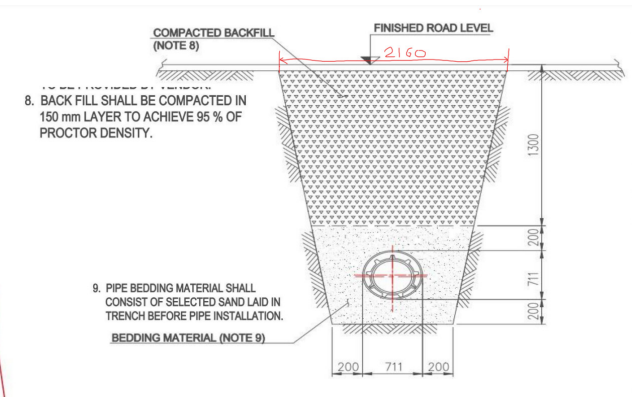


图 1 管道埋地深度及回填图

此项目由于没有任何原始地下附属物资料,因此所有过路口存在有线杆、排气管、井等附属物的,均需要人工探挖,探挖人员控制在两组,一组两人,一般人工探挖深度以 1.5

套管,内管(MTBE主管) $\phi 508*9.5$ ;因施工区域均为各个路口,地理位置及工况不同,且埋地长度不同,又受限于排风管必须现场开孔施工,因此项目采用现场进行埋地防腐绝缘层施工,分3PE热缩套和玻璃纤维加环氧煤沥青两种方式。

内外套管管道表面按设计要求喷涂:

底漆:环氧磷酸底漆(75微米)。

中层漆:环氧高固含涂层(干燥时间标准:100~200微米)。

面漆:丙烯酸聚氨酯面漆(绿色40微米)

绝缘层采用3PE即聚乙烯缠热缩套绕带,外部每隔1.5米绑定绝缘套管

外套 $\phi 711*9.5$ 保护套管,采用玻璃丝绵缠绕,两道,外涂煤焦油涂料,总厚4mm。与内管连接端口采用聚乙烯材料封口。

外套管绝缘防腐施工:外套管主要起保护绝缘作用,套管两头上下部位分别设有排风和导流管到,2吋SCH80无缝管,且避免倒运磕碰,必须在现场进行绝缘涂层施工。角焊缝做PT检测。现场设胎架,底漆采用煤油沥青底漆,3道;表面覆盖玻璃纤维布,采用螺旋缠绕2道,每层搭接不小于25mm。煤油沥青漆每层采用喷涂和滚涂结合,底漆完成立即进行玻璃纤维网的缠绕,避免底漆变干影响粘合;最终完成缠绕后,静待4小时,待漆层自然干透后,进行电火花测试检测绝缘性,全部合格后再进行下一道工序,不合格返修后重新检测,合格后再进入下道工序。

内套管防腐绝缘施工:内套管宜为整根钢管,尽量避免焊接接头出现,如因特殊情况,焊缝尽量排在管口位置。内套管为主干管,由于施工工艺要求以及现场条件限制,无法在车间进行绝缘防腐,根据实际情况采用3PE热缩套管进行:由辐射交联聚烯烃基材和特种密封热熔胶复合而成,特种密封热熔胶与聚烯烃基材。钢管表面及固体环氧涂层可形成良好地粘接。热缩套需采用加热枪均匀加热,同时采用工具铲推动挤压表面,使基材在径向收缩地同时,内部复合胶层融化,紧紧地包覆在管道表面。加热收缩时应先从中间位置沿环向均匀加热,使中央部位先收缩。然后向两侧均匀加热使热收缩带收缩。聚乙烯带采用逐片搭接并垂直于管道,管道口预留至少100mm焊接空间;搭接长度不能小于管道周长1/4,且不小于100mm,搭接宽度不低于25mm,搭接缝保持平行,不得扭曲。质量检测采用电火花测试,全部合格后再进行下一道工序,不合格返修后重新检测,合格后再进入下道工序。

内外套管电火花检测:防腐层的漏点应按采用在线电火花检测仪进行连续检查,检漏电压为25kV,无漏点为合格。单管有两个或两个以下漏点时,可按2.9.5的规定进行修补;单管有两个以上漏点或单个漏点沿轴向尺寸大于300mm时,该防腐管为不合格。

### 3.4 补口及补伤

补口材料:挤压聚乙烯防腐管的现场补口可采用环氧底漆/辐射交联聚乙烯热收缩带(套)方式或设计选定的其他方式。当采用环氧底漆/辐射交联聚乙烯热收缩带(套)时,应满足相关标准要求。

补口质量检验补口质量应检验外观、漏点及剥离强度等三项内容,检验宜在补口安装24h后进行:a)补口的外观应逐个目测检查,热收缩带(套)表面应平整、无皱折、无气泡、无空鼓、无烧焦炭化等现象;热收缩带(套)周向应有胶粘剂均匀溢出。固定片与热收缩带搭接部位的滑移量不应大于5mm;b)每一个补口均应用电火花检测仪进行漏点检查。检漏电压为15kV。若有漏点,应重新补口并检漏,直至合格;

补伤质量应检验外观、漏点及剥离强度等三项内容:a)补伤后的外观应逐个检查,表面应平整、无皱折、无气泡、无烧焦炭化等现象;补伤片四周应粘结密封良好。不合格的应重补;b)每一个补伤处均应用电火花检测仪进行漏点检查,检漏电压为15kV。若不合格,应重新修补并检漏,直至合格;下沟回填--防腐管下沟前,应用电火花检测仪对管线全部进行检漏,检漏电压为15kV。如有漏点应进行修补至合格,并填写记录。

绝缘套管安装:3PE热缩套施工完成并检测后,每隔1.5米安装一圈绝缘套管,绝缘套管采用多组片连接,因此必须紧固至所有组片紧密结合为准,避免后期脱落<sup>[2]</sup>。

### 4 内外管套装施工:

内套管外表为3PE绝缘层,外加间隔为1.5米的绝缘套管,不允许直接采用直接穿管方式,同时外套管也有防腐绝缘层,无法切割焊接。因此必须制作一穿管器,既能保护绝缘层,又能保证均长在12米的管道完好套装。

根据两管间隙及安装特殊性,现场设计了一款弧形板车,采用内管同尺寸管道,取1/3弧形管皮作为底板,按照测量的内外套管间隙及绝缘套管凸台高度,确定底部滑轮及支架尺寸,考虑到12米管道重量,滑轮采用钢制轴承,轴承支座采用10mm钢板块,将弧形底板按三等分设两排,每排三个轴承;“板车”要拖着管道在套管内滑行,必须考虑受重不均匀出现偏心,所以在底部弧板两侧各设导向轮一个,长度,弧度按照与套管接触面距离定。轴承承重要求在5吨以上,轴必须抗弯性强,选用20#直径12圆钢,与支架焊接形成一体。采用两头带螺栓扁钢条将其与管道牢固捆绑,避免脱轨。

管道的安装:管道穿管采用吊车辅助,吊装吊具须为吊带,用卡环锁扣,为保证穿管时外套管不会因外界推力滑移,且不会滚动伤人,在施工现场平整场地,下部间隔三米放木方,作为套管支撑,管道两侧放楔形木,阻挡管道滚动,内管起吊后,离地不超过外套管高度,吊点设置均匀,先利

用吊车慢摆臂穿进约一米左右，再在下方放上自制“板车”，缓慢滑动，直至到第一根吊带位置，缓慢落钩，在内管下部垫木方使其和外套管保持底平，松吊带，调整位置，再行穿管，如此往复，直至内管完全进入，“班车”划出，套装完成。



图2 内外套管安装



图3 埋地管道安装到位

套管完成后，焊接弯头，斜管，现场预制埋地管底段，焊缝采用 RT100% 检测，完成后对埋地段斜管、弯头进行绝缘防腐，依然采用 3PE 热缩套管，同时按设计图纸完成牺牲阳极保护的接头熔接，补扣。最后完成管道敷设管沟工作，在管沟内，完成排气管的连接，防腐，检测，阴极保护电池包的敷设，保护装置的调试。埋地前的报检等工作<sup>[3]</sup>。

## 5 结语

此项工作的重难点就是在未知的工况环境中，逐步摸索，逐步排查，完全根据经验和实际情况判断工作的每一步可靠性，需要严苛的紧密的全面的组织策划，尤其是在没外套管的组装环节，完全根据实际情况设计的辅助工具，不但实用，而且大大提高了安全性，保护性，完全是一线的探究而取得宝贵经验，也为类似项目积累了宝贵经验。厂区内管道安装看似简单，通过此项目的实践，评估了设计及施工方案的可行性，暴露了方案内的理想主义和不完善性，为方案的修改提供了强大的说服力和经验值；也为成本控制尤其是措施费的占比分析中贡献了宝贵的基础数据，为项目管理完善了实操性。

## 参考文献

- [1] SY/T 04142007, 钢质管道聚乙烯胶粘带防腐层技术标准, 2007.
- [2] GB/T 214472018, 钢质管道外腐蚀控制规范, 2018.
- [3] SH/T 35012021, 石油化工有毒、可燃介质钢制管道工程施工及验收规范, 2021.

# On the Optimization Design of Pipeline Installation in Mountain Tunnel Crossings

Nannan Li

Shandong Lake Engineering Design Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

## Abstract

With the continuous development of China's economy and science and technology, large-diameter natural gas long-distance pipelines have achieved rapid progress in welding techniques, construction processes, and mechanization levels. However, the cross-sectional dimensions and pipeline layouts currently used in mountainous tunnels can only meet the basic spatial requirements for manual and semi-automatic welding pipeline installation within tunnels, while being constrained in terms of fully automated welding, material transportation, and emergency evacuation space, resulting in lower work efficiency. This paper comprehensively analyzes the current status of cross-sectional dimensions and pipeline installation layouts in mountainous tunnels. Through analysis, it highlights the necessity for optimized design of pipeline installation layouts in mountainous tunnels and further explores the direction for optimizing the pipeline installation layout of long-distance natural gas pipelines traversing mountainous tunnels.

## Keywords

Long-distance pipeline; Natural gas; Mountain tunnel; Cross-section size optimization; Pipeline installation and layout

## 浅谈山岭隧道穿越管道安装优化设计探究

李楠楠

山东莱克工程设计有限公司, 中国 · 山东 东营 257000

## 摘要

随着我国经济与科学技术的不断发展, 大口径天然气长输管道在焊接技术、施工工艺、机械化程度等方面得到迅速发展, 但目前山岭隧道使用的断面尺寸及管道布置只能基本满足隧道内手工焊及半自动焊管道安装施工的空间需求, 但在全自动焊、材料运输、逃生通道空间等方面受限, 造成工效较低, 本文综合分析了山岭隧道断面尺寸及隧道内管道安装布置的现状, 通过分析, 提出了山岭隧道内管道安装布置优化设计的必要性, 进一步探讨了天然气长输管道穿越山岭隧道内管道安装布置优化设计方向。

## 关键词

长输管道; 天然气; 山岭隧道; 断面尺寸优化; 管道安装布置

## 1 引言

随着国民经济的发展, 我国对能源的需求进一步提高, 西气东输三线豫鄂段等管道工程是我国能源输送的重要基础设施, 在管道工程穿越山岭时往往需要建设隧道。目前, 随着隧道设计施工技术, 尤其是钻爆技术的发展, 钻爆法山岭隧道成为油气管道工程穿越工程的主要选择之一。

为了适应管道安装技术发展带来的机械化施工工艺, 隧道内管道安装布置应满足洞内全自动焊接、材料运输、支墩施工、管道就位以及逃生通道空间需求, 达到施工降效的目标, 需要对天然气长输管道穿越山岭隧道内管道安装布置

进行有效的设计与优化。

## 2 天然气长输管道穿越山岭隧道内管道安装布置现状

本文以西气东输三线工程(简称西三中)豫鄂段山岭隧道内单管安装布置为例, 目前, 22 条山岭隧道主体施工已全部完成, 正在开展山岭隧道内隧道内支墩/支座基础开挖、锚孔钻孔、植筋、管道布管、组对焊接、无损检测、防腐补口、混凝土浇筑/钢支座安装、材料运输、管道就位固定等施工。

探究天然气长输管道穿越山岭隧道内管道安装布置, 首先了解山岭隧道内管道安装的施工流程, 如下图所示:

**【作者简介】**李楠楠(1989—), 男, 中国山东东营人, 本科, 工程师、三级设计师, 从事油气长输管道安装设计研究。

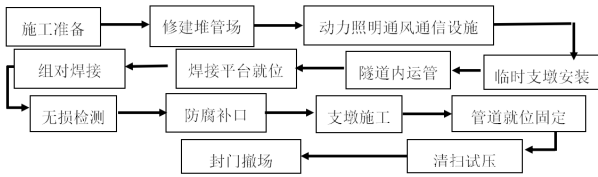


图1 隧道内全自动焊接整体穿管施工流程图

本文主要探究新建单根管道穿越山岭隧道内管道安装布置的优化设计，参照已实施的西气东输延水关黄河隧道穿越，管径 1016mm，根据隧道施工出渣、洞内管道安装机械的高度以及隧道净宽和支护结构承受围岩压力的合理性，确定采用圆弧拱形的断面，并确定隧道断面设计净高度为 3000mm<sup>[1]</sup>。以及近期西三中项目已施工丁河 2 隧道，隧道断面尺寸采用 3.2m×3.2m，管径 D1219，管道壁厚 22mm。

以丁河 2 隧道穿越管道安装为例，隧道内架空敷设一根 D1219 管道，管道结构外缘与左侧隧道内壁直墙水平净距 600mm，管道结构外缘与右侧隧道内壁直墙水平净距 1374mm，管道中心位置偏移隧道中心线 387mm。

隧道内全部采用混凝土支墩架空敷设，每 20m 设置一个混凝土支墩。根据隧道断面尺寸，结合管道全自动焊接及管道吊装设备，隧道内单管全自动焊工艺布置如下图所示：

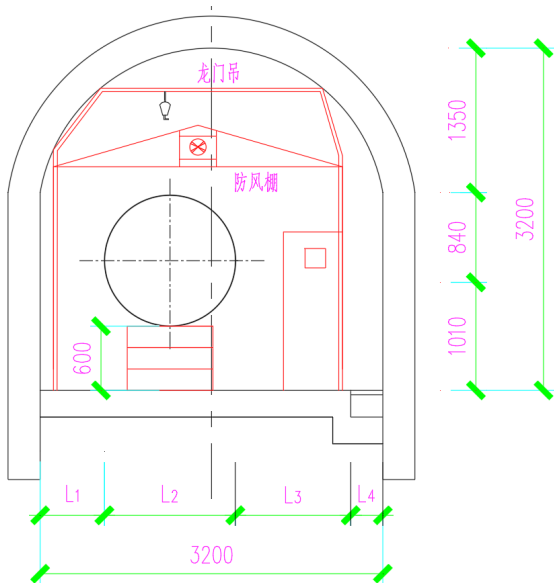


图2 隧道内单管全自动焊工艺布置示意图

图中标注分别代表以下含义：

- L<sub>1</sub>—焊接有效空间（mm）；焊接有效空间（mm）；管道直径 >660mm，取 600mm；
- L<sub>2</sub>—管道外径；取 1219mm；
- L<sub>3</sub>—人行通道宽度（mm），取 1081mm；
- L<sub>4</sub>—排水沟宽度（mm）；取 300mm。

本隧道内单管安装布置形式考虑预留焊接有效空间 600mm，现存在以下施工困难点：

隧道内预留的焊接有效空间不足，造成无法在管道最终就位点处实现全自动焊。

管道无法一次性从隧道外运送至隧道内管道中心位置，需在管道一侧的隧道中心位置焊接完成后将管道平移至图纸中最终管道中心就位点，增加施工水平平移难度和工程量。

因此考虑预留焊接有效空间的多少以及隧道断面尺寸的大小将直接影响隧道内管道安装的施工工效、施工进度、施工工序。

从油气管道工程全周期分析影响隧道断面尺寸的各种工况，包括施工安全、运行维护、隧道施工、管道安装施工等工况进行以下分析。

### 3 安全性合规分析

#### 3.1 相关法律、法规、规范对安全逃生通道的要求

《隧道施工安全九条规定》国家安全监督总局、交通运输部、国务院国资委、国家铁路局文件【安监总管二（2014）104 号】中要求，“必须按照规定设置逃生通道，严禁在安全设施不到位的情况下施工作业。”

《有限空间作业安全指导手册》应急管理部办公厅【应急厅函（2020）299 号】中指出，“异常情况紧急撤离有限空间作业期间发生下列情况之一时，作业人员应立即中断作业，撤离有限空间：

- ①作业人员出现身体不适。
- ②安全防护设备或个体防护用品失效。
- ③气体检测报警仪报警。
- ④监护人员或作业现场负责人下达撤离命令。
- ⑤其他可能危及安全的情况。”

《城市轨道交通技术规范》（GB50490-2009）第 7.2.8 条要求，区间线路的轨道中心道床面或轨道旁，应设有逃生、救援的应急通道，应急通道的最小宽度不应小于 550mm。

《公路水下隧道设计规范》JTC/T 3371-2022 第 13.9.6 条要求，盾构隧道可利用隧道路面以下的空间作为人员安全疏散通道，安全疏散通道及其连接通道的净宽不应小于 1.2m，净空高度不小于 2.1m。安全疏散通道的下滑逃生口、疏散楼梯等设置应满足隧道内人员逃生疏散要求，宽度不应小于 0.8m。

第 13.9.6 条要求，沉管隧道及堰筑隧道宜采用横向逃生，专用纵向逃生通道机逃生口的净宽不应小于 1.2m，净高度不应小于 2.1m。

《城际铁路设计规范》TB 10623-2014 第 8.2.2 条要求，隧道内应设置贯通的救援通道，救援通道宽度不宜小于 1.0m，高度宜为 2.2m，内侧至线路中线距离不应小于 1.8m。

《城市地下道路工程设计规定》（CJJ221-2015）第 8.3.5 条要求，城市地下道路人员安全疏散设计符合下列规定：

- 一、二、三类通行机车的双孔地下道路应设置人行横

通道或人行疏散通道。疏散净宽。

基于上述安全因素的考虑,隧道内预留人员逃生通道空间是十分有必要,根据隧道布置图及现场施工经验,隧道内焊接一般采用流水作业,一个焊接机组一般至少四个流水作业,至少有15名人员同时作业,应急状态下,人员逃生可能需要穿越三个防风棚,为了满足一个全自动焊机组同时逃生的需求,考虑在最低要求的(550mm)的前提下适当加大,防风棚与隧道侧壁的逃生通道宽度推荐采用700mm。

### 3.2 运行维护需求

#### 3.2.1 隧道内管道无损检测(RT+UT+PAUT+TOFD)空间需求

为满足隧道内常规无损检测表面处理及检测需求,经调研,管道距离侧壁至少0.6米,管底距离隧道底板至少0.3米。

#### 3.2.2 隧道内管道及本体检维修及治理空间需求

根据运行单位调研情况,隧道日常维护与检修,考虑到过程物料及设备的倒运,若用到车辆运输,隧道内检修通道空间至少2.0米(倒运小车宽度按照1.4米计算,管道支墩超出管道部分按照0.3米计算,行车安全空间按照0.3米计算,所需空间宽度至少2.0米)。隧道最小宽度 $S=0.6+1.219+2=3.819\text{m}$ 。

### 3.3 管道安装需求

隧道内断面尺寸与管道安装工法有很大关联,因此对管道安装的运管、布管、组对、焊接、检测、返修、割口、支座制作、管道就位各工序的空间需求进行了调研,按照安全、高效、经济的原则,对隧道合理断面尺寸进行分析。

#### 3.3.1 运管、布管

采用运管车+装载机将管道运送至隧道内,布管小车到达隧道内指定位置,采用龙门吊提起钢管并完全悬空,将布管小车从管道底部退出,设置枕木,然后缓慢放下钢管,使管道放置在枕木上。

#### 3.3.2 组对、焊接

管道组对:采用龙门架进行管道组对,通过控制电动葫芦来调节管道高度,设备为2台龙门架。根据管道安装设备调研情况,隧道内管道吊装装备并没有统一的标准尺寸,均为根据项目情况定制,西三中项目江汉油建采用的龙门吊尺寸为 $3500\times 2700\times 3000\text{mm}$ (长×宽×高),胜利油建采用的龙门吊尺寸为 $2936\times 2314\times 2900\text{mm}$ (长×宽×高)。考虑管道吊装高度 $\geq 1500\text{mm}$ 、人员操作水平空间 $\geq 500\text{mm}$ ,对隧道空间的需求主要取决于管道吊装设备尺寸、人员操作空间,并考虑施工过程中的通风需要。

隧道内管道焊接可采用如下两种方法:内焊机+双焊炬自动焊工艺、氩弧焊/STT/RMD+单焊炬组合自动焊。不同焊接方式对空间需求如下。

本工程主要采用内焊机+双焊炬自动焊工艺:

双焊炬自动焊设备较多,其中影响空间的主要是送丝

机和机头尺寸及人员操作空间要求。

双焊炬机头+伸出送丝软管高度:约600mm;

安装焊丝开合距离:约700mm;

人员操作设备空间: $\geq 800\text{mm}$ ;

防风棚最小宽度 $=800\text{mm}+D+800\text{mm}=2819\text{mm}$ ,目前西三中防风棚最小宽度为2800mm,考虑防风棚与隧道壁之间100mm的安装空间,管道距离隧道壁900mm。

基于对上述施工安全性、运行维护、隧道施工及管道安装施工等3个方面分析,结合目前管道焊接及管道吊装设备水平,对隧道断面尺寸和安装布置形式的优化设计十分必要。

## 4 天然气长输管道穿越山岭隧道内管道安装布置的优化设计

随着大管径管道自动焊接技术的广泛应用,其在隧道内的空间需求适宜性、安全性方面需通过全过程施工实践加以检验,针对D1219mm管道隧道内全自动焊接工艺,西三中开展了涵盖隧道施工、工装升级与改造、运输布管、组装、混凝土支墩浇筑及钢支座安装、自动焊模拟工棚、自动焊洞内焊接等全套工序的实践验证工作。

针对实践验证过程中所暴露出的问题进行总结和论证,并提出断面调整和安装布置优化的建议。通过优化断面尺寸和管道安装布置,可以降低施工风险,提高工程质量,更好地满足隧道建设发展的需求。

### 4.1 隧道内管道安装布置优化

根据上述隧道内单管安装布置形式的现状及存在的施工问题,优化隧道内单管安装布置的安装空间,由于洞口自然高差,导致洞内形成的自然风速较大<sup>[2]</sup>,应先确定自动焊机防风棚的最小使用宽度,防风棚规格主要考虑因素为单侧最小作业空间、管材直径、单侧棚内设备设施等,根据西三中施工现场反馈,自动焊机防风棚最小使用宽度为2700mm,D1219管道距离两侧防风棚结构外缘最小为737mm,防风棚结构外缘一侧距离隧道左侧直墙考虑预留163mm富裕空间,以满足后续运料小车进出空间。龙门吊采用与防风棚一致的尺寸,为2700mm。因此确定优化后的隧道内管道焊接有效空间为900mm。

本隧道内单管安装布置形式为管道一侧与隧道内壁直墙水平净距900mm(管道焊接有效空间),管道另一侧人行通道宽度774mm,排水沟宽度300mm。

优化隧道内单管安装布置的安装空间,应先确定自动焊机防风棚的最小使用宽度,防风棚规格主要考虑因素为单侧最小作业空间、管材直径、单侧棚内设备设施等,本文考虑最小自动焊防风棚2700mm,防风棚结构外缘距离左侧隧道直墙163mm,距离右侧隧道直墙337mm,龙门吊宽度与防风棚保持一致。

优化后的隧道内单管安装布置形式优点:

(1)管道进隧道后,可一次性就位,无需进行管道平移,减少施工工程量,缩短施工周期。

(2)焊接有效空间充裕,可在隧道内实现全自动焊。

优化后的隧道内单管安装布置形式缺点:

受断面尺寸限制,洞内全自动焊时,右侧逃生通道仅有337mm的通过空间,施工人员只能侧身通过,影响突发事件的应急撤离。

根据上述优化后隧道内管道安装布置设计,结合以下隧道内采用的支墩形式。

如隧道内整体采用混凝土支墩架空敷设,则优化后管道两侧空间相对较小,洞内运输混凝土材料相对困难,需同时考虑材料运输和逃生通道空间需求。

如隧道内整体采用钢支座架空敷设,洞内运输钢支座空间相对合理,但安装较为复杂,仅需考虑逃生通道空间需求。

根据西三中山岭隧道及隧道内管道安装施工现场踏勘情况,目前管道结构外缘距离隧道左侧直墙间距900mm,距离隧道右侧直墙间距1077.5mm,管径1219,管道通过叉车+运管小车运送至洞内焊接点后,每隔10m设置临时枕木,采用龙门吊将管道抬高至全自动焊焊接高度,两侧通过水平支撑控制管道横向位移,此时进行管道组对焊接,经测算,受隧道断面尺寸的限制,管道两侧焊接设备及龙门吊距离隧道一侧仅有163mm,距离隧道另一侧仅有337mm,属应急通道一侧,人员仅能侧身通过,极大地影响施工过程中的应急逃生空间。

目前现场混凝土的运输采用电动小车,多辆电动小车从管道一侧进入,到达指定位置后,受隧道断面尺寸的限制,只能采用链条将容积为0.3m<sup>3</sup>的漏斗现浇入混凝土基础中,后经漏斗倒运至管道另一侧出隧道,这样周而复始,完

成一系列的混凝土外运。因此将隧道断面尺寸进行优化,通过对两种隧道断面尺寸建立数值计算模型<sup>[3]</sup>,经数值模拟分析比较,比较加宽断面前后带仰拱的断面形式的计算结果可知,虽然加宽断面处开挖宽度增加,但由于耦角及仰拱的半径增加,使得隧道开挖后最大主应力增加很少,若采取合理的隧道内单管安装布置尺寸形式,将可有效地减少岩爆发生的烈度。因此适当加宽优化后隧道内单管安装布置尺寸,调整隧道断面净尺寸宽度,将会极大改善施工过程中材料运输的工效,降低人员应急通道撤离的风险。

基于上述材料运输、逃生通道空间的需求,在优化后的隧道内管道安装布置基础上,再在管道两侧各考虑0.2m,满足管道运管、组对、焊接、排水、维护、施工、逃生通道等空间要求,同时综合考虑施工机械、运输、通风等因素,确定对于管道D1219,优化后的隧道内单管安装布置尺寸为宽3.5m×3.5m。

#### 4.2 隧道内施工机具的优化

目前西三中山岭隧道内单管安装布置尺寸为3.2m×3.2m,优化后山岭隧道内单管安装布置尺寸为3.6m×3.6m,需要对运管小车、龙门吊、焊机棚、电动运料小车、钢支座基础运输小车及安装等工装设备进行改造,使之适用本优化后的山岭隧道内单管安装布置尺寸,将在材料运输、管道焊接、管道就位等方面提高施工效率,缩短山岭隧道穿越管道安装的施工周期。

### 5 结语

经过探究单管隧道内管道安装布置优化设计,并结合隧道内全自动焊施工,材料运输,支墩/支座施工,管道就位,逃生通道空间需求,确定不同管径下隧道内单管安装布置尺寸,详见下表:

表1 不同管径下隧道内单管安装布置尺寸

序号	管径 (mm)	隧道内焊接方式	管道焊接有效空间 (mm)	洞内支墩形式	隧道内单管安装布置尺寸(宽x高)(m)
1	508	全自动焊	500~900	混凝土支墩/钢支座	2.7×2.7
2	559	全自动焊	≥900	混凝土支墩/钢支座	3.0×3.0
3	610	全自动焊	≥900	混凝土支墩/钢支座	3.0×3.0
4	660	全自动焊	≥900	混凝土支墩/钢支座	3.0×3.0
5	711	全自动焊	≥900	混凝土支墩/钢支座	3.0×3.0
6	813	全自动焊	≥900	混凝土支墩/钢支座	3.0×3.0
7	1016	全自动焊	≥900	混凝土支墩/钢支座	3.3×3.3
8	1219	全自动焊	≥900	混凝土支墩/钢支座	3.5×3.5
9	1412	全自动焊	≥900	混凝土支墩/钢支座	3.7×3.7

通过对天然气长输管道隧道内单管安装布置优化设计,使之最大限度的提高现场施工工效,满足项目施工进度需要,以期达到最优的隧道内单管安装布置设计。

#### 参考文献

[1] 周晓军, 吴克信, 西气东输延水关黄河隧道的设计与施工

[J], 地下空间, 2004,24(1); 59-65

[2] 王晓峰, 葛华, 苟鸣宇, 康凯, 适应山区管道全自动焊的隧道设计探讨[J].石化技术, 2023, (8);189-191

[3] 镇亦明,何建新,李建春,等.某隧道断面优化分析[J].铁道建筑, 2008,(5):60-62.

# Design and Practice of Water Environment Landscape in Wetland Park

Wenyu Cheng

Tianjin Urban Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Tianjin, 300190, China

## Abstract

The landscape design of wetland park waterside environments serves as a vital platform for integrating ecological conservation with humanistic needs. Its core objective is to create safe, comfortable, and culturally significant waterside spaces while preserving wetland ecosystem integrity. Grounded in fundamental theories of waterside landscape design, this study clarifies the core principles of waterside environments and their ecological-humanistic interactions. It outlines design objectives, core strategies, and key elements, while detailing technical frameworks for water purification and safety protection along with implementation safeguards. A dual evaluation system for ecological and user satisfaction is established, with proposed dynamic optimization directions. This framework provides theoretical support and practical guidance for the scientific design, standardized implementation, and long-term maintenance of wetland park waterside landscapes, facilitating the synergistic development of wetland ecological value and humanistic experiences.

## Keywords

Wetland park; Aquatic environment; Landscape design; Ecological restoration; Human-ecological integration

# 湿地公园的亲水环境景观设计与实践

程文宇

天津市城市规划设计研究总院有限公司, 中国 · 天津 300190

## 摘要

湿地公园亲水环境景观设计是生态保护与人文需求融合的重要载体, 核心是在维系湿地生态系统完整性的基础上, 构建安全、舒适、具文化性的亲水空间。本文立足亲水景观设计基础理论, 明确亲水环境核心内涵与生态-人文交互关系, 阐述设计目标、核心策略及关键要素, 梳理水质净化、安全防护等技术体系与实施保障, 建立生态与使用满意度双重评估体系, 提出动态优化方向, 为湿地公园亲水环境景观的科学设计、规范实施与长效运维提供理论支撑与实践指引, 实现湿地生态价值与人文体验的协同发展。

## 关键词

湿地公园; 亲水环境; 景观设计; 生态修复; 人文融合

## 1 引言

生态文明建设持续推进, 居民休闲需求不断升级, 在此情形下, 湿地公园兼具生态保护和公共服务功能, 其亲水环境景观设计愈加受关注。湿地属于自然生态系统的关键形成单元, 具备涵养水源、调节气候之类的生态作用。亲水环境是人与湿地自然关联的桥梁。当下, 有些湿地公园的亲水环境设计存在生态优先偏颇、人文体验短缺、文化融合缺少等情况, 既影响湿地生态的韧性, 又难以满足居民亲近水的需求。基于此, 本文系统探讨湿地公园亲水环境景观设计的理论、策略、要素与保障, 为相关设计实践提供思路, 推动湿地生态保护与人文体验的协同发展。

【作者简介】程文宇(1992—), 女, 中国天津人, 硕士, 工程师, 从事风景园林规划与设计研究。

## 2 亲水环境景观设计基础理论

### 2.1 亲水环境的核心概念界定

亲水环境是以水体为核心载体, 融合自然生态和人文创造而成的空间环境。该环境可满足人们亲近自然、感知水体、休闲放松等需求, 而且不会破坏生态系统的完整性。其核心内涵包含生态性和人文性两大属性, 不同于单纯的水体景观, 更重视人与水体之间的良好互动以及人与自然的和谐共处。亲水环境不是一片杂乱的亲水活动场所, 而是依照自然规律, 通过科学设计, 达成水体景观、生态系统和人类活动的有机统一, 既能保存水体的自然本质, 又能给人类带来安全、愉悦的亲水感受, 还能维持生态系统的稳定及其可持续性。这便是自然生态与人文需求的协调统一。

### 2.2 湿地生态与人类活动的交互关系

湿地生态系统同人类活动彼此影响, 相互依靠, 二者

之间存在一种交互关系。湿地给人类活动给予基本支撑，它的蓄水保源、净化水质功能可以保障人类生活生产用水需求，还能给人类供应休闲、科普、文化体验的空间场所。但是，人类活动对湿地生态的影响具有两面性。恰当的亲水活动、科学的保护举措能够促使湿地生态系统良好循环，优化湿地的生态服务功能；如果过度开发、随意亲水等行为就会损害湿地植被、污染水体、破坏湿地生态协调，减小其生态韧性。二者若能良性互动，则是湿地公园亲水环境设计的先决条件，要达成人类亲水需求和湿地生态保护的动态兼顾。

### 2.3 亲水景观设计的基本原则

湿地公园亲水景观设计要遵照三个主要原则，即生态性、人文性和可持续性，其中以生态性为先决条件。设计时应尊重湿地原有的地形特征及其生态法则，着重保留湿地水体、植被、生物栖所这些关键生态单元，不可过度实施人工干预措施，从而保存该区域生态体系的完整性与稳定性。人文适配原则关注契合人们的亲水欲望，营造出既符合人体工程学原理又安全方便的亲水环境，还要综合考虑各类使用者的不同需求，促使人与水体之间达成和谐共处的局面。而可持续原则则倡导在短期内执行相关方案之时也要着眼于长远的守护工作，选用环保材料和技术手段来削减后续养护费用支出，进而做到景观观赏价值、生态效益以及实用性能长时间维持。

## 3 设计目标与核心策略

### 3.1 生态安全与韧性提升目标

湿地公园亲水环境设计的重点在于加强生态安全并改善其韧性，关键之处在于保障湿地生态系统能稳定运行且具备自身调节功能。设计时要防止出现水体污染、植被被毁、水土流失之类的生态问题，通过科学规划水体和岸边设施，维持水体自然流动，从而加强湿地蓄积水源、净化水质的能力。而且还要形成起抗干扰的生态系统，改良植物布局以及生物栖息地状况，使得湿地在应对气候变化和人类干预方面更具韧性，免除亲水活动给生态系统带来无法挽回的影响，达成亲水空间与湿地生态系统共同繁荣的目标，进而稳固湿地生态安全防线。

### 3.2 多层次亲水体验构建策略

要塑造多层次的亲水体验，就要按照不同人群的亲水需求来创建各种各样的亲水空间，达成视觉、触觉、听觉等多感官的亲水感受。从策略上看，要分清静止的亲水空间和动态的亲水空间。静止空间重点在于休息观赏景色，满足居民放松、观赏景色的需求；而动态空间重点在于互动体验，给予方便又安全的亲水活动场所。还要顾及到老人、小孩、病人以及残疾人这些特别人群的使用需求，完善无障碍设施，使得所有人群都能够平等地享受到亲水的乐趣，打破单一的亲水形式，形成起层次繁杂、适合多种需求的亲水体验系统，从而改善亲水环境的实用价值和舒适程度。

### 3.3 地域文化景观融合策略

湿地公园景观设计的地域特色营造离不开地域历史文化的参与，在设计中应当充分解读当地的历史文化，提取文化的精髓运用到景观设计中。缺乏历史文化的湿地公园景观就如同缺少灵魂的肉体，历史文化就是设计的灵魂，在湿地公园景观设计中延续这个“灵魂”，让历史文化在景观中发挥它的独特魅力。设计的时候不能总是采用同一种景观模式，而是要把当地自然风光和文化标志结合起来，在驳岸、步道、植物布局这些小地方加入地域元素，做到自然景观和人文文化的有机统一。经过文化融合之后，亲水环境除了具备休闲、生态的功能之外，还承载着地域文化记忆，从而改善景观的文化品质及其独特性，增进居民的文化归属感和认同感。

## 4 关键要素与空间设计

### 4.1 水体形态与驳岸生态化设计

水体形态和驳岸设计属于亲水环境景观的关键要素，要依照自然化、生态化的设计思路来执行。水体形态设计应保存湿地原本的水体布局，不要过分实施人工整修，模仿自然水体的迂回弯曲，维持水体同周围自然环境的有机统一，加强水体的生态意义和观赏价值。驳岸设计远离传统的硬质驳岸，采取生态化的驳岸样式，协调好生态保护和亲水的愿望，既能缩减水土流失、捍卫水体生态，又能给人类给予接近水体的地方，达成水体、驳岸以及周边植物的自然过渡，创建出自然、协调的亲水景观环境。

### 4.2 亲水步道与活动平台设计

亲水步道和活动平台是达成人类亲水体验的关键所在，其设计要兼顾安全、便捷与舒适。亲水步道的设计应依循水体形状而呈蜿蜒走向，并与水体维持恰当的距离，而且要用防滑且生态友好型的材料来铺设，以确保行人的安全，还要最大程度地展示水体风光，让人在行走之时领略自然的魅力。活动平台的设计应当按照实际情况来进行，并结合水体景观节点的分布状况，控制好平台的大小，防止过度开发，既要满足休闲、观景以及互动的需求，也要完善休憩设施，给居民提供驻足停留、休息以及亲近水面的地方，从而做到人与水体之间的亲密互动。

### 4.3 植物配置与生境营造

植物配置属于亲水环境景观设计的关键构成局部，重点在于统筹好生态功能与景观效果，并营造恰当的生物生境。挑选植物时主要着眼于本地的水生、湿生植物，优先选取具备净化水质、涵养水源能力的植物种类，防止出现外来物种入侵情况，从而保留湿地生态系统的稳定局面。在安排植物时重视层次上的协调统一，依照水体深浅程度、岸边高矮起伏等因素，合理安排乔木、灌木以及草本植物，塑造出高低错落、富有层次感的植物景观。这样既能优化亲水环境的观赏价值，又能够给湿地生物供应栖居及觅食之所，增添

生物的多元性,达成生态保护和景观创造。

## 5 技术体系与实施保障

### 5.1 水质净化与生态修复技术

水质净化与生态修正技术是保障亲水环境生态安全的关键所在,要采取生态化、低成本且易于管理的技术方法。水质净化技术主要依靠生物净化,辅以物理和化学净化方法,通过植物净化、微生物净化等方式来清除水体内的污染物,从而优化水质并维持水体生态协调稳定。生态修正技术着重对湿地植被、土壤以及生物栖息地实施修复,借助补种当地物种、改良土壤状况、创建适合生物生存的环境等举措,重建湿地生态系统自身的调节功能,优化湿地自然景观,给亲水环境构筑稳固的生态根基。

### 5.2 安全防护与无障碍设计

安全防护和无障碍设计是亲水环境景观得以执行的关键所在,重点在于保障各类人群使用的安全与便利。安全防护设计要全方位覆盖亲水空间,在临水区域设立防护设施,采用隐形又生态的防护形式,不能破坏景观的美观性,并且清楚地设置警示标识,提醒行人留意安全,防止溺水之类的安全风险。无障碍设计要综合考虑老弱病残等特别人群的使用需求,完备无障碍步道、坡道、休憩设施等等,清除使用上的阻碍,使得特别人群可以安全又方便地感受亲水的乐趣,这体现出设计的人文关怀。

### 5.3 可持续维护与管理体制

可持续管理与守护体系对于亲水环境景观功能的持久发挥十分关键,要形成起科学而完备的管理机制。其守护管理的重点包含水体守护、植被保养、设施检查等诸多方面,应当定时执行水质检测、清理水体,并及时修剪植被、更换枯萎的植物,检查步道、平台以及防护设施等,以保证景观设施处于良好状态。还要创建起专门人员负责的机制,明晰各项职责,制订出科学合理的管理计划,运用成本较低且易于操作的管理方法,削减后期维护的开支,从而达成亲水环境景观长久稳定的运行目标。

## 6 效果评估与优化方向

### 6.1 生态效益评估指标

生态效益评定是衡量亲水环境景观生态价值的关键所在,要形成起科学而全面的评定指标体系。评定指标着重围绕湿地生态系统稳定性、水质优劣、生物丰富性这些主要方面来设置,其中包含水体净化能力、植被覆盖比例、生物栖息地品质等具体指标,从而全方位考量亲水环境设计对于湿地生态系统保护和改善所起到的作用。评定流程应当依照客观、科学的准则,通过系统性的观测与剖析,来判定生态目的达成的状况,找出生态保护中存在的不足之处,进而给后

续的设计优化提供支撑。

### 6.2 使用后评价与满意度评估

使用后评价与满意度考量重点在于亲水环境的人文体验及其使用功能,关键在于掌握居民对于亲水空间的使用感受及需求。该考量通过恰当的调查方法来收集居民针对亲水步道、活动平台、景观效果、安全防护等方面的意见反馈,以此剖析居民的使用行为特点与存在的痛点难点,进而评判亲水空间在实用价值、舒适感受以及便利程度上的表现情况。借助满意度评价结果去判定人文关怀目标是否达成,找出设计规划当中尚需完善之处,从而给予改进亲水环境、改善使用者感受所需的具体参考方向。

### 6.3 动态监测与适应性优化

动态检测和适应性改良对于达成亲水环境景观的长效发展十分关键,要有常态化检测和改良的机制。动态检测主要集中在两个方面,一是自然环境,二是使用状况。要定时监测水质、植被、生物丰富性等自然指标,也要跟进居民的使用情况及其满意程度的变化,这样就能随时知道景观的运行情况以及存在的不足。适应性改良要依照动态检测得到的结果,找出生态保护和感受中的薄弱之处,然后调整设计图纸和管理方案,改善景观各个要素及其空间分布,从而让亲水环境景观不断得到完善,更好地应对自然环境的改变和居民需求的提升。

## 7 结语

湿地公园亲水环境景观设计的重点在于守住湿地生态的本质,达成生态保护和人文亲水需求的相互融合并共同发展。文章先论述基本理论,接着详细叙述设计目的、主要策略、重要部分、技术支撑以及考量改善的方向,由此确定生态优先、人文契合、可持续发展的核心理念,形成起完善的设计与操作系统。在设计的时候要同时考虑生态安全和亲水感受,融入地方文化,依靠科技手段和长期有效的管理来捍卫湿地的生态价值,营造良好的亲水场所。未来还要结合实际情况持续充实理论与应用,促使亲水环境景观设计朝着越发生态、更具人文关怀的方向稳步发展。

### 参考文献

- [1] 吴祎,方明.韧性理念下城市湿地公园景观设计研究——以长沙洋湖国家湿地公园为例[J].中外建筑,2025,(11):6-10.
- [2] 刘桂芳,涂邵华.基于乡土景观元素的湿地公园规划设计技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(32):226-228.
- [3] 王晨.湿地公园文化生态滨水景观设计[J].花木盆景,2025,(14):4-5.
- [4] 王文静.碳中和视角下乡村湿地景观设计研究[D].河南工业大学,2024.
- [5] 涂青坡.生态修复视角下湿地公园景观设计研究[J].浙江工艺美术,2024,(02):31-33.

# Technical Difficulties and Solutions in High-rise Building Construction Technology

Yuejuan Guo

Hebei Luhang Urban and Rural Development Group Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

## Abstract

With the acceleration of urbanization, high-rise buildings are springing up like mushrooms after rain. This article focuses on high-rise building construction and deeply analyzes the technical difficulties encountered in key links such as foundation engineering, vertical transportation, concrete construction, steel structure installation, and waterproofing. Combined with actual engineering cases, it elaborates on targeted solutions covering the application of new construction techniques, the selection of intelligent equipment, and refined construction management, aiming to provide practical technical references for high-rise building construction practitioners, improve construction quality and efficiency, and promote the stable development of the high-rise building industry.

## Keywords

High-rise Building; Construction Technology; Difficulties; Solutions; Quality Engineering

## 高层建筑工程施工技术难点与解决方案

郭月娟

河北路航城乡发展集团有限公司, 中国·河北 邢台 054000

## 摘要

随着城市化进程加速, 高层建筑如雨后春笋般涌现。本文聚焦高层建筑工程施工, 深入剖析其在基础工程、垂直运输、混凝土施工、钢结构安装以及防水工程等关键环节所面临的技术难点, 结合实际工程案例, 详细阐述针对性的解决方案, 涵盖新型施工工艺应用、智能化设备选型、精细化施工管理等方面, 旨在为高层建筑施工从业者提供切实可行的技术参考, 提高施工质量与效率, 推动高层建筑行业稳健发展。

## 关键词

高层建筑; 施工技术; 难点; 解决方案; 工程质量

## 1 引言

在当今城市发展中, 土地资源愈发稀缺, 高层建筑成为满足居住、商业等需求的主要建筑形式。然而, 相较于普通建筑, 高层建筑施工面临诸多挑战, 从地下深处的基础施工到高空作业的各个环节, 任何一个技术细节把控不当都可能引发质量问题、延误工期甚至危及安全。深入研究其施工技术难点并探索有效解决方案具有重要现实意义。

## 2 高层建筑基础工程施工难点与解决方案

### 2.1 深基坑支护难点

在现代高层建筑的施工过程中, 基础埋深通常较大, 这就导致了在进行深基坑开挖时, 周边土体的稳定性控制难度显著增加。特别是在软土地层中, 基坑的坍塌和变形问题尤为突出。以某沿海城市的高层住宅项目为例, 由于地下水

位较高、土质松软, 传统的土钉墙支护技术难以满足施工要求, 从而给工程带来了不小的挑战。

为了解决这一难题, 可以采用地下连续墙结合内支撑的支护形式。地下连续墙不仅能够作为挡土和止水的结构, 而且具有很强的整体性和良好的防渗性能; 内支撑则可以采用钢筋混凝土或钢结构, 根据基坑的具体形状和开挖深度进行合理布置, 从而有效控制基坑的变形, 确保周边建筑物及地下管线的安全。在施工过程中, 通过监测系统实时反馈墙体位移、支撑轴力等关键数据, 施工团队可以及时调整施工参数, 以应对可能出现的问题。

### 2.2 大体积混凝土基础浇筑难点

在建筑施工中, 基础筏板等部位常常需要浇筑大体积混凝土。在混凝土的水化过程中, 会产生大量的水化热, 如果不能及时有效地进行散热, 混凝土内部的温度会急剧升高, 与外部环境形成较大的温差, 这将大大增加混凝土开裂的风险。例如, 在中部地区某超高层写字楼的基础施工过程中, 单次浇筑的混凝土量就达到了数千立方米。

【作者简介】郭月娟(1993—), 女, 中国河北邢台人, 本科, 助理工程师, 从事建筑工程研究。

为了应对这一挑战,可以采取优化混凝土配合比的方法,选用低热水泥,并掺加适量的粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料,以减少水泥用量,从而降低水化热的产生。此外,在混凝土内部布置冷却水管,通过水循环的方式带走多余的热量,控制混凝土内部的温度。同时,加强混凝土浇筑后的养护工作,采用覆盖保温保湿材料,延长养护时间,以减小因温差引起的裂缝风险。

### 3 高层建筑垂直运输难点与解决方案

#### 3.1 塔吊选型与布置难点

在现代高层建筑施工过程中,塔吊扮演着至关重要的角色,它作为主要的垂直运输设备,其选型必须综合考虑多个因素。这包括吊运能力、吊运半径与建筑高度、结构形式等关键参数。在实际操作中,塔吊的布置尤其在狭窄的施工场地或群塔作业的环境中,会面临相互干扰和碰撞的风险,这无疑增加了施工的复杂性和安全风险。以某城市综合体项目为例,该项目涉及多栋高层建筑的同时施工,而场地空间相对局促,这就对塔吊的选型与布置提出了更高的要求。

为解决这一难点,施工前期可以利用 BIM (建筑信息模型) 技术进行塔吊模拟布置。通过这一技术,可以综合考虑建筑物的平面布局、周边环境、施工进度等多种因素,从而确定最合适的塔吊型号、位置与安装高度。此外,通过优化起重臂的长度与角度,可以确保塔吊的覆盖范围能够满足施工需求,同时保证塔吊之间有足够安全的距离。为了进一步降低风险,制定群塔作业的专项方案是必要的,这包括明确各塔吊的运行顺序、指挥信号,并安装防碰撞系统。通过实时监测塔吊的运行状态,可以及时预警碰撞风险,从而保障施工安全。

#### 3.2 施工电梯运输效率难点

施工电梯在建筑施工中承担着人员与材料垂直运输的重要任务。随着建筑高度的不断增加,单次运输所需的时间也随之增长,运输频次受限,这导致施工人员在等待电梯时耗费大量时间,材料供应也难以及时到位。特别是在高层住宅施工的后期,当装修材料的运输量大幅增加时,这一问题尤为突出,严重影响了施工效率。

为提高施工电梯的运输效率,可以采取以下措施:首先,选用高速变频施工电梯,以提高运行速度,缩短单次运输时间。其次,合理规划电梯的停靠楼层,采用分区运输模式,减少不必要的停靠,从而提升运输效率。此外,设置材料周转平台,提前在平台上对材料进行分类整理,可以加快装卸速度。同时,结合施工进度,灵活调整电梯运输时段,优先保障关键工序材料的运输,这样可以进一步提高整体的运输效率,确保施工进度不受影响。

### 4 高层建筑混凝土施工难点与解决方案

#### 4.1 高空混凝土泵送难点

在现代高层建筑施工过程中,混凝土的泵送工作面临

诸多挑战。特别是当需要将混凝土泵送至百米甚至更高的高度时,随着泵送高度的不断增加,混凝土在管道中所承受的压力也随之增大。这种情况下,混凝土容易出现堵管、离析等问题,这些问题会严重影响施工效率和混凝土的质量。例如,在某超高层地标建筑的施工过程中,泵送高度甚至超过了 300 米,这无疑对混凝土泵送技术提出了更高的要求。

为了解决这些高空混凝土泵送的难点,施工团队需要采取一系列有效的措施。首先,选用大功率、高压力的混凝土泵是基础,这样的设备能够提供足够的动力来克服高压带来的挑战。其次,配备耐磨高压输送管也是必要的,因为这可以减少因压力过大而导致的管道磨损和破裂的风险。此外,优化混凝土的配合比,提高混凝土的可泵性,适当增加外加剂如泵送剂、引气剂,可以有效降低混凝土的粘度,确保在高压环境下混凝土能够顺利泵送。在泵送过程中,设置接力泵,分段接力输送,可以减轻单泵的压力,同时安排专人在各泵送节点进行监控,及时发现并处理可能出现的堵管隐患,从而确保整个泵送过程的顺利进行。

#### 4.2 混凝土外观质量控制难点

在高层建筑施工中,混凝土的外观质量控制同样是一个难点。由于高空作业时风力较大,以及模板周转次数多等因素,混凝土在凝固过程中容易出现蜂窝、麻面、气泡等外观缺陷。特别是在高层框架-剪力墙结构的施工中,墙体混凝土的外观质量较难保证,这不仅影响建筑的美观,也可能对结构的稳定性和耐久性造成影响。

为了有效控制混凝土的外观质量,施工团队可以采取以下措施。首先,采用新型模板体系,如铝合金模板、塑料模板,这些模板表面光洁、拼接紧密,能够显著减少漏浆现象。在模板安装前,需要严格清理模板表面,并均匀涂刷脱模剂,以保证混凝土与模板之间不会发生粘连。在振捣混凝土时,遵循快插慢拔的原则,并采用分层振捣的方式,可以确保混凝土的密实度,同时避免因过度振捣而产生裂缝。此外,在混凝土终凝前,对表面进行二次抹压,可以有效消除早期裂缝,提升混凝土外观的平整度,从而确保混凝土的外观质量达到预期的标准。

### 5 高层建筑钢结构施工难点与解决方案

#### 5.1 钢结构构件吊装难点

在现代高层建筑施工中,钢结构构件的吊装是一个技术含量高且具有挑战性的环节。由于钢结构高层建筑的构件往往重量大、体型庞大,这使得吊装过程中的精度要求非常高。在高空作业时,风荷载的影响会显著增加,这不仅增加了构件就位的难度,而且对吊装设备和操作人员的技术水平提出了更高的要求。例如,在某高层钢结构商业大厦的施工过程中,主桁架的重量就达到了数十吨,而其安装的高度更是超过了 200 米,这样的工程难度可想而知。

为了解决这些吊装难点,施工团队通常会选用大吨位

的履带吊或塔吊来承担吊装任务。在吊装作业开始之前，会利用全站仪等高精度测量设备进行精确测量和定位，确保构件能够准确无误地放置到预定位置。同时，还会根据构件的重量、吊装的高度以及现场的具体条件来制定详细的吊装方案。在风力较大的时段，为了保证作业的安全性和构件的精准就位，会停止吊装作业或采取相应的防风措施，比如设置缆风绳来稳定构件在空中的姿态，确保其误差能够在毫米级的范围内。

## 5.2 钢结构焊接质量难点

钢结构焊接是确保建筑结构安全的关键环节之一，尤其是在高空进行焊接作业时，环境的复杂性会显著增加焊接接头出现气孔、裂纹等缺陷的风险。这些缺陷不仅会影响钢结构的整体受力性能，而且在寒冷地区冬季施工时，低温环境还会进一步加大焊接难度。此外，焊接过程中产生的热量会导致构件发生变形，这种变形如果控制不当，同样会对结构的稳定性和安全性造成影响。

为了克服这些焊接难点，施工团队会采取一系列措施。首先，选派经验丰富且资质合格的焊工来执行焊接任务，严格执行焊接工艺评定，确保焊接质量。其次，在焊接区域设置防风、防雨、保温棚等设施，以改善焊接环境，减少外界因素对焊接质量的影响。同时，采用合适的焊接方法和焊接材料，例如气体保护焊，严格控制焊接电流、电压、焊接速度等参数，以提高焊接质量。焊接完成后，及时进行外观检查和无损检测，对发现的不合格焊缝进行返工处理。对于焊接变形，采用火焰矫正、机械矫正等方法进行有效控制，以确保钢结构的整体性能和安全性。

## 6 高层建筑防水工程施工难点与解决方案

### 6.1 屋面防水难点

在现代高层建筑中，屋面防水是一个不容忽视的问题。由于屋面面积较大，它不可避免地会受到风吹日晒以及温度变化的强烈影响，这些因素都会加速防水层的老化过程，导致防水层出现开裂现象，进而引发渗漏问题。特别是在南方多雨的地区，高层住宅的屋面会频繁遭遇暴雨的考验，这对防水层的性能提出了更高的要求。

为了解决这一问题，建议选用耐候性优秀、拉伸强度高的防水卷材，例如SBS改性沥青防水卷材。在施工过程中，必须确保基层的平整度和干燥度，以保证卷材能够牢固地铺贴在屋面上。采用满粘法进行施工，并确保卷材之间的搭接宽度符合相关规范要求。此外，对于屋面防水的细部节点处理要特别注意，例如女儿墙根部、天沟、檐口等部位应增设

附加层，以加强防水效果。为了保证屋面防水系统的长期有效性，还需要定期进行检查和维护，一旦发现破损，应立即进行修补。

### 6.2 外墙防水难点

对于高层建筑而言，外墙防水同样是一个需要特别关注的难题。外墙不仅会受到雨水的冲刷和风压的作用，还可能因为墙体裂缝或穿墙管部位的渗水而出现防水问题。特别是在采用幕墙结构的高层建筑中，幕墙与主体结构连接部位的防水处理尤为复杂，需要特别的防水措施。

针对外墙防水问题，建议在砌筑外墙时使用防水砂浆，并严格控制砌体灰缝的饱满度，以减少裂缝的产生。对于已经出现的墙体裂缝，应及时进行修补，并涂刷防水涂料以增强防水性能。对于穿墙管部位，应设置止水环，并使用密封材料对周边进行嵌填，确保密封效果。在幕墙施工时，应在横竖龙骨交接处、幕墙板块拼接处等关键部位安装橡胶密封条，并采用耐候密封胶进行密封，从而形成多道防水防线，有效防止雨水渗漏。

## 7 结语

在高层建筑工程施工过程中，技术难点广泛存在于各个施工阶段，涵盖了从基础施工至屋面施工，从结构构建到防水处理的全过程。每一个技术难点的突破，均对工程的质量、进度以及安全产生决定性影响。通过运用前沿的施工技术、恰当的设备选择、科学的施工管理方法以及严格的质量控制策略，可以有效地克服这些技术难题。随着建筑技术的持续创新与进步，高层建筑施工的未来发展趋势将指向更高水平的智能化、绿色化以及精细化，致力于为城市化进程贡献更多高品质的标志性建筑。

### 参考文献

- [1] 曹守锋,吴丽娟.高层建筑工程施工技术及其质量控制要点研究[J].中国高新科技,2024,(14):133-135.DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.14.43.
- [2] 段建宇.高层建筑工程施工技术的重点与难点探究[J].建材发展导向,2024,22(14):58-60.DOI:10.16673/j.cnki.jcfzdx.2024.0444.
- [3] 杜永强.浅谈高层建筑工程施工中的桩基础施工技术[J].建材发展导向,2024,22(05):92-94.DOI:10.16673/j.cnki.jcfzdx.2024.0266.
- [4] 邱翔.探究高层建筑工程施工中的桩基础施工技术[J].居业,2023,(11):61-63.
- [5] 定震.高层建筑工程施工中桩基础施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(27):121-123.DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202327041.

# Discussion on the key points of asphalt concrete road construction

Changzhi Dong

Beijing Road & Bridge Ruitong Maintenance Center Co., Ltd., Beijing, 101399, China

## Abstract

Asphalt concrete pavement, renowned for its high ride comfort, maintenance convenience, and recyclability, has become the most widely adopted pavement type for high-grade highways worldwide. As China rapidly advances its modern transportation infrastructure development, asphalt concrete serves as the backbone of the road network, playing a vital role in ensuring seamless passenger and freight transport while driving regional economic growth. This paper focuses on the key technologies and management aspects of asphalt concrete road construction, systematically outlining critical quality control measures throughout the construction process. It particularly analyzes operational standards and control mechanisms for three pivotal technical phases: concrete mixing and transportation, paving operations, and compaction techniques, while addressing construction challenges under special conditions and proposing corresponding solutions.

## Keywords

Asphalt concrete; Road construction; Construction key points

## 探讨沥青混凝土道路施工要点

董长志

北京路桥瑞通养护中心有限公司, 中国·北京 101399

## 摘要

沥青混凝土路面因行车舒适度高、养护维修便捷、可循环利用等优点,成为全球范围内应用最广泛的高等级公路路面形式。在我国快速推进现代化交通基础设施建设的进程中,沥青混凝土作为公路网络的主架构,对保证客货运输畅通、促进区域经济发展有重要意义。本文以沥青混凝土道路施工的关键技术与管理环节为主要研究内容,系统阐述施工全过程中质量控制要点。重点分析混凝土搅拌和运输、摊铺作业与压实工艺三大关键技术阶段的操作规范与控制参与,讨论特殊工况下施工难点与解决方案。

## 关键词

沥青混凝土; 道路建设; 施工要点

## 1 引言

沥青混凝土直接关系着公路工程质量,而沥青混凝土道路的性能并非单纯由材料决定,施工质量也是影响道路长期服役表现的重要环节。根据大量工程实践与研究表示,施工过程中的控制不佳是导致道路出现早期损害的核心诱因,若施工质量控制不佳则会引发混凝土路面出现裂缝、剥落、泛油等一系列病害,这些病害不仅缩短道路的设计使用寿命,导致后期养护和建设成本增加,也显著降低路面平整度和抗滑性能,造成潜在的行车安全风险,威胁人民群众的生命与财产安全。通过对沥青混凝土道路施工要点的系统性梳理,具有重要意义。本研究旨在系统整合和深入分析从材料准备到最终落实的全链条施工关键技术,明确各环节的控制

标准与操作要点,为提高我国沥青混凝土道路的质量、延长使用寿命提供实践指导。

## 2 沥青混凝土道路施工关键技术要点

沥青混凝土道路的性能有赖于材料和施工。因此需要深入分析从混合料生产到路面成型过程中的重要施工环节:搅拌和运输、摊铺与压实,施工技术要点的精准控制是保证路面达到设计密实度、平整度的根本保障。

### 2.1 混合料拌合与运输

该环节是决定混合料出厂质量的第一道关口,目标在于生产出温度适宜、配比精准的合格产品,还要保证混合料在抵达摊铺现场时达到良好的状态。

#### 2.1.1 拌合工艺参数控制

温度控制。作为拌和的核心,要根据沥青标号、集料干湿状况和环境温度,严格设定并且控制沥青加热温度、集料加热温度和混合料出厂温度。温度过低,沥青黏度大,难

【作者简介】董长志(1987—),男,中国北京人,本科,助理工程师,从事道路工程研究。

以均匀裹覆集料，影响压实与强度；温度过高，则会导致沥青老化，加速其性能衰变。见图1。

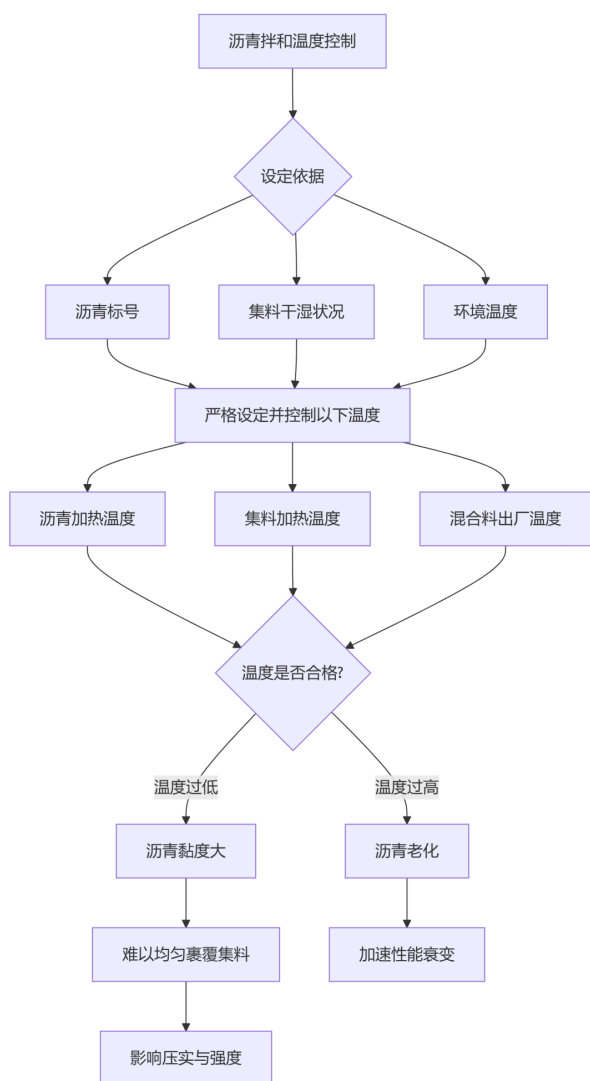


图1 工艺流程图

(2) 时间控制。主要包括干拌时间和湿拌时间，干拌时间是指集料初步混合均匀并且升温；湿拌时间是指加入沥青后的充分拌合时间。时间不足则混合料均匀性不足，容易出现花白料；时间较长则可能导致集料破碎、沥青过度老化。具体时间可通过试拌来确定。

(3) 均匀性控制。保证每个批次的混合料中，各种集料、沥青和矿粉的比例与设计配合比高度一致。依赖于拌合站计量系统的精确标定与稳定运行。

### 2.1.2 运输过程中的温度保持与防离析措施

(1) 温度控制。运输车辆必须准备完整、严密的双层苫布覆盖，减少热量散失。特别在低温、大风或长距离运输条件下，要根据设计情况预估温度损失，可适当提高出厂温度或采取专用的保温运输车。

(2) 防离析措施。装料时需要指挥运输车辆“前、后、中”移动，至少分成3次装载，减少由于重力引发的粗细集

料空间分离。运输过程中要匀速平稳行驶，避免急刹车和剧烈颠簸。卸料的时候，应让混合料整体滑入摊铺机料斗，减少堆料高度落差<sup>[1]</sup>。

## 2.2 摊铺施工

摊铺就是将松散的混合料转化为连续、均匀、平整初始路面的成型过程，施工质量决定了路面的平整度与结构的均匀性。

### 2.2.1 基层处理与透层、粘层施工

首先，摊铺前要对下承层也就是基层或旧路面进行彻底清扫、吹尘，确保表面洁净、干燥。对存在的局部缺陷进行处理。其次，在半刚性基层上喷洒透层油，要求渗透充分，起到固结表面、防水下渗以及加强层间连接的作用。最后，在沥青层或构造物接触面喷洒粘层油，形成均匀薄层，为上下层提供可靠的粘结力，防止层间滑动。喷洒量要精确控制，不得出现流淌。

### 2.2.2 摊铺速度、温度与厚度的实时控制

首先，摊铺速度。应与拌合站的供应能力、压实设备的碾压能力相匹配，保持缓慢、均匀、连续不间断的摊铺。速度波动是产生“波浪”和影响平整度的主要原因。其次，摊铺温度。混合料到达摊铺机时的温度必须满足规范要求，是保证后续压实效果的前提。需通过红外测温枪进行实时监测。最后，摊铺厚度。通过摊铺机熨平板的仰角、振捣频率和前部料位传感器进行综合控制。施工中应使用差尺多点、高频次检查松铺厚度，及时微调，确保压实后的厚度符合设计要求。

### 2.2.3 接缝处理技术

首先，纵向接缝。采用热接缝方式，多台摊铺机呈梯队作业前后错开10~20m，重叠5~10cm，在混合料未冷却时一并碾压，可消除接缝痕迹。其次，横向接缝。作为施工的薄弱环节，必须采取精细处理。采用平接缝，在每日工作结束时，用三米直尺确定切割位置，垂直切割清除端部不平整部分。次日摊铺前，在断面涂刷粘层油，预热熨平板，新料摊铺后先进行横向碾压，再转入纵向正常碾压。

## 2.3 压实工艺

压实是保证沥青混凝土路面最终强度、密实度和稳定性的决定性工序，核心目标是在合适的温度窗口内，以合理的工艺消除混合料中的大部分孔隙。

### 2.3.1 压实设备组合与压实遍数控制

采用“初压、复压、终压”的组合碾压工艺。初压(1~2遍)采用双钢轮压路机静压，发挥稳定效果；复压(4~6遍)是压实的关键，采用重型轮胎压路机或高频振动钢轮压路机，消除大部分孔隙；终压(1~2遍)采用双钢轮压路机静压，消除轮迹，提高平整度<sup>[2]</sup>。

### 2.3.2 压实温度与压实度检测

首先，压实温度。混合料具有压实温度窗口，通常介于135~90℃之间，具体根据沥青类型确定。初压必须是在高温下开始，复压必须在有效温度范围内完成，终压则在混

合料仍有塑性时进行。其次，压实度检测。采用无损检测与有损检测相结合的方式，对压实度进行全过程监控与验收。

### 2.3.3 防止过压与欠压的技术措施

首先，确保压实设备数量、吨位、性能满足要求；合理安排碾压段落长度，使压实工作在温度窗口内完整；加强对边角、接缝等薄弱区域的补充碾压，从而防止欠压。其次，严格控制压实遍数，避免在混合料温度降到过低的时候依然反复碾压；对某些级配较细的混合料，轮胎压路机碾压过度可能导致表面发软或产生细微裂缝，需要通过试验观察确定最终的复压遍数。

## 3 沥青混凝土道路施工难点及解决对策

### 3.1 特殊气候条件下的施工应对

气候条件是影响沥青路面施工质量的最大变量，必须根据实际情况动态调整施工方案。

#### 3.1.1 高温季节施工

施工难点为：环境温度过高，混合料降温缓慢，容易导致压实过程中混合料推移、产生难以消除的轮迹，并且高温下沥青容易老化。应对技术为：（1）时间调整。避开每日最高温时段（上午10点到下午4点），选择在早晚气温较低的时候进行摊铺碾压作业<sup>[3]</sup>。（2）温度控制。适当降低混合料出料温度，避免运输过程中过度覆盖导致温度激增。（3）碾压对策。缩短初压与复压的间隔，紧跟摊铺机作业；压路机可喷洒少量雾状水以防止粘轮，但注意不可过量。

#### 3.1.2 低温与大风季节施工

施工难点为：混合料热量散失较快，有效压实温度窗口急剧缩短，极易导致压实度不足、层间粘结不良，形成早期松散、开裂。应对技术为：（1）温度保障。适当提高沥青加热温度和混合料出料、摊铺、碾压各环节的温度控制标准。（2）保温措施。运输车加强覆盖与保温，必要时采用加厚棉被；摊铺现场应配备强挡风设施，减少风力导致的温度骤降。（3）工艺强化。采用“高温、紧跟、快压”原则，缩短摊铺与碾压作业段长度<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.3 雨季施工

施工难点为：雨水会迅速降低混合料温度，破坏沥青与集料的粘结，导致路面出现水损害。应对技术为：（1）预案与监测。密切关注天气预报，制定相近的雨季施工预案。施工现场配备足够的防雨篷布以及排水设施。（2）作业面管理。确保作业面干燥、洁净。下雨时立即停止摊铺，对已经铺设但未压实的混合料进行清除。（3）复工处理。雨后复工前，必须彻底排除结构层间积水，检查下承层干燥情况。对受潮、轻微被污染的断面，需进行烘干、刨铣或涂刷粘层油处理。

### 3.2 特殊路段施工处理

#### 3.2.1 桥头过渡段施工

施工难点为：路基与桥台间可能出现的差异沉降，容易出现桥头跳车。应对技术为：（1）地基与路基处理。加

强背地基的加固，选用透水性好、易压实的填料分层填筑，并采用重型压实设备对大型压路机无法靠近的区域进行补充强夯。（2）路面结构过渡。在路面层设置采用渐变的沥青层厚度与模量设计，实现刚性桥台与柔性路基之间的平缓过渡<sup>[5]</sup>。

#### 3.2.2 交叉口与公交站台施工

该部分车辆频繁启停、转向，承受较大的水平剪切力和重载冲击。应对技术为：（1）采用抗车辙能力强、高温稳定性好的改性沥青混合料，比如 SMA 或高模量沥青混凝土。（2）加厚与加强。适当加厚结构层厚度，施工时对停车线前后一定范围进行重点碾压。（3）平顺度控制。由于摊铺机作业不连续，需精心处理与各个方向道路的接缝，确保整体平整。见图2。

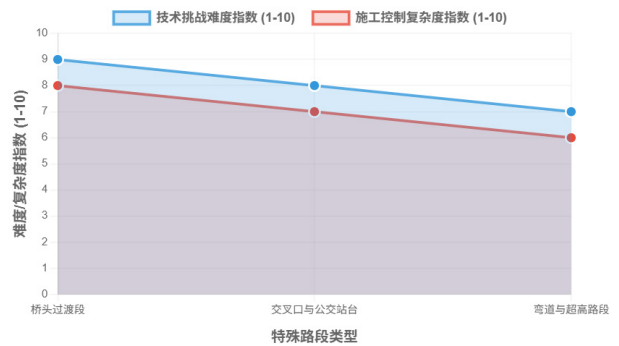


图2 特殊路段施工技术挑战与施工要点趋势分析

## 4 结语

本文系统探讨了沥青混凝土道路施工全过程的关键技术与管理要点。研究可知：沥青混凝土道路的高质量施工是一个多因素耦合的系统工程，依赖于标准化管理、精细化工艺、动态化控制和前瞻性技术的综合应用。唯有贯穿全生命周期的质量意识与系统控制，方能建造出耐久、安全、舒适的高性能沥青路面。展望未来，沥青混凝土道路施工必将深度融合材料科学、信息技术和装备制造的最新成果，推动行业从传统经验型向数据驱动、智能感知、绿色低碳的现代建造模式转型。

### 参考文献

- [1] 刘欢.市政道路施工中沥青混凝土路面施工要点探究[J].建材发展导向,2025,23(6):79-81.
- [2] 柯德龙.市政道路沥青混凝土路面施工的监理控制要点[J].福建建材,2025(3):115-118.
- [3] 翁玉宇.市政道路中沥青混凝土路面施工技术与常见问题探讨[J].建设机械技术与管理,2025,38(5):130-132.
- [4] 黄丰丰.市政道路沥青混凝土路面施工技术要点[J].低碳世界,2025,15(10):161-163.
- [5] 岑保贵.市政道路沥青混凝土路面摊铺碾压施工技术要点及质量控制措施探究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(8):123-126.

# Study on pile foundation parameters of tertiary extremely soft rock strata in sanshui basin, western guangdong

Shaoguang Wang

China Railway Design Corporation, Tianjin, 300308, China

## Abstract

Taking the extremely soft rock strata in the Sanshui Basin of Guangdong Province as the research object, a bearing capacity parameter test for pile foundations was conducted to determine the vertical compressive ultimate bearing capacity of the third-order argillaceous siltstone, the ultimate frictional resistance around the pile, and the pile-end resistance under static load tests. Through the testing of the pile body stress deformation under vertical static load conditions using optical fibers and steel bar strain gauges, the basic laws of load transmission in reinforced concrete bored piles in the strongly weathered argillaceous siltstone stratum were obtained. At the same time, comparisons were made with different standards to analyze the differences between the values of each standard and the test results of pile foundations, and reliable parameters that meet the design requirements were proposed to provide a reference for similar projects in this region.

## Keywords

Tertiary strata; Extremely soft rock; Static load test; Pile foundation parameters

## 粤西三水盆地第三系极软岩地层桩基参数研究

王少光

中国铁路设计集团有限公司, 中国 · 天津 300308

## 摘要

以广东省三水盆地极软岩地层为研究对象, 开展桩基承载力参数试验, 确定第三系泥质粉砂岩的竖向抗压极限承载力、桩周极限摩阻力、桩端阻力随静荷载试验的变化趋势, 通过光纤和钢筋应变计对竖向静载试验条件下桩身应力变形的测试, 得到了强风化泥质粉砂岩地层钢筋混凝土灌注桩桩身荷载传递的基本规律, 同时与不同规范进行对比, 分析各规范取值与桩基试验成果的差异, 提出满足设计需求的可靠参数, 为本地区类似工程提供参考。

## 关键词

第三系地层; 极软岩; 静荷载试验; 桩基参数

## 1 引言

粤中三水盆地位于广东省珠江三角洲西北部, 是粤中地区中、新生代沉积盆地的重要组成部分。区内上部分布一套河流-湖泊相沉积的第三系地层, 主要由灰白、紫红色泥岩、泥质粉砂岩等组成。根据试验结果统计, 广湛线经过三水盆地第三系地层岩石强度普遍小于 5MPa, 属于极软岩范畴。南宁某工程风化粉砂质泥岩单轴抗压强度 0.5-1.0MPa 单桩荷载试验得到的极限端阻 2500-3000kPa 远高于规范计算值。杭州大型车站项目对极软岩钻孔桩桩基参数取值进行了行业与地方规范对比。广东省规范对第三系地层承载力特征值、桩侧摩阻力等力学参数选取, 仅仅按照软质岩及硬质岩进行区分, 未针对软质岩中的极软岩进行进一步细化, 取

值存在适用性问题。

本文对第三系极软岩地层开展桩基承载力参数试验, 确定第三系泥质粉砂岩的容许承载力、桩周极限摩阻力、桩端阻力随着静荷载试验的变化规律, 同时对比不同规范的取值, 为粤中第三系地层铁路建设中的关键工程问题提供重要技术支撑, 也为本地区类似工程提供参考。

## 2 粤西三水盆地泥质粉砂岩力学特征

粤西三水盆地泥质粉砂岩为新近沉积岩, 以广湛高铁佛山段佛山特大桥项目为例, 试验段强风化泥质粉砂岩呈红褐色, 层状构造, 节理裂隙发育, 岩芯多呈柱状, 节长一般 10-30cm, 锤击易碎。天然单轴抗压强度标准值 4.27MPa, 饱和单轴抗压强度标准值 2.76MPa, 属极软岩, 具遇水软化崩解、失水收缩开裂等特性, 且有一定膨胀性, 力学强度指标见表 1。

【作者简介】王少光 (1982—), 男, 中国山西大同人, 硕士, 高级工程师, 从事工程地质研究。

表 1 泥质粉砂岩物理力学指标

岩土名称	指标 (MPa)	统计样本个数	最大值	最小值	平均值	标准值
强风化~弱风化泥质粉砂岩	饱和抗压强度	54	6.37	1.04	3.12	2.76
	天然抗压强度	56	9.73	2.24	4.7	4.27

### 3 工程地质条件

项目区域进行桩基荷载试验,场区覆盖层为第四系全新统冲洪积(Q<sub>4</sub><sup>all+pl</sup>)淤泥、粉砂,下伏基岩为全新统泥质粉砂岩(N),分述详见表2。试桩工程地质剖面见图1。

表 2 实验场地地层岩土性质

岩土序号	地层岩性	岩土描述
① 1	素填土 (Q <sub>4</sub> ml)	深褐色,稍湿,稍压实,成份主要以黏性土为主,含少量碎石。
② 1	淤泥 (Q <sub>4</sub> al+pl)	褐灰色,流塑状,土质均匀,捻具滑腻感,略具腥臭味,局部含腐殖质。
② 7	粉砂 (Q <sub>4</sub> al+pl)	褐黄、褐灰色、褐红色、饱和、松散,成分以石英、长石为主,含量约为57%,少量泥质物,砂泥质胶结,分选性中等,磨圆度差。
⑩ 2	泥质粉砂岩 (N)	紫红色,泥质结构,中厚层状构造,节理裂隙稍发育,颜色新鲜,泥质胶结,岩质较软,锤击易断。差异风化明显;强风化层上部呈碎块状,少量呈短柱状,下部呈短柱状、柱状,锤击易碎,敲击声闷。
⑩ 3		

### 4 桩基荷载试验研究

#### 4.1 实验设计

试验场地内试桩试验工作,共设计3根试桩,8根锚桩,桩端进入强风化泥质粉砂岩。试验采用低应变法对锚桩和试桩进行桩基完整性检测,判断桩基是否存在缺陷情况,再对试桩进行抗压静载荷试验,测定单桩极限承载力和轴力。

本次试验在竖向静载试验桩桩身上分别布设了钢筋应变计与光纤传感器,目的是确保数据的准确性,并能够通过钢筋应变计与光纤数据的对比,相互验证测试结果的准确性和可靠性。与传统技术相比,光纤传感器具有监测精度高、存活率高、施工简单、稳定性好等优点,可以对桩基在加载过程中的轴力与桩侧摩阻力等实现精确测定。

#### 4.2 实验过程

依据《铁路工程基桩检测技术规程》(TB10218—2019),通过单桩竖向抗压静载试验检测单桩竖向抗压承载力,并通过测试分析桩身应力变形和竖向承载特性,推求桩周极限摩阻力和桩端阻力。

试验加载桩基顺序为SZ-3、SZ-1、SZ-2,其中SZ-1、SZ-3采用锚固横梁反力加载装置,SZ-2采用压重平台反力装置,试验时用油压千斤顶分级加载。试桩设计容许承载力2987kN,则桩基极限承载力为5974kN,反力梁系统

的承载能力及加载系统的加载能力不应小于极限承载力的1.2倍,即7169kN。考虑到本次试验为试桩,需要加载至破坏,最大试验加载力按照9800kN计算,约为极限承载力的1.6倍,采用两台630t千斤顶加载,每台千斤顶的最大加载力为4900kN。其中SZ-2试验桩加载至12级时,试桩沉降速度加快,2h未达到稳定状态,油泵需要频繁泵油维持千斤顶压力,为安全起见,在本级停止加载。本级沉降量超过了上一级荷载的2倍,判定桩基在本级破坏,终止试验。荷载采用联于千斤顶的压力表(0.4级的精密压力表)和压力变送器测定油压,根据千斤顶率定曲线换算荷载。在桩顶顶设4个位移传感器,按规定时间测定沉降量(位移传感器精度为0.01mm),观测记录仪器采用RS-JYC静载测试仪。

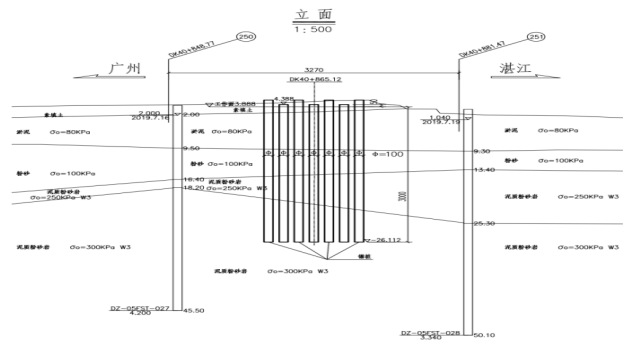


图 1 试桩工程地质剖面图



图 2 安装光纤的钢筋笼成品

#### 4.3 实验结果

3根单桩竖向抗压静载试验结果汇总见表3,以SZ-1桩为例,单桩Q-ε曲线图见图3。

表 3 单桩竖向抗压静载试验结果汇总表

桩号	最大加载量 (kN)	最大沉降量 (mm)	残余沉降量 (mm)	回弹量 (mm)	回弹率 (%)	极限承载力 (kN)
SZ-1	9600	10.48	3.89	6.59	62.88	9600
SZ-2	8800	14.65	/	/	/	8800
SZ-3	9000	14.14	4.74	9.4	66.48	9000

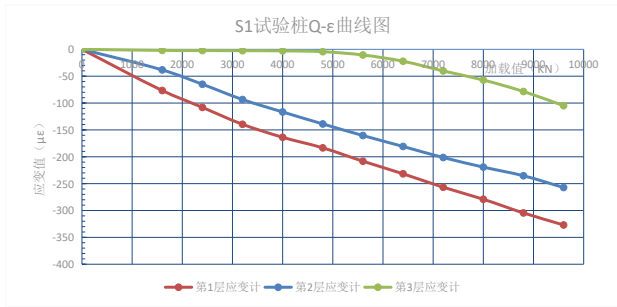


图3 SZ-1 桩 SZ-1 桩 Q-ε 关系曲线

以SZ-1桩为例，以布设在16m处的钢筋应变计在典型荷载下测得的数据，与相应荷载下光纤测得的16m处的数据进行对比，对比应变计测试和光纤测试结果，得到在单桩极限承载力状态下的强风化泥质粉砂岩的桩侧摩阻力值基本一致，见表4。强风化泥质粉砂岩侧摩阻力极限值建议采用80kPa，端阻力极限值建议采用3500kPa。

表4 单桩极限承载力状态下强风化泥质粉砂岩侧摩阻力及桩端阻力值统计表

桩号	应变计测试侧摩阻力极限值 (kPa)	应变计测试桩端阻力极限值 (kPa)	光纤测试侧摩阻力极限值 (kPa)	光纤测试桩端阻力极限值 (kPa)
SZ-1	83.8	3306	82.6	3312.54
SZ-2	82.8	3430	83.56	3475.49
SZ-3	80.6	3843	80.53	3825.59
平均值	82.4	3526	82.23	3537.87

### 5 分析和讨论

三水盆地普遍分布的泥质砂岩、泥质粉砂岩地层，试验测得饱和单轴抗压强度低，而现行规范中只对软岩的相关参数进行了确定，并未直接明确极软岩的桩端阻力、桩侧摩阻力等参数。

对比《建筑地基基础设计规范》(DB33/T1136)、广东省地方标准《建筑地基基础设计规范》(DBJ15-31)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTGD63)及试桩结果，各规范推荐的软质岩钻孔灌注桩侧摩阻力、桩端阻力特征值见表5。

对比不同规范和试桩试验，试桩试验得到的桩端阻力特征值均高于其他规范，如无现场试验采用规范推荐高值能满足设计要求。泥质粉砂岩桩侧摩阻力特征值均小于规范推荐低值，约为规范推荐值的二分之一，采用不同规范推荐低值无法满足设计要求。这主要是由于三水盆地第三系地层沉积时间较段，多为半成岩地层，按抗压强度指标判定为极软岩，规范对此类极软岩地层的桩侧摩阻力未进行折减，因此，对于此类地区的基础设计，选取桩侧摩阻力前应进行试桩试验综合考虑。

表5 不同规范推荐的桩端阻力及侧摩阻力建议值

序号	依据规范	岩土定名	桩端阻力特征值 (kPa)	桩侧摩阻力特征值 (kPa)
1	《建筑桩基技术规范》	强风化软质岩	700~1100	70~100
2	广东省地方标准《建筑地基基础设计规范》	强风化软质岩	800~1200	70~90
3	《公路桥涵地基与基础设计规范》	强风化较软岩	/	80~90
4	试桩结果	强风化泥质粉砂岩	1769	40

备注：桩侧摩阻力均按泥浆护壁钻(冲)孔桩考虑。

### 6 结语

本文以广湛高铁项目为依托研究了三水盆地第三系泥质粉砂岩极软岩桩基承载力参数取值，结论如下：

(1) 通过单桩竖向抗压静载试验得到了3根桩基的竖向抗压极限承载力值，分别为：SZ-1：9600kN，SZ-2：8800kN，SZ-3：9000kN。单桩竖向承载力受桩身强度、结构尺寸(桩长、桩径、配筋率等)以及地基土层的工程性质、分布状况等因素的综合影响。

(2) 通过光纤和钢筋应变计对竖向静载试验条件下桩身应力变形的测试，得到了强风化泥质粉砂岩地层钢筋混凝土灌注桩桩身荷载传递的基本规律：桩身轴力随着竖向荷载的增大而增大，沿着桩身长度方向呈非线性递减，衰减速度与桩侧摩阻力有关，桩端承担荷载约占总荷载的三分之一，属于端承摩擦桩。

(3) 对比应变计测试和光纤测试结果，得到在单桩极限承载力状态下的强风化泥质粉砂岩的桩侧摩阻力值和桩端阻力基本一致。强风化泥质粉砂岩侧摩阻力特征值推荐采用40kPa，桩端阻力采用1200kPa。

(4) 三水盆地第三系极软岩地层桩侧摩阻力采用规范推荐值无法满足设计要求，对于此类地区的基础设计，选取桩侧摩阻力参数前应开展试桩试验并分析后综合取值。

### 参考文献

[1] 吴志才, 彭华. 广东红层形成及其发育规律研究[J]. 热带地理, 2006, 26(3): 207-210.

[2] 许振球, 施利明, 蒋祖浩, 等. 珠三角地区红层风化岩的岩土工程特性探讨[J]. 西部探矿工程, 2006, 117(1): 114-115.

[3] 钱伟文, 邓忠信, 张信贵, 等. 泥质粉砂岩地基承载力的确定问题[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2003, 28(2): 155-157.

[4] 梁笃堂, 黄志宏, 曹小兵, 等. 某高层建筑软质岩石地基承载力的确定[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2006, 35(6): 70-73.

[5] 彭海华, 邝健华, 孙昌, 等. 典型软岩深基础端阻力计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 2913-2920.

# Analysis of the Spatial Layout and Architectural Form of Traditional Religious Buildings in Fengyi Town, Dali City

Qingxiu Qin

West Yunnan University of Applied Sciences, Dali, Yunnan, 671000, China

## Abstract

This article takes three representative traditional religious buildings in Fengyi Town, Dali City—Buddhist (Ciyun Temple), Taoist (Zhaozhou City God Temple), and Islamic (Fengyi Mosque)—as research objects. It systematically analyzes their spatial layouts and common characteristics, and sorts out their values and protection paths. The study points out that these three types of buildings are important relics of the diverse cultures in western Yunnan, with both historical and cultural values (witnessing religious spread and regional changes) and architectural artistic values (localized and ethnic architectural techniques). In response to issues such as natural aging and man-made damage, it is suggested to achieve inheritance through meticulous restoration (preserving authenticity) and activated utilization (balancing protection and cultural functions) to maintain their role as cultural carriers.

## Keywords

Dali Fengyi; Religious buildings; Spatial layout

## 大理凤仪镇传统宗教建筑的空间布局特征研究

秦庆秀

滇西应用技术大学, 中国·云南大理 671000

## 摘要

本文以大理市凤仪镇佛教（慈云寺）、道教（赵州城隍庙）、伊斯兰教（凤仪清真寺）三类代表性传统宗教建筑为研究对象，系统剖析其空间布局与共性特征，并梳理价值与保护路径。研究指出，三类建筑是滇西多元文化的重要遗存，兼具历史文化（见证宗教传播与地域变迁）与建筑艺术（地域化、民族化建筑技艺）价值。针对自然老化、人为破坏等问题，建议通过精细化修缮（保留原真性）、活化利用（平衡保护与文化功能）实现传承，以维系其文化载体作用。

## 关键词

大理凤仪；宗教建筑；空间布局

## 1 引言

宗教建筑是凤仪镇传统建筑的重要组成部分，承载着当地不同群体的宗教文化与精神信仰，主要包括佛教建筑、道教（民俗信仰）建筑、伊斯兰教建筑三类，且均有代表性实例留存。

大理市凤仪镇传统宗教建筑作为当地多元信仰的物质载体，其空间格局既遵循中国传统建筑“中轴对称、秩序井然”的核心逻辑，又因佛教、道教（民俗信仰）、伊斯兰教的教义差异与文化属性，形成各具特色的布局体系，同

时又存在着共性特征。

## 2 佛教建筑：以慈云寺为典型

位于大理市凤仪镇北街（凤山南麓），始建于清康熙年间（1662-1722年），乾隆三十二年（1767年）扩建，民国时期增建山门，约1500平方米（现存三进院落）。是当地佛教活动核心场所，承担信徒参拜、佛教文化传承、宗教仪式举办等功能，同时也是游客感受佛教文化的重要空间。

慈云寺坐北朝南，整体布局呈长方形，由前院、中院和后院组成，各院之间通过门廊相连。前院较为开阔，主要建筑有山门和天王殿。山门为三间四柱式牌坊建筑，简洁大气，彰显着寺庙的庄严。天王殿内供奉着四大天王和弥勒佛，天王像威武雄壮，弥勒佛笑容可掬，形成鲜明的对比。核心布局特征主要包括以下三点：

### 2.1 轴线递进，三进分序

从临街山门+照壁的前导空间，到紧凑的前院（引导接待），再到开阔的中院（核心礼佛、民俗活动），最后至

【基金项目】2024—2025年大理州社科项目“大理地区传统建筑研究”（项目编号：DLSK2024042）研究期限：

2024年11月—2025年9月已结项，项目负责人：秦庆秀。

【作者简介】秦庆秀（1976—），女，中国山东济南人，硕士，讲师，从事园林景观设计，传统建筑研究。

收窄的后院（僧人修行、居住），沿中轴线层层深入，空间的公共性逐步减弱、私密性与静谧性持续增强，仪式感与动线逻辑清晰。

### 2.2 动静分区，功能明确

中院为整寺核心动区，大雄宝殿居中，配殿、钟鼓楼对称分布，是信众礼佛、庙会聚集的主要区域；后院为静区，以藏经楼、禅房、僧寮为主，不与中院直连，而是通过横向巷道侧通，实现“外闹内静”的功能分隔；前院则作为市井与寺院的过渡，兼顾引导、接待基础功能。

### 2.3 汉制融白族，本土适配

整体遵循中原佛寺“钟鼓楼对称、主殿居院心”的规制，但在建筑形制、细节与空间适配中融入大量白族特色，如青砖白墙的建筑基底、飞檐翘角的门楼设计，院落排水采用白族经典的“四水归堂”模式，同时建筑尺度贴合古赵州（县级州）民间寺院定位，无大型繁复建构，兼具宗教庄重与地方生活化的适配性。



图 1 凤仪慈云寺

资料来源：现场拍摄、作者自绘

## 3 道教（民俗信仰）建筑：以赵州城隍庙为典型

大理市凤仪镇西街（原赵州城核心区，始建于明洪武年间（约 1380 年），清康熙、光绪年间重修。约 1800 平方米（现存三进院落）。源于中华传统民俗信仰，以“城隍神”为核心崇拜对象，是民众祈福、祭祀、寄托地方保护愿望的场所，同时也是古“赵州”历史文化的重要见证。

城隍庙以纵向中轴线为绝对核心，沿轴线从南至北依次排布照壁、山门、戏台、大殿、后殿，东西两侧对称设置厢房与两廊，形成严谨的三进四合院格局，完全遵循中国传统建筑“中轴对称、主次分明”的秩序逻辑，同时通过建筑层级的递进，强化“从世俗到神圣”的空间过渡。主要核心布局特征包括以下三点：

### 3.1 中轴对称 + 等级递进

严格遵循儒家礼制的中轴对称，空间从外到内依次为

“市井—广场—山门—前院—仪门—大殿院—后院”，层层深入，神圣性逐步增强；建筑高度由低到高（山门 < 大殿 < 寝殿），强化视觉中心。

### 3.2 汉制祠庙 + 白族工艺融合

整体格局是中原州级城隍庙的标准形制，但在材料（青瓦白墙、青砖浮雕）、屋檐（飞檐翘角的白族风格）、照壁题字与装饰上，融入了白族的审美与工艺，区别于北方的琉璃瓦顶。

### 3.3 祭祀与生活空间的重叠

前院、广场既是祭祀场所，也是凤仪春醮会等民俗活动的核心区域；修复后的小广场、休闲设施，使庙宇兼具信仰、文化、社区公共空间三重功能。

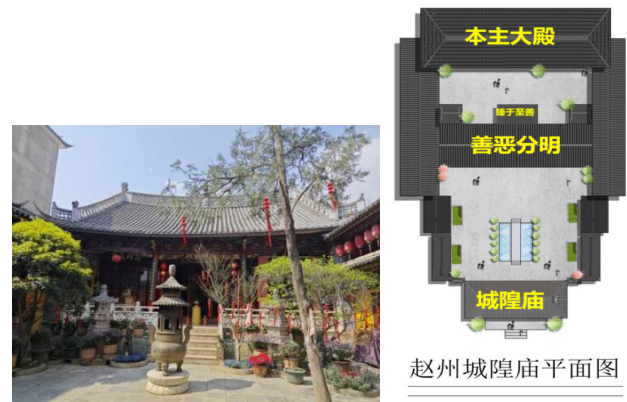


图 2. 凤仪城隍庙（主要院落、平面图）

资料来源：现场拍摄、作者自绘

## 4 伊斯兰教建筑：以凤仪清真寺为典型

位于大理市凤仪镇西街（回族聚居区），始建于清康熙年间（1662-1722 年），光绪年间扩建礼拜殿，1980 年代重修，约 1200 平方米（现存两进院落。是当地回族穆斯林进行礼拜、宗教教学、文化交流的场所，是伊斯兰文化在凤仪传承的核心载体，体现回族群体的宗教信仰与生活习俗。

规整的两进院落，沿中轴线分布大门、二门（拜楼）、大殿，两侧设两厢楼房（教学、办公、信徒休息），南侧为独立南院（附属设施）；大殿严格朝向麦加方向，符合伊斯兰教礼拜礼仪要求。

（一）入口层（照壁至山门）：为“世俗空间向宗教空间的初步转换”。照壁与山门形成入口缓冲带，信众从西街进入时，需先经过照壁，再通过山门进入第一进院，这一过程通过建筑屏障的遮挡，隔绝外界喧嚣，帮助信众从“日常状态”逐渐切换至“宗教状态”；山门内的接待室可提供饮水、休息服务，进一步强化“过渡”属性。

（二）过渡层（第一进院至拜楼）：为“宗教仪式的准备阶段”。第一进院空间开阔，信众可在此整理衣着、交流，等待礼拜时间；拜楼的存在则进一步强化宗教氛围——八角形的独特形制、顶部的宣礼功能，均提示信众“核心

礼拜空间即将到达”，引导其心态趋于专注。

(三)核心层(第二进院至礼拜殿)为“绝对神圣空间”。第二进院围绕礼拜殿展开,空间尺度相对紧凑,聚焦核心仪式;礼拜殿内部无任何偶像装饰,仅在朝向麦加的墙壁设“米哈拉布”(指示礼拜方向的壁龛),壁龛两侧刻阿拉伯文《古兰经》经文,地面铺设光滑大理石(便于清洁,符合伊斯兰教“洁净”要求),整体氛围庄重、肃穆,完全服务于“集体礼拜”这一核心宗教功能。

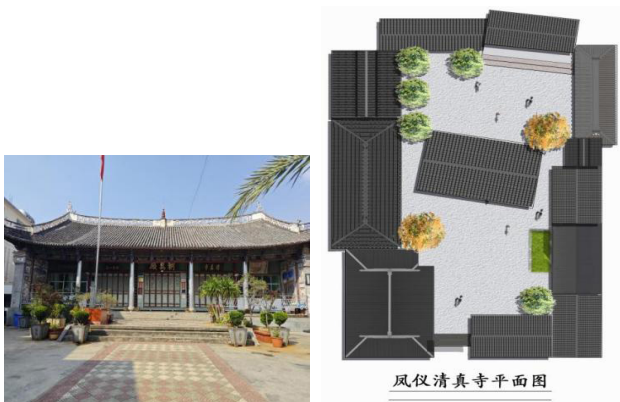


图3. 凤仪清真寺(第二进院,平面图)

资料来源:现场拍摄、作者自绘

## 5 大理市凤仪镇传统宗教建筑建筑空间布局共性分析

### 5.1 山水相依的选址共性

立足大理坝区与山区过渡地带,依天人合一理念选址:背靠山体,既契合藏风聚气风水观,又阻挡西北冷风,正面朝向开阔坝区/农田/溪流,保障视野与可达性;近水而建,满足宗教洁净需求,还能调节局部气候,呼应地域水文化。

### 5.2 中轴对称的布局共性

各类宗教建筑核心空间均以中轴为基础,山门—主殿—后殿纵向轴线清晰,配殿、钟鼓楼等对称分布,引导仪式化行进路线;功能沿轴线从外到内呈公共开放→私密神圣递进,入口层集散、核心层主祭祀、后院层为神职人员居住修行区,分区明确。

## 6 白族化的空间细节共性

深度融合白族建筑特色:院落采用“三坊一照壁”“四合五天井”形制,适配宗教仪式与白族围合空间使用习惯;主配殿檐廊相连成连廊系统,适配本地多雨、强日照气候,提升仪式舒适度;增设戏台、茶堂等本土化附属空间,形成宗教功能+民俗活动的复合格局。

## 7 层级分明的空间尺度共性

以主殿为核心做尺度控制,主殿在面宽、进深、高度及屋顶形制上均为建筑群之最,凸显核心神圣地位;院落尺度随轴线递进呈开阔→紧凑→安静的节奏变化,前院方便聚集、中院聚焦祭祀、后院营造私密感,主次层级清晰。

## 8 价值总结与保护建议

### 8.1 核心价值

凤仪镇传统寺庙建筑是当地历史文化、建筑技艺与民族精神的珍贵遗产,兼具双重核心价值:

历史文化价值:道教、佛教、伊斯兰教三类寺庙,见证了各宗教在滇西的传播发展,其沿革与凤仪镇区划、民族迁徙、宗教演变深度关联,是滇西历史、宗教、民俗研究的“活化石”;庙内明代木构、清代碑刻、阿拉伯文雕刻等遗存,史料价值极高。

建筑艺术价值:三类寺庙均遵循各宗教建筑规范,又融合滇西地域与多民族建筑智慧,形成独特风格;重檐歇山顶、八角拜楼、道教壁画等建筑与工艺,展现高超技艺,是中国传统宗教建筑地域化、民族化的典型代表,具备重要研究价值。

### 8.2 保护与传承建议

针对寺庙建筑自然老化、人为破坏等问题,从两方面强化保护传承:

精细化修缮,保留原真性:按寺庙特点制定专项修缮方案,城隍庙重点保护明代木构、用传统榫卯修复,慈云寺以天然矿物颜料修复壁画,清真寺保护拜楼构架与阿拉伯文雕刻并邀请专家参与,均严格遵循“修旧如旧”;同时建立建筑档案,记录修缮过程与工艺。

活化利用,平衡保护与功能:在保护建筑本体的基础上活化文化功能,城隍庙办城隍文化展、保留传统祭祀,慈云寺开设佛教文化讲堂、开放部分藏经楼,清真寺设伊斯兰文化展厅,各寺庙均规避过度商业化,兼顾宗教功能与文化传播、民族交流。

### 参考文献

- [1] 云南省大理白族自治州大理市地方志编纂委员会.大理市志[M].北京:中华书局,1998.
- [2] 张锡禄.白族民居[M].昆明:云南教育出版社,1994
- [3] 王鲁民.中国宗教建筑史[M].武汉:武汉大学出版社,2005
- [4] 杨大禹.云南少数民族建筑史[M].昆明:云南大学出版社,2009.
- [5] 王其钧.中国佛教建筑艺术[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [6] 杨宏烈,杨安.现代宗教建筑的形制流变[J].新建筑,1998(02):58-60.

# Optimization and Practice of Construction Fire Safety Supervision Mechanism for Chemical Construction Projects

JiaChao Kou

Yulin Hengshen New Materials Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 274015, China

## Abstract

This paper examines the distinctive features of the chemical construction industry and practical regulatory experiences, identifying critical challenges in current oversight practices. These include ambiguous division of responsibilities, outdated regulatory approaches, inadequate corporate accountability, weak emergency preparedness, and insufficient professional capabilities in regulatory teams. To address these core issues, the study proposes six targeted optimization strategies: refining legal and standard systems, establishing coordinated accountability mechanisms, strengthening corporate responsibility, innovating intelligent regulatory tools, enhancing emergency preparedness, and building competent professional regulatory teams. A case study from a high-tech industrial development zone demonstrates the feasibility and effectiveness of these measures, facilitating the transition of chemical fire safety regulation from reactive response to proactive prevention. This initiative aims to promote high-quality and safe development in the chemical industry.

## Keywords

Chemical engineering construction project; Construction safety; Fire safety; Regulatory mechanism; Optimization practice

# 化工建设项目施工消防安全监管机制优化与实践

寇甲超

榆林恒神新材料有限公司, 中国·陕西 榆林 274015

## 摘要

本文结合化工建设施工行业特性与实际监管实践,梳理出当前监管工作中存在的权责划分模糊、监管手段滞后、企业主体责任落实不力、应急保障薄弱、监管队伍专业能力不足等突出痛点。围绕这些核心问题,从完善法规标准体系、健全权责协同机制、强化企业主体责任、创新智能化监管手段、补齐应急保障短板、建强专业监管队伍六大维度,提出针对性的监管机制优化路径,并以某高新技术产业开发区的实操案例验证优化路径的可行性与有效性,推动化工消防监管从被动处置向主动防控转型,助力化工行业高质量安全发展。

## 关键词

化工建设项目; 施工安全; 消防安全; 监管机制; 优化实践

## 1 引言

化工产业是国民经济的支柱产业,其建设项目具有投资规模大、建设周期长、技术难度高、安全风险突出等显著特点<sup>[1]</sup>。施工阶段作为化工项目全生命周期中安全风险最集中的环节之一,涉及土建、安装、防腐、调试等多道工序,现场作业人员流动性大、操作规范性参差不齐,同时存在易燃易爆、有毒有害物料储存使用、特种设备吊装焊接、临时用电等高危作业场景,任何一个环节的监管疏漏,都可能引发火灾、爆炸等重特大消防安全事故。在此背景下,优化化工建设项目施工消防安全监管机制,强化监管实践、提升监管效能,成为防范化解化工领域消防安全风险、保障人民群

众生命财产安全、推动化工行业高质量发展的迫切需求。因此,本文将对化工建设项目施工消防安全监管机制优化与实践进行相关分析。

## 2 化工建设项目施工消防安全监管存在的问题

化工建设项目施工消防安全监管存在诸多突出问题,制约监管效能提升,埋下重大安全隐患。首要痛点在于监管权责模糊,协同监管机制不完善<sup>[2]</sup>。化工施工消防监管涉及多部门,但部分地区未清晰界定应急管理、住建、消防救援等部门的权责,衔接不畅易出现推诿扯皮,跨区域协同监管缺失,不仅降低效率,更易遗漏隐患,成为事故诱因。结合多地监管实践发现,传统监管手段滞后问题尤为突出,精准监管能力不足。当前监管仍以人工现场检查、定期督查为主,受人员专业度、责任心影响,对隐蔽工程等高危环节易漏查错查。依托大数据、物联网实现的智能化监管应用匮乏,多

【作者简介】寇甲超(1983—),男,中国陕西榆林人,本科,一级注册消防工程师,从事消防安全研究。

数地区未搭建完善监管平台,政企、中介数据不通,形成“信息孤岛”,无法精准研判预警。企业主体责任落实不力、内生防控动力不足是核心症结,部分企业秉持“重进度、轻安全”理念,违规压缩工期、“软性压缩”安全投入,作业人员培训缺位、违规操作频发,管理人员专业不足加剧隐患。

### 3 化工建设项目施工消防安全监管机制优化路径

#### 3.1 完善法律法规与标准体系,明确监管依据

化工建设项目施工消防安全监管要有序推进,健全的法律法规与标准体系是根本支撑。结合当前化工行业发展现状和实际监管需求,完善这一体系可从多方面发力,而非简单的条款补充。面对新型化工工艺、新型材料、新型设备的快速迭代,要加快修订相关法律法规,细化监管条款,明确各部门、各主体的监管职责与法律责任,让监管有明确依据、更具可操作性。据应急管理部相关数据,近三成化工施工消防隐患源于法规条款模糊,细化条款已成当务之急。在此基础上,要及时更新行业标准。结合不同类型化工项目的施工差异,制定针对性的安全技术、隐患排查和应急处置标准,尤其要补齐隐蔽工程、特种设备作业、临时用电等高危环节的标准短板。

#### 3.2 健全权责体系,强化协同监管

要破解化工建设项目施工消防监管中权责模糊、协同不足的痛点,关键在于健全权责体系,推动多部门协同发力、凝聚监管合力<sup>[3]</sup>。明确各部门权责分工是首要前提。结合化工施工全流程,清晰界定应急管理、住建、消防救援三大部门的职责边界与监管重点,杜绝监管真空和重复监管。住建部门聚焦消防设计审查与施工质量,应急管理部门紧盯施工过程中的风险管控与隐患整改,消防救援机构则负责应急处置与消防演练的监督,确保各部门各司其职、不越位不缺位。建立统一的协同监管协调机构,定期召开会议、共享信息、破解监管难题。例如,推动园区视频监控系统与省交警、应急管理平台联动,实现多部门感知数据互通。同时搭建统一监管信息平台,打破政企、部门间的“信息孤岛”,建立跨区域监管衔接机制,让大型、跨区域化工项目监管无缝衔接。

#### 3.3 强化企业主体责任,激发内生防控动力

化工建设项目施工消防安全水平,核心取决于企业主体责任的落实成效。结合行业实践来看,企业主体责任落实到位,往往是消防隐患滋生、事故发生的核心诱因,因此必须多维度发力,激活企业内生防控动力。首要的是引导企业树立正确安全理念,推动管理层重视施工消防安全,将“安全第一、预防为主、综合治理”理念融入发展战略,足额投入安全资金,坚决杜绝为压缩成本而“软性削减”安全投入的行为。在此基础上,完善企业消防安全管理制度与责任体系,明确建设、施工、监理三方权责,层层分解到岗到人。此外,需建立考核激励与信用约束机制,将消防安全纳入绩

效考核,奖惩分明,同时把企业消防信用与项目审批、市场准入挂钩,推动责任落实。

#### 3.4 创新监管手段,提升精准监管能力

化工建设项目施工消防监管的复杂性、动态性日益凸显,传统监管手段早已难以适配需求。因此必须主动创新监管模式,强化信息化、智能化技术应用,才能切实提升精准监管能力,破解监管难题。搭建智能化监管信息平台是核心抓手,要整合施工进度、危险源状态、作业人员信息等各类监管数据,运用大数据、人工智能、物联网技术,实现施工全过程实时监测、动态管控和精准预警。比如通过物联网实时监控易燃易爆物料储存、特种设备运行等高危环节,异常情况第一时间预警处置;借助大数据分析隐患排查数据,精准定位监管薄弱点。同步推广无人机巡检、红外热成像检测等先进设备,弥补人工排查短板,实现隐蔽工程、高空作业等难点环节的全覆盖。

#### 3.5 完善应急保障体系,提升应急处置能力

化工建设施工消防应急保障体系不完善、应急处置能力薄弱,是防范化解重大消防风险的突出短板,必须从多方面补齐应急保障短板,切实提升应急处置实战能力。完善应急预案是首要前提。要引导企业立足自身施工特点、危险源分布和作业场景,编制贴合实际、可操作性强的应急预案,明确应急组织机构、响应流程等核心内容,坚决杜绝照搬模板。同时推动企业预案与政府、周边企业预案有效衔接,形成上下联动、左右协同的预案体系。应急物资是基础保障,要督促企业按预案足额储备消防器材、防护用品等物资,明确存放地点和责任人,定期检查维护。应急演练绝不能流于形式,要引导企业定期开展实战化演练,模拟真实事故场景,检验预案成效、提升作业人员处置技能,对演练敷衍的企业从严督促整改。此外,要强化专业救援力量建设,加大投入、完善装备,建立政企联动机制,推动救援力量向中小型园区和偏远企业延伸,实现全覆盖,提升重特重大事故协同处置能力。

#### 3.6 加强监管队伍建设,提升监管专业水平

提升化工建设项目施工消防安全监管水平,关键在于打造一支专业过硬、责任过硬的监管队伍。结合行业监管实践,不少地区监管效能不足,核心症结就在于监管队伍专业不精、责任不强,因此必须多维度发力,强化队伍建设。队伍建设首要之举是优化招聘与配置,要优先吸纳化工、消防安全、施工技术等相关专业人才,充实监管力量,破解人员短缺、专业不符的困境。同时,要完善培训机制,制定针对性强的培训计划,涵盖化工知识、消防规范、监管技巧等内容,结合案例教学、现场实操,让监管人员真正学以致用,同时建立常态化学习交流机制,及时跟进行业最新技术与标准。此外,健全激励约束机制,明确考核标准,将隐患排查成效、监管质量纳入考核,奖惩分明,调动监管人员积极性。还要加强作风建设,强化责任与服务意识,杜绝“吃拿卡

要”“推诿扯皮”，树立公正廉洁、高效务实的监管形象。

## 4 化工建设项目施工消防安全监管机制优化实践案例

### 4.1 案例背景

某高新技术产业开发区作为国家高新技术产业开发区，集聚了众多化工企业，其中重大危险源企业数量居全省第二，安全监管压力突出。此前，该园区化工建设项目施工中，也存在监管手段滞后、企业主体责任落实不到位、应急处置能力薄弱等问题，消防安全风险突出。为解决这些问题，园区结合自身化工企业特点，借鉴先进监管经验，全面优化施工消防安全监管机制，经过实践取得良好成效，监管效能显著提升。

### 4.2 监管机制优化实践措施

该高新技术产业开发区聚焦化工施工消防监管痛点，多措并举优化实践，精准破解监管分散、效能不足等问题。园区先组建应急管理、住建、消防救援等部门组成的协同监管领导小组，统筹全局监管工作，明确各部门权责边界，每月召开协同会议互通信息、破解难题。同时搭建监管信息平台，实现政企、中介机构信息实时共享，打破“信息孤岛”，还开发了车辆叫号系统，联动预约、停车场管理系统，实现危化品车辆全流程管控。此外，园区着力强化企业主体责任，通过政策引导、督查考核推动企业落实责任，截至2025年3月潜江市累计投入近3亿元完善园区公用工程。针对危化品运输短板，园区投资1.79亿元建成443个车位的专用停车场，使用率超80%。园区还投入4900万元搭建智能管控平台，接入1379个危险源感知数据，截至2025年3月发出预警113次，搭配无人机巡检等技术，实现隐患精准排查。应急保障与队伍建设同步发力，投资3792万元建成特勤消防站，常态化开展联合演练，某危化品运输企业车辆故障率因此下降75%。同时精选11名化工专业人才组建监管队伍，投资1700多万元建成实训基地，通过案例教学、实

操培训，搭配激励约束机制，持续提升监管队伍专业素养与责任意识。

### 4.3 实践成效

高新技术产业开发区全面优化化工建设项目施工消防安全监管机制后，监管成效十分突出。消防安全隐患大幅缩减，园区施工隐患排查整改率提升至98%以上。同时，监管效能显著提升，监管人员工作效率提高30%以上，监管成本大幅降低。企业安全管理理念也明显转变，安全投入持续加大，违规操作得到有效遏制。此外，应急处置、危化品运输管理能力同步提升，形成危化品全流程监管体系。这一实践充分证明，本文提出的监管优化路径切实可行，能有效破解监管难题，为其他化工园区提供了宝贵实践借鉴。

## 5 结语

化工建设项目施工消防安全监管，是筑牢化工行业安全生产防线的关键环节，直接关系到产业发展的安全底色。本文研究立足化工施工的行业特性与实际监管痛点，从法规、权责、企业责任、监管手段、应急保障、队伍建设六个维度，提出了贴合实操的监管机制优化路径。某高新技术产业开发区的实践案例，也直观印证了这些优化路径的可行性与实际效能，能够切实破解当前监管中的各类难题，推动监管模式从被动处置向主动防控转型。

监管工作的优化并非一成不变的静态过程，随着化工行业新型工艺、设备的持续迭代，消防安全风险也会呈现新的特征。各地需立足本地化工产业发展实际，因地制宜落实优化措施，持续完善监管机制。

### 参考文献

- [1] 尹久.化工企业消防防火监督检查工作研究[J].化纤与纺织技术,2024,53(04):109-111.
- [2] 田森.化工企业消防监督管理机制改革探究[J].消防界(电子版),2023,9(13):79-81.
- [3] 罗蔚敏.石油化工企业消防安全监管质量对策研究[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(22):28-29.

# Research on the Technology of Slope Support in Construction of Building Engineering

Yang Lu

Xi'an Aerospace Power Test Technology Research Institute, Xi'an, Shaanxi, 710100, China

## Abstract

With the increasing prevalence of deep foundation pits and high slope projects of large scale, slope support technology has become a critical component in modern civil engineering. This paper analyzes the technical systems of slope support in construction projects, evaluates the advantages and limitations of various support technologies, and examines their application timelines under different geological and environmental conditions through case studies. The research demonstrates that scientific slope support integrates geological surveys, precision design, meticulous construction, and dynamic monitoring. As a key factor in improving construction quality, continuous optimization of slope support technology contributes to elevating the overall technical standards of slope engineering in construction projects.

## Keywords

Construction engineering; Slope support technology; Stability analysis; Application value

## 建筑工程施工中的边坡支护技术研究

陆阳

西安航天动力试验技术研究所, 中国·陕西 西安 710100

## 摘要

深基坑、高边坡工程日益增多且施工规模较大, 边坡支护技术已经成为现代土木工程施工中重要环节。本文通过分析建筑工程中边坡支护技术体系, 分析各类支护技术的优势与缺点, 结合典型的工程案例, 分析在不同地质及环境下的技术方案应用时间。研究可知: 科学的边坡支护融合了地质勘察、精准设计、精细施工和动态监测, 边坡支护技术是提高施工质量的关键, 通过持续优化有利于提高建筑项目边坡工程整体技术水平。

## 关键词

建筑工程施工; 边坡支护技术; 稳定性分析; 应用价值

## 1 引言

随着城市化进程进入以提高质量为核心的新阶段, 土地资源稀缺与发展需求之间的矛盾凸显, 为了拓展发展空间、优化城市功能, 建筑工程呈现出向地下空间纵深开发、向复杂山区环境拓展的发展趋势, 这些深基坑与高边坡构成普遍具有地质条件复杂、周边环境敏感、施工风险高的特点, 导致边坡稳定性分析与支护技术选择决定了施工质量。边坡失稳是岩土工程领域最具有破坏性的灾害, 国内外因支护不当或失效导致基坑坍塌、山体滑坡等事故屡见不鲜, 比如某些深基坑工程因支护结构设计缺陷或施工质量问题, 不仅造成施工人员重大伤亡、机械设备损坏等, 造成巨额的经济损失和恶劣的社会影响。

【作者简介】陆阳, 男, 中国陕西汉中, 硕士, 高级工程师, 从事工业项目建造与施工管理研究。

## 2 边坡支护技术的设计与施工要点

### 2.1 支护结构选型原则

支护结构的选型是一个多目标、多约束的综合性决策过程, 需要在安全、经济、工期之间寻求最佳平衡, 核心原则包括:

#### 2.1.1 基于工程地质与水文条件

地质与水文条件是边坡支护技术选型的依据。要掌握岩土体的物理力学参数、地层分布、构造特征和地下水类型和渗透性等。对于软弱淤泥质土、松散砂层或高含水地层, 优先考虑具有良好止水性能的支护形式, 比如地下连续墙、SMW 工法桩或结合帷幕注浆。对于岩质边坡或硬塑状土体, 可采用锚杆、土钉等依赖岩土体自身强度的主动加固技术。

#### 2.1.2 基于基坑深度、边坡高度和周围环境

工程的规模与环境的敏感度决定了支护方案的刚度与变形控制要求。首先, 深度或高度。深度 < 6m 的浅基坑可考虑土钉墙、钢板桩等较为经济的方案; 中等深度基坑采取

桩锚支护、SMW 工法桩。深度 > 12m 的深大基坑或高陡边坡，则多采用地下连续墙、多道内支撑或桩锚 + 内支撑复合形式。其次，周围环境。邻近重要建筑物、地铁隧道、主干管线时，必须将变形控制放在第一位，选择刚度大、变形小的支护形式，比如地下连续墙、灌注桩 + 多道预应力锚索，配合严格的监测与注浆保护措施。

### 2.1.3 基于工期、造价

在满足安全与环境要求的基础上，需要对边坡支护技术的经济性进行对比。首先，工期。对工期紧迫的项目，可选用施工速度快的预制桩、预应力装配式构件或逆作法中的地下连续墙。土钉墙虽然需要分层施工，但工序简洁，整体工期也相对可控。其次，造价。需要采取全生命周期成本分析。比如，SMW 工法桩型钢可回收，能显著降低材料成本；地下连续墙初期投入高，但若作为永久地下室侧墙，具有综合经济优势<sup>[1]</sup>。

## 2.2 关键支护技术分析

### 2.2.1 土钉墙支护

该支护类型的原理是通过植入坡体的密集土钉，与土体形成复合加筋土体，利用土钉与土间的摩阻力以及面层的约束作用，全面提高边坡的整体稳定性和抗变形能力。属于“自稳式”柔性支护，适用于地下水位以上或降水后粉土、黏性土、填土等，基坑深度一般不宜超过 12m，不适用于软弱淤泥层、流沙地层等。土钉长度通常为基坑深度的 0.5 ~ 1.2 倍，间距为 1 ~ 2m，倾角在 5 ~ 20°，面层采用  $\phi 6 \sim \phi 10$  钢筋网，喷射 C20 混凝土，厚度为 80 ~ 150mm。

### 2.2.2 桩锚支护体系

该体系由挡土排桩和预应力锚杆组成，排桩将土压力传递给锚杆，锚杆通过锚固段将力传递到稳定地层，就像一个连续梁从而形成高效的深度支护结构。该体系设计需要进行桩身内力计算、嵌固深度计算、锚杆承载力与长度设计，冠梁作为连接各桩顶的关键构件，能够协调各桩受力，增强整体性；腰梁是锚杆水平力的传力构件，必须具有足够的刚度才可以保证与桩身紧密接触。该技术的施工流程为：施工排桩 → 开挖到第一道锚杆标高下 0.5m → 施工冠梁和第一道锚杆 → 张拉锁定锚杆 → 继续分层开挖并施工后续锚杆和腰梁<sup>[2]</sup>。关键技术包括：确保桩身垂直度与完整性，锚杆成孔进度与清孔质量，浆体配制与高压注浆等。

### 2.2.3 地下连续墙

地下连续墙是在基坑周围地下构筑的连续钢筋混凝土墙，集挡土、止水、承重于一体。最大优势为刚度极大、变形极小且止水效果好，可直接作为主体地下结构的外墙，可节约工程造价和地下空间，适用于超深基坑和复杂地层。关键施工技术包括：（1）导墙施工。精准的导墙是成槽精度和垂直度的基准，用于存储泥浆。（2）泥浆护壁。采用膨润土泥浆维持槽壁稳定，其性能需要动态监控。（3）成槽开挖。采用液压抓斗或铣槽机分槽段开挖，实时监测垂直度。（4）钢筋笼吊装。巨型钢筋笼需要进行专项吊装设计，采用双机或多机抬吊，保证平稳、精确入槽。（5）地下混凝土浇筑。采用导管法连续浇筑，保证混凝土将泥浆完全置换，控制个导管高差，防止出现夹层或冷缝。地下连续墙的技术要点见表 1。

表 1 地下连续墙的技术要点

分类	核心特点 / 工序	技术要求
核心优势	刚度大、变形小；止水效果好；“两墙合一”、超强适应性	1、连续钢筋混凝土墙体，能有效控制基坑变形，保护周边环境。 2、墙体连续无缝，自身即为优良的止水帷幕，尤其适用于高水位地层。 3、可直接作为主体地下结构的外墙，节省工程造价、缩短工期、减少地下空间占用。 4、特别适用于超深基坑 (>15m)、紧邻敏感建筑物及地质条件复杂（如软土、砂层）的工程。
槽段施工技术	导墙施工 → 泥浆护壁 → 成槽开挖 → 钢筋笼吊装 → 水下混凝土浇筑	1、导墙施工要求定位精确，强度与稳定性满足要求，通常采用现浇钢筋混凝土结构。 2、泥浆护壁需要动态监测并调整泥浆性能（比重、粘度、pH 值、含砂率），确保槽壁安全。 3、成槽开挖需要分幅、分段开挖，实时监测垂直度（一般要求 $\leq 1/300$ ），确保槽壁平整与垂直。 4、钢筋笼吊装。进行专项吊装设计，采用双机或多机抬吊，确保平稳、垂直、精确入槽，避免变形。 5、水下混凝土浇筑。连续浇筑，保证混凝土面均匀上升，导管埋深适宜，确保将泥浆完全置换，防止出现夹层、冷缝等质量缺陷。

### 2.2.4 SMW 工法桩

该工法是在三轴深层搅拌桩内插入 H 型钢形成的复合挡土墙。首先，用三轴搅拌钻机在原土中切割搅拌，同时喷注水泥浆，形成连续致密的水泥土搅拌墙，即止水帷幕。其次，在水泥初凝前，通过专用设备将 H 型钢精准插入指定位置，等待基坑施工完毕，主体结构具备条件后，采用专用液压顶拔装置将型钢拔出后进行回收<sup>[3]</sup>。

该技术的优势就是型钢可回收，因此降低了支护材料的永久性消耗，技术经济性较高。而且，SMW 工法桩还具

有很好的支撑性和挡土强度，适用于深度 < 15m 的软弱基坑。该技术对于硬土层或砂卵石层中的成桩困难，型钢拔除后留下的孔隙也需要用水泥浆填满，因此具有一定的环境风险性。

## 3 结合工程案例分析边坡边坡技术应用效果

### 3.1 工程概况

本文以某城市中心的超高层建筑地下室基坑工程举例，基坑开挖深度为 18.5m，平面形状呈不规则矩形，周长为

320m。工程场地土层自上而下为杂填土、粉质黏土、中密砂卵石层，地下水埋深3m。工程面临挑战为：基坑东临紧靠城市轨道交通1号线区间隧道，隧道结构外壁距离基坑最近处只有12.5m。场地周围市政管线密集，包括高压电缆、主供水管、通信电缆等。

### 3.2 支护方案选择与设计

通过多种方案必选后，最终确定采用钻孔灌注桩+三道预应力锚索的桩锚支护体系，结合帷幕止水。该方案的优势为：不仅能提供足够刚度以控制变形，又能通过施加预应力主动限制位移。

支护结构设计参数为：（1）支护桩。采用直径1m的钻孔灌注桩，桩中心距1.2m，桩长30m，采用C30混凝土。（2）预应力锚索。采用4束φ15.2钢绞线，设置三道锚索：第一道在冠梁处，第二和第三道通过型钢腰梁与桩身连接。设

计锚索预应力锁定值为250~350kN，倾角为15~20°，长度为25~30m，锚固段深入稳定的砂卵石层。在支护桩外侧施工一排三重管高压旋喷桩，形成封闭的止水帷幕，坑内设置疏干井进行降水，最大限度减少地下水对基坑和周围环境的影响。

### 3.3 工程效果评价

首先，支护结构桩顶水平位移最大值累计为8.2mm，小于设计预警值的25mm。施工过程中，邻近地铁隧道的最大附加沉降为5.1mm，最大水平位移为3.8mm，均控制在10mm的安全标准中。锚索预应力值在锁定后存在10~15%的损失，随后在后续开挖中逐步增加并且趋于稳定，最终值在设计承载力的70~85%范围内，表示设计合理。

其次，本案例锚索支护体系成功应用，证实了在复杂城市环境下深基坑工程中，该技术有极大的优势。见表2。

表2 锚索支护体系成功应用

评价指标	现象	分析结果
安全性	实现了基坑自身稳定与毗邻地铁隧道安全的“双安全”目标。	成功依赖于“桩—锚—土”协同作用的有效发挥及对“时空效应”原则（分层、分区、及时支撑）的严格遵守。
技术性	变形控制达毫米级精度；地下水控制有效。	方案设计针对性强（桩锚组合+高压旋喷帷幕）。动态调整机制响应及时，整套技术体系可靠、精准。
经济与社会效益	相较于地下连续墙内支撑方案，具备造价更低、工期更短的优势。	在达成同等安全目标下，经济性更优。其对地铁的“零干扰”保护，创造了巨大的隐性社会效益，为城市核心区建设提供了可靠的技术范式。

## 4 结语

本研究从技术要点、工程实践两个方面，对建筑工程边坡支护技术的原理及应用进行讨论，成功的边坡支护工程需要做好地质勘察、科学结构设计等，要结合地质条件进行适当的人工干预，确保工程质量，并且减少工程对环境的影响。

## 参考文献

- [1] 马钊. 土木建筑工程施工边坡支护技术探究[J]. 新城建科技, 2023, 32(23): 118-120.
- [2] 金芳华, 卢娜娜. 建筑工程施工中的边坡支护技术研究[J]. 中华建设, 2022, (10): 137-138.
- [3] 马振宇. 土木建筑工程施工边坡支护技术分析[J]. 四川水泥, 2022, (05): 146-147.

# Discussion on the Construction and Application of Engineering Cost Index System Based on Big Data

Jingfeng Dai

Yunnan Jiantou No.2 Installation Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650033, China

## Abstract

Against the backdrop of accelerated digital transformation in the construction industry, traditional project cost indicator systems have become inadequate for refined engineering management due to limitations in data sources, delayed updates, and insufficient accuracy. This study leverages big data technology to address these challenges by integrating the characteristics of full lifecycle project cost management. It systematically identifies core dimensions and data sources for cost indicators, establishing a three-dimensional framework comprising basic indicators, process indicators, and benefit indicators. The research designs a comprehensive implementation pathway encompassing “data collection-processing-modeling-application-optimization” and validates the system’s feasibility through practical case studies. The findings demonstrate that this framework enables dynamic integration and precise analysis of cost data, significantly enhancing efficiency in cost forecasting, process control, and investment evaluation. It provides scientific support for digital cost management in engineering projects and holds substantial practical value for advancing cost management upgrades in the construction industry.

## Keywords

Big data; Project cost; Index system; Digital management; Cost control

## 基于大数据的工程造价指标体系构建与应用探讨

代靖峰

云南建投第二安装工程有限公司，中国·云南昆明 650033

## 摘要

在建筑行业数字化转型加速推进的背景下，传统工程造价指标体系因数据来源单一、更新滞后、精准度不足等问题，已难以满足工程精细化管理需求。本文以大数据技术为核心支撑，结合工程造价全生命周期管理特点，梳理造价指标的核心维度与数据来源，构建包含基础指标、过程指标、效益指标的三维造价指标体系，设计“数据采集-处理-建模-应用-优化”的全流程实施路径，并通过实际应用场景验证体系的可行性。研究表明，该体系可实现造价数据的动态整合与精准分析，显著提升造价预测、过程控制与投资评估的效率，为工程造价数字化管理提供科学支撑，对推动建筑行业成本管理升级具有重要实践价值。

## 关键词

大数据；工程造价；指标体系；数字化管理；成本控制

## 1 引言

工程造价管理作为建筑工程全生命周期管理的核心环节，其精准性直接关系到工程投资效益、建设质量与进度管控。随着我国建筑行业向高质量发展转型，超大型工程、复杂综合体项目日益增多，工程建设的技术复杂度、数据规模性与管理精细化要求大幅提升，传统依赖人工统计、经验判断的造价管理模式已暴露出明显短板。传统工程造价指标体系多基于静态历史数据构建，存在数据覆盖不全面、指标更

新不及时、与实际场景脱节等问题，导致造价预测偏差较大、过程控制缺乏依据、投资评估科学性不足。

大数据技术凭借海量数据处理、多源信息整合、实时动态分析的优势，为工程造价指标体系的重构与优化提供了技术突破口。通过整合工程设计、招投标、施工、结算等全流程数据，运用数据挖掘、建模分析等技术，可实现造价指标的动态提取与精准应用。近年来，国内学者围绕大数据在工程造价中的应用展开了初步探索，但多集中于单一环节的技术应用，针对指标体系的系统性构建与全流程落地研究仍较为欠缺。基于此，本文立足工程造价管理实际需求，构建基于大数据的工程造价指标体系，明确实施路径与应用场景，为推动工程造价数字化转型提供实践方案。

【作者简介】代靖峰（1986—），男，中国云南曲靖人，硕士，高级工程师，一级造价工程师，从事建设项目经济与管理、建设项目信息化、建设项目合同管理研究。

## 2 大数据与工程造价指标体系的关联性

### 2.1 工程造价指标体系的核心需求

工程造价指标是反映工程成本构成、变化规律与影响因素的量化标准，完善的指标体系需满足三大核心需求：一是数据全面性，需覆盖工程全生命周期各阶段、各成本类型数据，包括人工、材料、机械、管理等多维度信息；二是动态更新性，需实时捕捉市场价格波动、施工工艺调整、政策标准变化等因素对造价的影响；三是精准实用性，需适配造价预测、过程控制、结算审核等多场景应用，为管理决策提供直接支撑。传统指标体系因数据采集手段有限、分析方法单一，难以满足上述需求，而大数据技术为解决这些问题提供了有效路径。

### 2.2 大数据技术的赋能作用

大数据技术对工程造价指标体系的赋能主要体现在三方面：其一，数据整合赋能，打破“信息孤岛”，整合结构化数据（工程清单、造价报表）与非结构化数据（设计图纸、施工日志），实现全流程数据的集中管理；其二，分析建模赋能，通过数据挖掘、回归分析等技术，从海量数据中提取核心影响因素，量化指标权重与计算方法，提升体系科学性；其三，动态应用赋能，依托实时数据处理与可视化技术，实现指标动态更新、智能预警，推动造价管理从“静态分析”向“动态管控”转变。

### 2.3 体系构建原则

基于大数据的工程造价指标体系构建需遵循四大原则：一是实用性原则，指标设置贴合工程实际，计算方法简便可操作；二是系统性原则，覆盖全生命周期、全成本维度，指标间层次分明、相互支撑；三是动态性原则，建立实时更新机制，适配市场与工程动态变化；四是可扩展性原则，预留指标拓展空间，适配不同工程类型与管理需求。<sup>[1]</sup>

## 3 基于大数据的工程造价指标体系构建

### 3.1 体系整体框架

结合工程造价管理特点与大数据技术优势，本文构建三维工程造价指标体系，整体框架如图1所示。该体系以“指标维度-数据层级-应用场景”为核心架构：指标维度为体系核心，包含基础指标、过程指标、效益指标三大类；数据层级为体系基础，涵盖原始数据层、清洗处理层、指标建模层，实现数据从采集到建模的全流程转化；应用场景为体系目标，覆盖造价预测、过程控制、结算审核、投资评估四大核心场景，确保体系落地应用。

### 3.2 核心指标分类

#### 3.2.1 基础指标

基础指标是反映工程成本基本构成的静态指标，如同工程造价的“基因图谱”，基于设计蓝图的精密勾勒与招投标阶段的激烈博弈数据构建而成。它细致入微地拆解着成本

的肌理，包括成本构成指标——人工成本占比，那是工地上挥汗如雨的建设者们用双手与时间书写的数字，每一分都凝聚着劳动的价值；材料成本占比，从钢筋水泥到砂石骨料，每一种建材的价格波动都牵动着成本的神经；机械使用费率，则记录着塔吊的轰鸣、挖掘机的咆哮在工地上奏响的效率乐章。<sup>[2]</sup>同时，工程特征指标同样不可或缺，工程规模以千米为尺丈量着宏伟蓝图的轮廓，结构类型从框架到剪力墙，决定了建筑的骨骼与形态，地域标准则融入了当地的气候、地质与文化印记，让每一座建筑都带着独特的地域风情。

#### 3.2.2 过程指标

过程指标是反映施工阶段造价动态变化的“晴雨表”与“导航仪”，它如同一位敏锐的观察者，实时捕捉着施工现场的每一个细微变化，基于施工日志中跳动的实时数据与市场行情中瞬息万变的动态数据构建而成。成本波动指标中，材料价格波动率如同市场的脉搏，钢材、水泥等大宗材料的价格起伏，牵动着整个工程的成本神经；人工成本调整率则反映了劳动力市场的供需变化与生活成本的涨跌。进度匹配指标则像一双慧眼，审视着造价与进度的和谐度，造价偏差率揭示了实际花费与计划预算之间的差距，进度造价协同系数则衡量着两者是否步调一致，避免出现“钱花了进度没跟上”或“进度快了钱跟不上”的尴尬局面。资源消耗指标更是对施工效率的直接拷问，材料损耗率记录着每一份建材的“牺牲”，机械利用率则衡量着大型设备的“工作强度”与“闲暇时光”。

#### 3.2.3 效益指标

效益指标是衡量造价管理成效与投资回报的“标尺”与“成绩单”，它如同一位公正的裁判，在工程结算的尘埃落定与运营阶段的持续运转中，基于详实的结算数据与运营反馈数据构建而成。造价控制指标中，结算偏差率是检验前期估算与最终结算之间差距的“试金石”，成本节约率则闪耀着造价管理智慧的光芒，每一分的节约都是对资源的最优配置。投资效益指标则将目光投向更长远未来，投资收益率如同一盏明灯，照亮了项目的盈利前景；单位产能造价则精打细算地衡量着每一单位生产能力背后所付出的成本代价。这些效益指标如同投资评估的“量化罗盘”，为决策者提供了清晰的量化标准与科学的评估依据，让每一笔投资都能得到最客观的审视与最合理的回报，确保工程不仅建得成，更能建得好、管得好、效益高。

### 3.3 数据处理流程

数据层级的核心流程为：原始数据层通过OCR识别、数据库对接、网络爬虫等技术，采集工程全流程多源数据；清洗处理层运用大数据技术进行去重、纠错、标准化处理，形成高质量数据库；指标建模层通过回归分析、层次分析法等，构建指标计算模型与权重分配体系，实现数据到指标的转化。

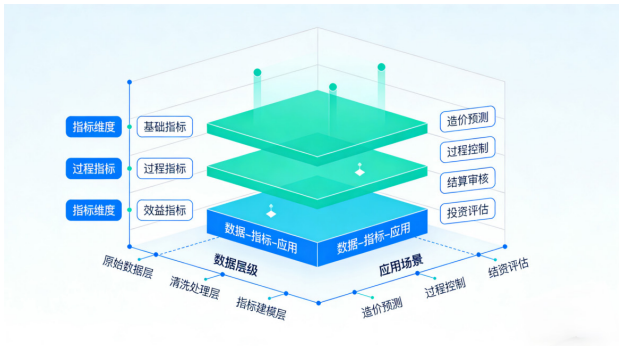


图 1 基于大数据的工程造价指标体系整体框架图

## 4 指标体系的实施路径与应用场景

### 4.1 全流程实施路径

#### 4.1.1 数据采集与整合

构建多源数据采集体系，覆盖工程设计资料、招投标文件、施工记录、结算报表、市场价格数据、政策文件等，通过数据库对接、OCR 识别、网络爬虫等技术实现数据实时采集，依托云计算平台构建统一数据仓库，打破数据壁垒。

#### 4.1.2 数据处理与建模

运用大数据清洗技术去除冗余、错误数据，将非结构化数据转化为结构化数据，制定统一数据标准；采用层次分析法、熵值法确定指标权重，通过回归分析、机器学习构建指标计算模型，形成动态更新的指标模型库。<sup>[1]</sup>

#### 4.1.3 指标应用与优化

搭建可视化应用平台，将指标体系应用于造价预测、过程控制等核心场景，通过图表化展示实现数据直观呈现；建立动态优化机制，根据市场变化、工程反馈实时调整指标参数与模型，确保体系时效性与准确性。

### 4.2 核心应用场景

#### 4.2.1 造价预测场景

在设计阶段，依托一套精密的指标体系，如同一位经验丰富的老匠人翻阅着厚重的工程典籍，将同类工程的历史数据——那些沉淀着无数智慧与教训的数字、图表与案例——与当前工程的特征指标——从建筑体量的巍峨轮廓到材料选用的细微考量，从地域气候的微妙影响到功能布局的精妙构思——进行深度整合同步。通过先进的模型计算，仿佛在脑海中构建起一座虚拟的工程大厦，精准预测出每一笔造价的走向与归宿。系统会细致地对比不同设计方案的造价指标，如同在天平两端放置不同的方案蓝图，让成本的差异清晰可见，为方案优化提供坚实的数据支撑。

#### 4.2.2 过程控制场景

施工阶段，造价管控如同一位敏锐的哨兵，时刻守护

着项目的经济防线。通过实时监控过程指标，系统如同拥有无数双眼睛，密切关注着材料价格的每一次波动——是市场风云变幻带来的上涨，还是供应链优化带来的下调；资源消耗情况——每一块钢材、每一方混凝土是否被高效利用，是否存在浪费的苗头；以及造价偏差——实际支出与预算之间的微妙差距。当这些关键指标如同警报器般超出预警阈值时，系统会立即发出提醒，如同在喧嚣的工地上敲响一记清脆的警钟。管理人员接到信号后，能迅速采取纠偏措施，及时调整策略，避免小偏差演变成大问题。

#### 4.2.3 结算审核场景

结算阶段，如同一场精密的财务体检，通过将基础指标与效益指标进行深度对比分析，如同用显微镜扫描数据肌理，快速核查结算数据的合理性。系统能敏锐捕捉到那些隐藏在数字背后的异常波动——重复计费如同账目中的冗余代码，在对比分析中无所遁形；成本虚高则像工程图纸上的多余线条，在数据比对中暴露无遗。这不仅大幅提升了结算审核的效率，让原本可能耗时数周的繁琐工作缩短至数日，更显著增强了审核的准确性，如同为工程造价装上了精准的导航系统，确保每一分投资都合规、透明，真正实现“钱花在刀刃上”的严谨把控。

## 5 结语

本文以大数据技术为坚实支撑，如同为工程造价管理插上了智慧的翅膀，构建了一套包含基础指标、过程指标、效益指标的三维工程造价指标体系。这套体系不再是传统静态的数字罗列，而是像一个动态生长的智慧大脑，设计了从数据采集到应用反馈的全流程实施路径，并清晰勾勒出核心应用场景的实践蓝图。它成功突破了传统指标体系固有的静态局限，实现了造价数据从多源异构到统一整合的华丽转身，从单一维度到多维联动的深度分析，以及从粗放管理到精准决策的高效应用。这一体系如同为建筑行业的造价管理注入了强劲动能，有效提升了其科学性与高效性，使其在复杂多变的市场环境中更具竞争力。它不仅是工程造价管理领域的一次革新，更为整个建筑行业迈向数字化、智能化转型提供了至关重要的理论支撑与实践指引，点亮了行业转型升级的智慧灯塔。

### 参考文献

- [1] 李栋.基于大数据的公路施工项目成本管理研究[D].兰州交通大学,2024.
- [2] 蒙玉艳.数字化转型下永辉超市的供应链成本管理效果评价研究[D].兰州财经大学,2024.
- [3] 王帅.智慧工地背景下高校基建项目绿色施工评价研究[D].中南大学,2023.

# Optimization and Innovation of High-Rise Building Design Strategies Under the Concept of Green Architecture

Xingshun Fei

Shandong Provincial Transportation Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250001, China

## Abstract

Against the backdrop of global efforts to address climate change and promote sustainable development, the green transformation of high-rise buildings is of paramount importance. This paper systematically explores a strategic framework for the deep integration of green building concepts with high-rise architectural design. It analyzes the enhancement strategies for key approaches, including energy strategies, resource strategies, environmental space strategies, and operational management and maintenance strategies in high-rise buildings. Additionally, it offers perspectives on the development direction of digital technologies, the application trends of new materials, and integrated systems. The study aims to establish a green design framework for high-rise buildings that transitions from passive adaptation to active creation, providing theoretical references and practical guidance for achieving a balance between environmental, social, and economic benefits in practice.

## Keywords

Green building; High-rise buildings; Design strategies; Optimization; Innovation

## 绿色建筑理念下高层建筑设计策略的优化与创新

费兴顺

山东省交通规划设计院集团有限公司, 中国·山东 济南 250001

## 摘要

在全球应对气候变化与推进可持续发展的背景下, 高层建筑的绿色转型至关重要。本文系统探讨了绿色建筑理念与高层建筑设计深度融合的策略体系。主要针对高层建筑中的能源策略、资源策略、环境空间策略、运营管理维护策略这些主要策略的提升策略进行了分析。并对数字化技术的发展方向、新型材料的应用趋势、集成系统等方面提出了展望。论文旨在构建一个从被动适应到主动创造的高层建筑绿色设计框架, 为在实践中实现环境效益、社会效益与经济效益的平衡提供理论参考与实践指引。

## 关键词

绿色建筑; 高层建筑; 设计策略; 优化; 创新

## 1 引言

在城市的快速发展中, 高层建筑由于其高效的特点也被大量建造, 但其建设与运行也带来了巨大的资源消耗与环境压力。传统的设计理念也很难符合低碳发展的要求以及提高人们的生活质量的需要, 在这样的情况下绿色建筑设计理念就给高层建筑的发展指引了道路, 那就是实现建筑全寿命周期内的节能、环保、健康舒适。

## 2 绿色建筑理念与高层建筑设计的基础理论

绿色建筑思想与超高层建筑设计相结合, 来源于解决当下面临的问题以及对长远未来发展的迫切要求。超高层建筑由于体型庞大, 能源相对集中以及与城市环境高度相

关, 传统建筑模式下容易造成极大的能耗和环境污染, 而绿色建筑设计的思想则是力求建筑物在其整个生命周期中能够最大限度地节约资源、保护环境和减少污染, 从而为人们营造健康、适用和高效的使用空间。两者之间的结合的理论依据源于对超高层建筑的理解, 即将其看作是一个复杂的有机的生命体而非单纯的人工建造物, 即设计需要从宏观角度出发, 首先考虑建筑自身的体形、平面以及外维护体系对气候的适应性, 比如利用自然通风与采光来减少机械能耗等方式, 称之为“被动式”的优先原则; 其次强调“因时、因地制宜”, 不同的地域气候条件、文化背景和自然资源等应直接影响建筑自身的形状、外表皮, 乃至空间形式的选择等等; 在此基础上再合理利用各种主动式的技术措施, 例如使用可再生的新能源、智能化系统来进行性能上的补充, 最终目的是使人们、建筑和自然相互依存共处, 减少环境污染的同时提高人们的健康度与舒适度, 达到环境效益、社会效益和经

【作者简介】费兴顺(1985—), 男, 中国山东德州人, 本科, 高级工程师, 从事建筑工程设计研究。

济效益的三效合一<sup>[1]</sup>。

### 3 高层建筑绿色设计的核心策略体系优化

#### 3.1 能源策略的优化与创新

大型楼宇的能源战略调整,则需要转换观念,由一味依靠高耗能机器保证运转变为首先通过自身及大自然的力量来削减需求、并最大程度地去满足这些余下的所需,也就是说,大宅的表层不再只是隔绝外界的一道墙,而是变成一部具有反应性的“环境控制器”,高性能的外围护体系是最基本的要求,高性能双层乃至几层的玻璃幕墙加上根据太阳的高度和辐射强弱自动进行调节的光电可调外遮阳,可以在夏天阻挡炽烈的阳光照射,又在冬天放阳光进来,大大节省了空调和供暖的消耗,更为先进的设想则是使大楼表面可以呼吸甚至发电,安装有能够将吸收的太阳能转化为电能的光电转换材料的外墙或者玻璃窗,将能够使建筑自给自足<sup>[2]</sup>。

当削减了能源需求以后,对于仍需的能源供给进行绿色化改造。比如选择超高效制冷制热机组、水泵风机、照明系统等等,另外还要充分挖掘高层建筑先天性的优势条件——竖向空间,大范围集成新能源。屋顶和适宜的立面安装太阳能板已是常见做法,而在风资源丰富的地区,经过严谨评估和精音设计的小型风力发电装置,也可能成为补充。更先进的尝试还包括,将电梯下降以及排风系统中蕴含的能量加以回收利用。而所有这些设施并不是单独运作的,它们由一个聪明的“头脑”进行指挥,也就是楼宇能源管理系统。该系统可以实时监测室内外环境温湿度、光照强度、人流量大小等参数并控制设备工况,实现能源在最必要时点、最必要场所的应用,杜绝一切不必要的损耗,最终目的是使建筑物越来越接近实现“零能耗”“正能量”。

#### 3.2 资源与环境策略的优化与创新

高层建筑的能源消耗贯穿建筑物整个寿命周期,绿色设计理念注重从源头消减、过程循环利用以及末端生态化补偿三维度进行综合性优化。对于水资源而言主要是“分质供水、循环再利用”,安装节水设备、使用空气注入式节水龙头等方式从源头降低用水量,同时可以将屋顶及露台的雨水收集起来经初步净化之后对建筑内的景观绿化、路面清洁进行浇洒灌溉,更为重要的是设置中水回用系统,在将日常生活中的洗脸洗手洗澡等活动产生的灰色污水统一回收并加以净化处理达到一定的水质要求之后用作冲洗马桶或者是冷却塔补水等用途。这样也极大地减少了对城市市政水源的需求和消耗。

在材料资源上,战略核心点在于实现“低碳循环”。优先采用本地出产材料,降低运输产生的碳排放量;广泛采用含再生成分的建筑材料,例如再生金属、再生骨料混凝土等等;同时鼓励推行结构设计及内装系统的工业化、模块化,就如同搭积木一般,在工厂提前预制好各个模块,到施工现场进行组装拼接,这样可以大大降低建造过程中产生的浪费

以及扬尘污染,将来如果需要改建或者拆除建筑物的时候,大量的模块都能够被整体拆下,回收更新再次被利用起来,从而大幅提升资源利用率。另外高楼大厦虽然占地面积小,但是不应该成为一座生态上的“孤岛”,可以通过合理规划立体化的绿化系统——屋顶花园、空中平台的景观绿化、墙体垂直绿化等一系列手段来重新给城市带去自然界的生命力。它们不仅能够降低城市的热岛效应,调节局部小环境的微气象,也可以为各种鸟儿和虫子们提供新的生存环境,更为城市居民带来可贵的放松身心,享受大自然的地方,真正意义上实现了对城市建设用地生态价值的创新性补偿的效果。

#### 3.3 空间与室内环境质量策略的优化与创新

绿色高层建筑的价值归根到底是为了人服务的,它空间及环境品质的设计宗旨在于营造一个健康,舒适并且具有活力的空间场所而不仅仅是提供一个简单的庇护之处。在设计中通过对平面排布的精心组织、利用采光天井、光线导引设施,甚至是特殊的反光体系等措施都可以使自然光照最大限度地深入建筑当中,降低人工照明需求的同时可以调整人体自身的生物钟。

在此基础上,室内的环境质量也需要精准化管理。选择低挥发性的绿色环保建筑材料、装饰材料及家具,从源头减少甲醛、苯等有毒物质的排放,保证空气质量。分区空调加新风系统的使用,能够使各个空间的温湿度调节均匀并且比较恒定。除此之外,对于声环境以及光环境的设计也是必不可少的,比如利用隔音材料降噪、使用防眩灯来达到灯光的柔和均匀等等。最终,好的绿色空间还要有弹性和可变性。运用开放式的大空间以及灵活可变分隔体系,允许空间随时间更替发生变化,延长建筑寿命,并设置共享中庭、绿色露台等增进沟通的非正式场所,注重人的心理状态和社会交往,打造一个人本的高水准的生活及办公氛围。

### 4 面向未来的高层建筑绿色设计创新方向

#### 4.1 数字技术驱动下的设计创新

未来超高层建筑设计会深度融合数字化智能化基因,颠覆了以往的设计手段,主要是基于算法大数据来进行性能化创造,建筑师不需要单纯依靠经验以及固定图纸,而是使用参数化设计软件,把建筑形式、部件与采光、通风、能耗等各种性能指标动态链接起来,调整几个变量参数,电脑就可以很快地计算出上百个不同的方案,并对其进行实时模拟,从中选出最符合当地气候和场地条件的性能最佳的形式,比如能得到最好自然通风或者减少最多太阳辐射热量的曲线幕墙。人工智能的应用将会使这个过程进一步加快,机器可以先学习大量优秀的绿色建筑样本,在初期阶段帮助设计人员做出既美观又具有良好性能的概念设计,还能为复杂能耗系统的运行进行分析判断<sup>[3]</sup>。

更大的影响将在建筑物落成之后产生。基于物联网传

感器全方位地捕捉大楼运转时的“心跳”，生成一个与现实中的大楼一模一样的“数字双胞胎”。这副克隆体忠实记录着关于大楼的一切，无论是主体的受力情况还是室内的小环境都一览无余。管理者可以在虚拟空间里对大楼做“兵棋推演”，例如测试不同的天气状况下调节玻璃的收放或者空调的策略会产生什么后果，预判出故障隐患，在“被动修缮”转为“主动防护”的智能管理时代到来前做好准备。信息技术最后把设计、建设、使用整个生命周期都连接在一起形成封闭环路，使绿色指标不只是停留在效果图层面的纸面工程，而是能真实落地并在楼宇几十年岁月中得到最准确的贯彻执行和不断完善。

#### 4.2 材料与结构技术的创新应用

材料与结构体系的变革，正在最根本上改变着摩天大楼这一物种之“基因”，让它变得更加轻盈，更加绿色，更有生命力。未来的重大创新在于开发新型主体建筑材料，比如颠覆性的低碳水泥和混凝土技术等。这些材料能够大量地捕获固定工业化排出来的二氧化碳，或者通过调整化学组分而显著减少生产和使用过程中所消耗的能量和排放的碳，从而实现从建筑物最大的材料构成载体上对碳排放进行削减。与此同时，现代的工程木材，如交叉层积木材，其承重能力已经可以媲美传统钢结构或钢筋混凝土结构，甚至用它建造一座“木结构超高层”也并非不可能。而木材在生长过程中捕获的碳被锁定在建筑物内长期保存下来，让建筑变成一个会呼吸的“碳汇”。

与新材料同步而来的是建造方式的革命性变化。装配式模块化建造将如生产精密汽车一般将标准住宅或者办公室单元模块在工厂加工完成之后再运输到工地现场进行像堆积木一样的快速吊装拼接。这样既可以最大限度地保障品质、降低工地现场的物料损耗以及尘土噪声等污染程度、加快进度；更为重要的是为可逆式设计、逆向建造提供了可能。在建筑使用功能转变以及生命周期结束之际，能够将建筑结构有计划的、无损地拆除并加以分类，成为高价值原材料再次投入新的建筑设计建造流程之中，真正实现资源循环利用，完全摒弃大规模拆建的做法<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 系统整合与跨尺度协同

未来绿色超高层建筑也将突破单一优化的状态，而将成为智慧城市建设中的一个积极、活跃的、可以互动的“细胞”，创新发展方向是拆除建筑物与其外部环境之间存在的

隔阂，实现在更高层面上对能量与物质的互联互通互用，比如：建筑物不仅是作为能耗的终端，而且可以利用自有的智能化微电网与周围社区进行双向沟通，在发电有余的时候向局部网供出电力，在自身需求较大的时候也可以从网中得到补充；而建筑物自身的储能装置（电池或者蓄冷冰盘管系统）更能够对城市的供电起到削峰填谷的作用，提高整个社区能源体系的安全性及可靠性。

这样的合作还体现在垂直的空间与城市功能紧密结合的方式上。借助立体化交通对接和公共空间的设计，高密度塔楼底层大堂、空中花园、屋顶平台均可与城市地铁、人行系统相连通，作为延展性的城市会客厅增加人与人之间的互动和交往，降低对小汽车出行方式的需求；同时在建筑规划层面也会更多地主动考虑其对于城市街坊微环境的作用，建筑形态将会更好地组织通风、缓解城市热岛效应，在更大范围内进行立体绿化从而对城市生态系统进行补充和联系。最终高层建筑将不再是一尊尊独立的纪念碑式的存在，而是作为城市健康与韧性和活力的积极组成部分，真正为城市发展作出贡献，完成从个体绿色向整体共栖的转变。

## 5 结语

总而言之，超高层建筑的绿色化是一个将被动设计、主动技术和智能运营相结合的综合课题，它不仅需要跳出简单的技术堆砌模式，而应该朝着性能优先、以人为本和环境友好的集成创新方向发展，未来的趋势必然更加注重数字化智能化牵引、新材料及新型结构体系应用以及建筑本体和城市建设一体化整合。完成这个转变既离不开在设计层面不断探索和完善的设计手法创新，同时也离不开对于相关规范标准制定和政府扶持鼓励等机制建设的支持，以及相关的学科人才培养，最终促进高层乃至超高层建筑走向真正的“绿色”，并迎接一个可持续发展的未来。

### 参考文献

- [1] 石季立. 数字化转型下建筑管理流程的优化与创新策略[J]. 建筑设计与设计, 2025(5).
- [2] 董征. 绿色建筑理念在高层建筑设计中的运用与实现[J]. 工程抗震与加固改造, 2025, 47(4):10007.
- [3] 张景森, 漆小军. 绿色建筑理念下的建筑结构设计优化对策[J]. 中国高新科技, 2025(14).
- [4] 原树宾. 低碳背景下绿色建筑设计策略与实践研究[J]. 2025(34):101-104.

# Common Fault Diagnosis and Maintenance Technology of Logging Auxiliary Short Sections

Hongqi Liu Changqing Huo Qiuli Zhao Fanyu Meng Zhenxing Li

Tanggu Operation Company Oil Technology Division, CNOOC Oilfield Services Co., Ltd., Baoding, Hebei, 300450, China

## Abstract

Cable logging auxiliary short sections (such as flexible short sections, tension short sections, and anti-rotation short sections) are important connection and functional adjustment units in downhole cable logging instrument strings. Their reliability is crucial to the quality of data acquisition and construction efficiency in cable logging operations with large cable runs. Based on the on-site fault statistics of auxiliary short sections for cable logging with large cable runs in a certain oilfield in 2024, this paper summarizes the diagnostic logic and maintenance technology paths for four typical faults: mechanical fatigue failure, load signal transmission anomalies, mechanical seal degradation, and environmental adaptability decline. For bending fatigue faults in flexible short sections, methods such as bending stiffness testing and fatigue crack detection are used; for sensor anomalies in tension short sections, dynamic load calibration and signal response verification methods are employed; for mechanical seal failure judgment, helium mass spectrometry leak detection and pressure decay curve fitting methods are applied; and for environmental adaptability fault reproduction, a high-temperature and high-pressure cyclic test platform is used for condition simulation. In terms of maintenance processes, mechanical structure repairs follow relevant industry standards; tension sensor calibration adopts a multi-point linear fitting compensation algorithm; high-pressure seal repairs use a metal-elastomer composite seal structure; and system testing includes three reliability verification indicators: bending performance, signal transmission, and vibration impact.

## Keywords

Cable Logging with Large Cable Runs; Auxiliary Short Section; Fault Diagnosis; Flexible Short Section

## 测井辅助短节常见故障诊断与维修技术

刘红旗 霍常青 赵秋力 孟繁宇 李振兴

中海油田服务股份有限公司油技事业部塘沽作业公司, 中国·河北保定 300450

## 摘要

电缆大满贯测井辅助短节(柔性短节、张力短节、防转短节等)属于井下电缆测井仪器串的重要连接和功能调节单元,其可靠性关乎电缆大满贯测井作业数据采集的质量以及施工效率。依据2024年度某油田电缆大满贯测井配套辅助短节现场故障统计,整理出机械疲劳失效、载荷信号传输异常、机械密封劣化、环境适应性衰退这四种典型故障的诊断逻辑及维修技术路径。对柔性短节弯曲疲劳故障,用弯曲刚度测试和疲劳裂纹检测的方法;张力短节传感器异常诊断用动态载荷标定和信号响应校验的方法;机械密封失效判断用氨质谱检漏和压力衰减曲线拟合的方法;环境适应性故障复现用高温高压循环试验平台进行工况模拟。从维修工艺上来说,机械结构修复执行相关行业标准,张力传感器校准采用多点线性拟合补偿算法,高压密封修复使用金属-弹性体复合密封结构,系统测试包含弯曲性能、信号传输、振动冲击这三个可靠性验证指标。

## 关键词

电缆大满贯测井; 辅助短节; 张力短节; 维修工艺

## 1 引言

井下电缆大满贯测井仪器串是由柔性短节、张力短节、防转短节等辅助短节串联而成,具有弯曲补偿、载荷监测、防反转保护、环境隔离等功能,是电缆大满贯测井作业顺利进行的保证。在井深大于5千米的作业环境中,环境温度可以达到175℃,静液柱压力超过140MPa,并且伴随着剧烈

的机械振动和化学腐蚀。2022年开始该系列电缆大满贯测井辅助短节在该油田大规模使用,共完成800多口井次的作业,但是2024年第二季度故障统计显示,该系列短节的平均无故障作业周期已经由设计值的120口井次下降到87.3口井次,因该系列短节故障引起的测井中断、仪器串起下等事件占全年电缆测井作业事故的23.6%。由于故障模式多样,井下环境不能直接观察,因此诊断效率低、维修返工率高的现象暴露出现有诊断流程和维修工艺的系统性缺陷。

【作者简介】刘红旗(1973—),中国河北保定人,本科,从事测井辅助短节研究。

## 2 电缆大满贯测井辅助短节结构原理与故障类型

### 2.1 辅助短节的基本结构与功能概述

电缆大满贯测井辅助短节有柔性短节、张力短节、防转短节等，被广泛地应用到各类电缆大满贯测井作业当中，是连接测井仪器串和测井电缆、保证电缆测井作业稳定性的关键部件。柔性短节的外壳用高强度合金钢锻造而成，内部采用波纹管结构实现弯曲柔性，设电缆穿芯通道与密封接口，两端有标准化的机械接头，可快速对接上下仪器模块。张力短节内置应变式传感器用来监测电缆轴向载荷，防转短节用特殊的机械结构防止下部仪器串旋转扭结电缆。壳体和端盖之间用双道 O 形圈加金属垫环密封，整体密封等级满足井下高温高压环境的要求，可在 175℃ 下承受 140MPa 静压持压要求<sup>[1]</sup>。

### 2.2 核心机械结构与传感器工作原理

柔性短节的主要作用是实现电缆随仪器串的弯曲补偿，允许一定角度的弯曲变形来适配并眼轨迹的曲率变化，减小电缆在造斜段的弯折应力，内置电缆穿芯通道保护测井电缆与信号传输。张力短节的主要功能是实时测量电缆轴向拉压载荷，其传感器为全桥应变片结构，输出信号要求在线性范围内，以准确反映电缆载荷和悬重变化。防转短节利用棘轮机构或者单向离合器结构，正向随电缆牵引旋转，反向旋转时被阻止，保护下部仪器串不受反扭冲击且防止电缆扭结。信号处理电路集成了模数转换、数字滤波、协议编码等功能，ADC 的采样率和分辨率的选择会影响载荷测量的精度，本型号配置的 16 位 ADC 在 125℃ 环境下的有效位数实测只有 13.2 位，温漂效应对弱信号的量化精度造成很大影响。

### 2.3 井下工作环境的主要应力分析

温度应力的累积效应一般都被低估了。井下温度梯度使辅助短节在下井过程中由常温变为高温，热膨胀系数的不同造成壳体、弹性元件、密封件之间产生复杂的热应力场，柔性短节的波纹管在多次温度循环后可能产生疲劳裂纹萌生和扩展。机械振动由下井时仪器串碰撞、并眼摩擦的脉动激励所引起，频谱分析得到主振频率为 80Hz 到 200Hz，存在与短节结构件固有频率耦合的风险。腐蚀环境也不能忽视，井筒流体中 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 在高温高压下渗透性很强，金属壳体和电缆密封接口的电化学腐蚀被加速<sup>[2]</sup>。

## 3 辅助短节典型故障诊断流程与案例

### 3.1 柔性短节故障的表征与诊断步骤

柔性短节故障的典型表征有弯曲刚度异常、电缆穿芯保护失效、弹性元件疲劳开裂等，在 2024 年第二季度返修的 47 台常规短节中，柔性短节机械相关故障占 31.9%。诊断流程从外观检查开始，目视检查波纹管表面有无裂纹、变形或者腐蚀痕迹，电缆密封接口是否完好，外观正常就进入性能测试阶段，施加标准弯矩测量弯曲角度响应曲线，刚度

偏离设计值超过 15% 或者出现非线性特征就判定波纹管有异常。某编号柔性短节在弯曲测试中出现异常响声现象，拆解后发现内部波纹管有疲劳裂纹，高温下材料疲劳寿命降低是主要原因。

### 3.2 张力短节信号异常的诊断流程

张力短节的载荷信号异常一般具有间歇性，静态测试不能再现。诊断策略是用标准载荷逐步增加，逐级检测传感器输出的方法，载荷从零逐渐增加到满量程来检验线性度和灵敏度。频谱分析是定位干扰源的有效方法，一批次的短节载荷数据里出现了周期性的毛刺，频谱上显示干扰的频率是 48.3kHz，干扰幅度与仪器串振动正相关，最终定位到机械振动通过结构传递耦合到传感器。时域相关性分析可以区分随机噪声和确定性干扰，将疑似故障传感器的采样数据和参考通道做互相关运算，相关系数小于阈值就说明该噪声为传感器本身故障而不是共模干扰<sup>[3]</sup>。

### 3.3 机械连接与密封失效的定位分析

密封失效的后果最为严重，一旦井筒流体进入内腔就会造成电缆芯线短路、内部结构的灾难性破坏。氦质谱检漏是检验整体密封性能的最佳方法，在短节充入氦气保压到一定压力后移到检漏仪上测泄漏率，设计指标要求泄漏率小于  $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。压力衰减法用来粗略地确定泄漏部位，在短节内腔充入干燥氮气之后测压曲线随时间的变化，泄漏集中在端盖密封处时曲线呈近似线性衰减，而电缆密封接口处微泄漏时曲线衰减速率会随着压力下降而变慢，呈非线性特征。某编号张力短节检漏结果为泄漏率为  $3.7 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，拆解后发现上端盖 O 形圈表面有径向划痕，是装配时造成的机械损伤<sup>[4]</sup>。

## 4 关键模块维修技术与工艺优化

### 4.1 柔性短节弹性元件维修与更换规范

柔性短节弹性元件（波纹管）的维修严格按照有关行业标准中返工和修理工艺的要求进行。波纹管拆卸要使用专用工装，操作过程根据结构特点的要求来设置，防止二次损伤，配合面有损伤时用研磨或堆焊修复后重新装配。波纹管更换时，优先选用耐温等级不低于原件的材料，特别注意高温疲劳寿命指标，设计寿命不能满足井下循环次数要求的型号不能用在井下仪器上。更换波纹管时要注意刚度参数的一致性，新波纹管要先在测试台上测出弯曲刚度与原件对比，偏差大于 5% 时会影响测井仪器的定向精度，同时保证电缆穿芯通道顺畅无遮挡。

维修过程中防转短节的棘轮机构检查也不能忽略，电缆大满贯测井仪器需要可靠的防反转保护，这些机构的磨损和卡滞要重点检查，维修人员必须按规程进行检查，对磨损超标的棘爪和棘轮要及时更换。张力短节的应变传感器返修工艺比较复杂，需要使用专门的检测设备来检查传感器粘贴和接线状态，传感器脱粘时需要彻底清除残胶后重新粘贴，

残胶会使新传感器贴合不良而影响测量精度。多个传感器组桥的张力短节故障排查,用电阻测量仪做电桥平衡性检测,确定故障传感器位置后更换,新传感器应选用与原规格相匹配的型号,按工艺要求固化防止高温脱落。

#### 4.2 张力短节传感器校准与信号调理技术

张力短节传感器校准的核心就是建立输入电缆载荷和输出电信号之间准确的关系。多点校准法在量程范围内选取若干个标定点,记录各点输入值和输出值后用最小二乘法拟合校准曲线,用残差分析来评价拟合优度,残差的标准差大于满量程的0.1%时,需要增加标定点或者用高阶多项式拟合。温度补偿是井下传感器校准的重要环节,把传感器放入程控温箱中,在井下传感器工作温度范围内每隔25℃取一组校准数据,根据这些数据建立温度-灵敏度、温度-零点补偿表,存于信号处理模块的存储器中。信号调理电路调试主要是增益设置和滤波器截止频率的匹配,前者保证ADC输入范围的充分利用,后者在信号带宽和噪声抑制之间求得平衡<sup>[5]</sup>。

张力传感器的校准需要用经过计量检定的高精度力值标准机作为基准,标准测力仪的准确度等级应比被校传感器至少高出四倍,校准过程中待传感器温度稳定后再采集数据,急速加载或卸载会引入动态误差。应变式传感器有蠕变特性,长时间受力后输出信号会慢慢漂移,校准时需要记录加载后即时读数和稳定读数的差值作为蠕变修正系数。信号调理电路中所用的运算放大器既要考虑低噪声,又要考虑低温漂,斩波稳零型放大器虽然零点漂移很小,但是其内部开关会产生时钟馈通噪声,在低频精密测量场合不如高性能JFET输入型放大器适用。滤波器阶数选择要权衡相位失真和衰减特性,四阶巴特沃斯低通滤波器在保证平坦通带的同时提供足够的带外衰减,拓扑结构便于调试并且对元器件容差不敏感。

#### 4.3 机械结构修复与高压密封工艺

壳体表面的划痕若只局限于表面,则用研磨抛光恢复粗糙度指标,密封面划痕深度大于O形圈压缩量的20%时必须采用激光熔覆或者堆焊工艺进行材料填充后再精加工。高压密封修复采用的是金属-弹性体复合密封结构,内层金属C形环起主要密封作用,耐高温,外层氟橡胶O形圈起冗余密封作用,有自紧效应,该结构重点应用于电缆密封接口和端盖密封。电缆密封接口处密封失效要重新修复密封面或更换密封接头,密封参数要严格控制,防止配合间隙过大

产生泄漏通道。装配时采用与井筒流体相容的全氟聚醚基脂润滑O形圈,按设计规范控制装配扭矩,用扭矩扳手精准操作。

高压密封失效的根本原因大多可以追溯到密封槽的几何精度退化,长期高压循环载荷作用下密封槽侧壁会发生微量塑性变形,间隙增大,O形圈在高压差驱动下被挤入间隙形成挤出破坏。维修时用三坐标测量仪对密封槽尺寸进行全检,槽宽超差时可以采用电刷镀工艺进行尺寸恢复,镀层材料选用和基体相近的镍钴合金来保证结合强度。电缆密封接口的密封也很重要,每次拆装后密封面都会产生微量磨损,累计磨损量超过允许值时必须进行密封面修复或者更换接头,API规范对密封面的磨损极限有明确规定可以作为判废依据。安装前应做外观检查、硬度测试,如果密封件存放时间超过保质期或者硬度值偏离标称范围,就应报废,强行使用老化密封件是造成井下仪器早期失效的常见原因。

### 5 结语

电缆大满贯测井辅助短节(柔性短节、张力短节、防转短节等)的故障诊断与维修技术,是井下电缆大满贯测井仪器可靠性保证体系的重要组成部分,其作业环境处于多物理场耦合之中,且机械结构与信号传输集成度高,维修工艺要求严苛。根据该系列电缆大满贯测井辅助短节实践可知,诊断流程的规范化、维修工艺的精细化可以使得维修返工率由最初的18.7%降低到现在的6.2%,平均维修周期由原来的5.3天缩短到现在的2.8天。未来技术发展方向是智能诊断系统的创建,依靠机器学习算法对以往故障数据进行挖掘,从而实现故障模式的自动识别以及根因分析,探索增材制造技术在复杂结构件修复方面的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 叶高,杨居朋,梁小兵,范修伟,李自成.油田测井无刷直流电机逆变器短路故障诊断及容错控制[J].微电机,2025,58(5):33-38.
- [2] 曲春雨,马梓晋.测井绞车刹车结构故障分析与优化设计[J].石油管材与仪器,2025,11(3):103-108.
- [3] 燕欢庆,黄宇.电缆测井井下张力随深度增加张力减小的故障研究[J].化工管理,2025(15):155-157+172.
- [4] 李辉,陆永钢,刘得军,郝振华.基于故障相关性的随钻方位电磁波测井仪器可靠性失效建模研究[J].地球物理学报,2025,68(2):759-767.
- [5] 韩建,陈着,王业统,曹志民,邓宇.基于RGCVAE的测井曲线重构方法[J].工业仪表与自动化装置,2025(5):87-91.

# Reflections on the Application of Pressure Test Technology for Water Supply and Drainage Pipes in Municipal Engineering

Ye Chen

Jinshan Environmental Protection Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311000, China

## Abstract

Reasonable application of pressure testing technology during the construction of water supply and drainage pipelines in municipal engineering can timely identify defects and deficiencies in pipeline construction and make corrections, thereby ensuring the construction quality of water supply and drainage pipelines and the operational reliability after they are put into use. It can effectively avoid corresponding problems such as leakage, pipe burst and water pollution. The rational application of pressure testing technology can be realized through the implementation of preparatory work before pressure testing, layout of pressure testing system and medium filling, pressure application and graded pressure control, leakage observation and quality judgment in pressure testing. By giving full play to the inspection function of pressure testing technology, construction problems can be detected in a timely manner, so as to ensure the construction quality and subsequent operational safety of water supply and drainage pipelines in municipal engineering.

## Keywords

Municipal Engineering; Water Supply and Drainage Pipelines; Pressure Testing Technology; Key Technical Points

## 市政工程给排水管道试压技术的应用思考

陈业

金山环保集团有限公司，中国·浙江 杭州 311000

## 摘要

在市政工程给排水管道施工期间合理应用试压技术可以及时地发现管道施工中存在的欠缺和不足并作出修正，进而保障给排水管道施工质量，确保市政工程给排水管道投入使用后运行的可靠性，有效规避渗漏、爆管、水体污染等相应问题。可通过试压前准备工作、试压系统布设和介质充注、试压加压与压力分级控制、试压渗漏观测与质量判定等相关工作的落实合理应用试压技术，发挥试压技术的检测功能，及时发现施工问题，进而确保市政工程给排水管道的施工质量及后续的运行安全。

## 关键词

市政工程；给排水管道；试压技术；技术要点

## 1 引言

经济社会的发展、城市化的加剧使得现阶段市政给排水工程的承载压力和运营要求日益提升。为了更好地保障城市供水、排水、污水处理的效率和质量，在加强市政给排水系统建设的同时还需要通过试压技术的合理应用保证市政给排水工程的施工质量。在试压技术应用期间可抓住如下几个关键点确保试压工作能够顺利推进，获得准确、有效的结果。

## 2 试压前准备

试压前准备是确保试压工作能够顺利推进、结果真实

有效的重要基础。在准备工作落实的过程中需要从管道外观与完整性检查、支墩与锚固结构检查、现场实验条件和安全环境检查、试压设备配置与技术交底等多个维度出发开展准备工作。在管道系统外观与完整性检查中需要加强试压区域管道、管件、阀门、接口等相应结构的核查工作。一方面检查管道等相应构件安装位置是否准确。另外一方面，在检查的过程中应紧抓管道接口这一关键部位，分析其焊接接口、法兰接口、橡胶圈接口的成型质量是否达到标准要求，是否存在松动、泄漏等相应问题，养护工作是否落实到位。

在试压工作开展的过程中支墩与锚固结构会承受较大的内水压力，很容易会出现位移等相应问题，因此也需要进行支墩和锚固结构检查，从多个维度来分析支墩施工质量是否达标。在锚固结构检查中应着重关注是否与土体结合紧密、是否存在松动等相应问题。在现场试验条件和安全环境检查中需着重分析该地区是否存在有效围挡，并设置了明显

【作者简介】陈业（1989—），男，中国浙江诸暨人，本科，工程师，从事市政工程给排水管道试压技术的应用思考研究。

的警示标识。判断试压两段的封堵板材、螺栓等相应结构构件是否强度和密闭性达标，能否承受试压工作的正常开展。在此基础之上需要做好场地清理工作<sup>[1]</sup>。

在设备准备及技术交底工作开展的过程中则需要结合试压方案明确试压过程中所需仪器设备，如加压泵、压力表、试压泵、排气阀、排水阀等等，通过检验工作落实确保仪器设备能够正常运转并安装至指定位置。在此之后则需要与施工工作人员进行沟通和交流，让相关工作人员对试压技术方法、给排水工程的工程特点等相关内容都有较为全面的了解，确保作业人员能够严格按照作业规程落实试压作业。

### 3 试压系统布设与介质充注

为确保试压作业开展过程中压力能够均匀传递，避免气堵等相应问题的出现，还需要做好试压系统布设和介质充注。在试压系统布设过程中应严格按照试压方案明确试验段长度，并根据管材性能、敷设方式、阀门位置和现场条件来对试压系统连接布设方案做出适当调整。在此之后做好加压设备和试压管道的连接，可采用高压软管或无缝钢管，并通过密封处理避免渗漏、松动等相应问题。在此基础之上需选择合适位置设置加压泵，便于后续操作、观测和紧急停机。此外，在试压系统布设的过程中还需关注排气装置布置问题。在试压作业开展的过程中管道内部很容易会积存空气形成气堵，空气又具有压缩性，会出现压力上升缓慢、保压阶段压力不稳定、渗透观测不准确等相应问题。为此需要在试压段最高点、局部隆起位置及弯头顶部设置排气阀。在试验介质充注过程中应确保充注的均匀性和连续性，通过缓慢充注保障充注效果。

介质选择上应优先选择洁净水，避免泥沙、腐蚀性介质腐蚀管道影响密封性能。同时在充注期间需要做好系统密闭性检查，尤其是连接部位、封堵部位、阀门部位、接口部位，需通过检查工作开展分析是否存在滴水、渗漏等相应情况。若出现该类情况应及时停止注水并进行整改。在介质充注期间，还需做好温度检测，确保其与环境温度基本一致，避免温差较大致使管道发生形变，产生附加应力，影响结果的准确性和可靠性。在升压系统布置结束以后可通过初步静态检查确保阀门状态正常，排水与排气装置能够正常运转，为后续压力控制及观测工作的落实提供更多保障<sup>[2]</sup>。

### 4 试压加压与压力分级控制

试压加压与压力分级控制是试压作业的核心环节，这将会直接影响试压结果能否有效反馈管道质量。在试压加压的过程中需严格遵循分级加压、逐级加稳压、平稳升压的原则，精准控制升压速度、压力等级、稳压时长，进而保障管道结构安全、结果真实准确。在加压作业过程中需根据施工需求引入专用试压泵，缓慢、均匀、连续地进行升压，根据前期确定的压力等级分步落实升压作业，避免直接升至试验压力，影响检验结果。在分级加压中工作人员需在每升一级压力值后，短暂稳压，对管道状态进行检查，分析是否存在变形、位移、渗漏等相应问题，并观测压力表。若压力表读数稳定则可继续升压。若在升压期间出现压力不上升、上升缓慢、压力表波动较大、局部渗漏等相应情况，则需及时停止升压作业，打开泄压装置缓慢泄压，找到问题根源并分析相应的整改措施，否则可能会出现管道破裂。

不同管材、不同管径、不同使用功能的给排水管道在试验的过程中压力值控制标准是存在鲜明差异的，施工工作人员不得随意调整。在施工期间可安排专业工作人员实时观测压力表读数，精准控制压力，同时可通过两端压力表数值对比的方式及时发现问题。

在降压阶段保压控制是关键技术点。当压力升至指定数值以后则需要进行稳压观测，保压期间需明确保压时间，根据规范要求确定具体数值。同时在保压期间不得落实整改、紧固等相应作业，还需要做好防护工作，避免管道出现碰撞等相应问题。作业人员需实时观测压力变化情况并做好数值记录，同时在该阶段还需要全面检查管道系统，尤其是接口、法兰、阀门、填料函、堵口等相应部位必须着重检查，分析是否存在渗漏、滴水、失衡等相应问题<sup>[3]</sup>。若在保压期间发现压力降超出允许范围则代表市政给排水管道可能存在渗漏、位移或管道变形等相应问题，应停止试验作业，在泄压以后对管道进行全面排查，找到缺陷并对缺陷进行处理，然后再次落实试压作业，直至达到标准要求。为了确保试压加压与分级控制的规范性，获得准确、真实、可靠的结果，相关单位需确立试压加压分级控制操作要点表，明确不同试压阶段重点检查内容，如表1所示，为后续各项工作的落实提供更多的参考和借鉴。

表 1 试压加压分级控制操作要点表

试压阶段	重点检查内容
初始充压阶段	管道整体有无明显晃动、位移，接口部位有无渗漏，压力表读数是否正常
预试验稳压阶段	排气效果是否彻底，支墩、锚固结构有无变形松动，阀门、管件密封状态
正式升压阶段	管道应力集中部位有无开裂、鼓包，封堵结构有无变形，压力上升是否均匀
主试验保压阶段	全段管道有无渗漏痕迹，压力表数值是否稳定，管道线形有无异常变化
泄压检查阶段	管道回弹变形情况，接口密封可靠性，支墩及支撑结构完整性

## 5 试压渗漏观测与质量判定

试压作业的根本目的是通过试压开展来明确市政工程给排水管道的施工质量,因此进行渗漏观测和质量判定是试压作业中十分重要的一环,这将会直接影响试压工作的功能和作用能否有效发挥。工作人员可通过直观观测和数据监测综合判定市政工程给排水管道的密闭性及承压性能是否达到了标准要求,为质量验收提供直观依据。在渗漏观测中,应确保观测范围全面,通过分段、分部位、分重点的精细化检查来及时地发现问题。这就需要观测人员按照预设路线有序落实巡视工作,避免出现接口、管件、阀门、法兰遗漏的问题。在观测过程中需明确哪些部位为薄弱部位,投以更高的关注、更细致的观察,如刚性接口、焊接接口、柔性接口、承插接口等相应位置。同时为确保观测结果真实、准确、可靠,工作人员还需准确分辨明确明显渗漏、轻微渗水、表面失衡等不同的渗漏形态,与此同时做好信息记录明确渗漏位置、时间、程度,为后续整改提供更多的借鉴和参考<sup>[4]</sup>。

而在保压观测阶段工作人员需通过现场管理确保环境稳定,避免因温度剧烈变化、外界震动、人为扰动等相应因素影响观测结果。若管道为地下敷设管道或管沟内敷设管道,这时则需要留出一定的观测空间并配备相应的照明设施。在试压之前,还需要做好管沟内积水、杂物的清理,确保观测视线清晰,能够有效识别渗漏位置,必要的情况下可借助干燥试纸触摸、擦拭等多种方法来辅助观测,避免出现视觉盲区。在保压期间还需定时读取压力表数据并做好信息记录,根据历史记录,明确压力降数值,分析压力降变化是否均匀、稳定。若出现骤降或持续下降问题则可以判定为管道存在渗漏问题或结构缺陷,要求相关单位及时落实修补工作。

在合格性判定中应根据现行规范文件要求来明确合格性判定标准,从综合压力降指标和渗漏表观情况两个维度进行判定。若在观测中发现管道存在微量非持续性的表面失衡且压力降在允许范围内,则可以确认为不影响管道密闭性能能够满足长期运行需求。但若出现持续滴水、线状渗漏、压力降超标等相应情况则意味着试压不合格,必须进行全面排查,找到缺陷位置并进行缺陷处理。在试压合格判定以后,需要整合数据信息,生成试压记录,明确范围、管道类型、设计压力、试验压力、保压时间、压力降数据等相应数据,由施工单位、监理单位、建设单位等多个单位共同审核签字确认<sup>[5]</sup>。

## 6 试压后泄压、排水与现场处置

为确保管道的安全,保障成品质量,在试压结束后还需落实泄压、排水和现场处置等相应工作。在泄压操作的过程中需确保泄压均匀、缓慢,避免瞬时泄压对管道产生较大的冲击和影响,引发管道反弹、支墩受损、接口松动等相应问题。泄压期间可先开启预设的泄压阀门,然后逐步增加泄压力度,控制泄压速度,可通过观察压力表数值来控制泄压速度,降至常压后落实排水作业。

在排水作业开展的过程中应根据前期规划方案,将实验用水排放至指定的排水系统,不得随意排放,引发环境污染问题。排水期间也需要控制排水速度,降低水流冲击力。排水结束以后需要进行管道内部检查、清理等相应工作,并拆卸现场设备。通过现场清理确保现场整洁并消除安全隐患。需注意的是在拆卸机械设备的过程中应做好管道保护,避免管道受到损伤,拆卸下来的设备及管件和材料应分类存放<sup>[6]</sup>。

## 7 结语

市政工程给排水管道试压技术的有效应用可更好地发现管网系统存在的密闭性问题和结构安全性问题,是确保市政工程给排水管道运行稳定性、延长其使用寿命的重要基础,必须引起关注和重视。相关工作人员需要从试压作业流程出发,明确准备阶段、试压系统布设与介质充注阶段、试压加压与压力分级控制阶段、试压渗漏观测与质量判定阶段、试压后泄压、排水与现场处置阶段等不同阶段的工作要点,加强技术控制和技术管理,获得准确、真实、可靠的数据信息。

## 参考文献

- [1] 宋慧立. 市政工程给排水管道试压技术分析 [J]. 居业, 2025, (11): 67-69.
- [2] 马森. 探讨给排水管道试压技术在市政工程项目中的应用 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (19): 95-97.
- [3] 郭涵坤, 韩世诚. 给排水管道试压技术在市政工程项目中的应用 [J]. 新城建科技, 2024, 33 (01): 158-161.
- [4] 崔光强. 市政工程的给排水系统施工中的管道试压技术 [J]. 中国高新科技, 2021, (24): 45-47.
- [5] 陈森茂. 给排水管道试压技术在市政工程项目中的应用 [J]. 工程技术研究, 2021, 6 (02): 84-85.
- [6] 曾志威. 市政工程中的给排水管道试压技术分析 [J]. 建材与装饰, 2020, (21): 230-231.

# Research on Pipe Material Selection and Quality Control Measures in the Construction of Municipal Water Supply and Drainage Engineering

Tang Li

Jinshan Environmental Protection Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311000, China

## Abstract

The selection of pipe materials during the construction of municipal water supply and drainage projects exerts a crucial impact on the operational stability and reliability of such projects after they are put into use. Therefore, it is essential to clarify the key points of pipe material selection and strengthen quality control. Construction teams should adhere to the principles of adaptability, economy and environmental protection, determine the pipe material selection methods in light of different municipal engineering scenarios, and implement quality control through incoming material control, construction process control, finished product protection as well as post-construction maintenance and management. In this way, the overall construction quality of municipal water supply and drainage projects can be improved, which provides a solid guarantee for residents' daily life, the operation of industrial production and the sustainable development of the ecological environment.

## Keywords

Municipal engineering; Water supply and drainage construction; Pipe material selection; Quality control

## 市政给排水工程施工中的管材选择及质量控制措施研究

李堂

金山环保集团有限公司, 中国 · 浙江 杭州 311000

## 摘要

市政给排水工程施工建设期间管材的选择对于给排水工程投入使用以后运行的稳定性和可靠性会起到至关重要的影响。因此明确管材选择要点并加强质量控制是十分必要的。施工团队需坚持适配性原则、经济性原则、环保性原则, 结合不同市政工程场景明确管材选择方法, 并通过进场控制、过程控制、成品保护及后期维护管理落实质量控制工作, 以此来提高市政给排水工程整体施工质量, 为居民日常生活、工业生产运行及生态环境可持续发展提供保障。

## 关键词

市政工程; 给排水施工; 管材选择; 质量控制

## 1 引言

市政给排水工程是确保城市能够正常运转的重要民生工程, 具有水资源输送、污水排放与处理的重要职能, 同时也会影响城市的防洪排涝能力、水资源利用率及城市居民的居住环境, 保证市政给排水工程的施工质量是十分必要的, 而管材选择及质量控制工作的有效落实则可以较好地达成这一目标。

## 2 市政给排水工程施工中的管材选择

### 2.1 管材选择原则

在管材选择的过程中相关施工单位和设计单位应遵循适配性原则、耐久性原则、经济性原则等相应基本原则。适配性原则是指不同管材的性能参数是存在鲜明差异的, 在管材选择的过程中需要充分考量给排水系统的工作压力、介质温度、输送流量及敷设环境, 确保管道材质与其运行环境和运行需求高度适配。例如高压输水管道在管材选择中就应当保证管材的抗压强度, 而污水管道在管材选择期间就需要尽可能选择耐酸碱腐蚀的材料。经济性原则是指在满足运行需求、保障给排水系统运行的稳定性和可靠性的同时充分考量施工成本问题, 包括但不限于管材采购、施工、安装、运输、后期维护所需要消耗的成本和资源, 保障施工的经济效益。但是需要注意杜绝使用低价、劣质管材, 这很容易会增加后

【作者简介】李堂(1989—), 男, 中国安徽蚌埠人, 本科, 工程师, 从事市政给排水工程施工中的管材选择及质量控制措施研究。

期维修成本。

耐久性原则是指在管材选择的过程中应充分考量其使用寿命问题，能够有效抵抗运行过程中的物理磨损、化学腐蚀、生物侵蚀，最大化地减少其更换频率，确保给排水系统能够长期稳定地运行。环保性原则是指在管材选择的过程中应优先选择无毒、无味、可回收的管材，避免在管材使用及回收的过程中出现环境污染问题，这不符合我国“既要金山银山，又要绿水青山”的发展理念。

## 2.2 市政给排水工程常用管材类型及适配场景

就现阶段来看市政给排水工程常用管材包含混凝土管、塑料管、金属管三大类别，不同管材的核心性能特点、适用场景和局限性存在较大差异。例如混凝土管具备高强度、价格低的优势，在市政给排水工程中得到了广泛应用，尤其是大口径污水管道、雨水管道、重力流给排水管道和城市主干道地下敷设管道多应用混凝土管道。但是混凝土管道也存在着一定的欠缺和不足，其重量相对较大，因此很容易会增加运输及安装难度和成本，且混凝土管道的抗渗性和抗腐蚀性有待提升，很容易会出现渗漏问题，同时在施工期间也需要

做好防腐处理。

塑料管具有重量轻、耐腐蚀的特性，在中低压给排水管道、住宅小区给排水管网、化工污水输送管道中得到了广泛应用，可以大幅提高施工效率，降低施工压力，但是塑料管道的抗压强度是相对较低的，同时其高温稳定性和刚度存在一定的欠缺和不足，很容易会在紫外线照射下出现老化问题，在施工期间也需要通过设置支撑避免管道安装质量受到影响<sup>[1]</sup>。

金属管道的韧性、抗压强度、密封性和抗震性都是相对较好的，在高压输水管道、城市主干管、过河管道、消防给水管道等对于管道密封性和强度要求相对较高的施工场景中得到了广泛应用。但金属管道存在价格过高的问题，同时在投入使用以后很容易会出现腐蚀性问题，需要加强维护，很容易增加维护成本。此外，金属管道的重量也相对较大，在安装期间需要配置专业设备。不同管材的核心性能特点是存在鲜明差异的，如表1所示，施工单位需要根据施工需求及市政给排水管道的运行环境和使用方向具体问题具体分析做好管材选择。

表1 管材类别、主要子类及核心性能特点

管材类别	主要子类	核心性能特点
混凝土管	钢筋混凝土管、预应力混凝土管	抗压强度高、刚度大、价格低廉、耐久性强
塑料管	PVC-U管、PE管、HDPE管、PPR管	重量轻、耐腐蚀、抗渗性好、连接便捷、内壁光滑阻力小
金属管	球墨铸铁管、钢管	抗压强度高、韧性好、密封性强、抗震性能优异

## 3 市政给排水工程施工中的管材质量控制措施

### 3.1 原材料进厂质量控制

原材料质量是给排水工程施工质量的重要基础，加强原材料进场质量检验是十分必要的，可从如下几点着手做出优化和调整。首先，施工单位在管材选择的过程中还需要做好市场调查，尤其需做好供应商调查，确保供应商具备相应的资质且信誉良好，综合考量供应商递交的报价及供应商提供的管材质量，选择合作商，签订供应合同，并在合同中明确性能参数、质量标准、检验方法和验收要求。

其次，在材料进场期间需做好管材的检测和分析，通过外观检测及时地发现管材表面裂纹、凹陷、气泡、划伤等相应问题，并分析管材的尺寸、壁厚、长度是否达到了标准要求。在外观检测上，不同管材的检测要点是存在鲜明差异的。例如若在给排水工程中选用的管材为混凝土管，这时应着重关注其外观是否密实，是否存在露筋、蜂窝麻面等相应问题。若管材为塑料管则需做好其颜色均匀度的分析，判断是否存在色差并紧抓接口这一关键部位判断接口是否光滑。若选用金属管材则需着重关注其防腐层是否完好，是否存在防腐层脱落等相应情况。在此之后则需按固定比例抽取样品并送至第三方机构进行检测，检测项目包含但不限于抗压强度、抗折强度、抗渗性能、耐腐蚀性能、密封性，具体应根据《给水排水管道工程施工及验收规范》《混凝土和钢筋混

凝土排水管》等相应的标准要求。若在检验的过程中发现材料质量不达标应及时退回给供应商，要求供应商更换合格产品<sup>[2]</sup>。

在施工期间需通过台账建立记录管材信息，如名称、规格、数量、生产厂家、进场时间、检验结果等等。这一方面可以为后续的使用管理提供更多帮助，避免不必要的资源损耗，要求施工单位严格按照前期规划支取管材。另一方面也可以为质量追溯提供更多帮助，若出现管材质量问题则可通过查询台账信息来及时明确其质量问题的构成原因并寻找相应责任人。此外，在材料管理的过程中还应注意运输和储存问题。在运输的过程中应采取必要的保护措施，避免管材在运输期间出现形变、性能受损等相应问题。在存储期间同样需做好管材的存储环境管理，根据管材的性质、材质特点明确存储管理的重点与核心。同时为避免出现管材形变、性能受损等相应问题，在存储期间应分类存放管材，并尽可能规避火源、热源和腐蚀性物质。若选用塑料管则需避免阳光直射。若选用混凝土管和金属管，则需要做好防腐防潮处理。在正式应用之前还需通过二次检验确保材料质量性能达标<sup>[3]</sup>。

### 3.2 施工过程质量控制

加强施工过程控制也是十分必要的，而在市政给排水工程建设期间需要注意的施工质量问题相对较多，需从不同

环节出发明确施工技术要点,加强技术管理,避免质量问题的出现。

在管材敷设环节需要做好技术交底,保障相关工作人员对于设计图纸和施工方案有较为全面的了解,尤其需要掌握敷设坡度、埋深、走向等相应施工技术内容。敷设前还需要做好沟槽验收工作,确保沟槽基底平整、夯实,承载力能够满足设计要求。若发现该地区为软土地基,存在不均匀沉降问题,可通过换填、夯实、铺设砂石垫层等多种方式来保障其承载力,避免因不均匀沉降导致管道开裂问题。管道敷设期间需坚持轻拿轻放的原则,避免管道与沟槽壁或其他硬物接触出现缺口。同时在敷设期间应与管道接口处预留出一定的操作空间,为后续的连接施工提供更多的帮助。若在施工建设的过程中引入了大口径管材或管材重量相对较大,这时则需要采用专业设备落实吊装作业。同时在吊装的过程中应当合理选择吊具及吊点,避免因受力不均出现损坏问题,吊装速度需要做好控制,保障吊装作业匀速缓慢<sup>[4]</sup>。

在管材连接环节需要根据不同管材的类型来对连接方式作出适当调整,严格按照施工规范和施工要求进行操作保障管道连接质量。例如在混凝土管连接上多选择承插式接口,在连接的过程中应当做好接口清洁工作,确保接口无杂物,然后明确橡胶圈的安装位置并做好橡胶圈的质量检查,避免橡胶圈出现安装错位、扭曲变形等相应问题。在此之后引入水泥砂浆或密封膏对接口缝隙进行填充,保障接口的密封性和整体性。若在施工建设的过程中引入了塑料管,如PE管和HDPE管,这时在连接方式选择上可以以热熔连接或电熔连接为主,在连接前也需要做好管道口的清洁工作,去除油污、灰尘,在连接的过程中应做好热熔温度与时间的控制,保障融合紧密,避免出现虚焊、漏焊等相应问题。若选用PVC-U管可采用粘接连接的方式,引入专用粘接剂保证粘接剂涂抹均匀,插入后保持一定时间确保固化效果。若选用的管材为金属管材,如球墨铸铁管,这时则可采用承插式接口,在做好橡胶圈检测工作以后将橡胶圈安装至指定位置。若为钢管则可以通过焊接或法兰连接的方式来进行管道连接,焊接过程中需做好焊缝检查,确保焊缝饱满,避免出现夹渣、气孔等相应缺陷。若选用法兰连接,则需要加强螺栓紧固力度的控制,并且严格按照施工规范和施工要求安装密封垫片<sup>[5]</sup>。

做好接口密封质量管控是十分必要的。在接口密封质

量管控的过程中相关工作人员需要对接口材料进行检验,尤其是橡胶圈、密封膏、粘接剂等等,确保材料质量性能达标,没有老化、破损等相应问题。在接口操作的过程中保障连接紧密,若涉及到水泥砂浆密封等相应工作还需通过养护工作的落实确保砂浆强度。2.3 成品保护和后期维护

在管材安装结束以后做好成品保护和后期维护也是十分必要的。首先需要在管道安装结束以后、沟槽回填之前对管道进行临时性保护,避免管道受到挤压或出现碰撞问题。对于已安装但未进行打压试验的管道需封堵两端接口,避免杂物进入。在沟槽回填期间应通过分层回填、分层夯实的方式保障回填效果,同时需要加强回填土的管控,去除回填土壤中的棱角、硬块,避免损坏接口和管道表面。在后期维护上需建立完善的巡检机制,定期对给排水管道进行检查、保养与维护,及时地发现渗漏、腐蚀、开裂等相应问题,并要求相关工作人员进行处理。还可通过管道检测技术的应用及时发现管道内部堵塞、结垢、腐蚀等相应问题,常用的管道检测设备包含CCTV管道检测机器人、声纳检测设备等,可根据检测需求进行技术选择<sup>[6]</sup>。

## 4 结语

在市政给排水管道施工中管道材料的选择对于市政给排水施工的整体质量会起到至关重要的影响。相关工作人员必须明确管道材料的选择原则,根据施工实际需求选择混凝土管、塑料管、金属管等不同材料,而在施工建设期间则需要从原材料质量检验、施工过程检验、成品保护及后期维护等多个维度出发加强质量控制,保障施工质量和施工效果。

## 参考文献

- [1] 彭琦. 市政给排水工程施工中的管材选择及质量控制分析 [J]. 中国房地产业, 2025, (30): 218-221.
- [2] 成琳超, 王建华. 市政给排水工程新型管材的选择和应用 [J]. 塑料助剂, 2025, (02): 98-101.
- [3] 黄斌, 孙涛. 市政给排水工程施工要点及质检技术研究 [J]. 城市开发, 2025, (06): 141-143.
- [4] 雷治. 市政给排水工程施工中的管材选择及质量控制分析 [J]. 建材发展导向, 2024, 22 (22): 19-22.
- [5] 凌志峰, 刘家明. 房建工程给排水施工安全及质量管控措施研究 [J]. 江西建材, 2024, (10): 85-86+89.
- [6] 姚崇. 建筑给排水常用管材质量检测与技术分析 [J]. 居业, 2024, (05): 230-232.

# Discussion on the integrated construction technology of pile foundation and slope treatment in foundation pit engineering

Wenkang Xue

Middling Coal Jiangnan Construction Development Group Co., Ltd., Meizhou, Guangdong, 514000, China

## Abstract

In foundation pit engineering, pile foundation and slope treatment are crucial components for ensuring the quality of foundation pit engineering and reducing subsidence in the surrounding environment. Traditional separate construction processes involve complex procedures, time and labor consumption, and inadequate coordination, which can easily lead to accidents such as foundation pit instability and slope collapse. Based on actual foundation pit engineering projects, this article explores the main advantages of integrated construction of pile foundation and slope treatment, discusses the technical difficulties, process arrangement, and quality control methods of integrated construction, and proposes solutions to some difficulties encountered during construction. It provides reference experience and technical support for rapid, efficient, and low-cost construction of foundation pit engineering, which is conducive to improving the technical standards for foundation pit construction.

## Keywords

Foundation pit engineering; Pile foundation; Slope treatment; Integrated construction; Construction technology; Quality control

# 基坑工程中桩基础与边坡治理——体化施工技术探讨

薛文康

中煤江南建设发展集团有限公司，中国·广东 梅州 514000

## 摘要

基坑工程中，桩基础以及边坡治理是保证基坑工程质量，减少周围环境下沉的重要部分，在传统的分别施工过程中存在工序复杂、耗时耗力以及协调不到位等情况，容易导致基坑出现失稳以及边坡滑落等事故的发生。文章根据实际的基坑工程，研究了桩基础及边坡治理一体化施工的主要优点，讨论了一体化施工的技术难点，工序安排以及质量把控方法，对于施工中遇到的一些难点提出了处理意见，给基坑工程快速、高效、低成本施工提供了借鉴经验和技术支持作用，有利于完善基坑施工技术标准。

## 关键词

基坑工程；桩基础；边坡治理；体化施工；施工技术；质量控制

## 1 引言

伴随城市化建设深入地下，基坑工程建设体量越来越大，施工环境越来越复杂，周围建筑密集，地下管线错综复杂，这对基坑工程的安全性和稳定性也带来了更高的要求。桩基础既要作为工程基坑支护的一部分，又要作为主体结构的一部分进行使用。边坡治理可以有效的防止基坑坍塌和周边沉降，两者之间是相辅相成的关系，相互影响制约，它们的质量直接影响到整个基坑工程的安全问题。传统的分体施工法存在桩基础和边坡治理各自施工且相互之间的衔接不良问题，容易导致施工中互相影响、拖慢施工进度、增加施工成本等一系列负面问题的发生。所以研究桩基础以及边坡治理一体化的方法，克服分体施工中的不足之处，对于提高

基坑工程施工速度、保证施工安全、减少工程造价有着重要的现实作用。

## 2 桩基础与边坡治理一体化施工的核心内涵与优势

桩基础及边坡治理一体化施工是在基坑工程施工总的安全与经济效益目的下，把桩基础施工同边坡治理施工紧密结合在一起，统一安排施工顺序、共同把控工程质量与安全水平的一种新型施工方式，它就是指要达到“支撑与承载一体、施工与保护并重”的效果，相比于分开来进行的传统施工来说有着明显的技术和经济效益上的好处，是基坑工程高水平施工的一个重要方向。

体化施工的根本意义在于两层意思上：一是功能融合，桩基除了承受主体结构的荷载外还具有挡墙抗滑、抗倾的作用，而挡土墙也与桩基一起共同对周围土进行加固以减小其变形量起到挡墙抗滑、抗倾的效果达到“一桩多用、协

【作者简介】薛文康（1993—），男，中国广东五华人，本科，工程师，从事桩基础、基坑支护、边坡治理研究。

同防护”的效果；二是施工融合，摒弃传统的分开施工的方式，把桩基和挡墙的施工统筹考虑好施工次序施工资源使得两种施工相互之间没有交叉影响从而提高工作效率<sup>[1]</sup>。因此一体化施工的目标就是在保证基坑安全性以及减少周围沉降的情况下节约时间节约费用以达到使基坑工程的社会效益和经济效益相匹配的目的。

相比传统的分段开挖方式，整体式开挖的优点主要有以下几点：第一是提高工作效率，统一布置施工工序，防止桩基施工和边坡治理错峰施工、相互影响，节约了施工等待时间，大大减少了整个项目的工期；第二节省工程费用，节约了重复施工、临时支撑等方面的工作，减少了施工材料、人工及机械方面的支出，同时避免了因交叉施工造成的返工费。

### 3 基坑工程中桩基础与边坡治理一体化施工的核心技术要点

工程桩基础施工技术是工程施工的基础，必须依据基坑土质状况及支护需求确定适合的工程桩类型以及相应的施工方法。常见的有钻孔灌注桩、预制桩、钢板桩等等，其中钻孔灌注桩由于适用范围广、承载能力强而被普遍地应用到基坑一体化施工当中。施工中需要注意以下几个方面：一要对工程桩的具体位置进行精确测量，多次校核保证其偏差值满足相关要求的规定；二是控制好钻孔的速度和方向防止出现孔洞扩大或者坍塌的情况发生；三是保证灌注过程中钢筋笼的下放精度及稳定性；四是注意导管法连续灌注混凝土以防止断桩、夹泥等问题的发生，保证成桩的质量达标并达到一定的强度及完整程度<sup>[2]</sup>。

边坡支护工程施工技术应与桩基工程相辅相成，在桩基的基础上形成一个整体的支护体系，常见的边坡支护方法有喷锚支护法、土钉墙支护法、挂网喷射混凝土支护等。喷锚支护施工时应应对坡面作清理，然后钻孔锚入锚杆，注浆固定之后铺设钢筋网片，喷射混凝土作为支护层，同时锚杆要与桩基进行可靠连接以提高支护整体的协调性能；土钉墙支护适合在土边坡上使用，土钉插入到边坡的土体内进行注浆固定，与坡面的钢筋网片、喷射混凝土相结合共同形成整体支护构造，应注意控制好土钉之间的距离、长度还有注浆的压力大小。

## 4 桩基础与边坡治理一体化施工流程与质量控制措施

### 4.1 一体化施工的标准流程

一体化施工的程序应考虑桩基及边坡防护的一体化，结合工程实际情况适当调整连接节点，保证各环节紧密相扣、顺利实施。主要包括六个主要步骤。首先是施工准备工作，这是整个一体化施工的前提基础，在此之前要全面进行现场勘探，详细了解基坑区域内土壤类型、岩层状况、地下水水位标高、周围建筑地理设施的位置情况等，以供制定桩

基及边坡支护一体化施工方案，确定施工顺序和技术要求、质量标准以及安全措施。施工方案得到批准后对全体施工人员进行技术交底及安全教育，使所有施工人员了解清楚施工工艺流程及各项工序的操作方法。其次为桩基施工过程，使用全站仪精确放设桩基中心位点，多次校核保证其误差值不超过容许范围之内，再进行成孔施工，根据不同地质条件来决定钻机转速以及泥浆浓度，尽量减少孔壁坍塌的可能性，在完成钻孔之后尽快清除孔底残留物质，保证其满足相关标准；严格按照设计尺寸定制钢筋笼子，吊装时找准中心并加以定位，防止浇注时发生偏移现象，利用导管方式进行连续灌注混凝土，在此过程当中注意控制好下料速率及振动密实程度，以免产生断桩或者卡阻等问题，最后按照规定时间养护，待桩身强度增长到规定值之后开展桩身质量检验工作，保证其结构完好无损。第三步是边坡整平处理，桩基完成后对基坑周边边坡表面进行整平，彻底清除坡面上的漂浮物及碎屑石块等，用专业机器调整好坡度大小，使之均匀一致，符合设计规范的要求，为接下来的边坡施工做铺垫，在此期间要做好安全保障措施，避免出现边坡坍塌等情况的发生危及安全<sup>[3]</sup>。第四步是边坡防护工程，根据基坑地层性质和设计标准选择喷锚加固或者是土钉墙等方式来进行防护，并且施工过程中首先要钻入锚索或者打入土钉，控制钻孔深度以及间距，灌注时确保饱满并且压力合适，在凝结稳定之后铺设防护钢筋网片，要做到网面平整且固定可靠，再喷洒一层混凝土作为保护层，确保厚度适宜并与基岩紧密结合，达到桩基和边坡防护相融合的效果。

### 4.2 施工质量控制措施

严格把关一揽子施工方案，在施工前组织相关技术人员对方案的合理性、可实施性以及安全性进行研究分析，尤其注重对施工工艺流程、关键技术指标、质量控制标准和应急预案等方面的检查，针对发现的问题及时修改调整方案使其更加贴近现场情况和设计指标；把好施工材料质量关，对进场的水泥、钢筋、锚杆、混凝土等物资进行取样检验，核实进场材料厂家产品合格证书及检验报告单以防止不合格产品进入施工现场；做好施工所使用的钻孔机械、拌合设备、监测装置等各种施工机械的调试和校正工作，保证机械设备运转状态良好且处于最佳工况下进行工作，满足施工精度、速度的要求；加强对施工人员的专业培训，聘用业内资深人士进行专业技术知识以及质量管理方面的培训，主要强调施工中要注意的一些规范要求、具体的操作要求以及一些需要注意的质量问题，提高工作人员的操作规范性和质量意识，考试通过以后才能开始工作。加大桩基工程各个环节的质量管理力度，在打桩前反复测量校正桩位，在钻孔期间全程监督钻孔倾斜度和钻孔的速度，并在钻孔出现孔壁塌陷、沉泥层较厚等问题时进行处理，对于钢筋笼安放之后要进行检验其准确性与稳定性，在浇筑混凝土的时候严格按照比例配置并采取相应的浇筑方法，做好维护措施，保证成桩质量。

### 4.3 施工安全控制措施

完善安全管理体系,针对一体化施工的特点,建立完整的安全生产责任制,明确各个工种、各个工序的安全责任人,把安全任务分解到每个施工人员身上,做到“个个负责、环环相扣”。建立健全安全生产管理规章制度,安全操作规程和应急预案等;明确施工现场的安全风险源及防范措施、安全操作规程及安全事故应急预案,保证施工管理依法依规实施。施工现场安全保护,施工场地周围应设立明显的安全标志牌,如:禁止标志、警告标志、指令标志等,对施工人员实施警示;施工现场基坑四周应设置围护装置,高度满足规定要求,并设置挡脚板阻止人员坠落;高处作业人员佩戴好安全帽、安全带;安装安全脚手架,保证高处作业安全;施工场地内分段施工,用围挡加以隔开,避免交叉施工带来施工事故;对施工现场机械设备进行检查,做好日常维修保养工作,不得带病运转,减少机械安全事故的发生等等。

## 5 一体化施工中常见问题及优化建议

在基坑工程桩基础及边坡整治一并施工中,由于地质情况、施工方法、人员操作等原因导致出现一系列的质量安全隐患,影响整体施工进度和质量,要对这些问题的原因进行针对性的研究,给出合理有效的改进措施,促进整体施工技术水平的逐步提升。

一体化施工中存在的常见问题是四个问题:一是桩基础与边坡处理配合不当,施工工序安排不合理,容易造成两者相互制约的问题,产生交叉作业,降低支护效率;二是桩体质量问题,有断桩、夹泥以及桩位偏离过大等现象会影响桩体的承载能力和支护作用;三是边坡支护强度不够,锚杆注浆不到位,喷浆层不均匀会存在边坡掉块或局部崩塌的情况;四是监控不到位,监控信息失真或滞后不能准确把握出基坑变型或者边坡滑移情况,很容易发生事故。

针对以上问题,提出如下改进措施:一是在施工组织上,根据基坑开挖地质情况及工程特点,科学安排施工工序,确定桩基础、坡面整治同步施工时间节点,做好两者相互联动施工,减少互相之间影响,提高协同支护能力;二是在桩基施工质量管理方面,严控好桩位放样、成孔、灌注砼等环节,加大对桩身的质量检验力度,对于出现质量问题的桩应及时

进行补强,保证桩体的整体性和强度;三是在边坡治理施工技术方面,加强对锚杆注浆质量把关工作,确保注浆饱满、压力到位,严格要求喷射混凝土质量,确保混凝土厚度一致、与坡面紧密结合,定期查看边坡支护系统状况,发现问题及时处理,消除安全隐患;四是在施工监控管理方面,选择精度高的监控仪器,设立必要的监控测点,动态监测桩位变形、坡体位移、土层沉陷等参数变化情况,做好监控数据记录本,定期分析监控结果,出现意外立即做出应急预案,保障安全施工。

另外,加强施工人员的专业培训,提高施工人员的技术能力和规范意识,做到“质量第一、安全第一”;做好施工过程中现场管理,在每个工序都安排专人负责对质量和安全进行把控,保障施工方案的落实到位;根据实际情况,探索一体化施工技术的应用,推广使用新型建筑材料以及设备工具,加快施工进度,保证工程质量,促进基坑工程一体化施工技术的标准化以及信息化建设。

## 6 结语

桩基工程与边坡治理一体化施工技术是基坑工程高质量施工的一项关键技术措施,对比以往的分隔开施工方式有着高效的施工速度、低廉的工程造价以及良好的稳定性等特点,可以很好地解决分隔式施工造成的协调度差等问题。文中详细阐述了一体化施工的概念与特点,介绍了桩基施工、边坡治理施工及其相互之间的衔接技术难点,提出了该类施工的整体过程与质量管控方案,并对施工过程中存在的问题进行了分析并针对性地给出了改进意见。从实际研究看,合理采用一体化施工工艺可以在很大程度上保证基坑工程的安全可靠,加快基坑工程施工进度并节约工程支出。

### 参考文献

- [1] 李凯,雷斌.填石边坡桩板墙高位预应力锚索栈桥平台顶驱双套管钻进施工技术——以“四川泸州某边坡治理工程”为例[J].广东土木与建筑,2025,32(2):80-84.
- [2] 李凯,雷斌.填石边坡桩板墙高位预应力锚索栈桥平台顶驱双套管钻进施工技术——以“四川泸州某边坡治理工程”为例[J].Gua ngdongArchitectureCivilEngineering,2025,32(2).
- [3] 文张,贾海洋,杨仕波,等.复杂山地边坡基坑支护工程施工技术研究[J].城市建筑,2025,22(S1):56-58.

# Research on Construction Technology and Quality Control Measures of Direct Burial of Municipal Thermal Pipeline

Pu Ge

Tengzhou Thermal Power Co., Ltd., Zaozhuang, Shandong, 277500, China

## Abstract

Direct burial installation of municipal heating pipelines has become a key deployment method in modern urban heating systems, owing to its cost-effectiveness, significant energy efficiency, and durability. To address common challenges during direct burial installation—including pipeline leakage, heat loss, and structural deformation—the paper systematically reviews the installation techniques and proposes comprehensive construction control measures based on practical engineering experience. Key quality control measures are summarized across critical phases such as material selection, trench excavation, insulation and anti-corrosion construction, and trench backfilling and compaction. These measures effectively enhance pipeline operational safety and longevity. The research holds significant implications for improving construction quality of municipal heating networks and reducing long-term maintenance costs.

## Keywords

Municipal heating pipeline; Direct burial installation; Construction technology; Quality control measures; Operational safety;

## 市政热力管道直埋敷设施工技术与质控措施研究

葛普

滕州市热力有限公司, 中国·山东 枣庄 277500

## 摘要

市政热力管道直埋敷设因其经济高效、节能效果显著、耐久性好等优点,已成为现代城市热力系统的重要敷设方式。针对直埋敷设过程中易出现的管道渗漏、热损及结构变形等问题,本文对直埋敷设工艺进行了系统梳理,并结合实际工程实践,提出了全过程的施工技术控制要点。同时从材料选择、管沟开挖、保温及防腐施工工艺、管沟回填压实等环节,归纳了关键质控措施,有效提升了管道运行的安全性与耐久性。相关研究对提高市政热力管网施工质量、降低后期维护成本具有重要意义。

## 关键词

市政热力管道; 直埋敷设; 施工技术; 质控措施; 运行安全性

## 1 引言

城市建设进程加速,市政热力管道建设是城市基础设施建设里面非常重要的部分。直埋敷设方式带来充分降低能耗、减少占地、降低施工和使用成本的很多优势,现已成为国内城市供热管网中主流的铺设方法。住建部门公布的统计数字显示,新建供热管网直埋管道占比逐年增加。供热施工过程中不规范,可能会导致部分直埋热力管道发生漏水、热量散失情况、结构发生形变情况,技术方面困难和质量方面不足严重影响管道整个运行过程的安全以及经济效益。

## 2 市政热力管道直埋敷设的现状与意义

### 2.1 直埋敷设的发展历程与现状

市政热力管道直埋敷设技术在20世纪中期开始出现,早期直埋敷设方法技术水平落后,管道防腐蚀能力差,保温效果差,导致施工质量不高,运行使用效果差。后期因为新型防腐和保温材料的出现,施工工艺变得先进,热力传输技术也得到连续改进,直埋敷设方式管道从无保护的裸管直埋敷设,改进成为现在高效保温防腐结构设计,管道保温效果明显增强,抗腐蚀能力也得到大幅提高。预制保温直埋管、全自动焊接设备以及智能化监测系统的推行推广,明显提升了施工效率和管道运行的安全性。直埋敷设技术已经变为市政热力工程的主流方式,其经济性、可靠性以及对城市建设协调性的优势获得了普遍肯定。

### 2.2 直埋敷设在市政热力系统中的应用优势

直埋敷设在市政热力系统中拥有明显的运用优越性。

【作者简介】葛普(1991—),男,中国山东滕州人,本科,从事市政工程研究。

其节约性强,由于无需建设地面附属设施,削减了建设成本和占地需要,减少整体开支。由于建造方便,可缩减工时,提升效能。相比于常规高架铺设,直埋敷设方法可以减少外部周围对管道的干扰,减少能量损耗,提升能源利用效率。直埋敷设还因其隐蔽性,减少地面设施对城市整体风貌的干扰,提升城市整体美感。直埋敷设方法内置的隔热、防锈措施可进一步延长管道的运用期限,减少后续保养工作负担,为市政热力系统稳定运行给予了保证。

### 2.3 直埋敷设存在的主要技术难题

市政热力管道直埋敷设虽然拥有节约性和施工方便的优点,但于实践中依然存在多项技术难题。直埋敷设的管道容易遭受地下水腐蚀和外部载荷干扰,引起管道泄漏和结构扭曲,影响管道运作可靠性和降低使用寿命。因为热力管道长时间处在高热运转状况,其保温材料的性能和施工工艺对热损控制极为关键,不适宜的选材或应对措施会提高热能损失。地质条件繁杂或施工监测不够、不合理的管沟填埋和夯实方式,或引起地基不平衡下沉,干扰管道运行稳固性。

## 3 主要敷设工艺及关键施工技术

### 3.1 管沟开挖与支护工艺

在城市热力管道直埋施工过程中,沟槽开挖和管沟支撑这两项技术起着关键作用。直埋敷设方式要求地基拥有充足的稳固程度来支撑管道本身的重量以及因为温度变化导致的膨胀和收缩力量,因此沟槽开挖的技术必须安排得合理而且恰当。根据工程项目的实际情况来挑选适合的挖掘机械和施工方式,确保沟槽开挖的整个过程既准确又快速。沟槽开挖的深度尺寸和宽度尺寸一定要完全符合设计标准的要求,这样才能确保后续各个施工步骤能够顺畅进行。支撑沟壁的技术是沟槽开挖阶段里不可缺少的一个部分,必须依据土壤的不同类型以及地下水水位的高低位置来挑选适当的支撑材料和支撑方式,例如采用挡土板支护、槽钢支护、板式支护、钢板桩支撑方式等等,从而有效阻止土壤发生塌陷,同时也防止对其他地下设施造成破坏。于高风险区域,必须开展边坡稳定性评估,且采取合适的加固措施。全面思考管沟的环境影响和施工安全性,保证施工期间对周边设施和环境的负面影响降低到最小。以上工艺和技术不但影响施工质量,还直观关系到管道运行的安全性和耐久性。

### 3.2 管道敷设与接口处理技术

在市政热力管道直埋施工中,管道安装和接口处理技术显得尤为重要。安装管道的过程中,需要全力保证管道中心线的位置与设计图纸上标注的位置达到精确吻合,只有做到这一点才能有效防止因为位置偏移而引发后面一系列麻烦问题。接口处理工作是保障管道不发生漏水现象以及整体性能始终保持良好的核心关键环节。处理接口时,必须挑选出最合适的焊接密封材料,依靠这些材料彻底避免接口位置发生漏水的情况,同时还要利用专业工具进行焊接及保温补

口工作,确保接口处理严密。开展接合工作时,需要完全依据施工规范执行焊接具体操作,只有这样才能让接口部分变得格外坚固,而且能够经受住长时间使用带来的考验。接口处理工作结束后,还需要认真开展详细的检查和全面的测试工作,将检查和测试的具体内容纳入质量控制的完整流程体系之中,确保绝对不出现泄漏或者接错的失误情况,从而保障管道系统实现长期安全且稳定的运行状态。

### 3.3 保温层与防腐层施工工艺

保温层施工工艺和防腐层施工工艺对于市政热力管道直埋敷设方式非常关键。选择保温层材料时需要认真思考材料耐高温性能和阻止热量传导能力,保证管道内部热量不会快速散失出去。经常使用材料包含聚氨酯硬质泡沫保温材料,这种材料阻止热量传导能力优秀,施工操作过程也相对简单方便。施工操作时需要特别关注保温层厚度保持均匀一致,尽可能降低热量散失数量。防腐层施工操作需要依据管道周边具体环境条件挑选合适防腐材料,例如环氧树脂涂层材料,能够有效阻止地下水以及各种杂质对管道表面产生腐蚀破坏。规范施工工艺加上严格质量控制管理能够显著延长管道实际使用年限并且明显提高管道运行期间安全可靠。

## 4 直埋敷设全过程的质量控制措施

### 4.1 材料选择与进场验收控制

市政热力管道安装铺设的时候,选择合适的材料和做好进场验收的控制,是保证施工质量的关键步骤。材料质量的高低会直接决定管道维护的频率和使用寿命长短,因此对材料进行审查是重要的一环。在筛选和采购管道以及相关材料的时候,需要根据所在区域的气候条件和地质环境特点,做出合理的分析和考量,首先挑选抗磨损和抗腐蚀能力较强的高质量材料。必须保证材料完全满足国家制定的标准和设计要求。关于进场材料的验收工作这一环节,需要建立健全的检验流程,仔细核查材料的物理性能和化学性能、规格尺寸大小以及标识和标牌等详细信息,还要采用随机抽样检测的方式,来验证材料的性能指标和合格率是否完全符合标准。于建设期间,保留妥善入场检查记录,且完成材料的保管治理,防止由于外界原因引发材料功能的退化。借助严格的材料挑选与入场检查监管,能够高效提高埋设安装管道的建造品质,给后期步骤的顺畅开展建立稳固的基础。

### 4.2 回填与压实的质量保障

回填和压实属于市政热力管道直埋敷设过程中质量控制最重要部分,直接决定管道能不能长期保持稳定状态,同时有效避免地面基础出现下沉问题。在实际施工过程中,需要挑选合适回填材料,大多数情况下采用颗粒分布良好的中粗砂、碎石或者黏土,严格避免混进有机垃圾以及其他不符合要求的物质。回填工作需要一层一层来完成,每一层厚度必须达到设计文件和相关规范具体要求,这样才能让压实程度完全符合标准要求。压实工作过程中一定要使用和要求相

符合的压实机械，避免不同层之间产生空洞或者压得太过结实的情况。特别对于靠近管道最关键那些区域，比如管道上面部分、下面部分以及左右两侧位置，必须采用人工方式或者小型机械一层一层仔细夯实，这样做就是为了避免伤害到管道本身。整个施工结束以后，可以利用现场测量密实程度这些具体检测方式来进行检查，确保回填和压实质量完全达到设计要求以及规范要求，从而让管道能够长期保持稳定运行状态。

#### 4.3 管道运行前的检测与验收

在市政热力管道直埋敷设过程中，管道运行前的检测与验收至关重要。检测阶段需对管道的耐压性、密封性及热能损耗等指标进行全面评估，确保管道在实际运行中的安全性与功能性。验收环节包括对施工记录的审核，通过无损检测技术验证管道质量，并对接口部位进行专项检查，以杜绝渗漏隐患。精确的监测手段与严格的验收程序能有效提高管道安装质量，减少后期维护压力，保障热力系统的稳定运行。

### 5 管道安全性保障与耐久性提升措施

#### 5.1 防渗漏与防变形技术措施

管道直埋敷设期间，渗漏和结构变形是干扰安全性和耐久性的重要问题。为高效避免渗漏，应在起吊和铺设期间严谨管理管道接口的对接质量，使用高精度对接工具，保障接口贴合严密。焊缝必须通过超声检测和射线探伤等无损检测，以消除隐性缺陷。管道外界的防腐层施工中，应挑选高耐候性材料并确保平整涂抹厚度，以此高效遏制外界腐蚀源的侵入。对于结构变形，管沟底部必须开展严谨的平整和压实处理，以构成平整的承载面，减少因地基沉降导致的应力聚集。碰到较大土压或者复杂地质环境时，务必认真设计一套贴合实际的柔性支撑体系，同时优先选择抗变形能力特别出色的管材。安装工作全部完成后，必须开展压力试验和弯曲测试，用来检查管道在承受压力时的牢固程度。通过实施以上一系列有效方法，可以很好地增强直埋热力管道系统的可靠运行能力以及耐久性能。

#### 5.2 热损控制与节能措施

市政热力管道埋入地下系统内部，管理好热量损失和推行节能措施对维持管网运行效率来说是一个重要环节。选用更优质材料来减少热量损失是一项基础性任务，务必采用能够有效阻挡热量散失的保温材料，例如聚氨酯硬泡或者高密度聚乙烯外护管，只有这样才能保障管道运行过程中热量保持平衡不外泄。施工期间，保温层和防腐层的制作要符合相关标准，接缝位置必须完全密封，整个工程都要做到位，尽量避免热量散失，以免造成不必要的资源浪费。针对弯头、接口这些容易散热的关键部位，结构设计可以进行增加

壁厚等优化处理，同时加强局部的保温处理工作，减少热量散失可能引发的不良后果，确保整个系统运行顺畅无阻。热能的高效转换和输送同样是节能的核心问题，管道走向的设计要做到系统合理，尽可能减少弯曲角度和热桥效应的不良影响，通过这些方法来推动运行过程中能源消耗和相关费用的降低，节约更多宝贵资源。在此前提下，强化运作调控，应用智能型管网监测系统，即时了解热损耗状况，迅速实施调节与保养，能更深层次提高管网的省能成效与运作效能。

#### 5.3 长效运行维护管理机制

规划一套严谨又合适的长期运行和保养管理体系，这是确保城市热力管道保持安全平稳以及长久耐用的最重要部分。建立一套全面的巡查规则，加强智能监控技术的使用，时刻关注管道温度和压力的关键数据，制定详细的应急处理方案，提升应对突发事件的能力，专门负责处理管道老化或磨损的问题，详细记录下管道建设的资料和运行数据，同时提升整个系统的运行效果，确保管道能长期安全地为城市居民提供服务。

### 6 结语

本文聚焦市政热力管道直埋敷设的主要施工工艺及质控措施开展了全面探讨，着眼于实际工程中常出现的渗漏、热损和结构变形等问题，总结构建了全过程施工技术控制要点。借助对材料选择、管沟开挖、保温层铺设及回填压实等关键环节的质量控制，达成了提高管道整体运作安全性与耐久性的目标。探讨结果表明，合理改进敷设流程和细化质控措施，有利于明显减少管网后期维护成本，保证城市热力系统平稳高性能运作。现在在复杂地质条件、非标准施工环境以及新型保温材料的适配性等方面依然遭遇一些局限，相关技术的推广应用还需不断改进。后续研究能更深入研究智慧管网监测手段，和新型环保材料于直埋热力管道之中的应用效果，用以达成市政热力管道构建的绿色化和智能化进步，给予城市基础设施高质量发展提供技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 于柏洋.市政热力管道直埋敷设技术探讨[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2021,(05).
- [2] 姚福海.直埋敷设技术在热力管道施工中的应用分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2021,(03):0287-0287.
- [3] 刘杰.探讨市政热力管道直埋敷设技术[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022,(04):0132-0135.
- [4] 李娟娟.市政热力管道直埋敷设技术研究[J].住宅与房地产,2022,(10):241-243.
- [5] 王彦添.热力管道无补偿直埋敷设技术研究[J].建材发展导向(上),2021,19(08):99-100.

# Application Research of Multi-energy Complementary Distributed Heating in the Upgrading of Central Heating System

Peng Zhou

Beijing Ruihong Kaicheng Technology Co., Ltd., Beijing, 100070, China

## Abstract

Aiming at the drawbacks of the traditional central heating system, such as high return water temperature and low heat utilization rate of the primary network, hydraulic imbalance, uneven heating, serious water loss, high system resistance and extensive regulation of the secondary network, this paper proposes an upgrading scheme of multi-energy complementary distributed heating system. The large temperature difference operation of 90°C/25°C for the primary network is realized through the coupling of heat exchanger and heat pump. An intelligent temperature control model is constructed based on outdoor temperature and historical heating data to optimize the hydraulic balance and pipeline resistance of the secondary network. Engineering examples show that on the premise of no transformation of the original primary pipe network, the heat load delivered by the pipe network is increased by 62.5%, the heating building area can be expanded by 38%, the water loss rate of the secondary network is reduced from 4.2% to 0.9%, the total system resistance is reduced by 28%, and the energy consumption of circulating pumps is reduced by 32%. The scheme achieves the synchronous improvement of energy saving and consumption reduction, load expansion and heating experience, and provides an effective technical path for the transformation and upgrading of urban central heating systems under the dual carbon goal.

## Keywords

Multi-energy complementarity; Distributed heating; Large temperature difference heat transfer; Hydraulic balance; Energy saving and consumption reduction; Heating capacity expansion

## 多能源互补分布式供热在集中供热系统升级中的应用研究

周鹏

北京睿弘恺诚科技有限公司, 中国 · 北京 100070

## 摘要

针对传统集中供热一次网回水温度高、热利用率低, 二次网水力失衡、供热不均、失水严重、系统阻力大及调控粗放等弊端, 提出多能源互补分布式供热升级方案。通过换热器+热泵耦合实现一次网90°C/25°C大温差运行, 结合室外温度与历史供热数据构建智能温控模型, 优化二次网水力平衡与管路阻力。工程实例表明: 在不改造原有一次管网前提下, 管网输送热负荷提升62.5%, 供热建筑面积可扩容38%, 二次网失水率由4.2%降至0.9%, 系统总阻力降低28%, 循环泵能耗下降32%, 实现节能降耗、负荷扩容与供热体验同步提升, 为双碳目标下城镇集中供热系统转型升级提供了有效技术路径。

## 关键词

多能源互补; 分布式供热; 大温差换热; 水力平衡; 节能降耗; 供热扩容

## 1 引言

北方城镇集中供热是民生保障与能源消费的重要组成部分, 传统“热源—一次网—集中换热站—二次网—用户”模式普遍存在一次网回水温度偏高、二次网水力失调、失水率超标、输配能耗高、调控粗放等问题。在双碳目标与老旧供热管网改造背景下, 多能源互补分布式供热成为破解传统供热瓶颈、实现系统提质增效的核心技术。

本文以换热器—热泵耦合大温差换热、分布式循环、智能气象预测调控为核心, 结合工程实测、水力计算与设备选型, 验证该技术在改造一次网条件下的扩容与节能效果, 为同类工程改造提供参考。

## 2 传统集中供热系统核心弊端 ( 实测数据 )

以北方某 15 万 m<sup>2</sup> 住宅小区为例, 对其传统集中供热系统运行工况进行实测, 核心问题与指标如下:

一次网回水温度高: 设计供回水参数 90°C / 55°C, 实际运行温差仅 35°C, 回水余热未得到充分利用;

二次网水力失衡严重: 系统水力失调率达 32%, 近端用户室温 26~28°C, 远端用户室温仅 16~18°C, 供热均匀性

【作者简介】周鹏 (1985—), 男, 中国天津人, 本科, 助理工程师, 从事供热研究。

极差；

管网失水问题突出：系统年平均失水率 4.2%，年补水量达 1.8 万 m<sup>3</sup>，伴随显著的热损失与水处理成本增加；

系统阻力与输配能耗高：二次网总阻力 38kPa，循环泵选型扬程偏大，无效电耗偏高；

运行调控方式粗放：采用固定供水温度运行模式，未联动气象参数与历史负荷数据，过量供热占比达 22%。

### 3 多能源互补分布式供热系统总体设计

#### 3.1 系统架构

以市政一次网为基础热源，耦合空气源热泵、太阳能集热系统与燃气调峰锅炉，构建多能源互补供热体系；采用分布式换热站分区就近供热模式，替代传统集中换热站；搭建智能调控平台，实时接入室外温度、历史供热负荷、管网实时流量与温度等运行数据。

#### 3.2 系统运行逻辑

基荷供热：一次网高位热能经板式换热器直接换热，承担二次网基础热负荷；

余热深度取热：通过水源热泵机组提取一次网回水余热，将其提升至二次网供水温度，最终将一次网回水降至 25℃；

调峰供热：极端低温工况下，启动燃气调峰锅炉与空气源热泵补充热负荷，保障供热稳定性；

智能调控：基于室外实时温度与历年供热数据，提前预设二次网供水温度与循环流量，实现按需供热。

### 4 换热器—热泵耦合系统与工程关键计算

#### 4.1 耦合系统工作原理

一次网 90℃ 供水先进入板式换热器，与二次网回水完

成基荷换热；换热后的一次网出水进入螺杆式水源热泵机组，以一次网余热水为低温热源，提取其中的低位热能并提升至二次网可用供水温度；最终一次网回水温度稳定至 25℃，实现 90℃/25℃ 大温差稳定运行。

#### 4.2 一次网大温差扩容计算

项目改造前一次网运行参数为 90℃/55℃，实际运行温差  $\Delta t_1=35℃$ ；改造后一次网运行参数为 90℃/25℃，运行温差  $\Delta t_2=65℃$ 。

根据式 (7) 计算供热能力扩容率：

$$\eta = (65-35)/35 \times 100\% = 62.5\%$$

计算结果表明：在一次网流量、管径、流速均不改变的前提下，热网输送能力提升 62.5%，项目供热建筑面积可由原 15 万 m<sup>2</sup> 扩容至 20.7 万 m<sup>2</sup>，扩容比例达 38%。

#### 4.3 二次网水力计算与优化

本项目取消原有集中换热站与大循环系统，设置 3 座分布式换热站实行分区独立供热，大幅缩短供热半径，降低系统阻力。水力计算严格按照《城镇供热管网设计标准》执行。

#### 4.4 水力计算结果分析

改造后二次网系统总阻力由 38kPa 降至 27.4kPa，降幅达 28%，有效降低循环泵扬程与运行电耗；

分布式循环模式将管内流速控制在 0.8~0.9m/s 的经济流速区间，系统水力工况更稳定；

采用动态平衡阀 + 变频循环泵联动调控，系统水力失调率由 32% 降至 7.2%，供热均匀性显著提升。

#### 4.5 核心设备选型

结合项目热负荷计算、水力计算结果与系统运行工况，完成多能源互补分布式供热系统核心设备选型，具体参数与选型依据见表 1。

表 1 多能源互补分布式供热系统核心设备选型清单

设备名称	型号规格	核心技术参数	数量	选型依据
板式换热器	板式可拆卸型	换热量 7.2MW, $K \geq 3800W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , 换热面积 42 m <sup>2</sup>	3 台	承担一次网基荷换热, 适配 90℃ 供水工况
水源热泵机组	螺杆式水源热泵	制热量 3.6MW, 输入功率 680kW, COP $\geq$ 5.3	3 台	一次网余热深度提取, 实现回水温度降至 25℃
二次网循环泵	立式变频离心泵	Q=160m <sup>3</sup> /h, H=16m, N=11kW	6 台 (3 用 3 备)	匹配分布式换热站流量, 降低系统阻力
一次网循环泵	卧式离心泵	Q=110m <sup>3</sup> /h, H=20m, N=7.5kW	6 台 (3 用 3 备)	适配一次网大温差小流量运行工况
稳压补水泵	立式多级泵	Q=5m <sup>3</sup> /h, H=32m, N=2.2kW	6 台 (3 用 3 备)	适配系统 0.9% 失水率, 满足管网稳压补水需求
动态流量平衡阀	动态流量平衡阀	DN80/100/150, 调节精度 $\pm$ 5%	86 台	消除管网水力失调, 均衡楼栋流量分配
智能温控柜	一体化控制柜	带室外温感、历史数据存储、远程调控功能	3 套	气象参数联动, 实现供水温度智能预设
平板太阳能集热器	平板型集热器	集热面积 120 m <sup>2</sup> , 工作温度 60℃	120 组	辅助供热, 降低热泵机组运行能耗
燃气调峰锅炉	冷凝式燃气锅炉	额定热功率 1.4MW, 热效率 $\geq$ 98%	3 台	极端低温天气补充热负荷, 保障供热稳定性
智能监测仪表	远传型仪表	热量表、压力表、温度计, 精度 0.5 级	36 套	系统运行参数实时监测与数据采集

## 5 工程实例运行效果对比

### 5.1 系统核心运行参数对比

项目改造完成后，经过一个完整采暖季的实测运行，系统核心参数与改造前对比结果见表2。

表2 系统改造前后核心运行参数对比

指标名称	改造前参数	改造后参数	变化率
一次网供回水温度	90℃ /55℃	90℃ /25℃	温差 +85.7%
二次网水力失调率	32%	7.2%	-77.5%
二次网失水率	4.2%	0.9%	-78.6%
系统总阻力	38kPa	27.4kPa	-28%
循环泵能耗占比	100%	68%	-32%
实际供热面积	15 万㎡	20.7 万㎡	+38%
用户室温波动范围	16~28℃	20±1.5℃	均匀性大幅提升

### 5.2 节能与经济效益分析

项目全采暖季实测节能效益与经济效益数据见表3，经核算，项目静态投资回收期为4.8年，具备良好的经济可行性。

表3 项目节能与经济效益实测数据

指标名称	实测数值
年节约标准煤量	286t
年减少CO <sub>2</sub> 排放量	748t
年节约电费	18.2 万元
年节约热费	46.5 万元
项目静态投资回收期	4.8 年

## 6 传统集中供热痛点针对性解决方案

针对一次网回水温度过高、热能利用率低的痛点：通过换热器—热泵耦合技术，实现一次网回水深度降温至25℃，系统热能利用率提升25%；

针对二次网水力失衡、供热不均的痛点：采用分布式换热站分区供热+变频循环泵+动态平衡阀联动调控，将系统水力失调率控制在8%以内；

针对管网失水严重、热损失大的痛点：通过分区稳压控制提升系统密闭性与压力稳定性，将系统失水率降至1%以内；

## 7 结语

多能源互补分布式供热技术可系统性解决传统集中供热系统一次网回水温度高、二次网水力失衡、管网失水严重、系统阻力大、运行调控粗放等核心弊端，实现供热系统全链条提质增效。

换热器—热泵耦合技术可稳定实现一次网90℃/25℃大温差运行，热网输送能力提升62.5%，可在不改造原有一次管网的前提下，实现38%的供热建筑面积扩容，大幅降低老旧管网改造成本。

### 参考文献

- [1] 付林, 张世钢, 肖常磊. 吸收式换热大温差供热技术与工程应用[J]. 暖通空调, 2020, 50(08): 1-6.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 采暖通风与空气调节设计规范: GB 50736-2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [3] 中国城镇供热协会. 城镇多能源互补分布式供热技术规程: T/CDHA 10-2023[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.

# Construction difficulties and treatment techniques of static pressed pipe piles in soft soil areas

Zhi Luo

Middling Coal Jiangnan Construction Development Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China

## Abstract

The construction of static-pressed pipe piles in soft soil zones presents several challenges, such as pile inclination, deviation, severe soil compaction, excessive or insufficient pile-sinking resistance, and the impact of excess pore water pressure. Based on the characteristics of soft soil, this paper discusses the technical difficulties encountered during the construction of static-pressed pipe piles and proposes corresponding solutions in three aspects: preparation before construction, management during construction, and reinforcement after construction. By reasonably arranging the construction sequence, controlling the pile-sinking speed, ensuring proper drainage, and using the re-pressing method, the problems of static-pressed pipe pile construction in soft soil zones can be effectively addressed. The research results of this paper provide certain reference significance for the construction of pipe pile foundations in soft soil zones.

## Keywords

Soft soil foundation; Static pressure pipe pile; Construction difficulties; Soil squeezing effect; Technical processing

## 软土地区静压管桩施工难点与处理技术

罗志

中煤江南建设发展集团有限公司, 中国·广东广州 510000

## 摘要

软土地带静压管桩施工存在一些困难,如桩身倾斜、偏位、挤土严重、沉桩阻力过大或过小等问题,此外还有超静孔隙水压力的影响。根据软土特点,本文对静压管桩施工过程中遇到的技术难题进行探讨,并在施工前准备、施工中管理和施工后补强三个方面提出相应的解决方案。通过合理安排施工顺序、控制压桩速度、做好排水工作以及使用复压法等方法,可以较好地解决软土地带静压管桩施工的问题。本文的研究成果对于软土地带管桩基础施工具有一定的参考意义。

## 关键词

软土地基; 静压管桩; 施工难点; 挤土效应; 技术处理

## 1 引言

静压法沉桩由于其无振动、低噪声、速度快等优势在中国软土地基工程中被广泛使用,但同时由于软土具有高压缩性、低强度、高灵敏度等特点也使得静压管桩施工存在诸多困难,在实际施工中出现桩身偏斜、断桩、上浮以及承载力不足等现象时有发生,极大地影响到工程质量和工期。因此研究软土地基静压管桩施工的技术难题并提出相应的解决措施对于提高工程质量、减少工程风险具有极大的意义。基于此本文从软土地质条件及静压施工原理出发,总结了在软土地基中静压管桩施工所面临的主要问题以及相应的对策,以供借鉴。

## 2 软土工程特性及其对静压施工的影响

### 2.1 软土的物理力学特性

软土包括淤泥、淤泥质土以及高压缩性粘土等,其性质非常独特,在自然界中一般天然含水量接近甚至超过了液限而呈饱水状,孔隙比较大,压缩性高、强度低,在外力作用下易产生较大位移并且位移持续时间较长且有明显流变性,在静压管桩施工时,由于桩身打入使周围软土受到巨大压力而发生扰动,从而使土体原有结构被破坏,使它的各种指标迅速降低。这些扰动能严重影响施工过程的正常进行,同时也改变了桩与土之间的关系,从而给最终的桩基础带来很大危害。因此,在施工之前要详细了解软土地基基本物理力学性质,以便为后续的设计、施工等各项工作的开展奠定坚实基础。

### 2.2 软土的触变性与时效特征

软土有明显的触变性,在受到扰动时强度会立即下降,然后经过一段时间再慢慢恢复。静压沉桩时,由于打桩使桩

【作者简介】罗志(1991—),男,中国江西新余人,本科,工程师,从事土木工程研究。

周土体受到强烈扰动,其强度明显降低,从而造成桩周摩阻力降低<sup>[1]</sup>。沉桩完成后,由于超静孔隙水压力逐渐消散,土体会发生固结,进而使桩周摩阻力也相应增加。对时效的要求是,在施工中要合理安排沉桩顺序以及间隔时间等,以免造成土体过度扰动。另外,还要利用好软土触变恢复的特点,在合适的时候采用复压等方式给桩基一定的压力,能让桩基最终获得更好的承载能力。因此,在软土地区进行桩基设计和施工时,应充分考虑软土的触变恢复特性和时效规律,通过优化施工参数和采取合理的技术措施,确保桩基的长期稳定性和承载性能。

### 2.3 软土的超固结比与应力历史

由于软土中超固结比一般较低,为正常固结或者欠固结,且受其形成过程影响较大。在静压管桩施工时,桩入土使地基土产生应力重新分布,桩底以下部分土体会受到较大的附加应力而发生压缩变形;桩侧周围土体被挤出,产生很大的横向移动以及地面隆起。了解软土中超固结比,可以更好地预测沉桩时土体变形情况,从而合理选择桩长、桩径以及施工工艺等,以避免因土体变形过大而导致的质量问题,保障工程质量和耐久性。

## 3 静压管桩施工主要难点分析

### 3.1 桩身倾斜与偏位控制难题

软土地基承载力低,水平约束能力差,在静压管桩施工过程中桩身倾斜及偏位现象较为显著。由于地面硬壳层和下部软土层之间刚度相差悬殊,桩端穿过不同土层时所受阻力不同,容易造成桩身偏斜。压桩机位置偏差或者垂直度掌握不好也会引起初沉桩偏位。临近桩施工引起挤土效应使已成桩产生位移,再加上软土地基具有蠕变性质使得桩在停顿一段时间后逐渐产生倾斜,以上多种原因会导致较大偏位。桩身倾斜会减少其竖向承载力,并会产生额外弯矩,严重时会导致断桩,需采取精确放样、合理安排施工顺序、加强监控等方法进行预防。

### 3.2 挤土效应与超静孔隙水压力

静压管桩是非挤土桩,在施工过程中,桩体体积被压缩到土体内,在饱和软土中会产生很大的挤土效应。由于软土透水性差、排水固结慢,挤土作用造成超静孔隙水压力迅速上升,可达到上覆有效应力的几倍<sup>[2]</sup>。过高的孔隙水压力会使土体有效应力减小,减弱桩侧摩阻力,不利于沉桩;同时,孔隙水压力传播使土体强度下降,发生邻桩上浮、桩位位移以及地面隆起等问题。密集桩群施工时,挤土效应叠加严重,影响更大,所以要采取设置排水井、控制沉桩速度、合理组织施工顺序等方法来消除超静孔隙水压力,保证施工质量。

### 3.3 沉桩阻力异常与桩身损伤

软土地区静压沉桩阻力受土层性质、桩型尺寸、施工工艺等众多因素的影响而变化较大,在桩尖遇到局部硬土

层、砂层透镜体或者地下障碍物的情况下,压桩阻力突然增大,超过桩身允许应力或者压桩设备的能力,导致沉桩停止或者桩身破坏;由于软土对桩周包裹性较差,沉桩过程中桩周摩擦力较小,容易产生溜桩,桩身下沉过大而导致偏位,增加了施工的风险;桩身损伤主要是桩头顶进时被压坏、桩身开裂或者断桩,一旦出现这些问题都很难修复并且费用很高。因此,在施工之前要进行详细的地质调查工作,根据实际情况选用合适的桩型以及压桩设备,在施工过程中要时刻关注桩阻力的变化情况,一旦发现异常要及时采取措施,避免桩身受损。

## 4 静压管桩施工处理技术措施

### 4.1 施工准备与预处理技术

施工前必须做好充分的调查研究工作,掌握该地区软土层位置、厚度以及夹层情况等,这是保证静压桩施工质量的前提条件。由于软土地区地质条件一般非常复杂而且变化无常,在一个区域内可能会有软黏土、淤泥质土、粉土夹层及局部较硬土层等不同地层相互穿插存在,如果未经认真探查就贸然采用统一方案,很容易造成在打桩时发生意外或者达不到预期效果。因此,在勘探期间要增加钻孔数量并对其软土层各项性质进行检测,如含水量、孔隙比、压缩模量以及抗剪强度等,以利于确定合适的桩型及桩长。合理选取桩型、桩长及压桩设备,在查明地质条件下选用预制钢筋混凝土桩或预应力管桩,根据持力层埋深选择合适桩长以及吨位适合静压桩机进行施工,使设备能力满足工程需要。

对于可能出现的局部硬土层,可以进行预钻孔取土以利于沉桩,减小挤土作用以及沉桩阻力,在桩位处预先钻出一定深度及尺寸的导孔,挖除一部分硬土,以便随后沉桩,有利于减轻压桩阻力,避免由于强行穿过硬土层造成桩体断裂或者机器超载问题。如果场地内软土较厚,则应进行表层加固,例如铺设砂垫层或者碎石垫层来增加地面承压能力和机械的安全性。而重锤式打桩机在软土地上工作容易出现掉入土中或者翻倒的情况,铺设垫层可以使机械设备均匀分布载荷,在施工期间使打桩机处于平稳状态并给后续施工打好基础。桩位放样要准确,设立控制桩及观测点,在施工过程中经常复核。在软土层中桩位容易因为挤土作用而产生位移,因此要建立平面及高程控制网,每次沉桩到一定深度后都要重新测量,发现偏差立即纠正。施工前对压桩机的压桩垂直控制系统以及压力表进行检查保证其正常工作,为后续工作打好基础。

### 4.2 施工过程动态控制技术

沉桩过程中必须控制压桩速度以及终压要求,是保证桩的质量及强度的重要因素。软土在短时间内受到较大压力时会发生明显的触变性和超静孔隙水压力形成,如果压桩速度太快,孔隙水无法及时排出,超静孔隙水压力迅速上升,不但加大后续沉桩难度,而且会造成土体向外挤压、临近

桩体上浮甚至地面抬升。因此压桩速度不能太快，一般为1~2m/min，让孔隙水有一定的时间进行释放，减少对土层土体的影响。另外还要考虑桩长、地质条件以及压力表显示情况等灵活掌握，在软土地段可以适当加快，在遇到持力层后要减慢速度，以达到最终压力为准。遇到阻力增大，要停止沉桩，查明原因后继续施工，不能用加大压力入力的方式沉桩，因为阻力突然增大可能是因为有浅层障碍物或者地层突变等，要根据现场实际情况进行分析判断，如有可能可采用探挖、扩孔的方法清除障碍物。

采用“跳打”的施工方法，间隔沉桩以减轻挤土效应叠加，在密集群桩施工时，如果连续锤击相邻两根桩，则挤土效应会逐渐累加，后来沉桩不易达到设计标高，前面已经沉入的部分桩易被挤压移动甚至上浮。“跳打”是每隔一根或者几根桩不打而留空，给土体一定的间歇时间让其恢复部分强度及消散一部分孔隙水压力，从而提高施工质量<sup>[1]</sup>。布置袋装砂井或塑料排水板形成竖向排水通道，有利于超静孔隙水快速消散。在施工现场预先布置排水通道，供沉桩过程中的超静孔隙水迅速流出，可以有效降低孔隙水压力值，减小对土体的影响。施工过程中加强检查，如桩身垂直度、桩顶标高、地面隆起、邻桩位移等，发现问题及时纠正处理。在桩身上安装倾斜仪，观察桩身垂直情况；在场地上布置一些沉降观测点，监测地面隆起及邻桩位移情况，一旦超过一定值就停止施工或者改变顺序或者卸载。对于已经打入的桩进行复打，通过软土地基触变性恢复来提高其桩端阻力，复打次数以及压力大小依据试桩结果确定。当桩周土体孔隙水排出、触变强度恢复之后再对桩顶进行复打，使桩端能更深地进入持力层中，减少由于孔隙水排出所导致的桩身浮起现象从而极大地提高它的承载能力。

#### 4.3 施工后检测与加固处理

沉桩完毕后，应在超静孔隙水压力消散、土体强度恢复后再进行承载力检测，这是保证检测结果能正确反映桩基长期工作情况的前提条件。软土在沉桩过程中受到强烈干扰，其抗剪强度降低，超静孔隙水压力仍存在，在这种情况下进行静载试验所得到的承载力明显小于土体恢复正常后的承载力。间歇时间软土地区不宜小于25d，而具体时间要视土层透水性、排水条件以及观测情况而定，一般以孔隙水压力降至接近静水压力、土体十字板强度恢复到原有强度80%以上为准。检测方法以静载试验为主，对于一些重要桩基也可用高应变法加以验证，以保证检测准确性。当检测出承载力不足时，可以使用桩侧后注浆或者桩端后注浆的

方法，通过预先埋设好的注浆管内灌入一定量的水泥浆液到桩周或者桩底处，改善桩周或者桩底周围的摩擦力以及支撑力。后注浆法是靠高压浆液对周围土体产生劈裂作用以及渗入作用，在桩周或者桩底形成空隙处填充，把被扰动区域松散土体胶结成整体，形成更大的桩底或者更好的桩侧加固段，从而大幅度增加承载力一般可增加20%—40%左右。

对于上浮桩，需要对其进行复压使其桩端再次嵌入稳定土层中，在沉桩或者邻近桩施工引起挤土作用造成已沉桩上浮，桩端离开持力层而使承载力降低情况下，复压用原压桩机或大吨位千斤顶给桩顶施加压力，把桩压到设计标高并保持一段时间让桩端再次接触到持力层。复压之后还要检查其承载力以判断是否达到要求，在桩身破坏程度较小的情况下可以采用外裹套筒或者碳纤维布包裹的方法来加固。而对于有裂缝但未穿透的桩，清除裂缝部位之后再覆盖多层碳纤维布利用其高强度限制桩体变形从而恢复一部分承载力；对局部破损严重的部位，可用钢套筒抱箍进行固定，防止其继续恶化；损坏严重不能修复时可进行补桩，在原桩附近增加一根新桩，由设计人员对承台进行重新计算，保证整个结构安全可靠。检测及加固过程均需做好相关工作，如检测结果、加固方法、施工参数等，作为日后检查所需资料，也是今后类似地基施工参考材料。

## 5 结语

软土地区静压管桩施工难点源于软土特有的工程特性，在施工中出现的问题有桩身倾斜、挤土、沉桩阻力过大等，对工程质量及安全造成不良影响。本文通过对软土特性的研究探讨静压施工所遇到的问题并提出相应的对策建议，包括施工前准备、施工过程中以及施工后分别采取预处理、动态调整和检查加固等方法解决这些问题。这些措施可以有效地保证软土地区静压管桩施工的质量，避免或防止质量问题的发生。随着软土地基理论的发展以及施工工艺的进步，在软土地基中使用静压管桩会越来越多、越来越可靠，在将来需要对智能化监测及自适应控制技术应用用于静压施工进行更为详尽的研究工作以提高施工质量可预见性和可控性。

### 参考文献

- [1] 吴翔.软土地区静压桩和钻孔灌注桩的技术经济对比分析[J].建设监理,2025,(02):72-77.
- [2] 陈大勇.软土地区静压桩施工挤土效应影响范围及预防措施[J].上海建设科技,2019,(01):22-25.
- [3] 郭英明.软土地区静压桩设置及挤土效应分析[J].建筑技术开发,2018,45(09):112-113.

# Green Maintenance Technology Path and Practice of Highway Engineering under the Dual Carbon Goals

Fuyan Ma

Yunnan Huayi Road & Bridge Technology Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

## Abstract

Against the backdrop of the comprehensive implementation of the dual carbon strategy, carbon emission reduction in transportation infrastructure has become a critical development task. The highway maintenance sector faces prominent carbon emission issues arising from material usage and energy consumption. The high-carbon characteristics and ecological shortcomings of traditional maintenance models have become increasingly evident, making the green transformation of this industry both urgent and essential. This study focuses on green maintenance in highway engineering, establishing a multi-dimensional green maintenance technology framework. Through validation in typical engineering scenarios, it demonstrates the practical emission reduction effectiveness and engineering value of the applied technologies. The research identifies key optimization directions for emission reduction, including low-carbon materials, energy-efficient construction, and intelligent management. These findings provide actionable technical pathways and practical references for the low-carbon transition of the highway maintenance industry under dual carbon goals.

## Keywords

Dual Carbon Goals; Highway Engineering; Green Maintenance

## 双碳目标下公路工程绿色养护技术路径及实践

马福艳

云南华怡道桥技术工程公司, 中国·云南昆明 650000

## 摘要

在双碳战略全面推进的背景下, 交通基础设施领域碳减排成为重要发展任务, 公路工程养护环节因材料、能耗等产生的碳排放问题突出, 传统养护模式的高碳特征与生态短板凸显, 推动其绿色转型具有极强的现实紧迫性与行业必要性。本文围绕公路工程绿色养护展开研究, 构建了多维度绿色养护技术体系框架, 通过典型工程场景验证了技术应用的实际减排成效与工程价值, 明确了材料低碳化、施工节能化、管理智慧化等减排优化关键方向, 为双碳目标下公路养护行业的低碳转型提供了可落地的技术路径与实践参考。

## 关键词

双碳目标; 公路工程; 绿色养护

## 1 引言

全球“双碳”战略已成为应对气候变化的核心共识, 我国明确提出碳达峰、碳中和目标, 交通基础设施领域作为能源消耗与碳排放的重点行业, 肩负着关键减排使命, 亟需通过技术革新与模式转型破解发展与减排的矛盾。然而, 传统公路养护模式存在资源利用率低、能耗强度高、生态扰动大等突出短板, 缺乏对碳排的系统性管控, 与低碳发展理念严重不符, 难以适应新时代交通行业高质量发展需求, 因此, 亟需突破传统养护技术瓶颈, 探索低碳、环保、高效的绿色养护路径, 实现公路养护与生态保护、碳减排目标的协同推进。

【作者简介】马福艳(1982—), 女, 回族, 中国云南昆明人, 本科, 从事公路工程养护研究。

## 2 双碳目标下公路工程绿色养护理论基础

### 2.1 核心概念界定

双碳目标核心内涵是通过系统性减排行动, 实现二氧化碳排放达峰后稳步下降, 最终达成碳中和, 交通领域作为碳排放重点行业, 明确了单位周转量碳排放强度持续降低、新能源应用比例提升等关键减排指标, 为公路养护行业划定了低碳发展底线。公路工程绿色养护是基于双碳理念的新型养护模式, 以低碳化、资源化、生态化为核心特征, 强调在保障公路服役性能的基础上, 最大限度降低碳排放、提高资源循环利用率、减少生态环境扰动。公路养护全生命周期碳足迹涵盖材料生产、施工养护、运营使用、废弃处置全流程, 既包括养护机械能耗、现场作业等直接碳排放, 也涵盖材料生产运输、废旧建材处理等间接碳排放, 是衡量绿色养护成效的核心维度。

## 2.2 双碳目标对公路绿色养护的要求与约束

双碳目标对公路绿色养护提出明确的碳减排量化要求，需结合公路等级、养护类型制定差异化减排指标，确保全生命周期碳排强度持续下降。同时，绿色养护面临技术、经济、政策多重约束，技术层面需突破低碳材料研发、节能工艺应用等瓶颈，经济层面需平衡低碳技术增量成本与长期效益，政策层面需依托标准规范与激励机制引导落地。此外，需坚守养护效果与碳减排协同目标，既要通过绿色技术实现碳减排，也要保障公路结构安全、通行质量与使用寿命，避免片面追求减排而忽视养护核心功能，实现生态效益与工程效益的统一。

## 3 公路工程养护碳排现状及绿色转型潜力分析

### 3.1 公路工程养护碳排来源与核算方法

公路工程养护碳排放源于全流程多环节，按排放属性可分为直接碳排放与间接碳排放两类。直接碳排放主要来自养护作业现场，核心是养护机械能耗排放，包括挖掘机、摊铺机、压路机等燃油机械的尾气排放，以及电动养护设备的电力消耗间接关联碳排放；同时，现场加热、搅拌等作业过程也会产生少量直接碳排放。间接碳排放是养护碳排的主要组成部分，涵盖养护材料从生产到废弃的全链条排放，如沥青、水泥、钢材等原材料的开采与加工能耗，材料运输过程中的燃油消耗排放，以及废旧路面材料、建筑垃圾等废弃处置环节的碳排放。为精准量化碳排总量，本文基于生命周期

评价（LCA）理论构建全流程碳排核算模型，明确核算边界为“材料生产-施工养护-运营使用-废弃处置”，选取碳排放因子法作为核心核算方法，整合不同材料、机械、运输方式的碳排放因子，详见表1，建立分环节碳排核算公式，实现对公路养护全生命周期碳排的系统性、精细化核算<sup>[1]</sup>。

表1 公路养护典型碳排放因子（参考值）

类别	核算单元	碳排放因子	备注
能源	柴油	3.15 kgCO <sub>2</sub> /L	国标/地方标准
能源	电力（区域电网）	0.58-0.72 kgCO <sub>2</sub> /kWh	按区域调整
材料	水泥	0.8-1.0 tCO <sub>2</sub> /t	生产阶段
材料	沥青	2.8-3.2 tCO <sub>2</sub> /t	含拌合
材料	钢材	1.8-2.2 tCO <sub>2</sub> /t	加工成型
运输	重型货车	0.12-0.18 kgCO <sub>2</sub> /(t·km)	综合工况

### 3.2 我国公路养护碳排现状调研与数据统计

结合我国公路养护行业实际调研数据，不同等级公路的碳排呈现显著差异：高速公路因技术标准高、养护工艺复杂，单位里程碳排放量最高，尤其在路面大修、桥隧养护等环节，碳排强度明显高于普通公路；国道作为跨区域交通主干道，养护频率与荷载压力较大，单位里程碳排放量次之；省道及以下公路虽养护标准较低，但里程基数大、养护技术相对粗放，整体碳排总量不容忽视。不同养护类型碳排放强度与特征详见表2，当前传统养护模式存在三大突出问题，详见表3。

表2 不同养护类型碳排放强度与特征对比表

养护类型	碳排强度	主要排放来源	管控重点
日常养护	低	小型机械、零星材料、清扫洒水	精细化作业、节能机具
专项养护	中	病害处治、局部修补、材料运输	优化工艺、缩短运输距离
大修工程	高	材料更换、重型机械、废旧料处置	再生利用、低碳施工

表3 我国公路养护传统模式主要问题与数据统计

问题类别	关键现状数据	带来的碳排影响
废旧材料利用率	回收利用率不足30%	新增原材料生产排放大幅增加
养护机械能源结构	新能源机械普及率<5%	直接燃油排放居高不下
碳排管控体系	缺乏全流程核算与决策机制	碳排强度难以持续下降

### 3.3 绿色转型潜力评估

我国公路养护行业绿色转型具备巨大潜力，主要体现在技术替代、资源循环与管理优化三个维度，核心措施及减排潜力详见表4。

表4 公路养护绿色转型综合减排潜力汇总

转型维度	核心措施	减排潜力
技术替代	低碳工艺、新能源装备	30%-40%
资源循环	废旧料再生、循环利用	15%-20%
管理优化	智慧决策、精准养护	5%-10%
综合协同	三维一体发力	≥50%

## 4 双碳目标下公路工程绿色养护核心技术路径

### 4.1 低碳养护材料研发与应用路径

低碳养护材料是实现公路养护碳减排的基础支撑，核心围绕再生利用与新型低碳材料研发两大方向推进。核心工艺、回收利用率及碳减排效果，详见表5。低碳新型材料研发重点突破传统材料高碳瓶颈，低碳沥青通过改性技术降低生产过程能耗与排放，生态型填料选用工业固废、建筑垃圾再生填料等替代天然填料，节能型外加剂则通过优化配比减少水泥、沥青等胶凝材料用量，进一步降低碳排强度。材料低碳化评价标准需建立基于全生命周期的碳排核算体系，明确材料碳足迹量化指标，选型原则遵循“低碳优先、性能达

标、经济可行”，综合考量碳减排效果、工程适配性与成本效益。

### 4.2 节能型养护施工技术路径

节能型养护施工技术通过机械升级、工艺优化与过程管控，实现施工环节碳减排。低能耗施工机械推广聚焦新能源与节能改造两大方向，新能源机械包括电动压路机、混合动力摊铺机等，零排放或低排放特性可显著降低现场直接碳

排放；对传统燃油机械进行节能改造，如安装尾气净化装置、优化动力系统，可降低 15%-20% 的能耗与排放。绿色施工工艺核心优势、能耗较低幅度及碳减排效果详见表 6。施工过程能耗管控需建立精细化管理体系，通过制定能耗定额标准、优化施工组织方案，合理调度机械作业顺序与时间，避免无效能耗；采用智能能耗监测设备实时跟踪机械能耗数据，及时调整施工参数，实现能耗动态优化。

表 5 典型再生材料碳减排效果对比

再生材料类型	核心工艺	回收利用率	碳减排效果
再生沥青混合料	热再生、冷再生、厂拌再生	≥80%	较新料降低 30%–50%
再生混凝土骨料	破碎、清洗、分级	60%–80%	减少天然骨料开采与生产排放
废旧钢材再生	除锈、整形、再利用	较高	显著降低冶炼环节碳排放

表 6 绿色施工工艺能耗与碳减排对比

施工工艺	核心优势	能耗降低幅度	碳减排效果
温拌沥青技术	拌合温度降低 30–60℃	能耗降低 20%–30%	废气与碳排放显著减少
就地冷再生技术	无需高温加热旧料	能耗降低 50% 以上	较热再生减排 40% 以上
模块化快速施工	预制拼装、缩短工期	机械能耗减少 30%	降低现场作业碳排放

### 4.3 生态协同养护技术路径

生态协同养护技术强调公路养护与生态保护、碳汇提升的协同发展，构建“养护-生态-碳汇”一体化体系。公路边坡生态修复以固碳与生态防护为核心，优先选用乡土植物进行混播种植，适配本地气候与土壤条件，提高成活率与稳定性；配置固碳型植被如乔木、灌木与草本植物组合，提升边坡植被碳汇能力，同时发挥水土保持、净化空气等生态功能；结合生态袋、三维植被网等防护技术，增强边坡稳定性，减少水土流失。水土保持与污染防控技术聚焦养护过程生态扰动治理，雨水收集利用系统收集养护区域雨水，经处理后用于路面清洗、植被灌溉，节约水资源并减少径流污染；养护废水处理采用小型化、移动化处理设备，对施工废水、清洗废水进行过滤、沉淀等处理，达标后排放或循环利用，避免污染土壤与水体。生态敏感区公路养护需制定特殊技术方案，针对自然保护区、水源涵养地等区域，采用低扰动施工工艺，避开生态敏感时段，选用生态友好型材料，减少养护活动对动植物栖息地、生态廊道的破坏，实现养护工程与生态环境的和谐共生。

### 4.4 智慧化养护管理技术路径

智慧化养护管理技术通过数字化、智能化手段优化养护决策，提升碳减排精准性与效率。养护决策智能化依托大数据技术，整合公路检测数据、服役年限、交通荷载、气候环境等多源信息，构建养护需求识别模型，精准判断路面病害类型、严重程度与发展趋势，避免过度养护或养护不足导致的碳排浪费；基于病害特征与低碳目标，自动匹配最优养护技术与材料方案，实现养护决策的科学性与低碳化。碳排动态监测借助物联网技术，在养护机械、材料运输车辆、施工区域部署传感器与数据采集终端，实时监测能耗、废气排

放等数据，结合碳排核算模型，实现全流程碳排实时追踪与量化分析；通过数据可视化平台，直观呈现碳排分布与变化趋势，为减排措施调整提供数据支撑。全生命周期养护方案优化模型以碳减排为核心目标，整合技术、经济、生态等多维度指标，对养护材料选型、施工工艺选择、养护周期设定等进行全流程优化；考虑公路从建设到废弃的全生命周期碳排，平衡短期减排与长期效益，制定动态调整的养护方案，实现全生命周期碳排最小化与公路服役性能最大化<sup>[2]</sup>。

## 5 双碳目标下公路绿色养护优化策略与保障措施

### 5.1 技术优化策略

技术优化需立足场景适配性、创新前瞻性与推广实效性，构建全链条技术优化体系。不同养护场景下技术组合方案优化需结合公路等级、气候条件、病害类型精准施策：高速公路大修可采用“沥青混合料热再生+温拌施工+新能源机械”组合技术，平衡减排效果与路面高性能需求；山区公路养护优先选用“冷再生工艺+生态边坡修复”组合，降低施工扰动与运输能耗；城市道路养护推广“模块化施工+智慧监测”组合，缩短交通影响周期并强化碳排管控。绿色养护技术创新聚焦前沿方向，推动碳捕集技术与养护工程融合，研发路面材料碳捕集添加剂，实现养护过程中二氧化碳固定；深化新型低碳材料研发，重点突破高性能再生剂、固碳型生态填料、低能耗复合材料等关键技术，提升材料低碳化与功能一体化水平；探索数字孪生、人工智能与绿色养护的深度融合，构建虚拟养护场景模拟系统，优化技术应用效果。技术推广应用机制需打破“产学研用”壁垒，建立政府引导、企业主导、科研机构支撑的协同推广模式，通过试

点示范工程形成可复制经验，依托行业展会、技术交流会搭建推广平台；针对中小养护企业技术储备不足问题，开展定向技术帮扶与设备租赁服务，降低技术应用门槛。

### 5.2 政策保障措施

政策保障需构建“激励+标准+监管”三位一体体系，为绿色养护落地提供制度支撑。碳减排激励政策方面，建立差异化绿色养护补贴机制，对采用低碳技术、达到减排目标的养护项目给予财政补贴，补贴标准与碳减排量挂钩；推动公路养护行业纳入碳交易市场，允许养护项目产生的碳减排量作为核证自愿减排量参与交易，拓宽减排收益渠道；对购置新能源养护机械、研发低碳材料的企业给予税收减免，激发市场主体减排积极性。标准体系建设需补齐行业短板，制定绿色养护技术标准，明确再生材料使用比例、节能工艺操作规范等技术要求；统一碳排核算标准，规范核算边界、因子选取与计算方法，确保碳排数据可比可追溯；建立效果评价标准，构建“碳减排+工程性能+生态效益”多维度评价指标体系，量化绿色养护成效。监管机制强化需落实全流程管控，建立养护项目碳排备案制度，要求项目开工前提交碳排预算方案，竣工后提交实际碳排报告；组建专业核查团队，采用现场核查与数据核验相结合的方式，对碳排数据真实性、减排措施落实情况进行监督；将绿色养护执行情况纳入养护企业信用评价体系，对未达减排要求的企业采取限制投标、信用扣分等惩戒措施。

### 5.3 经济可行性提升策略

经济可行性提升需破解低碳技术增量成本难题，构建长效成本控制与投融资体系。全生命周期成本控制方法聚焦增量成本分摊，将低碳技术的初期增量成本分摊至公路养护全生命周期，通过减少后期养护频次、降低能耗与资源消耗等长期收益对冲初期投入；建立增量成本分摊机制，由政府、养护企业、社会资本按比例承担，政府通过补贴覆盖部分成本，企业通过技术优化降低自身投入，社会资本通过碳交易、

绿色收益获得回报。投融资模式创新需拓宽资金渠道，鼓励金融机构推出绿色信贷产品，对绿色养护项目给予低利率、长周期贷款支持；推广 PPP 模式，吸引社会资本参与绿色养护项目投资、建设与运营，共享项目长期收益；探索绿色债券、产业基金等融资方式，为低碳技术研发与规模化应用提供资金保障。成本-效益分析模型优化需完善评价维度，将碳减排效益、生态效益、社会效益纳入分析体系，采用环境价值评估法量化碳减排、水土保持、生态修复等非经济收益；建立动态调整的成本-效益分析模型，根据原材料价格、技术进步、政策变化等因素实时优化参数，为养护方案选择与投资决策提供科学依据<sup>[1]</sup>。

## 6 结语

本研究系统梳理了双碳目标下公路工程绿色养护的理论体系与实践路径，核心结论如下：构建了“材料低碳化、施工节能化、生态协同化、管理智慧化”四位一体的绿色养护技术体系，明确了再生建材、低碳新材料、节能工艺、智慧管理等核心技术方向，形成了适配不同场景的技术组合方案。通过典型工程实践验证，核心技术路径可实现单位里程养护碳排下降 30%-50%，同时保障公路服役性能与生态效益，凸显了技术落地的实践价值。研究提出的“技术优化-政策保障-经济可行-人才支撑”四维保障体系，为绿色养护行业转型提供了全链条解决方案，其中差异化激励政策、全生命周期成本控制、产学研协同机制是推动技术规模化应用的关键。

### 参考文献

- [1] 探析公路养护工程质量管理中存在的问题及对策[J]. 林久力. 城市建设理论研究(电子版),2023(06)
- [2] 公路养护工程四新技术应用分析——以常州市普通国省公路养护工程为例[J]. 高懿. 运输经理世界,2023(03)
- [3] 公路养护工程施工存在的问题及对策分析[J]. 许东灵. 工程技术研究,2022(24)

# Research on Construction Protection Technology and Practice of High Slope in Mountainous Water Conservancy Projects

Hongcheng Li

Comprehensive Guarantee and Technical Service Center of Lijiao Town, Binchuan County, Dali, Yunnan, 681600, China

## Abstract

The construction of high slopes in mountainous water conservancy projects is confronted with multiple technical challenges such as complex and variable geological conditions, significant excavation disturbance effects, and the coupling of water environment and mechanical loads. Safety risk control during the construction period has become a key issue restricting the project's progress. Based on rock mass mechanics theory, this paper systematically reveals the evolution mechanism of instability risks during the construction period of high slopes, and focuses on analyzing the influence laws of structural plane control effects, mechanical responses to excavation unloading, and hydraulic coupling on slope stability. The research results show that the construction protection of high slopes needs to achieve dynamic adaptation of rock mass mechanical properties, on-site construction techniques, and monitoring feedback information, and establish a full closed-loop control mode of real-time perception, intelligent analysis, scientific decision-making, and precise control. The research findings can provide theoretical basis and technical reference for the safety guarantee of high slope construction in mountainous water conservancy projects.

## Keywords

mountainous area water conservancy project; high slope; construction protection

## 山区水利工程高边坡施工防护技术与实践研究

李洪程

宾川县力角镇综合保障和技术服务中心, 中国·云南大理 681600

## 摘要

山区水利工程高边坡施工作业面临地质条件复杂多变、开挖扰动效应显著、水环境与力学荷载耦合作用等多重技术挑战, 施工期安全风险防控已成为制约工程建设的关键问题。本文以岩体力学理论为基础, 系统揭示了高边坡施工期失稳风险的演化机制, 重点分析结构面控制效应、开挖卸荷力学响应及水力耦合作用对边坡稳定性的影响规律。研究表明, 高边坡施工防护需实现岩体力学特性、现场施工工艺与监测反馈信息的动态适配, 建立实时感知、智能分析、科学决策、精准控制的全闭环管控模式。研究成果可为山区水利工程高边坡施工安全保障提供理论依据与技术借鉴。

## 关键词

山区水利工程; 高边坡; 施工防护

## 1 引言

山区水利工程多坐落于地形陡峻、地质条件复杂的特殊地理单元, 高边坡的开挖与支护作业已成为制约此类工程建设进程的核心技术瓶颈。在高边坡施工阶段, 岩体内部将依次经历开挖卸荷、初始应力场重分布、结构面力学性质劣化与张开等一系列典型力学响应过程。若支护体系实施不及时、参数配置不足或施工时序存在滞后, 极易诱发滑坡、崩塌等突发性地质灾害, 进而导致重大人员伤亡与巨额经济损

失。传统高边坡施工防护体系高度依赖工程经验法则, 核心强调“开挖一级、防护一级、验收一级”的线性施工原则<sup>[1]</sup>。然而, 随着山区水利工程建设向高陡化、深开挖方向演进, 边坡地质条件的复杂性与不确定性呈现指数级增长, 传统经验性的单一技术模式已难以满足现代高风险边坡的安全管控需求。本文立足于高边坡施工的岩体力学理论基础, 系统剖析并构建了覆盖全周期的施工防护关键技术体系, 旨在为国内同类山区水利工程高边坡项目的安全建设提供坚实的理论支撑与可借鉴的工程实践路径。

## 2 高边坡施工风险的形成机理

### 2.1 岩体结构对边坡稳定性的控制效应

岩体作为由完整岩块与各类结构面共同构成的非连续

【作者简介】李洪程(1980-), 男, 彝族, 中国云南大理人, 工程师, 从事水利工程, 水土保持研究。

介质，其力学特性与变形破坏规律在很大程度上受结构面的控制。结构面涵盖层面、节理、裂隙、断层及破碎带等地质界面，其产状、发育密度、延展尺度、充填特征及贯通性等指标，共同决定了岩体的各向异性与非连续性特征。

从力学机理层面分析，结构面对边坡稳定的控制作用主要体现在三个维度：第一，结构面本身构成岩体内部的薄弱带，其抗剪强度显著低于完整岩体。第二，多组结构面相互切割形成空间块体，在开挖卸荷、振动或降雨等外部作用下，这类结构体易产生失稳塌落，其稳定状态主要受结构面组合交线的产状控制。第三，结构面的开度与贯通性为地下水渗流提供优势通道，孔隙水压力的升高会降低岩体有效应力。

### 2.2 开挖卸荷的力学响应机制

高边坡开挖本质上是一个复杂的应力卸荷与力学响应过程。原始地应力场在开挖临空面被释放，驱使岩体向自由面产生回弹变形，并伴随全域应力场的动态重构，其内在力学机制可从卸荷扰动与强度劣化效应、流变时效特性、开挖工序的力学路径效应三方面系统阐释<sup>[2]</sup>。

### 2.3 水-力耦合与环境荷载作用

地下水是控制边坡稳定性的关键敏感要素，其作用机制涵盖物理软化、力学效应与化学侵蚀三大维度。首先，在物理作用层面，水体对岩体具有显著软化效应，可直接降低岩体强度指标。其次，降雨是触发边坡失稳的最主要环境诱因，降雨入渗过程中，坡表岩体饱和度升高、基质吸力衰减、暂态饱和区持续扩展。再者，地震荷载对边坡的作用机制更为复杂，地震波在岩体内传播产生往复剪切作用，一方面基于循环荷载疲劳理论，周期性剪切作用导致岩体强度指标持续劣化，另一方面易引发潜在在滑移面发生不可逆位移累积。如表1所示，为高边坡主要失稳模式与成因机理。

表1 高边坡主要失稳模式与成因机理

失稳模式	地质条件	主导机理
平面滑动	单组软弱结构面倾向坡外	结构面抗剪强度不足
楔形体滑动	两组结构面交线倾向坡外	组合结构面切割
圆弧滑动	均质土坡或破碎岩体	岩土体抗剪强度不足
倾倒破坏	陡倾层状岩体反向坡	层间抗拉强度不足
坠落破坏	陡坡危岩体	结构面切割、重力作用

## 3 高边坡施工防护技术体系

### 3.1 预加固与动态支护技术

预加固的核心机理，是在开挖卸荷扰动产生前或初始阶段，通过人工加固手段提升岩体自身承载性能，从而有效控制卸荷松弛区的扩展范围。预应力锚索是超前预加固技术的典型代表，锚索通过张拉对岩体施加主动压应力，锚固段依靠砂浆与岩体的黏结强度提供抗拔力，自由段将预应力传递至深部岩体，形成压缩应力区，锚墩对坡面施加的压应力可改善表层岩体应力状态。系统锚杆的加固机理与锚索存在

明显差异<sup>[3]</sup>。全长黏结型锚杆通过与围岩形成共同受力的复合体，发挥“销钉”作用，限制结构面间的相对错动与滑移。

### 3.2 数智化监测与预警技术

边坡监测的核心目标，是通过采集岩体变形与力学响应的时空演化数据，反演其受力状态并预判失稳趋势。现代边坡监测技术已由单一物理量观测，升级为多维度、多源信息融合的智能感知系统。监测数据的核心应用价值在于实现科学预警，其理论基础是建立变形量、变形速率与边坡稳定性之间的定量关联。传统预警方法以阈值判定为核心，将实测数据与工程经验或数值模拟确定的临界值对比，超出阈值即触发预警。数字孪生是物理实体在虚拟空间的高精度数字化镜像，其核心是构建与现场实体实时同步、双向映射的动态虚拟模型。

### 3.3 立体防护与生态修复技术

防护网系统是控制边坡浅表失稳与落石灾害的关键技术措施，按作用机理可分为主动防护与被动防护两大类型。主动防护网直接敷设于边坡表层，通过钢丝绳网对岩体形成整体约束，抑制裂隙扩张与危岩松动。被动防护网布置于坡脚及危险区段下方，主要用于拦截失稳滚落岩体。其工作原理为利用柔性结构的大变形实现冲击能量耗散，落石撞击网面后，通过支撑绳拉动减压环发生设定滑移，以摩擦做功方式将动能转化为热能，从而实现缓冲减振。

生态护坡是以边坡结构稳定为前提，通过植被重建实现生态修复的综合技术。植被对边坡稳定的力学贡献主要体现在根系加筋效应与蒸腾排水效应两方面。生态护坡常用技术包括客土喷播、植生袋、生态混凝土等。客土喷播将种子、基质、胶结材料混合喷射于坡面，适用于岩质边坡快速绿化；生态混凝土采用15%~30%大孔隙结构，内部填充营养基质，兼具结构防护与生态绿化功能。

全生命周期绿色施工强调将生态环保贯穿工程规划、设计、施工与运营全过程，融入工程决策全链条。对高边坡工程，核心体现为“开挖一级、防护一级、复绿一级”的一体化施工模式，将生态修复嵌入施工工序，而非施工后的末端治理。

## 4 技术讨论与适用性分析

预加固技术的应用成效，核心取决于对控制边坡稳定性的关键结构面的精准识别，以及基于该识别结果开展的针对性设计与施工。凝灰岩软弱夹层作为影响边坡稳定性的核心薄弱环节，其力学强度低、抗变形能力弱，是决定边坡整体稳定性的关键控制因素。

若缺乏实时、精准的监测预警体系，当边坡出现肉眼可见的明显变形时，岩体往往已进入加速变形阶段，此时滑动面已初步形成，变形速率大幅提升，不仅加固处置的难度会显著增加，还可能导致加固成本翻倍，甚至引发边坡失稳坍塌。监测预警体系能够有效发挥作用，关键在于三个核心

环节。一是监测点布设需精准覆盖潜在滑动区域及关键薄弱部位,确保监测数据能够真实反映边坡内部变形特征。二是预警阈值的设定需结合岩体力学特性,采用“变形速率+阶段特征”的双重判据,避免单一阈值带来的误判风险。三是建立快速响应机制,在预警触发后,能够在短时间内启动停工、补强、复核等处置流程。

生态护坡技术在岩质边坡中的应用存在明显的局限性。一方面,施工初期植被处于萌发阶段,生长速度缓慢,根系尚未深入岩体内部形成有效锚固,对边坡的防护作用有限,无法替代结构性支护的承载功能。另一方面,植被生长对水分条件要求较高,在干旱季节若缺乏持续的养护措施,植被成活率会显著下降,进而影响生态防护效果。基于此,生态护坡技术更适合作为工程结构性防护的补充手段,用于提升边坡生态效益,而非替代锚杆、锚索等结构性支护措施。对于坡度大于 $45^\circ$ 的岩质边坡,由于其整体稳定性较差、下滑力较大,需以工程结构性防护为主,重点通过锚杆、锚索等手段提升抗滑能力,生态护坡仅作为辅助措施,用于减少水土流失、改善生态环境,实现工程安全与生态保护的协同发展。

## 5 结语

山区水利工程高边坡施工防护的核心要义,在于以岩体力学特性的深度认知为基础,实现“开挖作业—支护施工—监测预警”三者的动态协同与闭环管控。本文围绕高边坡施工防护的核心科学问题与技术实施路径,从风险成因解析、技术体系构建及工程实践验证三个维度,系统阐释了高边坡施工防护的核心逻辑与技术要点。研究表明,高边坡施工风险的形成,主要受控于岩体结构特征、开挖卸荷效应及环境荷载耦合作用三大关键因素——结构面的产状分布与力学特性,直接决定了边坡潜在破坏模式的类型,其稳定状态可通过极限平衡理论进行量化评估。开挖卸荷作用会引发岩体内部应力场的重新分布及变形累积,该过程的时间效应可借助流变力学模型进行精准描述。降雨入渗、地震

作用等外部荷载,会通过改变岩体有效应力、加速岩体损伤等方式,进一步放大边坡失稳风险。

超前预加固技术的核心作用,在于主动约束开挖过程中岩体的卸荷松弛范围,其应用效果的关键的在于精准识别控制边坡稳定的核心结构面,并据此设计针对性的锚固方案。锚固参数的确定需基于极限平衡理论进行反演计算,确保锚固体系能够提供足够的抗滑约束力,有效抑制边坡的有害变形。数智化监测体系的核心价值,在于通过捕捉岩体变形的时间序列特征,实现边坡失稳风险的提前预判与精准管控,推动防护模式从“事后处置”向“事前预警”转型;预警阈值的设定需结合岩体变形阶段特征动态调整,确保预警信号的科学与时效性,为及时采取补强加固措施提供支撑。

在立体防护体系构建中,主动与被动防护网通过能量耗散与柔性约束机制,实现对边坡浅层失稳的有效控制;生态护坡技术则通过根系加筋作用发挥辅助防护效能,二者协同配合,共同提升边坡整体稳定性能。随着岩体力学理论的不完善及智能建造技术的快速发展,高边坡施工防护正逐步迈向“感知精准化、分析智能化、决策科学化、控制精细化”的闭环管理模式。未来,高边坡施工防护技术的突破方向主要集中在多源监测数据融合下的岩体参数实时反演、考虑流变特性的变形预测模型构建、自适应调控的智能支护系统研发三个方面,通过技术创新推动高边坡防护从传统经验驱动模式向数据驱动模式转型,实现工程安全与生态保护的协同发展。

## 参考文献

- [1] 陆佳,徐镇扬,花叶琦,等.高边坡开挖支护技术在水利水电工程中的应用研究[J].水上安全,2026,(01):43-45.
- [2] 王剑书.水利水电工程中的高边坡加固与治理技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(35):187-189.
- [3] 邱文丰.高边坡加固技术在水利水电工程施工中的应用探讨[J].新发现,2025,(16):97-99.

# Research on Key Construction Technologies for the Aerospace Science and Technology City Super Complex Project

Lili Zhu

Shanghai Construction Engineering Group Co., Ltd., Shanghai, 200080, China

## Abstract

The Aerospace Science and Technology City Super Complex Project is characterized by its massive scale, complex functions, diverse structural forms, and constrained construction environments. Its implementation involves multiple key technologies including deep foundation pit engineering, super high-rise prefabricated structures, large-span steel structure corridors, and complex curtain wall systems. Focusing on core technical challenges during project execution, this study systematically analyzes multi-disciplinary collaborative construction, foundation pit safety control in complex environments, high-altitude operations for prefabricated structures, installation precision control of large-span structures, and integrated application of BIM technology. Based on these findings, a construction technology system and management methodology tailored for mega-scale complex projects has been developed, providing technical references and practical pathways for similar engineering endeavors. Research demonstrates that the adoption of digital management tools and precision construction techniques can significantly enhance construction efficiency and quality control, reduce safety risks, and achieve efficient, sustainable development in engineering projects.

## Keywords

aerospace science and technology city; super complex; critical construction technologies; prefabricated structures; bim technology; foundation pit engineering

## 航天科技城超级综合体项目关键施工技术研究

朱莉莉

上海建工集团股份有限公司, 中国·上海 200080

## 摘要

航天科技城超级综合体项目具有体量大、功能复杂、结构形式多样及施工环境受限等显著特征,其施工过程涉及深基坑工程、超高层装配式结构、大跨度钢结构连廊及复杂幕墙系统等多类关键技术。围绕项目实施过程中的核心技术问题,结合工程实践与技术研究,对多专业协同施工、复杂环境下基坑安全控制、装配式结构高空作业、大跨度结构安装精度控制及BIM技术集成应用等方面进行了系统分析。在此基础上,总结形成适用于超大型综合体项目的施工技术体系与管理方法,为类似工程提供技术参考与实践路径。研究表明,通过引入数字化管理手段与精细化施工技术,可以有效提升施工效率与质量控制水平,降低安全风险,实现工程建设的高效与可持续发展。

## 关键词

航天科技城; 超级综合体; 关键施工技术; 装配式结构; BIM技术; 基坑工程

## 1 引言

随着城市化进程推进,大型综合体在城市功能整合与空间利用中的作用不断增强。航天科技城超级综合体工程具有结构复杂、空间受限及紧邻地铁等特点,施工过程涉及多专业交叉作业,实施难度较高。传统施工模式难以满足其建设需求,亟需在技术与管理层面进行系统优化。本研究依托工程实践,对施工关键环节进行分析,围绕基坑群控制、装配式结构施工、大跨度钢结构安装及数字化技术应用等内容展开探讨,形成具有应用价值的施工技术体系,为类似工程

提供参考。

## 2 复杂工程条件下的施工组织与协同管理

### 2.1 多专业协同施工组织机制

航天科技城超级综合体在施工阶段呈现出结构工程、机电系统与装饰工程交叉推进的复杂格局,不同专业在时间与空间上的叠加关系,使施工组织需要具备高度的统筹能力。通过构建以总承包为核心的统一管理体系,可以将各专业纳入同一协调框架,使施工目标与资源配置形成整体联动。在具体实施中,借助信息化平台对进度、资源与工序关系进行集成管理,有助于实现多专业之间的信息共享与协同决策,从而减少界面冲突与重复作业。施工组织从传统的分段管理转向系统化运行,使各工序在逻辑关系上形成有序

【作者简介】朱莉莉(1980-),女,中国湖北荆州人,硕士,高级工程师,从事土木工程研究。

衔接,提升整体运行效率。协同机制的有效建立,不仅优化了施工流程,也降低了因沟通不畅与协调不足带来的潜在风险,使复杂工程在多专业交织条件下保持稳定推进。

## 2.2 动态资源配置与进度控制

在超大型综合体项目中,资源配置的合理性直接关系到施工效率与成本控制水平。施工过程中,劳动力、机械设备与材料供应呈现出动态变化特征,若采用固定配置方式,容易导致局部资源过剩或短缺。通过引入动态调度方法,对各类资源进行实时分析与优化分配,可以使资源配置更加符合施工实际需求。在进度控制方面,依托关键路径分析与信息化监测手段,对施工节点进行持续跟踪,有助于及时识别进度偏差并进行调整。施工计划不再局限于前期设定,而是在实施过程中根据现场条件进行修正,使进度控制具有更强的适应性。信息技术的介入,使资源配置与进度管理形成联动机制,提升项目整体调控能力,从而在复杂施工环境中实现高效与有序的推进。

## 2.3 风险识别与预警机制

复杂工程施工环境中,风险因素具有多样性与不确定性特征,涵盖结构安全、施工组织及外部环境等多个方面。通过构建系统化的风险识别与预警机制,可以在施工全过程中实现对潜在问题的动态监控。基于监测数据与分析模型,对关键施工环节进行实时评估,使风险信息能够及时反馈至管理层,从而支持决策优化。预警机制的建立,使风险管理由事后应对转向事前预防与过程控制,增强了施工安全的主动性。在实际应用中,通过对风险等级进行分级管理,并制定相应的控制措施,可以提高管理效率与针对性。随着信息化手段的不断完善,风险管理逐步实现精细化与系统化,为工程安全提供持续保障,使项目在复杂条件下保持稳定运行。

# 3 复杂环境下基坑工程施工关键技术

## 3.1 基坑群施工的稳定性控制

在超大型综合体建设中,基坑数量多且空间分布密集,形成典型的群坑施工特征,其整体稳定性控制成为工程实施的关键环节。不同基坑之间在开挖过程中会产生相互影响,若缺乏系统性控制,容易引发土体应力重新分布与变形叠加问题,从而影响整体安全。通过对工程地质条件与周边环境进行综合分析,合理选择支护结构形式,并结合分区施工与阶段性开挖策略,可以有效降低基坑间的耦合效应。在施工组织中,需要对开挖顺序进行精细化设计,使土体受力变化保持在可控范围内,同时通过加强支护结构刚度与稳定性,提高基坑整体抗变形能力。施工过程中持续跟踪变形趋势,并根据监测结果及时调整施工参数,使控制措施与现场状态保持一致,从而在复杂条件下实现基坑群施工的整体稳定。

## 3.2 邻近地铁环境下变形控制技术

基坑施工紧邻既有地铁结构,对周边环境的扰动具有

较高敏感性,变形控制成为保障既有设施安全的重要内容。施工过程中,基坑开挖会引起土体位移与应力释放,若控制不当,可能对地铁结构产生不利影响。通过布设高精度监测系统,对基坑围护结构位移、地表沉降及地下管线变化进行实时观测,可以形成连续的数据反馈机制,使施工状态始终处于可监控范围内。在技术措施上,通过优化支护体系设计,提高围护结构的整体刚度,并结合分层开挖与及时支撑的施工方法,可以有效减小土体变形幅度。施工参数的调整需基于监测数据进行动态修正,使控制措施具有针对性与时效性。通过多种技术手段协同作用,可以在复杂环境中实现对变形的有效控制,保障地铁结构的安全运行与工程施工的顺利推进。

## 3.3 信息化监测与安全管理

信息化技术在基坑工程中的应用,使安全管理的传统经验判断转向数据驱动的精细化管理模式。通过建立集监测、分析与预警于一体的信息化系统,可以对基坑施工全过程进行动态管理。各类监测数据在统一平台上进行整合与分析,形成多维度评价体系,为施工决策提供可靠依据。数据处理不仅关注单一指标变化,还通过趋势分析揭示潜在风险,使管理者能够提前采取应对措施。信息化手段的引入,使施工现场与管理层之间形成高效的信息传递机制,提高响应速度与决策效率。在复杂施工环境中,这种基于数据的管理方式能够有效减少人为判断误差,提升安全控制的科学性与精准性。通过持续优化信息化系统功能,可以进一步增强基坑施工的安全保障能力,为大型工程项目提供稳定的技术支撑。

# 4 超高层装配式结构施工技术

## 4.1 构件吊装与高空作业技术

在装配式结构施工体系中,构件吊装与高空作业构成施工实施的核心环节,其技术水平直接影响工程进度与安全控制效果。由于构件体量较大且安装精度要求较高,吊装过程中需要对吊点布置、设备选型及作业路径进行系统优化,使构件在起吊、平移与就位过程中保持稳定受力状态。通过对施工现场空间条件与作业顺序的综合分析,可以合理安排吊装流程,减少交叉作业带来的干扰。在高空作业阶段,分区施工方式能够有效降低作业面集中带来的风险,使不同区域施工形成相对独立的作业单元。标准化操作流程的建立,使施工行为具备统一规范,有助于提升作业一致性与可控性。安全管理与技术措施相结合,使人员操作环境更加稳定,从而在保证施工效率的同时实现风险的有效控制。

## 4.2 节点连接与结构整体性控制

节点连接作为装配式结构体系中的关键部位,其施工质量直接关系到结构受力性能与整体稳定性。节点施工过程中,需要在设计要求与现场条件之间建立精确对应,通过控制构件定位精度与连接工艺参数,使节点连接达到预期性

能。连接方式的选择与施工顺序的安排,需要充分考虑结构受力路径与施工阶段的力学变化,使节点在安装过程中保持可靠性。施工中通过引入检测手段,对关键连接部位进行实时监控与质量评估,可以及时发现偏差并进行调整,从而避免问题在后续施工中累积。节点质量控制不仅体现在施工阶段,也需要在全过程管理中形成闭环,使设计、加工与安装之间实现有效衔接。通过精细化控制,可以确保结构在整体层面具备稳定性与安全性,为工程质量提供坚实保障。

#### 4.3 标准化施工与效率提升

装配式建筑施工强调标准化与模块化理念,通过对构件设计、生产与安装流程的统一规范,使施工过程由传统经验主导转向体系化管理。标准化构件在工厂预制阶段即可完成质量控制,使现场施工更多集中于安装与调试,从而减少现场作业的不确定性。统一的施工流程与操作规范,使各工序之间形成清晰衔接,降低因工序不一致带来的效率损失。标准化体系的建立,有助于实现施工过程的可复制与可推广,使工程管理更加高效。随着施工经验的积累与技术手段的完善,标准化程度不断提高,使施工周期得到有效压缩,同时降低材料浪费与返工率。通过在设计与施工阶段同步推进标准化建设,可以形成完整的技术体系,为装配式结构工程的高质量实施提供支撑。

### 5 大跨度结构与复杂幕墙施工技术

#### 5.1 大跨度钢结构连廊安装技术

大跨度钢结构连廊在超级综合体工程中承担空间连接与结构转换功能,其安装过程对精度控制与整体稳定性具有较高要求。由于构件跨度大、自重较高,施工过程中易受温度变化、吊装路径及受力转换等因素影响,若控制不当,容易产生累计误差与结构变形。通过采用分段拼装与整体提升相结合的施工方法,可以在地面完成关键节点拼装与质量控制,再通过同步提升实现整体就位,从而降低高空作业难度并提高安装精度。在施工组织中,需要对拼装顺序与受力路径进行系统分析,使结构在各阶段均处于安全状态。结合数字化模拟技术,对吊装过程、受力变化及位移趋势进行预演,有助于提前识别潜在风险并优化施工方案。通过全过程精细控制与多技术手段协同应用,可以有效保障大跨度结构安装的精度与稳定性,使其满足复杂工程条件下的施工要求。

#### 5.2 异形幕墙精准施工技术

异形幕墙作为建筑外立面的重要组成部分,其造型复杂且空间曲面变化多样,对施工精度与加工质量提出了较高要求。传统施工方法在面对复杂曲面时,往往难以保证构件安装的连续性与一致性,容易产生拼缝不均或局部偏差问题。通过引入三维扫描与数字化建模技术,可以对实际结构进行高精度测量,并将数据与设计模型进行比对,从而实现

构件加工与现场安装的精确匹配。在施工过程中,基于数字模型进行放样与定位,使每一块幕墙单元在空间中的位置得到准确控制,减少人为误差带来的影响。数据驱动的施工方式,使构件加工、运输与安装之间形成紧密衔接,提升整体施工效率。通过对安装过程的持续校核与调整,可以有效提高幕墙系统的整体精度与视觉效果,使复杂造型在实际工程中得到高质量呈现。

#### 5.3 BIM 技术在施工中的集成应用

BIM 技术在复杂工程中的应用,改变了传统施工管理以经验为主的运行方式,通过三维信息模型实现设计、施工与运维各阶段的数据贯通与信息共享。在施工阶段,BIM 模型不仅用于表达空间关系,还承担施工组织与过程模拟的功能。通过碰撞检测,可以提前识别结构与机电系统之间的冲突,避免现场返工带来的时间与成本损失。施工模拟功能则能够对关键工序进行动态演示,使施工方案在实施前得到验证与优化,从而提高决策的科学性。模型数据与现场管理系统的结合,使进度控制与资源配置更加直观与高效,提升项目整体协调能力。随着信息技术的发展,BIM 应用逐渐向多维度拓展,其在质量控制、安全管理及运维管理中的作用不断增强。通过集成应用,可以推动施工管理向数字化与精细化方向转型,为大型复杂工程提供可靠的技术支撑。

### 6 结语

航天科技城超级综合体项目在施工过程中所面临的技术问题,具有典型的复杂性与综合性。通过对基坑工程、装配式结构、大跨度钢结构及数字化施工技术的系统研究,可以形成较为完善的关键施工技术体系。研究表明,技术创新与管理优化的协同推进,是提升工程质量与效率的重要途径。在未来工程实践中,应进一步加强数字化技术与施工工艺的融合,推动施工模式向智能化与精细化方向发展。通过不断总结实践经验并加以推广,可为超大型综合体项目建设提供更加成熟的技术支持,从而促进建筑行业整体水平的提升。

#### 参考文献

- [1] 曾维贵.大型城市综合体项目设计与管理要点[J/OL].中国城市规划知识仓库,1-4[2026-03-27].
- [2] 曹光怀.全过程管理+EPC+BIM在大型综合体项目中的集成应用[J].住宅与房地产,2026,(05):74-76.
- [3] 陈阳阳.分析BIM技术在建筑结构设计中的运用——以某市文化综合体项目为例[J].城市建设,2026,(04):115-117.
- [4] 谢晋,蒋兴伟,王先所,等.医疗综合体项目医用气体施工技术[C]//《施工技术》杂志社.2024年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册).中建八局第三建设有限公司,2024:229-232.
- [5] 李聪,吴广凡,涂品.商业综合体中庭结构改造施工技术[J].建筑技术,2026,57(03):271-275.

# Optimization of Construction Technology for Geological Disaster Prevention and Control in Tailings Dams

Zituan Zhao

Wuhan Sinomach Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430032, China

## Abstract

Under the construction context of green mines and extreme weather, tailing dams have structural deficiencies in terms of dam stability, seepage control, and monitoring response. This paper, with the main thread of stability control during the construction period, seepage path interruption, and the closed-loop of monitoring and early warning, proposes an integrated optimization path of polymer-modified soil and thin-layer fast-cycle compaction, pre-stressed anchoring and counter-pressure soil to enhance shear strength, composite geomembrane and continuous blind ditches to reconstruct seepage channels, and multi-source sensing and edge computing-driven linkage threshold system. Taking a certain tailing dam as an example, after implementation, the stability safety factor of the dam body increased from 1.15 to 1.35, the seepage velocity decreased from 0.20 to 0.05 meters per day, the early warning response time was shortened from 30 minutes to 5 minutes, and the comprehensive cost decreased by 12%, the risk occurrence rate decreased by 80%, and the seepage pollution index decreased by 60%. The results show that this integrated optimization path can achieve the synergy of risk forward control and cost reduction and efficiency improvement under the condition of limited rainy season window.

## Keywords

tailings pond; dam body stability; seepage control; monitoring and early warning; extreme weather

# 尾矿库地质灾害防控工程施工技术优化

赵紫团

武汉国机岩土工程有限责任公司, 中国·湖北 武汉 430032

## 摘要

在绿色矿山与极端天气叠加的施工情境下,尾矿库在坝体稳定、渗流控制与监测响应方面存在结构性短板。本文以施工期稳定控制、渗流路径切断与监测预警闭环为主线,提出高聚物改性土与薄层快循环压实、预应力锚固与反压土协同提升抗剪强度,复合土工膜与连续盲沟重构导渗通道,多源传感与边缘计算驱动的联动阈值体系。以某尾矿库为例,实施后坝体稳定性系数由1.15提升至1.35,渗流速度由0.20降至0.05米每日,预警响应时间由30分钟缩短至5分钟,同时综合费用下降12,险情发生率下降80,渗流污染指数下降60。结果表明,该一体化优化路径能够在雨季窗口受限条件下实现风险前瞻管控与降本增效的协同。

## 关键词

尾矿库; 坝体稳定; 渗流控制; 监测预警; 极端天气

## 1 引言

尾矿库作为矿业固废高位堆存的关键工程单元,其安全运行直接关系到流域生态与下游城镇安全。近年来绿色矿山建设要求与极端天气频发并行,施工窗口缩短、任务密集的矛盾愈发突出,坝体在高含水率细粒尾砂堆筑条件下更易出现强度折减与软化破坏,渗流通道在短历时强降雨与库水位快速波动的驱动下难以及时疏解,自由水面抬升与浸润线外移放大了整体与局部失稳风险。同时,传统以人工巡查与低频观测为主的手段对快速演化状态识别滞后,监测信息与

施工组织脱节,难以支撑秒级联动的处置决策<sup>[1]</sup>。基于此,本文聚焦施工期的关键控制环节,围绕材料体系与工序协同提升抗剪强度,防渗与导渗一体化重构等效渗透系数,多源感知与边缘计算构建联动阈值机制,形成面向施工组织的整合型技术体系,并通过工程应用量化其在安全、经济与环境维度的综合效益,为山区细粒尾砂库的防控实践提供可复制路径与参数化依据。

## 2 尾矿库地质灾害防控工程施工现状与问题分析

在绿色矿山与极端天气叠加的施工情境下,施工任务密集与窗口受限并存,但现行做法在三类关键环节暴露出结构性短板。坝体稳定性方面,上游法与中线法库区普遍选用细颗粒高含水率尾砂,雨季堆筑周期被压缩,施工碾压不连续,

【作者简介】赵紫团(1980-),男,中国河南平顶山人,硕士,助理工程师,从事地基基础研究。

把坝体抗剪强度储备拉低,坝坡夹层软化与坝肩风化带贯通,使整体与局部稳定同受扰,在老坝加高与排洪改线交汇区形成扰动集中带。渗流控制方面,防渗帷幕布设长度与渗透通道分布不相匹配,心墙与反滤层级配偏离设计意图,排水体连续性差,导致自由水面抬升与浸润线外移在暴雨与上游水位快速波动阶段明显;排洪涵洞节点止水老化以及盲沟淤堵,使渗透坡降增大。监测与响应方面,仍以人工巡查和周期性变形观测为核心,自动化渗压计、孔隙水压力计、GNSS连续站以及光纤光栅应变尚未形成一体化网络,布点稀疏、采样间隔长、阈值设定依赖经验,导致对快速演化状态的响应滞后,信息平台未与施工进度和加固工序建立联动<sup>[2]</sup>。

### 3 尾矿库地质灾害防控施工技术优化策略

#### 3.1 坝体稳定性加固技术优化

面向上游法与中线法尾矿坝在雨季高含水率细粒尾砂堆筑条件下的滑坡敏感性,本研究把材料体系与施工工艺的协同优化当作核心路径。优先选用高聚物改性土作为坝坡稳定层与关键连接部位的加固介质,包含水溶性聚合物乳液与聚氨酯类材料与细粒尾砂现场拌合,借助包裹黏结与界面加筋效应,提高细料结构的抗剪强度与抗软化能力。分层压实工序按薄层快循环组织,把单层厚度控制在0.25至0.35 m,把含水率调至接近最佳值的偏差带内,依靠大吨位振动碾与边部小型夯具的迭代碾夯,实现高均匀度的干密度。结合坝肩风化带与软夹层的分布特征,在坝坡设置预应力锚杆与锚杆梁的联合体系,把自由段与锚固段的长度划分与持力层埋深相匹配,常规取水平间距约3.0至4.0 m、竖向间距约2.5至3.0 m,施加分级张拉与锁定,引入面层钢筋网与喷射混凝土形成受拉受剪协同的表层结构<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 渗流控制技术优化

鉴于暴雨阶段自由水面抬升与浸润线外移的叠加效应易把坝体下游形成高渗透坡降,本研究把“新型防渗膜+排水盲沟”作为耦合路径来削弱渗流对结构的侵蚀影响。新型防渗膜指以复合土工膜为基体并叠加自愈型聚合物层的防渗材料,通过上游坡面连续铺设并与老坝过渡段及涵洞周边进行同构衔接,把上游水头对坝体的直接作用进行切断。膜材宜选用厚度不小于1.5 mm的糙面复合膜,坡面设置非织造土工布缓冲层,坝顶与岸坡采取0.6 m×0.6 m锚固槽压埋处理,长边搭接宽度控制在0.15 m至0.20 m,采用热楔焊成型并进行真空盒与电火花连续检漏。需重点关注的是,廊道、跌水井等穿坝构筑物周边把止水圈与防渗膜进行多道密封,并设置环向止水带,避免结构节点形成优先渗透通道。由此推导,下游排水体系必须呈现全断面连通特性,排水盲沟作为包裹非织造布并以级配砾石围护的暗埋渗排单元,沿坝趾与坝体内分层布置,沟底坡度宜控制在0.5%至1.0%,纵向设置带滤孔的HDPE管,管径不小于160 mm,检查井按60 m至80 m间距布设并配置沉砂舱,把运维疏通与淤积监控嵌入运行期管理。反滤材料的颗粒级配需兼顾防冲与

导渗,内层中值粒径与尾砂粒径比值保持在安全区间,外层渗透系数较心层提高至少一个量级,以形成由内向外有序过渡的渗流通道。

#### 3.3 监测系统布设技术优化

传输链路遵循近场有线与远场无线相结合的原则,把坝体内部节点汇集至岸坡汇集箱,经环形光电复合缆接入网关,远端分散点位选用LoRa与NB-IoT混合接入,关键廊道配置4G或5G双上行通道,以TLS加密与断点续传来提升数据可用性。边缘网关承担数据清洗与融合,包括采集校时、异常剔除、短窗趋势识别与多源同位校核,在降雨强度超过20 mm/h或上游水位小时变幅超过0.3 m时,把采样周期由10 min下调至30 s,并联动施工组织把碾压节拍与分区排水的启动时点进行调整。为降低单点失效风险,典型断面关键孔位设置双探头并联,网络拓扑构建环网自愈,网关具备72 h本地缓存与上行恢复回传,全网以GPS授时与PTP校时统一时间基准,使跨源数据得以在秒级对齐。需重点关注的是,阈值体系采用分级与联动方式构建,把孔隙水压力比、坝顶水平位移速率与盲沟流量增量组合作为触发判据,设置预警、响应与管控三级动作,触发后把告警定向推送至施工调度与加固作业负责人。

### 4 尾矿库地质灾害防控优化技术的应用效果评估

#### 4.1 优化技术的工程案例验证

本研究选用某尾矿库作为对象,在雨季窗口受限与上游法局部中线法相结合的施工背景下,把施工期稳定控制、渗流路径切断以及监测预警闭环纳入同一工艺链条来开展实施。现场既往巡查记录显示坝体抗剪强度储备偏低且坝肩风化带与软夹层交错分布,渗排系统连通性薄弱并导致自由水面抬升,监测以周期性观测为主而对快速演化工况响应滞后。针对上述问题,项目把坝体加固、渗流控制与监测系统安装作为串联流程部署,形成施工组织与风险管控耦合的技改路径。稳定性系数在本文中指典型剖面极限平衡法得到的安全系数,渗流速度指下游观察断面达西平均渗速,预警响应时间指阈值触发到管控指令下达并执行到位的时距。

围绕坝体稳定性提升,施工在老坝加高过渡段与排洪廊道邻近区域设置加密工区,把水溶性聚合物乳液与聚氨酯类材料与细粒尾砂进行现场拌合,当作坝坡稳定层与关键连接部位的加固介质,依靠包裹黏结与界面加筋效应来提高抗剪强度与抗软化能力。分层压实以薄层快循环组织,把单层厚度控制在0.25至0.35 m,把含水率调入最佳值偏差带内,选用大吨位振动碾与边部小型夯具进行迭代碾夯,并把核子密度仪与轻便动力触探纳入过程验收<sup>[4]</sup>。

针对渗流控制薄弱环节,工程把上游坡面铺设复合土工膜叠加自愈型聚合物层的防渗系统,设置0.6 m乘0.6 m锚固槽进行压埋处理,并在涵洞与跌水井等节点实施多道密封以阻断优先渗透通道。下游以全断面连通理念重构排水网

络,沿坝趾与坝体内分层敷设包裹非织造布的排水盲沟与带滤孔 HDPE 管,沟底坡度控制在 0.5% 至 1.0%,检查并按

60 m 至 80 m 间距布设并配置沉砂舱,反滤材料级配形成由内到外的有序过渡以兼顾防冲与导渗。

表 1 某尾矿库优化前后防控效果对比表

指标	定义说明	实施前数值	实施后数值	变化幅度
坝体稳定性系数	典型剖面极限平衡法获得的安全系数	1.15	1.35	提升 17.4%
渗流速度 m d <sup>-1</sup>	下游观察断面达西平均渗速	0.20	0.05	降低 75.0%
预警响应时间 min	阈值触发到管控指令下达并执行到位的时间	30	5	缩短 83.3%

#### 4.2 优化技术的效益分析

鉴于雨季窗口受限与上游法和中线法复合施工的现实情境,本研究把经济、安全以及环境三类效益纳入同一评价框架来开展分析。施工成本在此处以单位填筑方量和全周期运维投入的综合费用来界定,灾害发生率指在年内中到大雨过程触发的险情事件发生频率,渗流污染指数由盲沟出水浊度、典型金属离子浓度以及达西渗速按权重叠加形成的无量纲指标。在沾益区白沙冲尾矿库的实施范围内,经成本台账与运维记录的对比核算,可以把材料体系和工序协同带来的节约明确量化:薄层快循环压实减少了返工与超控回填,防渗膜与连续盲沟降低了雨停待干和临时抽排的待机损耗,多源监测把巡检工时与突发抢险投入压缩到可控区间,综合费用相较基线施工组织方案降低 12%。需重点关注的是,防参与导渗的一体化重构把自由水面与浸润线稳定在下游安全区,渗流路径被集中至可治理断面,叠加检查井沉砂与定点抽排把悬浮颗粒与溶解态迁移通量同步削减,使渗流污染指数在同尺度监测周期内降低 60%,并把达标排放的保障能力扩展到高频暴雨季。由此推导,成本、风险与环境外部性被协同压降,优化技术在山区细粒尾砂库的推广具备可复制性与组织层面的适配空间<sup>[5]</sup>。

#### 5 结语

本文面向雨季窗口受限与上游法中线法复合施工的复杂场景,构建了坝体稳定、渗流控制与监测预警一体化的优化技术体系。工程应用表明,高聚物改性薄层快循环压实、预应力锚固配合反压与临时减载,可显著抬升抗剪强

度储备;复合土工膜与全断面连通盲沟重塑渗流通道,稳定自由水面与浸润线;物联网监测与边缘计算驱动的分级联动阈值,将风险响应由分钟级压缩至秒级调度。量化结果显示,稳定性系数提升,渗流速度与预警时距显著下降,综合费用与险情发生率同步压降,渗流污染得到有效治理。为保障持续成效,建议将质量与参数回填纳入施工组织闭环,完善帷幕与心墙补强在不同地质分区的参数库,持续优化阈值与工序联动规则,推进与施工进度计划的深度耦合。后续可围绕改性材料在循环干湿与冻融条件下的长期耐久性、强度与渗流的多场耦合机理、监测数据与数值模型融合开展研究,向数字孪生与全寿命智慧管控拓展。

#### 参考文献

- [1] 马晓旭,赵乐萱,王睿齐,傅灿,罗玉龙.某尾矿库塌坑处理方案的三维渗流优化比选研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2025,47(04):11-15.
- [2] 沈欣,果召强,黄旭东,高永,余家骥,潘秋景.地震作用下某尾矿坝永久位移分析及稳定性评估[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2025,48(06):839-845.
- [3] 潘凤珍.单薄分水岭和堆渣副坝地基塑性混凝土防渗墙施工技术[J].水泥,2025,(12):95-97.
- [4] 高鹏飞,高涛,史夏杰,耿超,李全明,梁辉,李伟,衡钊林.基于排土场-尾矿库联建系统主要影响因素的稳定性分析研究[J].中国安全生产科学技术,2025,21(11):107-113.
- [5] 徐亮,李亮,李春立,文嘉辉,王超.基于解耦Newmark法与代表性滑动面的扩容尾矿坝动力稳定可靠度分析[J].金属矿山,2025,(06):212-220.