

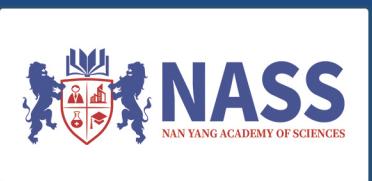
工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 7 · July 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 62233839
E-mail: contact@nassg.org
Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 7 · July 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(online)



中文刊名：工程研究前沿
ISSN：3060-9054（纸质）3060-9062（网络）
出版语言：华文
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Frontiers of Engineering Research
ISSN: 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)
Language: Chinese
URL: <http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《工程研究前沿》征稿函

期刊概况:

中文刊名：工程研究前沿
ISSN：3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)
出版语言：华文刊
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure
www.cnki.net

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

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
Tel: +65-65881289
Website: <http://www.nassg.org>



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
- 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。

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 Issue 7 July 2025
ISSN 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)

主 编

虞 斌

Bin Yu

编 委

王振波 zhenbo Wang

赵希强 Xiqiang Zhao

刘永军 Yongjun Liu

张新儒 Xinru Zhang

- | | | |
|----|---|--|
| 1 | 公共场所集中空调系统微生物污染特征消毒干预效果评估
/凌涛 程小璐 廖赋 汪文辰 | /梁子琦 |
| 4 | 钢板桩引孔设备选型与施工工艺适配性技术研究
/岳志才 刘青江 王学峰 李奋新 胡廷轩 | 25 公路路基注浆加固新工艺质量控制研究
/蒋海洋 |
| 7 | 边缘网关在物联网资产管理系统中的技术适配应用
/耿士顶 | 28 地质科技创新成果在地勘实践中的转化机制与应用路径优化——基于新一轮找矿战略行动的地勘单位实践
/雷育宾 蒋显忠 喜英 陆建国 齐志龙 |
| 10 | CF 对负温下硅酸盐砼抗压性能的影响
/颜佳志 王杰 王金星 熊艺凡 刘凤云 | 31 天然气长输管道焊接质量提升技术措施研究
/张明深 |
| 13 | 复合防水系统（非固化 + 自粘卷材）优劣与控制
/钱远建 | 34 人机协作模式下电子加工车间设备安全防护措施的改进与效果验证
/邹大章 |
| 16 | DR 与 PAUT 在无损检测中的对比研究及工程应用探讨
/陈强 和连昌 谭啸 | 37 自控仪表在化工项目建设中的应用研究
/侯卫民 |
| 19 | 桥梁工程中大跨径连续桥梁施工技术探讨
/江尧 | 40 玄武岩纤维再生混凝土力学性能研究
/侯玉飞 |
| 22 | 智慧工地系统在建筑工程管理中的应用策略 | 43 超高层建筑施工安全管理措施的探讨
/潘秋芳 |

- 1 Evaluation of disinfection intervention effect on microbial contamination characteristics of centralized air conditioning systems in public places
/ Tao Ling Xiaolu Cheng Fu Liao Wenchen Wang
- 4 Research on the compatibility between the selection of steel plate pile drilling equipment and construction technology
/ Zhicai Yue Qingjiang Liu Xuezheng Wang Fenxin Li Tingxuan Hu
- 7 Technical Adaptation and Application of Edge Gateways in IoT Asset Management Systems
/ Shiding Geng
- 10 Effect of CF on compressive strength of Portland cement concrete at negative temperatures
/ Jiazhi Yan Jie Wang Jinxing Wang Yifan Xiong Fengyun Liu
- 13 Advantages and disadvantages of composite waterproofing systems (non-curing + self-adhesive rolls) and their control
/ Yuanjian Qian
- 16 Comparative Study of DR and PAUT in Nondestructive Testing and Discussion on Engineering Application
/ Qiang Chen Lianchang He Xiao Tan
- 19 Discussion on Construction Technology of Large Span Continuous Bridge in Bridge Engineering
/ Yao Jiang
- 22 Application strategy of intelligent construction site system in construction engineering management
- 25 Research on Quality Control of New Process for Highway Subgrade Grouting Reinforcement
/ Haiyang Jiang
- 28 Optimizing Mechanisms and Application Paths for Transforming Geological Innovation Achievements in Exploration Practices: A Case Study of Geological Survey Units Under the New Mineral Exploration Strategy
/ Yubin Lei Xianzhong Jiang Ying Xi Jianguo Lu Zhilong Qi
- 31 Research on Technical Measures for Improving Welding Quality of Natural Gas Long-Distance Pipeline Transportation
/ Zhangming Shen
- 34 Improvement and Effect Verification of Equipment Safety Protection Measures in Electronic Manufacturing Workshop under Human-Machine Collaboration Mode
/ Dazhang Zou
- 37 Research on the Application of Automatic Control Instruments in Chemical Project Construction
/ Weimin Hou
- 40 Study on mechanical properties of basalt fiber recycled concrete
/ Yufei Hou
- 43 Discussion on Safety Management Measures for Construction of Super High-Rise Buildingsc
/ Qiufang Pan

Evaluation of disinfection intervention effect on microbial contamination characteristics of centralized air conditioning systems in public places

Tao Ling Xiaolu Cheng Fu Liao Wenchen Wang

Hubei Pulin Standard Technical Service Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

There is a risk of microbial contamination when improving indoor environment with centralized air conditioning systems in public places. This study collected and analyzed samples of return air, supply air, and condensate water from centralized air conditioning systems in hospitals, shopping malls, office buildings, and other places to evaluate the levels and distribution characteristics of bacterial, fungal, and pathogenic microbial contamination. The applicability of three disinfection methods, ultraviolet radiation, chemical disinfectants, and ozone, was compared. The results indicate that hospital microbial contamination is the most severe and requires special attention; Ultraviolet radiation has the highest removal rate for bacteria, chemical disinfectants have better inhibitory effects on fungi, and ozone disinfection has a shorter duration of action. This study provides practical basis for the selection of cleaning and disinfection strategies and microbial risk prevention and control for centralized air conditioning systems.

Keywords

public places; Central air conditioning system; Microbial contamination characteristics; Disinfection intervention; effect evaluation

公共场所集中空调系统微生物污染特征消毒干预效果评估

凌涛 程小璐 廖赋 汪文辰

湖北省普林标准技术服务有限公司，中国·湖北 武汉 430000

摘要

公共场所集中空调系统改善室内环境时存在微生物污染风险。本研究采集分析医院、商场、办公楼等场所集中空调的回风、送风及冷凝水样本，评估细菌、真菌及致病微生物污染水平与分布特征，对比紫外线、化学消毒剂和臭氧三种消毒方法适用性。结果表明，医院微生物污染最严重，需重点关注；紫外线对细菌去除率最高，化学消毒剂对真菌抑制效果更好，臭氧消毒作用持续时间短。本研究为集中空调系统清洁、消毒策略选择及微生物风险防控提供实践依据。

关键词

公共场所；集中空调系统；微生物污染特征；消毒干预；效果评估

1 引言

集中空调系统作为现代公共场所的关键设施，微生物污染问题正不断引发人们关注，超过 60% 的公共场所集中空调出现微生物超标现象。其中回风管道、冷凝水盘和过滤器等位置污染极为严重，容易引发呼吸道感染以及过敏等状况。目前，因缺少对污染特征的全面系统认知，消毒方法的选择与应用效果参差不齐，本文借助实地取样和实验剖析，全面探究集中空调微生物污染规律和消毒成效，以给优化消毒策略、保障空气健康提供科学凭据。

【作者简介】凌涛（1994-），男，中国湖北黄冈人，本科，从事质量检测研究。

2 公场所集中空调系统微生物污染特征分析

2.1 不同场所类型的微生物污染差异

对商场、综合医院、写字楼、酒店这四类公共场所的集中空调系统开展抽样调查，采集到 240 份样本，检测结果表明不同场所微生物污染程度有明显差异。综合医院集中空调系统污染情况最为严峻，细菌总数平均达 $580 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，真菌总数平均为 $320 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，同时有 20% 的样本被检测出含有军团菌；由于商场人员流动频繁、空气流通状况复杂，细菌平均总数达 $420 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，真菌总数平均为 $280 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，未检测到致病菌；写字楼与酒店的污染状况相对缓和，平均细菌总数分别达 $250 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 、 $280 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，真菌总数平均分别为 $180 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 、 $200 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，都没有检测到致病菌^[1]。差异的主要成因是医院有大量病原微生物携带者，同时室内环境湿度偏高，利于微生物繁殖；写字楼和酒店的人员密集

程度相对不高，日常清洁频次高，面临的污染风险较小。

2.2 空调系统不同部件的微生物分布规律

开展了针对集中空调系统的回风管道、送风管道、冷凝水盘以及过滤器四个关键部件的微生物检测，发现冷凝水盘受微生物污染程度最深，细菌总数平均达 $850 \text{ CFU}/\text{cm}^2$ ，真菌总数平均为 $620 \text{ CFU}/\text{cm}^2$ 。原因是冷凝水盘长期处于潮湿环境，并且极易积聚灰尘与污垢，造就了适宜微生物生长的“温床”；回风管道相对稍差，细菌总数平均达 $480 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，平均真菌总数是 $350 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，主要由于回风直接与室内空气接触，易吸附空气中微生物及颗粒物；过滤器与送风管道受污染程度不高，过滤器平均细菌总数为 $220 \text{ CFU}/\text{m}^2$ ，真菌总数平均达 $150 \text{ CFU}/\text{m}^2$ ，送风管道细菌总数平均达 $180 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，真菌总数平均为 $120 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，过滤器的过滤效应在一定程度上降低了微生物向送风管道的传播量。

2.3 主要污染微生物的种类与特性

借助微生物的分离培养与鉴定工作，厘清公共场所集中空调系统中的主要污染微生物类型，细菌种类主要为革兰氏阴性菌，有军团菌、大肠埃希菌、*Pseudomonas aeruginosa*（铜绿假单胞菌）等。而军团菌致病性显著，可借空气传播引发军团菌肺炎，还能在潮湿环境存活数月；真菌主要包含曲霉菌、青霉菌和酵母菌，这类真菌容易生成孢子，孢子会顺着空调送风向室内扩散，引发哮喘、过敏性鼻炎等过敏性疾病；还检测到少量如金黄色葡萄球菌这类革兰氏阳性菌，虽说被检测出的比率不高，然而拥有一定的致病特性，可能会引发皮肤感染等问题^[2]。多数污染的微生物有耐低温、耐干燥的特性，能在空调系统中长久存活，而且繁殖速度迅猛，当温湿度适宜（温度 $20 - 30^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $60\% - 80\%$ ），24 小时内数量能增加至 $10 - 100$ 倍。

3 公共场所集中空调系统消毒干预方法选择与实施

3.1 常见消毒干预方法的原理与适用场景

公共场所集中空调系统常见的消毒手段主要有紫外线消毒、化学消毒剂消毒和臭氧消毒这三种，其原理和适用场景有显著不同。紫外线消毒借助波长在 $200 - 280 \text{ nm}$ 的紫外线杀菌能力，使微生物的 DNA 结构受损，让其无法繁殖。该方式操作简便、无化学残余，可用于空调系统送回风管道内壁及过滤器等部件消毒，特别适合那些对化学消毒剂敏感的地方，例如医院儿科病房、食品商场。化学消毒剂借助含氯消毒剂、过氧乙酸等与微生物蛋白质起反应，破坏细胞的结构，以此实现杀菌，杀菌范围广、效果好。适用于冷凝水盘、空调机组内部等既潮湿又污染严重的部件，经常用于医院、商场等污染风险高的地方；臭氧消毒借助臭氧强大的氧化能力，促使微生物的细胞膜与酶系统发生氧化分解，达成消毒目的。它穿透能力强，能用于空调系统管道的深处和隐蔽部

位消毒，但由于臭氧具有刺激性，得在无人环境使用，消毒后需充分换气通风。

3.2 消毒干预方案的制定与优化

在制定消毒干预方案时，要依据场所类型、空调系统污染程度以及部件特性，消毒干预方案制定应遵循“针对性、安全性、有效性”原则，根据前期污染监测成果明确消毒关键。比如，医院空调系统，要重点对冷凝水盘和回风管道实施消毒，并且要挑选对致病菌（军团菌）杀灭效果佳的方法；界定消毒参数，紫外线消毒时，需把控照射强度，化学消毒要确定消毒剂浓度，臭氧消毒则需调控臭氧浓度；由于消毒安全性，化学消毒剂切勿直接与金属部件接触，臭氧消毒要精准把控通风时间，保证室内臭氧浓度降到 $0.1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以下才能使用。依据实际应用成效，优化调整消毒方案，考虑到商场空调系统人员流动性大、无法长时间停机开展消毒工作的难题，把紫外线消毒和过滤器更换相融合，运用“夜间紫外线消毒 + 每周过滤器更换”的方式，既能够保障消毒效果，又降低对正常运营的干扰；考虑到写字楼空调系统污染程度不高的特性，减少消毒频率，把每月消毒一次改为每季度消毒一次，且采用“低浓度化学消毒剂擦拭 + 自然通风”的方法，降低化学残留风险。

3.3 消毒干预实施过程中的质量控制

消毒干预执行过程的质量把控是保障消毒成效的核心，应从人员、设备、操作三方面推进^[3]。针对人员要求，消毒操作人员应接受专业培训，掌握消毒方法的原理、操作流程以及安全注意要点，还须具备相关资质证书，操作前要检查个人防护用具（像防护服、口罩、手套）是否完好；按时对消毒设备（例如紫外线灯、臭氧发生器、消毒剂喷雾器）开展维护与校准工作，保障设备正常运转，紫外线灯每季度得检测其照射强度，臭氧发生器每月得检测臭氧浓度，消毒剂喷雾器每次使用前都要检查喷雾均匀度；严格依照消毒方案开展作业，详细记录消毒的时间、部位及参数等信息，同时在消毒进程中对关键环节实施监督检查，如使用化学消毒剂消毒时，检查消毒剂浓度是否合乎标准，当进行紫外线消毒时，查看紫外线灯能否全面覆盖消毒区域，杜绝出现消毒死角。构建消毒效果预评估体系。在完成消毒干预后，随机抽取部分样本开展微生物检测，若检验结果显示微生物数量未达标准规定（细菌总数 $\leq 500 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，真菌总数 $\leq 300 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，未检出致病菌，便要分析缘由，调整消毒策略后再次实施消毒，直至达标。

4 公共场所集中空调系统消毒干预效果评估

4.1 微生物去除率的检测与分析

消毒干预效果的核心评估指标为微生物去除率，借助对比集中空调系统消毒前后微生物数量，按公式（去除率 = $(\text{消毒前数量} - \text{消毒后数量}) / \text{消毒前数量} \times 100\%$ ）算出去除率。对运用三种消毒方式的空调系统样本开展检测，检测

发现紫外线消毒对细菌的去除率最高，平均可达 92.3%，对真菌去除率为 85.6%；采用化学消毒剂消毒，对真菌的去除成效最优，平均可达 90.5%，对细菌的去除率为 88.2%；臭氧消毒对细菌、真菌的去除率分别是 86.8% 和 83.4%^[4]。根据不同的场所，医院空调系统消毒后，细菌的平均去除比例为 89.7%，真菌平均去除率达 86.3%，且后续检测未发现军团菌；商场空调系统平均能去除 91.2% 的细菌，真菌平均可被去除 88.5%；写字楼与酒店的空调系统对微生物的去除率均超 90%，消毒效果佳。

经进一步剖析可知，微生物去除率受消毒方法选择的影响十分明显，要针对不同的微生物种类选用恰当的消毒方法。例如针对军团菌污染，化学消毒剂（含氯消毒剂）消毒的去除率比紫外线消毒高 5.8 个百分点；针对曲霉菌污染，紫外线消毒的去除效果比臭氧消毒高出 4.2%，消毒参数的恰当性同样会影响去除效果，如紫外线照射时间若未达 20 分钟，细菌去除率仅达 75.3%，当照射时间延长到 30 分钟，去除率提高到 92.3%。

4.2 消毒效果的持续时间评估

消毒效果的持续时间影响着消毒频率的界定。针对消毒后的空调系统进行 1 - 3 个月的跟踪检测，解析微生物数量随时间的变化走向，不同消毒手段的效果持续时间有差别。紫外线消毒的效果持续时长最长，在清洁状况良好的写字楼空调系统中，能让微生物数量 2 个月内不超标（细菌总数 $\leq 500 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ，真菌总数 $\leq 300 \text{ CFU}/\text{m}^3$ ），然而在污染严重的医院空调系统中，效果只能维持约 1 个月；化学消毒剂的消毒效果持续时长排第二，写字楼空调系统可维持 1.5 个月，医院空调系统大概是 25 天；臭氧消毒效果的持续时长最短，不论处于何种场所，其效果仅能维持 15 - 20 天，主要是因为臭氧在空气中容易分解，还无法在空调系统部件表面形成持久的抗菌防护层。

针对空调系统的部件，冷凝水盘消毒效果维持的时间最短，平均大概 20 天。鉴于此部件易再度累积水分与污垢，微生物繁殖速度迅猛；回风管道和过滤器消毒成效的持续时间偏长，平均约达 1 个月，主要缘由是过滤器可阻拦部分微生物进入系统，降低二次污染概率，室内环境状况也会影响消毒效果的持续时间，如人员密集且湿度大的室内场所，消毒效果持续时长会缩短 5 - 7 天。

4.3 消毒干预对空调系统运行的影响评估

评估消毒干预效果时，应剖析其对空调系统运行产生的影响，涵盖系统能耗、部件使用寿命以及室内舒适程度。从系统能耗角度而言，紫外线消毒和化学消毒剂消毒对能耗几乎没有影响，而臭氧消毒由于要关闭空调系统并营造密闭环境，会造成消毒时空调无法运转。若处于夏季或冬季的使用高峰期，会加大后续系统的负担，造成能耗短期内提升约 5%~8%，但消毒完毕后能耗可恢复常态；从部件使用寿命角度而言，若化学消毒剂消毒操作有误，会对空调系统中的金属部件（如送风管道内壁、冷凝水盘）产生腐蚀，长期使用可能让部件寿命减少约 1 - 2 年。而紫外线消毒与臭氧消毒对部件没有明显的腐蚀现象，只有紫外线灯需定期更换；从室内人员舒适度方面考量，紫外线消毒与臭氧消毒要求在无人环境开展，消毒后不影响室内温湿度。若化学消毒剂消毒时通风不足，会残留刺鼻气味，降低室内人员的舒适体验，然而将通风时间延长到不少于 2 小时，能有效去除气味。

5 结语

本文深入考察了公共场所集中空调系统的微生物污染特点、消毒方式及效果。研究发现：医院污染状况最为严峻，主要的污染位置是冷凝水盘，军团菌、曲霉菌等存活及繁殖能力颇为突出；紫外线、化学消毒剂以及臭氧等方式各有利弊，应依据实际污染特征与场所类别来挑选；消毒成效会被方法、参数以及环境所影响。该研究为集中空调微生物防控提供支撑，却未开展成本效益分析，样本仅涉及四类场所，未来可拓展应用至机场、地铁等场所，同时开展经济效益的对比分析，为制定更精确的消毒策略提供支撑。

参考文献

- [1] 周晓红,李晓君,郭健芬,等.一起胃肠镜终末漂洗水微生物检测超标事件的干预处置报告[J].中国消毒学杂志, 2022(003):039.
- [2] 孙渭歌,程慧娟,席丽娟,等.靶向高通量测序技术在纤维支气管镜引发的龟分枝杆菌医院感染假暴发事件调查中的应用[J].华西医学, 2025(3).
- [3] 江宁,钱子煜,黄钰亮,等.电解微酸性次氯酸水对口腔综合治疗台水路消毒效果观察[J].中国消毒学杂志, 2022(007):039.
- [4] 李云玲.口腔综合治疗台水路微生物污染情况调查分析[J].山东医学高等专科学校学报, 2023, 45(3):219-220.

Research on the compatibility between the selection of steel plate pile drilling equipment and construction technology

Zhicai Yue Qingjiang Liu Xuezheng Wang Fenxin Li Tingxuan Hu

China Communications First Highway Engineering Co., Ltd., No., Beijing, 101102, China

Abstract

The 18m and 24m Larsen IVw steel sheet pile support system was implemented for deep foundation pits in the Daxing section of National Highway 230. The construction site features a predominantly fine-grained sandy soil formation, consisting of multiple soil layers from top to bottom: silty sand fill, fine sand, and silty clay. This study investigates the selection of spiral drilling guide hole equipment and construction process compatibility based on the project's geological conditions. Through analyzing the influence of stratum characteristics on guide hole formation, the research optimizes equipment parameters and construction techniques to address difficulties in steel sheet pile driving. The findings provide technical references for deep foundation pit construction with steel sheet piles in similar fine-grained sandy soil formations.

Keywords

Steel sheet pile pilot hole equipment; Equipment selection; Construction technology; Compatibility technology

钢板桩引孔设备选型与施工工艺适配性技术研究

岳志才 刘青江 王学峰 李奋新 胡廷轩

中交一公局第三工程有限公司，中国·北京 101102

摘要

国道 230 大兴段深基坑用 18m、24m 拉森 IVw 型钢板桩支护，场区主要是粉细砂地层，自上而下分布粉砂素填土、粉细砂、粉质黏土等多层土体。本文根据该工程地质情况，对螺旋钻引孔设备选型及施工工艺适配性进行研究，通过对地层特性对引孔影响的分析，优化设备参数及施工工艺，解决钢板桩插打困难问题，为类似粉细砂地层深基坑钢板桩引孔施工提供技术参考。

关键词

钢板桩引孔设备；设备选型；施工工艺；适配性技术

1 引言

国道 230（长周路至西韩路）大兴段是北京市南部重要的交通干道，深基坑工程遇到的是以粉细砂为主的复杂地层。工程中 44 座承台基坑使用拉森 IV w 型钢板桩支护，在插打之前需要通过引孔来保证施工的效率。粉细砂地层易发孔壁坍塌、钻进阻力不均等状况，设备选型及施工工艺的适配性关乎工程质量与安全^[1]。本文根据工程实际，对螺旋钻引孔技术要点做了详细的研究，为同类工程提供实践依据。

2 工程概况与地质条件分析

2.1 工程基本信息

国道 230 大兴段起止桩号 K1+970 到 K4+047.7，全长 2.08 公里，27# 到 48# 轴 44 座承台基坑为深基坑，采用

18m、24m 拉森 IV w 型钢板桩 +H 型钢支撑支护。基坑开挖深度 11.28 - 15.65m，27# 轴位于永定河河槽内，受地下水影响较大，其余基坑位于河滩地、堤外。主要工程量为 18m 拉森 IV 型钢板桩 4020 根、24m 钢板桩 1868 根，围檩型钢为 HW588×300、HW700×300 等型号，在钢板桩插打前需要通过引孔处理复杂地层。

2.2 地层特性分析

场区地层自上而下依次分布，各层物理力学特性及适配引孔参数如表 1 所示：

粉细砂地层（②层、④层、⑥层、⑨层）占比达 60% 以上，其松散易塌、渗透性强的特性导致钢板桩直接插打时阻力大、桩身垂直度难以控制，且易引发孔壁坍塌，必须通过引孔预处理保障施工质量。

【作者简介】岳志才（1981-），男，中国山西晋中人，本科，高级工程师，从事公路工程施工经营管理方面的研究。

表1 地层信息表

地层编号	地层名称	主要特性	引孔关键参数	施工风险点
①层	粉砂素填土	表层松散, 含杂质, 承载力低	转速 25-30r/min, 压力 5kPa	孔口浮土堆积, 易塌孔
②层	粉细砂	颗粒均匀, 渗透性强, 易产生流砂	转速 20-25r/min, 压力 6-7kPa, 泥浆护壁	流砂、孔壁坍塌
③层	粉质黏土 (承台底)	可塑性强, 强度中等, 易粘钻头	转速 15-20r/min, 压力 8kPa	钻头打滑, 钻进效率低
④层	粉细砂	致密程度高, 钻进阻力大	转速 20r/min, 压力 8-12kPa, 预裂钻孔	钻进卡顿, 孔垂直度偏差大
⑤ - ⑨层	粉质黏土 / 细砂	交替分布, 力学性质差异显著	随地层交替调整转速 15-25r/min	参数切换不及时导致孔壁扰动

3 钢板桩引孔设备选型技术研究

3.1 选型原则与核心要求

引孔设备的选型要遵照地层适配性、施工效率、安全稳定性这三个准则, 具体要求如下: 第一, 设备必须适应粉细砂地层钻进, 不能造成孔壁坍塌; 第二, 钻孔直径要和钢板桩尺寸准确对应, 保证插打精度; 第三, 设备要有较强的机动性, 适应基坑分段布置的施工情况; 第四, 设备的钻进速度要可控, 符合施工进度计划。

3.2 设备选型分析与确定

针对工程地质条件, 对比螺旋钻、冲击钻、旋挖钻三种常用引孔设备: 冲击钻: 适用于坚硬地层, 钻进振动大, 易扩大孔径, 粉细砂地层中孔壁坍塌风险高, 排除; 旋挖钻: 效率高, 但设备体型大, 基坑间距小的场景下机动性差, 成本较高, 不适用; 螺旋钻通过螺旋叶片切削土体并将其输送到孔外, 钻进平稳, 对孔壁的扰动小, 且设备体型适中, 适合分散的基坑施工。

最终选择螺旋钻作为引孔主要设备, 150型振动锤、履带吊配合使用, 其中18m钢板桩引孔用临工760型螺旋钻, 24m钢板桩引孔用定制加大功率螺旋钻, 钻头直径比钢板桩径小5-10cm, 保证插打时的挤土效应和桩体稳定。

3.3 设备参数优化

根据地层特性调节设备参数, 在粉细砂地层中, 钻头转速设置为20~30r/min, 表层填土及该地层钻进压力控制在5~8kPa; 粉质黏土地层钻头转速调整为15~20r/min; 致密粉细砂层钻进压力提高到8~12kPa。钻头采用锥形螺旋钻头, 叶片螺距为15-20cm, 增加土体切削、输送能力。同时配置3kW水泵, 施工时同步运行降尘, 不仅可以有效防止粉砂扬尘污染, 还可以起到稳定孔壁的作用, 保证钢板桩引孔施工高效、环保、安全地进行^[2]。

4 引孔施工工艺适配性优化

4.1 施工工艺流程设计

结合工程特点设计引孔-插打一体化工艺流程:

施工准备→测量放样→螺旋钻就位→分层引孔→孔壁清理→钢板桩打入→垂直度校正→围檩安装→基坑开挖

关键控制节点包括引孔深度, 孔壁稳定, 钢板桩插打时机, 保证工序衔接顺畅, 符合粉细砂地层施工要求^[3]。

4.2 核心施工工艺适配性优化

4.2.1 测量定位与孔位布置

采用GPS定位加全站仪现场测量的方式, 引孔孔位按钢板桩插打位置准确布置, 偏差控制在±50mm以内。整体开挖基坑长边孔位间距≤10m, 短边每边中间增设1处孔位; 分幅开挖基坑每边布置4处孔位, 保证孔位分布均匀, 支撑钢板桩插打精度。

4.2.2 分层引孔施工技术

对于多层土体, 采用分层钻进工艺保证施工质量和效率: 表层粉砂素填土①层快速钻进1.5m到2.0m, 然后清理孔口浮土, 防止塌孔; 粉细砂②层用慢钻慢提的方式, 每钻进50cm停顿30s, 用螺旋叶片压实孔壁, 必要时注入泥浆加强护壁效果; 粉质黏土③层适当加大钻进压力, 避免钻头打滑, 提高钻进效率; 下部粉细砂④层及以下地层严格控制钻进速度, 每2m检测孔垂直度, 若偏差超过1%立即调整。另外, 引孔深度比钢板桩设计嵌固深度浅30-50cm, 为挤土留出空间, 保证钢板桩插打后的稳定, 18m钢板桩引孔深度控制在17.5-17.7m, 24m钢板桩引孔深度控制在23.5-23.7m。

4.2.3 孔壁稳定与防护措施

在粉细砂地层中进行钢板桩引孔施工, 孔壁坍塌是常发问题, 采用三重防护措施解决, 一是地下水位低处, 采用干法护壁, 依靠螺旋叶片钻进时对孔壁的挤压形成护壁; 二是地下水位高处, 如27#轴附近, 采用膨润土泥浆护壁, 泥浆比重控制在1.1-1.2g/cm³, 黏度控制在18-22s, 泥浆压力平衡地下水压力, 提高孔壁稳定性; 三是控制施工时间和机械作业, 引孔完成后30min内完成钢板桩插打, 防止孔壁长时间暴露坍塌, 禁止大型机械在孔位周边碾压, 防止机械振动、荷载作用下孔壁扰动, 从各方面保证粉细砂地层引孔施工安全、质量^[4]。

4.2.4 钢板桩插打与引孔适配控制

钢板桩插打采用引孔导向、振动沉桩的工艺, 插打前要严格检查孔位垂直度、深度, 对不合格孔位及时进行二次钻孔修正, 施工时用履带吊配合振动锤插打, 将首根钢板桩垂直度偏差控制在0.5%以内, 作为后续柱体的导向基准。每3m对桩身垂直度进行一次检测, 根据需要调节吊机位置和振动锤的角度及时校正偏差, 保证施工精度。另外, 在锁口处涂刷黄油混合物, 可以有效地减小插打阻力, 同时可以

有效地提高防渗性能，保证钢板桩的施工质量。

4.3 特殊工况施工工艺调整

27#轴位于永定河河槽中，面临地表水深50cm左右，地下水位高的挑战，同时致密粉细砂④层存在钻进阻力大的问题。根据以上复杂地质、环境条件，采用如下综合施工工艺：

河槽区域施工采用“围堰筑岛+引孔”。先填筑土围堰，填土高度应高出水位1.0m，宽度应超出承台边线3m，坡度为1:1；围堰内排水后用泥浆护壁引孔，钻进时增大泥浆比重至1.2-1.3g/cm³；钢板桩插打后及时安装第一道围檩支撑，防止水流冲击造成桩体移位。

对粉细砂层采用钻孔预裂和分段钻进的工艺。先用小直径钻头预钻孔形成裂隙，再用标准钻头扩孔；每钻进1m进行孔内送风，吹散松散砂粒降低阻力；同时配备液压加压装置，提高钻头切削能力保证钻进效率^[5]。

5 施工质量与安全控制措施

5.1 质量控制标准与检测方法

钢板桩引孔施工控制项目及允许偏差如下：孔位偏差控制在±50mm以内，用全站仪测量；孔垂直度不超过1%，用吊线锤检测；孔深度允许偏差为±100mm，用钢卷尺测量；孔径尺寸比桩径小5cm至10cm，用孔径规检测。

钢板桩插打质量控制要点有柱顶平面位置偏差±50mm，用全站仪检测；柱身垂直度偏差≤1%，用水平尺和吊线锤联合检测保证垂直度；锁口要贴合紧密，没有明显的缝隙，用观察法和塞尺检测来把控质量。

5.2 关键质量控制措施

施工前应对螺旋钻、全站仪等设备进行全方位校验，经过严格校准保证其精度满足施工要求，为后续工作打下基础。选取28#轴基坑作为首件工程，在施工过程中不断调整引孔参数及插打工艺，各项技术指标达到最好时再进行大面积施工。引孔时，实行分层检测制度，每钻进2m就对孔的垂直度和孔径进行检测，发现有偏差的立即采取有效的措施进行纠正，保证施工质量。引孔结束后，技术人员与监理一起对隐蔽工程进行验收，从各方面对引孔质量进行检查，合格后才能进行钢板桩的插打，通过这一系列的严格程序，保证钢板桩引孔施工的质量和安全^[6]。

5.3 安全保障措施

施工安全管理贯穿钢板桩引孔作业全过程，从设备、防坍塌、用电、监测预警都要把控系统：①设备安全，螺旋钻作业前必须全面检查机械性能，保证钻机停放在平整坚实的地面上，支腿稳固支撑；作业时专人监护，防止出现设备隐患。②防坍塌安全：地下水位高的地方不得盲目加快钻进速度，发现孔壁坍塌，应立即停机，用沙袋回填后重新钻孔，防止扩大险情。③用电安全：施工现场采用三相五线制供电，配备漏电保护器，所有电器设备做好防雨防潮，防止触电。④监测预警，在桩顶准确设置水平、竖向位移监测点，引孔、插打时实时监测，位移累计达到20-30mm预警值时立即停工处置，保证施工安全可控。

6 施工效果与技术经济分析

6.1 施工效果验证

通过使用螺旋钻引孔设备及采用最佳工艺，工程施工取得了良好的成效，具体表现在以下几点：①钢板桩插打成功率为100%，垂直度偏差小于1%，满足设计要求；②引孔效率达到4-6孔/天，比计划工期提前15天完成全部钢板桩插打；③孔壁坍塌率仅为0.3%，远低于行业平均水平，避免了质量风险；④钢板桩锁口防渗效果好，基坑抽水后渗漏量≤0.5L/(m·d)，为干槽施工创造了良好条件。

6.2 技术经济分析

技术效益方面形成了一套粉细砂地层钢板桩引孔成套技术，解决了复杂地层插打的难题，优化后的设备选型和施工工艺具有广泛的适用性，可以直接用于类似的深基坑工程，施工技术革新大大减少了钢板桩的损耗，利用率提高到了98.5%，比传统的施工方法提高了3%。

经济效益方面，用螺旋钻设备取代旋挖钻，租赁费下降了40%，施工效率提高，工期缩减，管理费用少了120万元，质量隐患减少，返工避免，直接产生86万元经济效益。两项效益互相促进，工程总体效益大增。

6.3 应用前景展望

本研究形成螺旋钻引孔设备选型及施工工艺适配技术，可用于粉细砂、松散砂土等复杂地层的深基坑钢板桩支护工程，对临近水源、地下水位高的工程有较好的借鉴意义。之后再优化泥浆护壁的配方以及钻进参数，提高在恶劣地质条件下适应性。

7 结语

国道230大兴段深基坑工程对于以粉细砂为主的复杂地层，通过系统的探究确定了螺旋钻为引孔设备，对钻头类型、转速、压力等重要参数进行了调整，形成了分层钻进、孔壁防护、及时插桩的施工工艺。可以解决钢板桩插打阻力大、孔壁坍塌等难题，保证施工质量和安全，缩短工期，降低成本。研究成果对类似地层条件下的钢板桩引孔施工提供可靠的、可借鉴的技术支撑，有较强的工程应用价值。

参考文献

- [1] 李宏宾. 复杂地质条件下钢板桩引孔施工技术研究与应用[J]. 科学技术创新, 2024, (09): 107-110.
- [2] 许松, 苏国梁, 邵彦杰, 等. 浅谈钢板桩快速入桩施工技术[C]//广东省国科电力科学研究院. 第四届电力工程与技术学术交流会议论文集. 中国建筑第四工程局有限公司, 2023: 199-200.
- [3] 彭勇波. 钢板桩引孔施工技术在工程中的应用研究[J]. 广东建材, 2022, 38(12): 65-67.
- [4] 刘海奇. 公路桥梁工程承台引孔钢板桩围堰施工技术要点分析[J]. 交通世界, 2022, (24): 62-64.
- [5] 吴辉. 深基坑水中承台引孔钢板桩围堰施工技术研究[J]. 运输经理世界, 2021, (32): 7-9.
- [6] 海大鹏, 王小强, 田为, 等. 基于不同引孔参数及换填土特性的钢板桩围堰性能分析[J]. 安徽建筑, 2022, 29(06): 141-142.

Technical Adaptation and Application of Edge Gateways in IoT Asset Management Systems

Shiding Geng

Nanjing Aoto Electronics Technology Co., Ltd., Nanjing, Anhui, 210039, China

Abstract

In order to solve the problems of low efficiency and insufficient real-time performance in traditional asset management, and to promote the deep integration of the Internet of Things and asset management systems, this study focuses on the technical adaptation application of edge gateways. First, analyze the integration requirements of the two, and clarify the core role of edge gateway in data transmission, protocol conversion, and edge computing, as well as the challenges faced by adaptation, such as device compatibility, data security, protocol differences, etc; Then, from the perspective of equipment docking, data transmission and processing, system integration and security assurance, a differentiated connection strategy, MQTT/CoAP protocol optimization, edge computing application, hierarchical integration and full process security protection scheme are proposed; Finally, verified by a case study of an electronic product manufacturing enterprise, the solution achieved efficient collaboration between asset equipment and management systems, reducing asset inventory time by 70%, improving management efficiency by 50%, and reducing management costs by 30%. This provides strong support for the intelligent upgrading and digital transformation of enterprise asset management.

Keywords

edge gateway; Internet of Things; Technical adaptation; system integration

边缘网关在物联网资产管理系统中的技术适配应用

耿士顶

南京奥拓电子科技有限公司，中国·安徽南京 210039

摘要

为解决传统资产管理效率低、实时性不足等问题，推动物联网与资产管理系统深度融合，本研究聚焦边缘网关的技术适配应用。首先分析二者融合需求，明确边缘网关在数据传输、协议转换、边缘计算中的核心作用，以及适配面临的设备兼容性、数据安全、协议差异等挑战；进而从设备对接、数据传输处理、系统集成与安全保障三维度，提出差异化连接策略、MQTT/CoAP协议优化、边缘计算应用及分层集成与全流程安全防护方案；最后经某电子产品制造企业案例验证，方案实现资产设备与管理系统高效协同，使资产盘点时间缩短70%、管理效率提升50%、管理成本降低30%，为企业资产管理智能化升级与数字化转型提供有力支撑。

关键词

边缘网关；物联网；技术适配；系统集成

1 引言

数字化时代，物联网技术迅猛发展，预计 2025 年全球物联网设备将达 750 亿个，5G 与云计算的进步为其提供有力支撑，推动各行业智能化变革。而资产管理对企业至关重要，传统管理方式存在效率低、实时性不足等问题，全球资产管理系统市场持续增长，但需与物联网深度融合以适配新需求。边缘网关作为物联网关键组件，可实现数据就近处理，降低延迟、减轻云端负担，在资产管理中能连接各类资产设

备，实时采集并预处理数据，为系统提供精准支持。本研究聚焦物联网边缘网关在资产管理系统的技术适配应用，综合运用文献研究法、案例分析法与技术调研，深入探索两者集成融合方法，创新提出基于边缘计算的系统架构，拓展资产实时定位、预测性维护等新应用场景，方案兼具实用性与可操作性，对提升资产管理智能化水平、助力企业数字化转型意义重大，也为相关领域研究提供理论与实践支撑。

2 物联网边缘网关与资产管理系统的技术适配需求分析

物联网系统具备强大的实时数据采集能力，可获取设备运行状态、环境参数等海量信息，而资产管理系统侧重资产全生命周期信息记录与管理，二者融合能实现资产实时监

【作者简介】耿士顶（1988—），男，中国安徽亳州人，本科，高级工程师，从事计算机科学与技术、软件工程、物联网、系统集成研究。

控、优化管理决策，为企业提供精准数据支持。边缘网关在融合中扮演关键角色，既是数据传输桥梁，可准确及时传递设备数据至资产管理系统；又能实现不同通信协议转换，解决设备与系统间的协议差异问题；还能通过边缘计算本地处理数据，过滤无效信息、减少传输量，提升处理效率。然而技术适配面临多重挑战：设备种类繁多导致兼容性难题，不同设备的接口、协议和数据格式差异给连接交互带来阻碍；数据在传输存储中存在被窃取、篡改的安全风险；设备、系统及边缘网关间的协议差异增加了集成复杂性。对此，需选择多接口多协议支持的边缘网关或开发适配驱动，采用加密、认证等安全技术保障数据安全，通过制定统一标准或中间件技术解决协议适配问题^[1]。

3 边缘网关与资产管理系统的技术适配方案

3.1 设备对接技术与实现

物联网资产管理系统中，边缘网关与物联网设备的连接分为有线和无线两类：有线连接里，以太网高带宽、稳定性强，适合工业场景大数据量实时传输，但布线成本高、施工复杂；RS-485 抗干扰能力强、支持多节点和远距离传输，适配工业复杂电磁环境，却传输速率低、功能扩展性有限。无线连接中，Wi-Fi 传输快、覆盖广、兼容性好，适用于办公场所和仓库设备调度，但其稳定性易受环境干扰、功耗较高；蓝牙低功耗、低成本、连接便捷，适合近距离小型设备或资产盘点数据传输，却传输速率低、覆盖范围有限；LoRa 长距离、低功耗的特点适配偏远或大面积场景，电池供电设备续航久，不过传输速率极低、网络部署管理复杂，实际需结合设备特性、场景需求和成本选择适配方式。资产管理系统的手持机盘点机多通过 Wi-Fi 或蓝牙与边缘网关无线对接，工作人员扫描资产标签采集信息后，经数据校验机制传输至网关，网关预处理后同步至系统服务器；固定盘点终端常以以太网、Wi-Fi 或蓝牙对接网关，安装于固定位置自动读取资产信息并传输，后续由服务器更新资产数据。对接过程中需通过信号增强、抗干扰技术保障通信稳定，采用 MQTT 等轻量级协议提升传输效率，同时做好终端设备与网关的远程配置管理，确保系统高效运行。

3.2 数据传输与处理技术适配

资产管理系统中，数据传输协议的选择与优化直接影响传输可靠性和效率，MQTT 与 CoAP 是常用协议：MQTT 基于发布 / 订阅模式，轻量适配低带宽、不稳定网络，支持三种 QoS 级别，QoS 2 可确保关键数据可靠传输，还支持持久会话保障传输连续性，适合资产状态、位置等信息的实时推送；CoAP 基于 UDP，延迟低、消息体积小，适配资源受限设备和实时性需求高的场景，其确认机制能保障数据准确性，还可延长低功耗设备续航。优化方面，MQTT 可按需选择 QoS 级别、优化代理配置，CoAP 可采用 DEFLATE 压缩、优化确认机制并结合缓存技术，提升传输效率。边缘

计算在数据处理中作用关键，通过本地预处理去除原始数据中的噪声、重复项，经聚合压缩减少传输量；借助实时分析算法（如机器学习模型）监测资产运行状态，及时发现异常并报警；通过分析历史与实时数据挖掘价值信息，为资产维护计划制定、调配方案优化提供决策支持，同时大量本地数据处理仅传输关键结果，有效减轻云端负担、降低网络延迟，提升系统实时性，适配高实时性需求场景^[2]。

3.3 系统集成与安全保障

物联网平台与资产管理系统平台的集成是物联网资产管理的关键，主要有数据层和应用层两种集成方式：数据层集成通过数据库对接或 ETL 工具实现数据共享，直接高效且能保障数据实时准确，ETL 工具可解决数据库结构差异问题并增强安全性；应用层集成借助 API 接口实现功能调用与数据交互，灵活性高、安全性强，但对接口设计和管理要求严格，需遵循 RESTful 等标准规范并做好版本管理。接口设计需兼顾数据格式（常用 JSON/XML）、传输协议（HTTP/HTTPS 或 MQTT）及安全认证（用户名密码、令牌等认证机制），通过集成实现两平台数据共享与业务协同，助力资产实时监控、远程控制及精准决策。数据安全与隐私保护同样关键，传输过程采用 SSL/TLS 协议加密数据，防止窃取篡改；存储时用 SM4 等算法加密敏感信息，保障数据机密性；同时通过用户名密码、多因素认证等身份认证方式及设备认证机制，验证用户与设备合法性，仅允许授权主体访问，全面筑牢数据安全防线。

4 案例分析

4.1 案例选取与背景介绍

本研究选取某电子产品制造企业为案例，其资产数量多、分布广，传统人工 + 纸质文档的资产管理方式流程繁琐、效率低、数据不准，资产动态信息传递滞后，影响决策与资源配置。为提升资产管理水平、降低成本、增强竞争力，该企业引入物联网资产管理系统，通过边缘网关优化升级。

4.2 基于边缘网关的资产管理系统实施过程

4.2.1 系统架构设计与搭建

本系统采用分层分布式架构，涵盖感知层、边缘层、网络层与应用层四大核心层级。感知层由传感器、RFID 标签及智能终端构成，针对生产车间设备安装多参数传感器，实时采集温度、转速等运行数据及开关机时长等使用信息，通过 RFID 标签实现资产唯一标识与快速识别，为盘点追踪提供基础。边缘层依据资产分布，在车间、仓库及办公区域分布式部署边缘网关，作为连接感知层与网络层的关键枢纽。网关支持以太网、Wi-Fi、蓝牙、RS-485 等多种连接方式，兼容 Modbus、MQTT、HTTP 等协议，可适配不同类型物联网设备。其核心作用为就近采集数据并完成本地预处理，通过过滤噪声数据、聚合多源信息、检测异常值等操作，大幅减少无效数据传输，提升处理效率。网络层采用企业局

域网与互联网结合的传输模式，内部通过有线及无线网络保障数据稳定传输，远程场景借助互联网实现交互，全程采用SSL/TLS加密协议，防范数据窃取与篡改风险。应用层基于B/S架构搭建资产管理平台，集成资产入库、盘点、维修等全流程功能，通过分析边缘层传输的数据，提供实时状态监控、使用效率分析及故障预测等服务，助力管理者优化资产配置与预防性维护。该架构充分发挥边缘计算优势，分布式部署降低单网关负载，分层设计明确各模块职责，兼顾系统实时性、可靠性与可扩展性，为高效资产管理提供技术支撑。

4.2.2 技术适配的具体实现与调整

在设备对接方面，针对不同类型设备采用差异化方案：大型生产设备通过以太网直连网关，小型传感器及终端采用Wi-Fi/蓝牙无线连接，对Modbus协议设备开发专用驱动程序，并优化波特率、校验方式等通信参数。手持机盘点机通过Wi-Fi接入网关，采用MQTT协议实现RFID标签数据实时传输；固定盘点终端部署于仓库关键位置，通过以太网与网关对接，自动读取资产标签信息，经统一配置管理保障协同工作。数据传输与处理环节，边缘网关与物联网设备间采用MQTT协议满足实时传输需求，通过服务质量分级保障关键数据可靠传输；网关与资产管理系统间选用HTTP协议适配集成需求，结合GZIP压缩算法减少传输量。利用边缘计算能力对数据进行实时分析，实现设备运行异常预警，及时触发维护响应。实施过程中针对现场问题动态优化：面对生产环境电磁干扰导致的无线传输不稳定，通过增加信号放大器、调整设备位置改善信号质量；针对高数据量设备采用分批传输策略，避免网络拥堵。经持续调整优化，系统实现稳定高效运行，适配复杂工业场景需求^[3]。

4.3 应用效果评估与经验总结

基于边缘网关的物联网资产管理系统为企业带来显著应用成效。效率提升方面，系统实现资产信息实时采集与更新，彻底改变传统人工手动盘点模式，通过手持机盘点机、固定盘点终端自动采集数据，大幅缩短盘点耗时并提升准确性。资产出入库、调拨等操作均实现自动化记录与实时同步，管理部门可动态掌握资产状态，响应速度显著加快。数据显示，系统落地后资产盘点时间缩短70%，整体资产管理效率提升50%。成本控制上，借助资产实时监控与数据分析能力，企业得以优化资产使用与维护规划，减少设备闲置浪费，降低运维成本。通过故障预测功能开展预防性维护，有效规避设备突发故障导致的停产损失，压缩维修开支，经估算资产管理成本降低30%。决策支持层面，系统提供的资产实时状态监控、使用效率分析等功能，为管理者提供全面

精准的数据支撑。企业通过分析资产使用效率，及时调配闲置资产至需求部门，提升资产利用率；依据故障预测数据优化维护计划、储备维修备件，进一步提高设备可用性，助力科学决策与资源优化配置。

在实施过程中，也总结了一些宝贵的经验。在技术选型方面，要充分考虑企业的实际需求和现有设备情况，选择合适的边缘网关和物联网设备，确保系统的兼容性和可扩展性。在系统集成方面，要注重各个环节的对接和协调，建立完善的测试机制，及时发现和解决问题，确保系统的稳定性和可靠性。在人员培训方面，要加强对员工的培训，使员工熟悉系统的操作和使用，提高员工的工作效率和数据质量。同时，也认识到在实施过程中可能会遇到一些挑战，如技术更新换代快、数据安全风险等，需要企业持续关注技术发展动态，加强数据安全管理，不断优化和完善系统，以适应企业不断发展的需求。

5 结语

本研究聚焦物联网边缘网关在资产管理系统的技术适配应用，剖析系统融合需求与适配挑战，提出设备对接、数据传输处理及系统集成安全等多维度适配方案。设备对接上，明确各类设备连接方式与驱动开发策略，实现高效通信与数据采集；数据传输处理方面，对比MQTT、CoAP协议并优化，依托边缘计算完成数据预处理与实时分析，提升传输可靠性并减轻云端压力；系统集成与安全上，设计数据层、应用层集成方案，完善接口设计与安全认证，通过加密、认证技术保障数据安全。制造企业案例验证了系统可行性，在提升资产管理效率、降低成本、优化决策等方面成效显著，助力企业数字化转型。未来，该应用将向智能化、高效化、安全化发展，边缘网关将集成AI算法、融合新一代通信技术。后续研究需优化网关软硬件架构、强化安全技术、拓展全生命周期管理等应用场景，并探索与区块链、数字孪生等技术的融合，推动系统创新升级。

参考文献

- [1] 方纪磊.支持边缘计算任务的物联网网关系统的设计与实现[D]:西安电子科技大学,2023.DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2023.003341.
- [2] 李承龙.基于区块链的物联网边缘侧数字资产管理系统的
设计与实现[D]:北京邮电大学,2020.DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2020.001874.
- [3] 高晓峰,李晓蕾,董书谦.电网企业中关于固定资产管理的物联网
技术应用研究[J].电力系统装备,2019,(21):206-207.

Effect of CF on compressive strength of Portland cement concrete at negative temperatures

Jiazhi Yan¹ Jie Wang¹ Jinxing Wang¹ Yifan Xiong¹ Fengyun Liu²

1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China

2. Department of Engineering Management Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China

Abstract

In order to explore the improvement effect of ceramic fiber on the compressive properties of ordinary silicate concrete under negative temperature conditions, the compressive strength of concrete with different mass fractions (0%, 0.2%, 0.3%, 0.4%) of ceramic fiber under normal temperature (20°C) and negative temperature (-5°C, -10°C, -20°C) was studied by systematic experiments. The microstructure and strengthening mechanism were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The results show that ceramic fiber can significantly improve the compressive strength of concrete in negative temperature environment. Especially at -10°C and -20°C, when the fiber content is 0.2%~0.3%, the growth rate of compressive strength exceeds 40%, showing the best enhancement effect. SEM analysis reveals that ceramic fibers can effectively improve the low-temperature mechanical properties and frost resistance of concrete by inhibiting crack propagation, optimizing pore structure, reducing the content of frozen water, and forming a three-dimensional network to alleviate the expansion stress of ice crystals.

Keywords

ceramic fiber; ordinary silicate concrete; negative temperature conditions; compressive strength; microstructure

CF 对负温下硅酸盐砼抗压性能的影响

颜佳志¹ 王杰¹ 王金星¹ 熊艺凡¹ 刘凤云²

1. 西南石油大学, 中国·四川成都 610500

2. 西南石油大学工程管理教研室, 中国·四川成都 610500

摘要

为探究陶瓷纤维对普通硅酸盐混凝土在负温条件下抗压性能的改善效果, 本文通过系统试验研究了不同质量分数(0%、0.2%、0.3%、0.4%)陶瓷纤维掺量下混凝土在常温(20°C)及负温(-5°C、-10°C、-20°C)养护条件下的抗压强度变化, 并结合扫描电镜(SEM)分析了其微观结构与增强机制。结果表明: 陶瓷纤维能显著提升混凝土在负温环境中的抗压强度, 尤其在-10°C和-20°C条件下, 纤维掺量为0.2%~0.3%时, 抗压强度增长率超过40%, 显示出最优增强效果; SEM分析揭示, 陶瓷纤维通过抑制裂缝扩展、优化孔结构、减少可冻结水含量, 并形成三维网络以缓解冰晶膨胀应力, 从而有效改善混凝土的低温力学性能与抗冻性。

关键词

陶瓷纤维; 普通硅酸盐混凝土; 负温条件; 抗压强度; 微观结构

1 引言

随着工程领域的拓展, 混凝土的应用场景不断扩大,

【基金项目】西南石油大学土木工程与测绘学院大学生科技创新基金项目“陶瓷纤维对普通硅酸盐混凝土在负温条件下抗压性能的影响研究”; 2025年四川省大学生创新训练计划项目“陶瓷纤维改良混凝土抗压性能及其纤维分散性影响机理研究”(项目编号:S202510615214); 四川省自然科学基金项目(No. 2025ZNSFSC1314)。

【作者简介】颜佳志(2003-), 男, 中国四川达州人, 本科, 从事工程管理研究。

但其抗拉强度低、脆性大、韧性差等缺点使得混凝土的应用得到了一定的限制。为了克服混凝土自身的缺陷, 国内外众多学者采用玻璃纤维^[1]、镀铜钢纤维^[2]等对混凝土进行改良, 发现纤维的掺入能够有效提升混凝土的力学性能。

上述研究表明, 纤维能够显著提高混凝土的力学性能及耐久性。但陶瓷纤维(CF)相较于玻璃纤维和碳纤维等, 不仅具有玻璃纤维抗腐蚀的特性、碳纤维轻重量的特性, 还具有耐高温、热稳定性好、导热率低、比热小及耐机械震动的特性^[3]。因此, CF在混凝土改良方面具有巨大的潜力。苏灏扬、许金余团队^[4]对体积分数分别为0.1%、0.2%和0.3%的陶瓷纤维混凝土的准静态和动态力学性能进行了研究, 深入分析了CF的增强机理, 最终发现CF对普通硅酸盐混凝

土在增强和增韧方面的效果总体上比碳纤维更优。

目前,无机非金属纤维材料对各类混凝土力学性能影响的研究已经趋于成熟,但关于CF在负温条件下对普通硅酸盐混凝土力学性能影响的研究却少见。因此,本研究采用CF对混凝土进行改良,研究不同质量分数的CF掺量下混凝土在常温和负温的条件下的抗压强度变化,并基于扫描电镜(SEM)对CF固化土的水化产物及微观结构进行分析,揭示固化机理,以期为寒冷地区的建筑结构提供材料解决方案。

2 实验概况

2.1 实验材料

本研究需要制备不同质量分数的CF掺量的改良混凝土,主要使用的原材料如下:

胶凝材料:PO·42.5R普通硅酸盐水泥、I级粉煤灰、微硅粉;细骨料:细度模数在2.5的河细砂;粗骨料:粒径在5~20 mm之间的石灰岩碎石;外加剂:聚羧酸高效减水剂、甲酸钙早强剂;外加材料:CF各项指标参数(质量密度:200~300 kg/m³;导热系数:0.03~0.06 W/m·k;耐高温度:1200~1400 °C;纤维直径:3.0~5.0 μm;介电常数:3~7),水:自来水。

2.2 配合比

普通硅酸盐混凝土的设计强度为C30,使用的普通硅酸盐混凝土配合比为:水泥:粉煤灰:硅粉:水:河细砂:石灰岩碎石:减水剂:早强剂=288:72:25:160:849:1081:2.88:6.5。本实验中,CF的掺量分别为普通硅酸盐混凝土质量的0%、0.2%、0.3%、0.4%(对应质量为0 kg/m³、4.98 kg/m³、7.48 kg/m³、9.98 kg/m³),所采用的CF长度介于100 mm~200 mm。

2.3 试件制备

本实验试件制备严格按照相关规范标准制备,各类材料严格按照上述配合比进行添加。在混凝土试件制备前,须对粗细骨料进行含水量测试,对于含水量过高的骨料,需要在烘箱中进行烘干处理,防止影响混凝土配合比。所有材料处理达标后即可开始制备混凝土试样,在制备试样的过程中,为使CF在混凝土中均匀分散,避免因制备导致的纤维团聚增强效果干扰,使用先干拌后湿拌与分散剂法两种方法结合的方式来制备陶瓷纤维混凝土,具体制备流程按照JGJ/T 221-2010《纤维混凝土应用技术规程》相关规范开展。本实验使用单卧轴混凝土搅拌机进行搅拌,混凝土入模后需进行振荡处理,混凝土成型尺寸为150 mm×150 mm×150 mm标准立方体试样尺寸。根据下表1分组,将各组试块在设置的温度下养护28天。

表1 实验分组设计

分组编号	CF掺量	养护温度	分组编号	CF掺量	养护温度
CF-0-1	0%	20°C	CF-3-1	0.3%	20°C
CF-0-2	0%	-5°C	CF-3-2	0.3%	-5°C
CF-0-3	0%	-10°C	CF-3-3	0.3%	-10°C
CF-2-4	0%	-20°C	CF-3-4	0.3%	-20°C
CF-2-1	0.2%	20°C	CF-4-1	0.4%	20°C
CF-2-2	0.2%	-5°C	CF-4-2	0.4%	-5°C
CF-2-3	0.2%	-10°C	CF-4-3	0.4%	-10°C
CF-2-4	0.2%	-20°C	CF-4-4	0.4%	-20°C

2.4 实验方法

2.4.1 无侧限抗压试验

无侧限抗压强度试验参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)。试验设备采用微机控制电液伺服万能试验机(SHT4106),加载速率为0.3~0.5 mm/min。无侧限抗压强度试验结果基于平行试样,平行试样抗压强度的最大值或最小值均不超过平均值的10%,以平行试样平均值为试验结果;当平行试样抗压强度的最大值或最小值超过平均值的10%,则结果无效,需重新制样养护进行测试。

2.4.2 SEM测试

选取压碎试块的内部破坏截面,吹风清扫后用导电胶将试样黏至底座上,随后进行喷金处理,最后放入扫描电子显微镜内部进行扫描电镜试验,观察微观孔隙结构和内部纤维特征。

3 试验结果

3.1 抗压实验测试结果

对于抗压实验的数据,筛选排除差距过大的数据,计算每组试件的最大抗压强度的平均值。不同掺量以及不同养护温度下的陶瓷纤维混凝土试件的最大抗压强度(平均值)。混凝土最大抗压强度随着温度的降低而降低。而CF掺量在0%~0.4%范围内,各组温度下的混凝土试件抗压强度最大值随着CF掺量的增加而增加,表明在一定的掺量范围内,在负温条件下,CF能够有效缓解混凝土因冻融破坏而导致其抗压强度下降的情况。

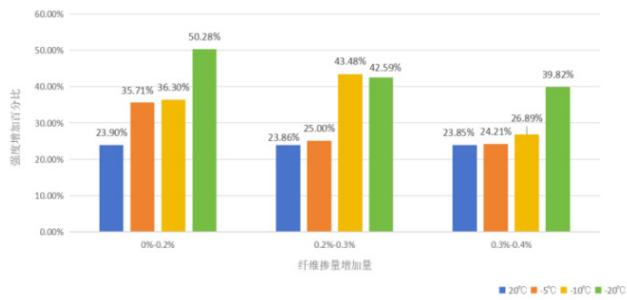


图1 混凝土试件最大抗压强度变化率

图1为纤维掺量增加后,各温度下混凝土试件最大抗压强度的变化率,由图可知,在各个阶段,20℃条件下混凝土试件最大抗压强度变化率最低,处于23%~24%之间,而-20℃条件下的混凝土试件最大抗压强度变化率较大,处于领先地位。当CF掺量从0%增加到0.2%后,-5℃与-10℃条件下混凝土试件最大抗压强度的增长率相近,处于36%上下,-20℃条件下增长率最大,达到50.28%。当CF掺量从0.2%增加到0.3%后,-10℃和-20℃条件下都出现了混凝土最大抗压强度增长率较大的情况,均处于40%以上,表明0.2%~0.3%是CF增强普通硅酸盐混凝土抗压强度效应最佳时的掺量范围。当CF掺量从0.3%增加到0.4%,各温度条件下的混凝土试件最大抗压强度增长率相较于前两个有所下降,表明此掺量区间下,CF在普通硅酸盐混凝土内部的增强效应开始减缓,但还未达到最大阈值区间,其仍对混凝土抗压强度起正向增强作用。

3.2 SEM测试结果

通过SEM电镜扫描测试发现,陶瓷纤维主要通过两种途径提高混凝土的抗压强度。第一种途径,在混凝土承压时,陶瓷纤维通过与混凝土之间的粘结作用来抑制混凝土裂缝的开展,进而提高混凝土的强度,如图2。第二种途径,在裂缝开展时,若裂缝与陶瓷纤维交叉,陶瓷纤维则通过牵拉作用和自身韧性来减缓裂缝开展,进而提高混凝土的抗压强度。

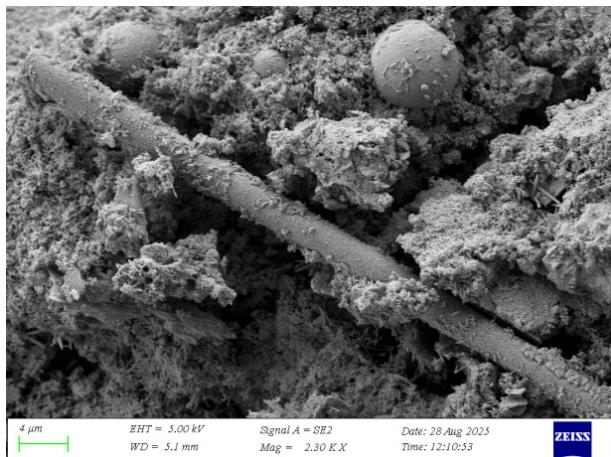


图2 陶瓷纤维与混凝土发生粘结

通过SEM电镜扫描测试发现,尽管存在早强剂和减水剂等促进混凝土水化的外加剂,在负温条件下,混凝土内部还是会存在部分水分凝结成细小冰状颗粒,导致混凝土内部存在许多细小空洞,进而降低混凝土的抗压强度。

在负温条件下,掺入陶瓷纤维的混凝土试块的抗压强度相较于未掺入陶瓷纤维的混凝土试块的抗压强度更高。造成这种影响的主要原因有以下两种:第一,陶瓷纤维可以抑

制冰晶膨胀应力,在负温条件下,混凝土内部中的水结成冰膨胀,产生巨大的内应力,而陶瓷纤维形成的三维网络能够约束和分担这种应力,减少水泥石基体和骨料界面过渡区的破坏,从而保全混凝土的整体性;第二种,陶瓷纤维的加入能有效优化混凝土的孔结构^[5],减少有害孔洞的数量,从而降低可冻结水的含量,降低冻结水对混凝土抗压强度的影响。

4 结语

通过系统的试验研究与微观分析,本文探讨了CF对普通硅酸盐混凝土在负温条件下抗压性能的影响,主要得出以下结论:

陶瓷纤维对负温条件下混凝土抗压强度具有显著增强作用。在CF掺量为0%~0.4%范围内,混凝土在-20℃~20℃养护条件下的抗压强度均随纤维掺量的增加而提高,表明陶瓷纤维能有效缓解因冻融引起的强度损失。

存在最佳纤维掺量区间。试验结果表明,CF掺量在0.2%~0.3%时,混凝土在负温条件下的抗压强度增长率最高,尤其是在-10℃和-20℃条件下,增长率均超过40%,说明该掺量区间为增强效应的最优范围。

纤维增强机理主要包括抑制裂缝发展与优化孔结构。SEM结果显示,陶瓷纤维通过与基体的粘结作用和裂缝牵拉效应,有效抑制了混凝土在受力过程中的微裂缝扩展;同时,纤维的掺入改善了混凝土的孔结构,减少了有害孔数量,降低了可冻结水含量,从而提升了抗冻性和力学性能。

负温条件下纤维的应力分担作用显著。陶瓷纤维形成的三维网络结构能够有效抑制冰晶膨胀引起的内部应力,保护水泥石与骨料界面过渡区,维持混凝土在低温环境下的整体性与耐久性。

参考文献

- [1] 叶晗晖,茅鸣,布占宇.玻璃纤维增强复合材料管约束装配式混凝土桥墩抗震性能[J/OL].复合材料学报,2025,42.
- [2] 陈晶,亢晋军,梁雄雄,等.陶瓷纤维和钢纤维对轻骨料混凝土力学性能的影响[J].建筑科学,2023,39(09):104-113.
- [3] Kareem M ,Ajadi E ,Fadipe O , et al.Sustainability-driven application of waste steel and tyre rubber fibres as reinforcement in concrete: An optimization study using response surface methodology[J].Next Materials,2025,7100345-100345.
- [4] 苏灏扬,许金余,高志刚,等.陶瓷纤维对普通硅酸盐混凝土的强韧化效应[J].高压物理学报,2013,27(01):69-75.
- [5] Banthia N ,Gupta R .Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete[J].Cement and Concrete Research,2006,36(7):1263-1267.

Advantages and disadvantages of composite waterproofing systems (non-curing + self-adhesive rolls) and their control

Yuanjian Qian

China Metallurgical South Wuhan Engineering Consulting Management Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

With the continuous development of construction technology, people have put forward higher requirements for the waterproofing performance, durability and reliability of building roofs. Single waterproof materials often struggle to cope with complex base conditions and harsh environmental challenges. Therefore, the concept of “combining rigidity and flexibility, and composite waterproofing” is increasingly becoming a consensus in the industry. The composite waterproofing system that combines non-curing rubber asphalt waterproof coating with self-adhesive polymer modified asphalt waterproof membrane integrates the advantages of coating waterproofing and membrane waterproofing. With its outstanding sealing performance, self-healing property, adhesion and construction convenience, it has been widely applied in modern building roofing projects. This article aims to deeply explore the technical features of this composite waterproofing system, systematically analyze its advantages and inherent disadvantages, and focus on elaborating the key points of attention and control measures throughout the entire process from design, materials, construction to acceptance, with the expectation of providing theoretical references and practical guidance for the scientific application of this technology and the improvement of project quality.

Keywords

Non curing rubber asphalt; Self adhesive polymer modified asphalt roll; Composite waterproofing; Advantages and disadvantages; Construction control; construction quality

复合防水系统（非固化 + 自粘卷材）优劣与控制

钱远建

中冶南方武汉工程咨询管理有限公司，中国·湖北武汉 430000

摘要

随着建筑技术的不断发展，人们对建筑屋面的防水性能、耐久性和可靠性提出了更高的要求。单一防水材料往往难以应对复杂的基层条件和严苛的环境挑战，因此，“刚柔并济、复合防水”的理念日益成为行业共识。非固化橡胶沥青防水涂料与自粘聚合物改性沥青防水卷材相结合的复合防水系统，集成了涂膜防水与卷材防水的优势，以其卓越的密封性、自愈性、粘结性和施工便捷性，在现代建筑屋面工程中得到了广泛应用。本文旨在深入探讨该复合防水系统的技术特点，系统分析其优点与固有缺点，并重点阐述从设计、材料、施工到验收等全过程中的关键注意要点与控制措施，以期为该技术的科学应用与工程质量的提升提供理论参考和实践指导。

关键词

非固化橡胶沥青；自粘聚合物改性沥青卷材；复合防水；优缺点；施工控制；工程质量

1 引言

建筑防水是保障建筑结构安全、延长建筑使用寿命、维持室内环境舒适的关键环节。屋面作为建筑最顶部的围护结构，长期暴露于阳光、雨雪、温差变化、结构变形等复杂环境中，其防水失效将直接导致渗漏，引发混凝土碳化、钢筋锈蚀、装饰层破坏等一系列问题，严重影响建筑的正常使用功能和结构安全。

传统的沥青卷材热熔施工存在环境污染、火灾风险高、对基层干燥度要求严格等弊端；而单纯的涂膜防水则存在厚

度不均、抗穿刺能力弱等不足。非固化橡胶沥青防水涂料与自粘聚合物改性沥青防水卷材的复合，正是在此背景下应运而生的一种创新解决方案。本文将对该系统的内在机理、性能表现及工程实践中的核心管控环节进行全方位剖析。

现就本人经历的市柏泉强制隔离戒毒所建设项目进行分享，项目位于武汉市东西湖区西北部东山办事处，处于京港澳高速以西，A 地块戒毒所建筑面积为 46530 平方米。园区内共 14 栋单体，层数为 1-4 层，局部地下层。因本项目属于特殊项目，投入使用后一般人员无法进入，建设单位对使用功能要求非常高，各参建单位也相当重视。本工程 1#--11# 楼平屋面及闷顶层屋面防水做法：2mm 非固化防水涂料 +2mm 自粘聚合物改性沥青防水卷材。

【作者简介】钱远建（1989-），男，中国湖北汉川人，本科，工程师，从事工程管理研究。

2 非固化橡胶沥青 + 自粘聚合物改性沥青防水卷材复合系统概述

在深入分析其优缺点之前，有必要对该复合系统的构成与工作原理进行简要阐述。

2.1 非固化橡胶沥青防水涂料

非固化橡胶沥青防水涂料是一种以橡胶、沥青、特种添加剂及填料等组成的，在应用状态下始终保持粘稠膏状、永不固化的防水材料。

2.2 自粘聚合物改性沥青防水卷材

自粘聚合物改性沥青防水卷材是以聚合物（如 SBS、APP）改性沥青为基料，上表面覆以聚乙烯膜、细砂或矿物粒料，下表面覆以涂硅隔离膜或隔离纸所制成的一种高性能防水卷材。其核心特点是“自粘性”，卷材背面预涂有高性能压敏胶，在剥离隔离膜后，仅需轻微压力即可与基层或涂层实现满粘。这种粘结方式避免了明火作业，安全环保，且能形成紧密的“微观满粘”，有效防止“窜水”现象。

2.3 复合系统的工作原理

该复合系统的工作原理可以形象地比喻为“皮肤与创可贴”的关系。非固化橡胶沥青涂料如同一层具有生命力的、永不干涸的“活性皮肤”，它紧密地附着在混凝土基层上，填充所有不平整处和微裂缝，形成一个连续、无缝、富有弹性和粘性的密封层。自粘聚合物改性沥青防水卷材则如同贴在这层“皮肤”上的“高强度创可贴”，它提供了主要的机械强度、耐候性和抗穿刺能力。

两者复合后，非固化涂料作为介质的优势得以充分发挥：

- 完美的“追随性”：涂料永不固化，当基层发生收缩、膨胀或开裂时，非固化层可以通过自身的蠕变来吸收和消解应力，避免了防水层因应力集中而被拉裂。
- 双重防线的“密封性”：即使外部卷材因意外局部破损，非固化层作为第二道防线，能有效阻止水的侵入。并且，非固化材料会向破损点蠕动，在一定程度上实现“自愈合”。
- 优异的“粘结性”：非固化层与自粘卷材的压敏胶层具有极佳的相容性和粘结力，实现了卷材与基层的“微观满粘”，彻底杜绝了水在防水层与基层之间的横向“窜流”，将渗漏点限制在破损点正上方，极大简化了后期维修。

3 复合防水系统的优点分析

该复合系统集成了两种材料的优势，并相互弥补了单一材料的不足，其主要优点体现在以下几个方面：

3.1 卓越的防水密封与抗渗性能

非固化涂料形成的连续、无缝涂膜层，从根本上解决了卷材搭接边多、节点处理复杂等可能带来的渗漏风险。其优异的渗透性能够嵌入混凝土基层的毛细孔和微裂缝中，形成“根状”咬合，极大地提高了防水层的抗渗能力。与自粘卷材复合后，构成了物理性能与化学密封相结合的双重防水屏障，防水可靠性远高于单一材料。

3.2 出色的适应基层变形能力和自愈功能

这是该系统最核心的优势之一。由于非固化材料具有永久的蠕变性，它能有效地吸收和缓冲由温差、荷载、沉降等原因引起的基层变形与开裂应力。当基层出现不大于4mm的裂缝时，非固化层能够通过自身的流动与变形来填补裂缝，避免防水层被拉断。同时，若外部卷材发生破损，水进入两者之间，非固化材料会在水压作用下向破口处迁移，堵塞渗水通道，表现出独特的“自愈”能力。

3.3 优异的粘结性能，有效杜绝“窜水”

系统实现了卷材与基层的满粘接。非固化层作为一道极佳的粘结介质，使卷材与基层牢固地结合为一个整体。这种“皮肤式”防水使得水无法在防水层与基层之间横向流动，即使发生局部渗漏，也能快速、准确地定位渗漏点，便于维修，大大降低了后期维护的难度和成本。

4 复合防水系统的缺点与局限性

尽管优势突出，但任何技术体系都存在其固有的局限性，客观认识其缺点是实现科学应用的前提。

4.1 耐高温性能相对较差

非固化橡胶沥青涂料在高温环境下（通常超过60℃）会变得更软，粘度下降，抗流淌性变差。在夏季高温且坡度较大的屋面上，复合防水层可能存在滑移的风险。同时，过软的非固化层也会降低其抗穿刺能力。因此，该系统在高温地区或黑色吸热屋面上的应用需进行严格的耐热性评估和构造设计。

4.2 抗穿刺和抗外力破坏能力需依赖卷材

该系统的主要机械强度由自粘卷材提供。非固化层本身是膏体状，抗冲击和抗穿刺能力较弱。如果卷材厚度不足或选择不当，在后续施工（如安装光伏支架、维修踩踏等）中容易受损。因此，必须根据使用环境选择合适的卷材厚度和类型（如带增强胎基、覆有页岩片等）。

4.3 材料成本相对较高

相较于传统的SBS改性沥青卷材等材料，非固化橡胶沥青涂料和优质自粘聚合物改性沥青卷材的单价通常更高。这使得该系统的初始材料投入成本增加，可能在成本敏感型项目中缺乏竞争力。

5 重要注意和控制点

为确保该复合防水系统的成功应用，必须在设计、选材、施工和验收的全过程中进行精细化管控。

5.1 设计阶段的控制要点

系统匹配性设计：必须明确指定非固化涂料与自粘卷材的匹配型号。不同厂家的产品在配方上存在差异，不匹配的产品可能导致粘结不良或化学腐蚀。建议采用同一厂家提供的配套系统。

构造层次设计：根据屋面的使用功能（上人、非上人、种植等）、保温形式、当地气候条件（特别是最高气温）等因素，合理设计防水层的保护层。对于坡度较大或高温地区，

必须设计可靠的机械固定或压重措施，防止滑移。

细部节点深化设计：对所有的阴阳角、穿板管道、落水口、天沟、变形缝等节点，必须出具详细的防水构造大样图，明确非固化加强层的宽度、卷材的收头方式和密封处理等。

5.2 材料质量控制要点

材料准入：严格审查供应商的资质和产品检测报告，确保材料具有合格的物理性能（如固含量、低温柔性和耐热性、粘结强度、拉力、延伸率等）。

现场抽样复试：材料进场后，必须按规范要求进行见证取样，送交有资质的检测单位进行复试，合格后方可使用。严禁使用不合格产品。

材料储存与保管：非固化涂料应储存于阴凉通风处，避免暴晒和雨淋。自粘卷材应直立堆放，避免倾斜或横压，且隔离膜应保持完好。

5.3 施工过程的控制要点（核心环节）

非固化橡胶沥青涂料和卷材施工工艺

工艺流程：加热非固化橡胶沥青涂料→基层打磨→清理基层→基层处理→节点加强处理→定位弹线→试铺自粘卷材→施工非固化橡胶沥青涂料→铺贴自粘防水卷材→卷材搭接密封→组织验收

施工工艺

加热橡胶沥青涂料：采用专用的电加热设备进行加热，温度严格控制在产品说明书规定的范围内（通常为120℃-160℃）。温度过低会导致流动性差、涂刷困难；温度过高则会加速沥青老化，影响性能。

基层抛丸：地下室外墙平面采用抛丸机把基面的浮浆、砂子等清理干净，使基层坚实平整。

清理基层：用扫帚、铁铲等工具将基层表面的灰尘、杂物清理干净（图3），基面保持基本平整，对于不平的部位需修补平整。

基层处理：必要时在基层上均匀的涂刷配套基层处理剂，做到不漏涂、不露底，阴阳角应做成半径不小于50mm的圆弧形，以利于涂料堆积和卷材铺贴。

节点加强处理：所有节点部位（如管根、水落口）均应先进行涂料增强处理，涂刷范围应超出节点周边250mm以上。

定位弹线：以分格的方式进行弹线，确定施工橡胶沥青涂料的范围，每个格子的宽度为

0.92m，长度为5m，面积为4.6 m²。

试铺自粘卷材：将自粘卷材自然松弛的摊开，按控制线摆放好，然后把卷材从两端往中间收卷。

施工非固化橡胶沥青防水涂料：

- 涂布厚度控制：**这是施工成败的关键。（平面）必须采用刮板或机械喷涂，确保涂布均匀，厚度符合设计要求（通常不低于1.5mm）。单位面积用量进行控制（把加热完毕的橡胶沥青涂料，装入带有刻度的专用桶内，然后将涂料倒在4.6 m²的格子内，确保涂料的用量）。厚度不足则影响密封和蠕变性能，过厚则增加成本和滑移风险。

滚涂法（立面）：采用配套专用滚筒，在平面上进行滚涂立面专用型橡胶沥青涂料，一次滚涂成型，滚涂厚度均匀，不露底，确保涂料的用量。

铺贴自粘防水卷材：

- 铺贴时机：**紧随涂料施工之后，在涂料仍保持最佳粘结状态时进行。严禁在已沾染灰尘的涂料层上铺贴。

- 铺贴工艺：**将卷材对准基准线，缓缓展开，同时用压辊从中间向两侧滚压，彻底排除卷材下方的空气，确保实现满粘，无空鼓、无褶皱。（图1）。



图1 铺贴自粘防水卷材

5.4 成品保护与验收要点

成品保护：防水层施工完毕后，必须立即设置保护隔离层，严禁在防水层上直接行走、堆放重物或进行焊接等交叉作业，防止防水层被破坏。

过程验收：实行工序交接验收制度。基层处理、涂料涂布、卷材铺贴、细部处理等每一道工序完成后，均需经监理或业主单位验收合格后，方可进行下一道工序。

6 结语

非固化橡胶沥青防水涂料与自粘聚合物改性沥青防水卷材构成的复合防水系统，凭借其“皮肤式”满粘、自适应变形、自愈合及施工便捷等突出优点，代表了现代建筑防水技术的发展方向。它有效地解决了传统防水材料易“窜水”、对基层变形适应性差等痛点。

然而，我们也必须清醒地认识到其在耐高温性、抗穿刺性以及对施工工艺的高要求等方面的局限性。该系统的成功应用，绝非简单的材料堆砌，而是一个系统工程。它要求从设计选型、材料采购、施工操作到成品保护的全过程精细化管理和严格控制。只有在充分理解其材料特性、严格遵守工艺规程、强化现场质量监督的前提下，才能最大限度地发挥该复合系统的技术优势，最终为建筑打造一道可靠、耐久、无需担忧的防水屏障，实现“滴水不漏”的工程目标。

参考文献

- [1] GB 50345-2012, 屋面工程技术规范[S].
- [2] GB/T 23457-2017, 预铺防水卷材[S].
- [3] JC/T 2428-2017, 非固化橡胶沥青防水涂料[S].
- [4] 王寿华, 等. 屋面防水设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [5] 张雄, 张杰. 非固化橡胶沥青防水涂料及其复合防水系统应用技术[J]. 中国建筑防水, 2018(10): 15-19.

Comparative Study of DR and PAUT in Nondestructive Testing and Discussion on Engineering Application

Qiang Chen Lianchang He Xiao Tan

State Pipeline Network Group West Pipeline Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830011, China

Abstract

DR (Digital Radiography) and PAUT (Pulsed Acoustic Testing) are two widely adopted non-destructive testing (NDT) methods that significantly enhance product quality assurance and structural safety evaluation in engineering. These technologies currently serve as indispensable tools in mechanical manufacturing, energy pipeline systems, and aerospace engineering. Given their distinct technical principles, it is essential to evaluate their application advantages and limitations based on specific characteristics, testing performance, and operational scenarios. This approach facilitates targeted and appropriate implementation of DR and PAUT technologies, ultimately improving the quality and efficiency of NDT processes.

Keywords

DR technology; PAUT technology; nondestructive testing technology; engineering application

DR 与 PAUT 在无损检测中的对比研究及工程应用探讨

陈强 和连昌 谭啸

国家管网集团西部管道有限责任公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830011

摘要

DR技术和PAUT技术是现阶段无损检测中的常用检测方法，可以为保障工程产品品质分析和结构安全评测提供更多助力。就现阶段来看，DR、PAUT技术在机械制造、能源管道、航空航天等相应领域都发挥着不可替代的作用。而DR和PAUT技术的技术原理是存在鲜明差异的，需根据其技术特性、检测性能、适用场景来明确不同技术的应用优势和局限性，为DR、PAUT技术科学应用提供更多助力，保障技术应用的针对性、适切性，进而提高无损检测的质量和效率。

关键词

DR技术；PAUT技术；无损检测技术；工程应用

1 引言

在现代工业生产及设备运维中无损检测技术可以在不损伤被检测对象的基础之上完成结构缺陷及产品质量的检测，确保运行安全，而得到了广泛应用。无论是石油天然气长输管道的环焊缝检测还是航空发动机零部件的内部质量筛查都会应用到无损检测技术，其中 DR 和 PAUT 作为最常用的两项无损技术，其技术原理和核心特征是存在鲜明差异的。随着人工智能和大数据技术的发展，两种技术都在向自动化、智能化方向发展。DR 技术正朝着更高分辨率、更低辐射剂量的方向发展，而 PAUT 技术则在向全聚焦、更高检

测精度的方向演进。

2 DR 与 PAUT 技术的检测原理及核心特性

2.1 DR 技术

DR 技术即数字射线检测技术，该项技术的检测原理是利用 X/Y 射线穿透特性来对被检测物质进行成像分析。射线穿透被检测对象时，不同材质、不同厚度区域的射线衰减能力存在显著差异，利用这一特性为气孔、裂纹、夹渣等相应缺陷的识别提供更多帮助。衰减后的射线会被数字平板探测器捕获并转化为电信号，通过图像处理生成高分辨率的数字图像，检测人员则可根据图像中的灰度变化、轮廓形态完成缺陷的识别与定性分析。

DR 的核心优势在于成像直观性强，能有效反馈缺陷的二维形态和空间分布，检测范围更全，尤其是气孔、夹渣、缩孔等相应体积性缺陷的检出率更高，数据可追溯，可为后续质量复核、缺陷追溯提供更多帮助。DR 技术也存在明显局限性，该项技术的平面型缺陷检出灵敏度较低，很容易会出现漏检问题，且定量精度有限。DR 还存在辐射安全风险，

【作者简介】陈强（1979–），男，中国新疆克拉玛依人，本科，副高级工程师，研究方向：油气储运及长输管道工程与附属工程、油田地面建设，长输管道运维，道路、桥梁、隧道工程、工业建筑及民用建筑工程、市政公用工程、地质勘查、工程测绘等研究。

可能会威胁工作人员的人体健康。此外 DR 在实践应用过程中设备初期投入也是相对较高的，容易受环境温度、湿度等因素影响导致检测结果准确性、真实性和可靠性受到冲击。辐射安全和成本始终是决策过程中需要重点考量的因素。

2.2 PAUT 技术

PAUT 技术即相控阵超声检测技术，是利用超声波传播与反射原理，借助相控阵探头完成检测。相控阵探头多由独立的压电晶片组成，通过电子方式控制各晶片激发时间延迟 (ΔT)，形成可聚焦、可偏转的超声波束（扇形扫描），超声波束的角度可根据实际情况灵活调整。在检测过程中超声波束遇缺陷时会发生反射、折射，这些信号会被探头接收，经过数据处理系统生成灰度化的截面图像，检测人员则可根据图像特征和信号强度完成缺陷的定量、定性、定位分析。

PAUT 最显著优势是平面型缺陷的检出灵敏度较高，通过波束角度调整提升检出率，定量精度较高，可完成深度、高度、长度等三维尺寸的测量^[1]。PAUT 无辐射危害、安全环保、检测适应性强，能够适配不同环境。PAUT 技术的局限性则是成像直观度不足，超声截面图像为信号重构的灰度图像，对缺陷形态的呈现不如 DR 图像直观，检测人员需具备丰富的专业经验才可以准确完成缺陷的识别与定位。同时该项技术的体积型缺陷的识别能力有限，在检测过程中还会受工件表面粗糙度、涂层厚度的影响。此外，PAUT 对粗晶材料（如奥氏体不锈钢）、厚壁工件（声束能量衰减）的检测效果也有较大的提升空间。

简言之，DR 和 PAUT 技术的技术差异是较为鲜明的，如图 1 所示为 DR 和 PAUT 技术关键性能参数对比。

表 1 DR 技术和 PAUT 技术的关键性能参数对比

对比项目	DR 技术	PAUT 技术
平面型缺陷检出率	$\leq 60\%$	$\geq 95\%$
体积型缺陷检出率	$\geq 90\%$	$\leq 70\%$
缺陷定量误差	平面尺寸 $\pm 5\%$, 深度 $\pm 20\%$	深度 / 高度 $\pm 10\%$, 长度 $\pm 8\%$
辐射风险	有（需防护）	无
设备投入成本	高（30-80 万元）	中（20-50 万元）
表面预处理要求	低（清除明显杂质即可）	高（需精细打磨）
检测环境要求	较高（温湿度可控）	较低（-10-50°C 均可）
单工件检测时间	短（15-20 分钟/件）	中（20-30 分钟/件）
人员资质要求	中等（需辐射安全培训）	较高（需超声图像解读培训）

3 DR 与 PAUT 技术的系统性对比分析

3.1 检测性能对比

在缺陷检出能力方面，DR 和 PAUT 技术呈现出互补特性。例如在检测类型上，DR 技术可快速完成体积型缺陷的检测，检测精度较高，而 PAUT 更适用于平面型缺陷检测。在定量精度方面 DR 可完成平面尺寸的测量，通过图像像素校准获得缺陷长度、宽度的精准量化数据。PAUT 可以完成三维尺寸的测量，通过波束聚焦定位缺陷的深度与高度。在检出效率方面，DR 可通过实时成像，提高检测效率。PAUT 的单工件检测时间略长，但是在复杂结构检测中不需要多次调整设备，其综合效率反而更优。因此，理解它们各自的优势和适用场景，对于制定最优的无损检测方案至关重要。

3.2 适用场景对比

从作业环境看 DR 更适用于开阔场景或检测工位固定的情况，例如在工厂车间可借助 DR 技术完成批量生产检测。PAUT 更适配于空间较为狭窄、人员较为密集的区域，其作业灵活性相对较强。从工件类型上 DR 更适用于大厚度、结构复杂的工件，例如厚度接近 100mm 的厚壁压力容器、大型铸件等。PAUT 更适用于厚度在 80mm 的中薄厚度工件检测。从行业应用上，DR 多应用于航空航天、机械制造、建筑建材等相应领域，而 PAUT 更多的是应用于石油天然气、

船舶制造、轨道交通等相应领域^[2]。在选择时，需结合自身的生产规模、工件类型和长期质量管控战略进行综合权衡。

3.3 经济性对比

DR 和 PAUT 技术在实践应用的过程中需考量经济成本，可从设备投入成本、运行成本和维护成本三个维度来展开讨论。

从设备投入成本上来看，DR 的初期采购成本是相对较高，但是从长远来看，因 DR 检测效率较高，在批量检测上其单位成本反而更低。

从运行成本上来看，DR 需定期更换射线源，射线源的平均寿命为 3~5 年，更换成本约为 5~10 万元，在实践应用的过程中需要购买防护设备，约 2~5 万元；PAUT 在应用过程中并无耗材更换需求，只需要定期对探头进行校准，一般情况下每年需校准一次，成本约 1 万元，因此 PAUT 技术的运行成本较低。

从维护成本来看，DR 的数字平板探测器对环境要求高，很容易会受冲击、湿度等多重因素的影响出现故障，因此维护成本也相对较高。PAUT 的探头和主机稳定性相对较强，维护成本较低。

总体来看，批量检测环境下 DR 技术的经济性更优。但若在小批量和复杂结构检测中 PAUT 技术的综合成本更低，可根据生产规模、检测对象特性来分析适配技术^[3]。在

实际决策中，选择哪种技术更经济，不能一概而论，需要结合具体的检测对象、缺陷类型、产量要求、安全规范以及预算限制，进行综合的经济技术论证。

4 DR 和 PAUT 技术的工程应用优化探讨

为了发挥 DR 和 PAUT 的技术优势，在工程应用过程中可从如下几点着手做出优化和调整，提高技术应用的适切性、针对性和有效性。

4.1 基于检测需求进行技术选型

技术选型是十分重要的一环，这对检测效率、质量及结果准确性会起到至关重要的影响。在技术选型的过程中可根据检测需要做好技术调整。在体积型缺陷为主的检测中可通过 DR 技术实现批量检测，提高检测效率。例如在铸件、锻件的内部质量筛查中就可以采用 DR；而在平面型缺陷为主的检测中可以采用 PAUT，有效检测焊接接头、结构件疲劳裂纹问题。针对复杂场景检测，例如受限空间内管道检测可通过 PAUT 技术来保证作业灵活性，而开阔场地的厚壁设备检测则可以采用 DR 技术。在技术选型的过程中还需要考量成本预算，例如中小型企业若检测批量小、资金有限可以选用 PAUT 技术，满足大多数场景的检测需求。而大型企业则涉及到了批量检测问题，对于检测效率要求较高，可以采用 DR 技术^[4]。在现代工业检测中，DR 和 PAUT 并非总是“二选一”的竞争关系，越来越多的场合开始采用多技术融合的方案。

4.2 检测流程优化

优化检测流程也是提高检测效率与质量的关键所在。在 DR 应用中需要先做好预处理，清除工件表面杂质，根据工件的厚度、材质来对管电压、管电流等相应参数作出适当调节，减少后期参数调整时间，通过 AI 图像识别算法进行图像智能化分析，完成缺陷区域的标注，减少人工分析误差，在提高工作效率的同时保证工作质量。

若用 PAUT 技术，需要精细化落实预处理工作，制定标准化打磨流程，确保工件表面粗糙度达到标准要求，在此基础之上引入耦合剂涂抹工具，为提高超声波传播效率提供更多的帮助^[5]。需要对波束参数做出优化和调整，根据缺陷类型确定波束角度，保障检出灵敏度。需要通过专用软件完成数据的自动化处理，生成标准化检测报告。

若采用组合检测模式这时则需要明确两项技术的先后顺序，制定疑似缺陷的判定标准和复核阈值，避免重复检测

或遗漏检测，通过数据关联的方式为后续追溯分析提供更多帮助。

4.3 加强设备及人员能力建设

设施设备是检测工作重要物质基础，检测人员是检测工作开展的重要落脚点，加强设备、人员管理是十分必要的。在设备管理上需根据检测需求具体问题具体分析，确定设备型号，明确设备要求，例如 DR 技术应用中设备可优先选择高分辨率数字平板探测器，保障图像清晰度。而 PAUT 技术应用中设备则需要关注扇扫、线扫、矩阵扫等相应扫描模式的应用需求，搭配柔性探头和专用夹具满足复杂结构的检测需要。在此基础之上可购入便携设备，为野外检测和受限空间检测提供更多帮助，也可通过购买固定设备为批量检测提供助力，具体需要根据检测方案来对设备配置方案做出适当调整，为高效检测提供物质支撑。

在人才建设的过程中可通过复合技能培训帮助人员掌握 DR 和 PAUT 的技术原理、操作流程、图像解读方法，明确不同技术的适用范围、应用优势、缺陷及不足，通过实操训练和典型案例分析的方式让检测人员能够结合实践工作需求进行技术选择，提高技术应用成效。还需通过培训内容的适当调节和优化提高检测人员的质量意识、学习意识，为检测工作的落实提供人才基础^[6]。

5 结语

DR 和 PAUT 技术在无损检测中应用可更好地提高无损检测效率和质量，需要根据 DR 和 PAUT 技术检测性能、适用场景、经济性的差异和实践需求来做好技术选择，通过检测流程优化、设备及人员能力建设提高技术应用成效。总之 DR 和 PAUT 是工具，但最终决定检测成效的，是使用人以及背后的管理体系。将先进技术与优化的流程、合格的设备和专业的人员三者结合，才能真正实现无损检测效率和质量的双重飞跃。

参考文献

- [1] 刘刚,王笑春. 相控阵超声检测技术在风电项目焊缝检测中的应用 [J]. 热处理技术与装备, 2025, 46 (05): 77-80.
- [2] 张宽,王树强. 基于改进SSD模型的环焊缝DR图像缺陷检测 [J]. 化工装备技术, 2025, 46 (05): 33-37.
- [3] 周燕,刘元庆,刘吉波,等. 相控阵超声检测技术在核岛大型锚固螺栓应力腐蚀裂纹检测中的应用 [J]. 科技视界, 2025, 15 (28): 67-71.

Discussion on Construction Technology of Large Span Continuous Bridge in Bridge Engineering

Yao Jiang

China Water Resources and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

With the rapid development of China's transportation infrastructure, large-span continuous bridges in bridge engineering have attracted significant attention as they play a crucial role in connecting complex river channels and urban clusters. Based on this, this paper, grounded in engineering practice and construction cases, focuses on the structural characteristics of large-span continuous box girders and composite girders, systematically outlining construction organization models, key processes, and on-site control points. It also proposes operational technical points and practices in aspects such as cantilevered hanging baskets, support systems, closure and thermal shrinkage control, material and component assembly, as well as foundation pit and deep-water foundation construction. The research aims to provide replicable and controllable technical pathways for the construction and on-site implementation of other large-span continuous bridge projects.

Keywords

Bridge engineering; Long span continuous bridges; Construction technology; discuss

桥梁工程中大跨径连续桥梁施工技术探讨

江尧

中国水利水电第七工程局有限公司，中国·四川成都 611130

摘要

随着中国交通基础设施飞速发展，桥梁工程中大跨径连续桥梁作为承载着连接复杂河道与城市群的关键作用而备受瞩目。基于此，本文立足工程实践与施工案例，围绕大跨径连续箱梁与组合梁的结构特性，逐条梳理施工组织模式、关键工艺与现场控制要点，并在挂篮悬臂、支架体系、合拢与温缩控制、材料与构配件装配，以及基坑与深水基础施工等方面提出面向可操作性的技术要点与做法。通过本文研究旨在为其他大跨径连续桥梁工程的施工与现场实施提供可复制、可控的技术路径。

关键词

桥梁工程；大跨径连续桥梁；施工技术；探讨

1 引言

随着中国社会经济的不断发展，桥梁工程也在不断地提升自身的建设水平，其中大跨径连续桥梁施工技术就是一种较为先进的施工技术，不仅能够有效地提升桥梁工程的质量，还可以有效地降低施工成本，提升社会效益^[1]。有鉴于此，下文将结合相关文献资料查阅以及自身工作实践背景下，围绕于桥梁工程中大跨径连续桥梁施工技术展开探讨，以供参考。

2 大跨径连续桥梁概述

大跨径连续桥梁是指跨径处于大尺度范围、采用连续梁结构体系以保证整体受力连续性与变形协调的桥梁类型。其典型形态包括现浇连续箱梁、预制拼装连续箱梁以及钢—

混凝土组合连续梁，工程常见跨径区分标准随结构型式而异，但在我国工程实践中，跨径超过主跨 200 米以上的连续梁工程通常被归为大跨径类型。该类桥梁构造特征表现为截面惯性大、纵向刚度与抗弯—抗剪性能需精细化配比以及节点处受力复杂，且跨中与跨端受力分布对施工阶段构件内力及变形控制提出严格要求。施工时常采用挂篮悬臂现浇、连续支架支撑或拼装吊装相结合的方案，针对不同河道水文、地质条件与交通要求选择最为经济且安全的施工工序。国内若干典型大跨径工程在深基坑、隧道锚碇与高强钢材应用方面积累了多项可借鉴经验，这些经验表明施工组织与节点控制在确保工程整体性能上占主导地位。

3 桥梁工程中大跨径连续桥梁施工技术探讨

3.1 挂篮悬臂现浇施工与刚度分配控制

挂篮悬臂现浇施工与刚度分配控制：在挂篮设计阶段应以工程结构整体三维有限元为基础，对挂篮自重、混凝土

【作者简介】江尧（1993-），男，中国湖北天门人，本科，工程师，从事建筑工程现场施工管理研究。

浇筑瞬时荷载与施工活载分别进行线性与非线性刚度校核，结合频率敏感性分析给出横向与纵向挠度限值。挂篮主构架与撑杆采用参数化设计，挂篮与梁体连接处布置可调支点及微调缸，支点预加载并设置位移传感器用于在线标定，现场通过静载试验验证刚度并调整挂篮刚度分配。分段浇筑节段长度与配筋率需协同优化，实行不等节段与变截面配筋策略。靠近支座以短节段并增设底板与腹板局部加厚，跨中通过增加纵向预应力束密度或分层布置预应力来提升弯曲刚度，节段拼接处采用阶梯搭接与贯通箍筋保证力传递，混凝土配合比与振捣工艺控制一次成型质量^[2]。测控与在线调整流程构建测量—比对—反馈闭环，测点涵盖挠度、温度、应变及孔道应力，数据实时上传并与有限元预测比对。若监测超限，优先采用吊索预拉或调整挂篮下临时支撑进行位移修正，同时对已浇段实施外贴钢板或局部加劲补偿，并调整后续浇筑与张拉计划以消减残余应力。校核中应考虑温度与徐变引起的刚度时程变化，并预设临时横向支撑作为刚度恢复措施。配筋上采用分区高强钢筋并在关键节点设置贯通套筒以利于预应力贯通。测控结果纳入施工日志并形成超限处置记录。微调缸行程按±10毫米设计，采用千分表与光栅位移计复核，安装后开展热—湿—荷载耦合试验以修正模型。在节段划分时依据应力曲线采用优化算法确定位置，支座近区节段长宜为跨径的1/30~1/20，跨中可延长至1/10。预应力张拉采用分级程序，先张近支座节段，待相邻节段达到强度后逐步贯通张拉，张拉后压浆并监测残余应力。

3.2 模板与支架体系的模块化设置与施工质量校核

在模板与支架体系模块化设置方面，施工单位应建立参数化族件库并按箱梁截面参数化切割为系列化拼装模块，在模块工厂化预制时进行尺寸公差控制与装配配位试验，模块上应布置二维坐标网格与可调节螺栓孔群以便现场以全站仪与激光扫描快速定位，定位后采用定位销、楔形垫块和力矩控制螺栓完成初固定并记录调整量和紧固力矩，模块接缝处宜采用舌槽配合或高强度对拉螺栓以保证接缝密合与截面连续性，并对提升点与吊装链路进行力学校核与疲劳验算。在支架刚度分层与承载校核方面，应按照跨中—跨端—靠近支座三段划分刚度梯度并基于有限元非线性分析进行工况叠加验算，跨中采用箱形承载单元和横向剪力环件以提升抗弯抗扭性能，靠近支座处采用沉降兼容的柔性连结并布置刚度补偿构件如可调撑杆或刚度插板，关键节点安装应预埋监测孔并装设应变计和位移计以开展预压与分段静载试验，试验数据用于修正支架单元配置，验收判定依据应为变形控制值与承载余量阈值并记录频域响应以便评估施工期动力作用影响。在施工质量校核与档案管理方面，实行模板—支架—浇筑三段协同验收制度并形成电子化竣工档案，模板安装后按横向平面度、纵向线形与翼缘厚度偏差开展分项检验并记录偏差项与修正措施，支架搭设完成后按设计荷载进行分段静载试验与连续变形监测并出具承载复核报告，

浇筑前进行整体几何复测、接缝间隙检查与脱模间隙确认并对不合格项实施加固或更换，所有构件编号、制造检验单、现场调整量、试验原始曲线与复核结论应存入施工质量台账并按工程档案规定归档保存，测量仪器校准应有资质证书并在档案中注明校准周期与责任单位^[3]。

3.3 合拢段施工组织与合龙控制

合拢段是连续梁施工的关键节点，控制合拢过程的残余应力与缝隙密封性直接关系长期服役性能。首先，实施倒计时式预判与预调制度。在合拢前以工程测量与结构分析为基础建立温度—挠度耦合推演模型，并用现场日尺度温度、混凝土龄期与徐变预测结果反推合拢日支座位移与截面曲率。编制分项容差表与预调方案，明确各支座允许位移、预应力张拉量与临时千斤顶调节量。合拢当天依据实时气象与测量数据复核推演结果，按优先级顺序实施支座微位移调整、局部张拉或卸载配重以消除迎合误差，并对关键参数实施逐小时记录与联合签证。其次，采用同步闭环张拉与微位移闭合控制。在合缝处布设光纤应变计、片式应变计与缝隙位移计，并对测点实施并联读数与人工复核以实现闭环反馈。合拢以分阶段张拉为主，每阶段按预设力—位移曲线以恒速或恒力模式施加，实时比对应变与裂缝开口值并按阈值触发微调千斤顶动作。张拉过程配置冗余测点以用于误差判别，采用逐级增力与保持时效策略以控制残余应力。全过程由测量、结构与施工三方实施逐段签认并形成可追溯记录。再次，合缝处理与二次灌注工艺细化。选用经性能试验的低收缩、超早强水泥基灌浆料并按施工温度修正水胶比与缓凝剂用量，采用多点挤压注浆法，注浆压力与注入速率按缝隙宽度与渗透系数分级设定。灌浆后对合缝区域实施表面覆膜与保温覆盖，并配置电加热或蒸汽恒温装置以抑制早期温差。对已灌浆的接缝实施定期回读应变与超声回弹检测，按需开展补浆或植筋加固，并以试块与现场检测结果作为合格判据。测点校准与互校在合拢前24小时内完成，采样频率不低于1Hz，关键工序设定三层核验机制。合拢精度验收以缝隙残余值、相对位移与试块强度为判据，其阈值在施工控制书中予以明确。

3.4 预应力体系施工与温度—收缩协调控制

在大跨径连续梁施工中，针对预应力体系施工与温度—收缩协调控制，应在张拉序列、时效控制与施工可调补偿三方面贯彻细化工艺。其一，张拉序列应遵循端部先行、跨中后行的分段耦合原则，施工中将纵向通长预应力束按功能与长度划分为若干张拉单元，先张拉外侧长束以抑制横向及纵向曲率，再按对称由外向内推进。每级张拉应实施渐进加载、持荷与松余恢复程序，锚区与跨中布设应力与位移观测点，张拉后立即实施孔道压浆与固化养护以稳固索力传递路径。其二，张拉力值与张拉时机须与混凝土龄期和现场温度场耦合，施工前通过原位回弹与立方试块试验获取强度发展曲线并布设温度剖面测点以获得温度—时效场数据。当昼夜或短

期温差超限时，现场优先采用被覆保温或遮阳降温措施，必要时顺延张拉，张拉过程采用数控张拉设备实时采集张力—位移响应以便在线校正残余索力偏差，张拉等级与持荷时限按设计与规范逐级校核^[4]。其三，为控制长期温缩与徐变引起的力学重分布，施工阶段应预留可调粘结段并在端锚处设置机械调整器或标准化千斤顶接口，粘结段采用短节套管或滑移接头以利后期补张或松调，首年经历冷热循环后，应依据索力、跨间挠度与温度监测曲线实施必要的补偿性张拉或松调，且所有张拉记录、压浆化验、温度曲线与强度试验结果应以标准化预应力施工日志格式归档，作为运行期健康监测与溯源校核依据。监测初期按周频率开展并随季节调整为月度或季度频次，监测仪器须经校准并保留溯源证书，压浆留样至少采集三组送检并记录凝结时间与含水率以判定固结质量。施工日志由专职工程师签字并纳入工程档案管理系统以便长期数据比对。

3.5 深基坑、锚碇及水下基础施工配套

大跨连续桥梁在河道或断崖地段常伴随复杂基坑与锚碇工程，施工技术应综合考虑地质、水文与生态限制以实现基底可靠性。首先，基坑与锚碇开挖前，应实施高密度钻探与连通孔水文测试，并以详化地质参数建立三维有限元 - 有限体联立模型以模拟深基坑—锚碇相互作用，模型需包含分层孔隙水压、非线性应力应变关系与施工荷载时程，以此制定分步开挖与逐段卸载的支护序列，支护序列应明确护壁桩施工深度、临时内支撑布置与降水方案，并在模型校核下确定允许位移限值与观测点布设。其次，在软弱土或溶洞发育区采用组合围护并行注浆加固技术，先施行定向高压喷射注浆或冻结成墙以形成临时承载体，再采用预制管桩或反循环钻孔灌注桩与土钉喷锚组合控制侧向位移，注浆材料按岩土渗透性与抗溶蚀要求选用水泥—微细粉体复合浆或化学浆，并规定注浆时序、充盈率与回灌检测方法，内支撑施工遵循

先撑后挖、先托后拆原则，施工监测采用自动倾斜仪与孔隙水压计同步记录以便即时调整注浆量与支撑刚度^[5]。最后，水下基础施工根据工程尺度与流体动力条件选用分舱沉箱或大直径钻孔灌注桩体系，沉箱施工需控制逐舱下沉速率并实施周边反冲刷围堰或碎石护坡；钻孔灌注桩水下混凝土浇筑采用下导管导流或震动导管法并配套防离析混凝土配合比与二次清孔工序，现场布置超声波导管和泥浆净化装置以确保成桩质量，基底回填与防冲刷措施应同步进行并在施工期间实施流速与浊度监测以满足环保限值。

4 结语

综上所述，基于中国大跨径连续桥梁工程实践的回顾与技术沉淀，本文提出的五项施工要点覆盖挂篮悬臂、模板支架、合拢控制、预应力与深基坑配套五大领域的可落地做法。上述要点强调以测控为核心、以参数化与模块化为手段、以闭环质量管理为保障，从而实现施工阶段对变形与内力的动态控制。期待这些技术路径在后续工程实践中通过持续校核与资料化沉淀，进一步完善并形成可传承的施工标准化流程。

参考文献

- [1] 李强.桥梁工程中大跨径连续桥梁施工技术探讨[J].建材发展导向, 2025, 23(5):118-120.
- [2] 刘凯.桥梁工程中大跨径连续桥梁施工技术[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术, 2024(003):000.
- [3] 贺光荣.桥梁施工中大跨径连续桥梁施工技术的应用研究[J].汽车周刊, 2023(11):0106-0108.
- [4] 杨飞.桥梁工程中大跨径连续桥梁施工技术[J].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术, 2024(001):000.
- [5] 李娜.桥梁工程中大跨径连续桥梁施工技术[J].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术, 2023.

Application strategy of intelligent construction site system in construction engineering management

Ziqi Liang

Xi 'an Aerospace Test Technology Institute, Xi' an, Shaanxi 710000, China

Abstract

Construction project management involves complex aspects requiring comprehensive analysis across cost, schedule, safety, and quality dimensions. The implementation of smart construction site systems enables professionals to better coordinate various stakeholders and enhance operational efficiency. This article examines how these systems improve management effectiveness through scenarios including schedule optimization, safety monitoring, quality control, and cost reduction. The study aims to provide actionable insights for industry practitioners, facilitating scientific adjustments to construction management strategies and ensuring these systems fulfill their intended roles in project execution.

Keywords

smart construction site system; construction project management; application strategy; factor coordination

智慧工地系统在建筑工程管理中的应用策略

梁子琦

西安航天动力试验技术研究所, 中国·陕西 西安 710000

摘要

建筑工程管理所涉及到的内容繁杂, 需要从成本、进度、安全、质量等多个维度来展开分析。而智慧工地系统的应用则可以帮助建筑工程管理人员更好地协调各方要素, 提高建筑工程管理效能。文章从进度管理、安全监控、质量控制、成本优化等多个场景来分析如何借助智慧工地系统提高建筑工程管理效能。希望可以为相关管理人员提供更多的参考与借鉴, 对建筑工程管理策略作出科学优化和调整, 让建筑工程管理可以切实发挥其应有的作用和影响。

关键词

智慧工地系统; 建筑工程管理; 应用策略; 要素协调

1 引言

在工程建设过程中影响工程建设质量、成本、效率及安全的因素是相对较多的, 必须通过建筑工程管理工作的有效落实来做好各项因素的控制和管理, 进而保障建筑工程能够顺利推进, 在规定的周期内保质保量的完成施工任务, 而智慧工地系统则可以借助物联网技术、人工智能技术、大数据技术、BIM 技术等相应现代化技术来进一步提高建筑工程管理效能。相关管理人员可以从进度、成本、质量、安全等多个维度来分析智慧工程系统的具体应用路径。

2 进度管理

进度管理是建筑工程管理中十分重要的组成部分, 对于建筑工程的施工成本会起到至关重要的影响。若进度管理率是不到位则很容易会增加设备租赁成本、人工成本甚至可

能会让相关施工单位面临违约赔付风险, 因此加强进度管理是十分必要的。而传统进度管理都是通过甘特图加人工报表的方式来展开管理, 因此出现与实际脱节、偏差发现滞后等相应的情况, 这时工作人员则可通过智慧工地系统构建 BIM 可视化加实时采集加智能预警全流程数字化管理模式, 提高进度管理质量和效能。

2.1 BIM+4D 进度管理

在进度管理过程中 BIM 技术可实时收集工程进度数据建立三维模型, 而在此基础之上管理人员可将三维模型与时间维度结合, 建立 4D 进度模型, 将工序、时间、资源配置等相应的施工计划嵌入到模型当中, 通过模型构建来明确不同子项目所需时间以及在项目开展过程中需要的设备, 帮助管理人员更好地明确工程进展, 然后根据施工变更需求、天气影响因素以及人员设备等资源配置情况来实时调节模型, 并将更新后的模型结果同步给各班组。这样做的目的在于保证各子项目都能够有效衔接, 提高衔接效率和质量。同时通过可视化展现进度开展情况来帮助管理人员更

【作者简介】 梁子琦 (1994-) , 男, 中国山东郓城人, 本科, 中级工程师, 从事土建工程及管理研究。

好地明确实际进度与预期进度之间的差异及偏差构成原因，找到相应的解决对策。

2.2 打通计划 – 实际链路

为了更好地解决进度管理与计划脱节的问题，相关工作人员可借助移动终端和传感器设备来实时收集施工现场的图片数据，更好地明确施工工程开展情况。例如可借助物联网技术来自动采集大型设备的运行数据，通过分析塔吊日均吊装次数等相应的数据信息来间接反馈进度状态，及时的发现进度偏差并找到构成原因和解决对策^[1]。

2.3 智能偏差分析与预警

物联网技术虽然可以实时收集工程建设过程中的各仪器设备数据，但是很多数据是无法直观反馈进度情况的，为了更好的解决这些问题就需要应用大数据技术和人工智能技术来进行数据关联性分析，以此来完成偏差自动预警，例如人工智能技术会分析材料进场时间、人员分配情况，并根据施工设计图纸明确施工进度需求，然后通过数据关联性分析判断施工建设工作能否按照预定的计划来展开，若无法按照预定计划开展则会触发警告。

3 安全监督

在工程建设期间存在的安全风险是相对较多的，例如工作人员的危险操作行为、在工程建设期间的气候以及施工技术管控、设备故障等等，在这样的背景下做好安全防护十分重要。而智慧工地系统则可以为安全监管提供更多的助力和便捷，相关工作人员可紧抓如下几点着手作出优化^[2]。

3.1 人工智能视频识别

可借助人工智能摄像头智能监测施工建设过程中的危险行为，提高危险问题的识别能力和响应能力。例如可以将危险行为划分为设备异常状态、区域入侵预警和人员危险行为三大类别，并明确不同类别的识别参数和技术算法，提高识别能力。如表 1 所示。

表 1 人工智能视频识别要点

识别类别	具体内容	技术算法
人员危险行为	未戴安全帽、高空抛物、违规吸烟	CNN+YOLOv8
设备异常状态	塔吊超载、电梯门未关、脚手架倾斜	图像分割 + 参数比对
区域入侵预警	非施工人员入作业区、闯危险区域	语义分割 + 电子围栏

3.2 人员定位与电子围栏

在建筑施工的高空作业以及电焊作业等相应作业开展的过程中，可能会存在高空坠落物、飞溅物等相应问题，若不做好人员活动范围的精准管控则很容易会滋生安全事故，智慧工地系统可借助北斗定位技术配合定位标签精准定位施工人员所处位置，并实时更新数据，管理人员则可以通过远程平台的人员分布热力图明确不同地区的人员分布情况，并根据施工需求施工危险程度具体问题具体分析做好人员

调配。例如当深基坑周边人员密度超过 5 人 /m³ 时，系统则会自动触发警报，提示人员过于密集。在此基础之上会发动信息指令于安全帽中的定位标签或通过现场语音提醒、APP 推送信息等多种方式来进行人员疏散。

3.3 设备状态监测

塔吊电梯等相应关键设备既会影响施工建设效率，同时也影响施工安全，其运行数据的重要性不言而喻，而这时则可借助物联网技术配合人工智能技术对设施设备的运行数据进行实时分析，若数据超过安全性阈值系统则会自动触发警报甚至启动相应的应急措施。例如若塔吊超载 10% 系统则会在 5 秒内切断电源，以此来最大化的降低安全风险，规避安全隐患^[3]。

4 质量控制

质量控制是建筑工程施工管理的重点与核心，必须引起关注和重视，而传统人工检查加纸质记录的质量控制手段显然已经无法满足于现阶段施工管理的实际需求，为此则可通过智慧工具系统抓住如下几个关键要点来进行质量控制。

4.1 关键工序数据采集

可借助物联网技术来实时收集整合不同工序的施工数据，更好的明确各工序的开展情况，对比设计图纸分析误差，并发送整改信息给管理人员及相关的施工负责人如表 2 为智慧工地系统关键工序数据采集要点及采集数据。

表 2 智慧工地系统关键工序数据采集要点和采集数据

工序类型	采集设备	采集数据
混凝土施工	无线温湿度传感器、蓝牙回弹仪	浇筑温度、养护湿度、强度
钢筋工程	GPS 定位钢筋扫描仪	间距、保护层厚度、直径
防水工程	红外渗漏检测仪	渗漏点位置、大小

4.2 隐蔽工程数字化验收

在建筑工程中存在较多的隐蔽工程，这些工程质量验收的难度显然更高，为此相关工作人员可通过调取 BIM 数字模型来明确验收部位和验收标准，在此之后通过 GPS 关联模型和现场拍摄图片的方式来进行质量验收和分析，验收数据会自动归档至管理系统，在为隐蔽工程质量验收提供更多便捷、提高质量验收能力的同时也可以为后续的责任追溯提供更多的帮助^[4]。

4.3 区块链存证

建筑工程施工规模大，在施工建设过程中所涉及到的施工环节较多且环环相扣，前一个环节的施工质量将会直接影响后一个环节施工质量，在这样的背景下做好数据存储、为质量追溯提供更多帮助是十分必要的。而区块链技术则会自动收集整合验收数据、整改记录和材料信息等相应的数据信息，具有去中心化和不可篡改等相应特性，可以为质量追溯提供数据支持。若后期出现质量问题管理人员则可通过区

块链数据调取的方式来快速明确原因及责任方，为质量追溯提供更多的帮助，这也可以倒逼相关工作人员规范工作行为、端正工作态度，重视施工质量问题。

5 成本优化

建筑施工单位作为市场运营主体，在其运营和发展的过程中关注施工成本是无可厚非的，智慧工地系统也可以为成本管理提供更多的助力和便捷，相较于预算估算加事后核算的传统方式，智慧工地系统可通过资源监测加动态核算的方式提高成本管控的实效性和精准性。

5.1 材料成本动态监控

材料成本占建筑施工总成本的 60% 以上，加强材料成本控制可以更好地抓住成本优化的关键重点，进而减少资源浪费，可借助 RFID 技术为不同材料赋予电子身份证，材料的进场、存储、使用全过程都需要录入系统进行系统验证，而相关管理工作人员在实践工作落实的过程中则可以根据施工设计图纸及施工成本预算来明确不同环节的材料用量。施工单位在材料调取的过程中需要录入个人身份以及材料的身份标签才可以调取相应的材料，这可以有效避免在施工建设过程中材料随意调取所引发的资源浪费问题^[5]。

5.2 设备管理

首先，需根据施工设计图纸明确不同环节所需设备的类别及数量，关联物联网系统明确设备库存情况，然后进行设备资源调配，优化施工工序，减少设备闲置时间。例如通过数据调查分析发现塔吊日均闲置 4 小时，这时管理工作人员则可通过调节作业计划的方式将其日均闲置时间缩短至 1 小时。其次，需要做好设施设备运行能耗的采集，明确能耗规律，并通过错峰运行等相应运行策略的有效优化和调整来减少设备运行能耗支出。最后，需通过物联网技术实时收集设施设备的运行数据，了解设施设备的运行状态，及时的发

现设施设备存在的故障和问题并安排维修工作人员进行维修和处理，延长设施设备的使用寿命，降低设施设备更换、修理成本^[6]。

5.3 人工成本管理

人工成本在建筑施工成本中占比也是相对较大的，施工管理工作人员也可借助智慧工地系统来加强成人工成本的核算和分析，避免出现成本误差问题。可借助系统的人员定位和工时统计功能，自动记录不同施工工作人员的作业时间，并根据工种和工作量来核算人工成本，避免因核算误差导致的人工成本纠纷和资源损失。

6 结语

在建筑施工管理中智慧工地系统的有效应用可以更好地协调进度、安全、质量、成本等相应关键要素。相关工作人员可借助人工智能技术、物联网技术、大数据技术、BIM 技术等相应现代化技术来提高智慧工地系统的应用成效，提升管理效能。

参考文献

- [1] 邢正江. 智慧工地在建筑工程安全管理和质量管理中的应用 [J]. 中华建设, 2025, (08): 93-95.
- [2] 刘亚会, 徐朋, 路志刚, 等. 智慧工地在建筑工程安全管理中的应用 [J]. 居业, 2025, (07): 229-231.
- [3] 田延民. 智慧工地系统在房屋建筑施工现场管理中的应用探讨 [J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39 (06): 132-135
- [4] 吕彬. 智慧工地系统在建筑工程管理中的应用研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4 (11): 137-140.
- [5] 刘雯. 智慧工地系统在建筑工程管理中的运用研究 [J]. 中国管理信息化, 2025, 28 (10): 130-132.
- [6] 赖勇坚. 智慧工地在建筑工程安全管理和质量管理中的应用 [J]. 广西城镇建设, 2025, (02): 61-65.

Research on Quality Control of New Process for Highway Subgrade Grouting Reinforcement

Haiyang Jiang

Binhai County Highway Development Center, Yancheng, Jiangsu, 224500, China

Abstract

To address the issues of non-standard quality control and unstable effects in the new process of highway subgrade grouting reinforcement, this study combines theoretical analysis with practical verification to systematically explore its quality control path. Clarify the core principles and new process characteristics of grouting reinforcement, sort out the key influencing factors such as geological conditions and grouting performance, and disassemble the key points of full-process control including construction preparation (geological investigation, grouting test), core construction (dynamic parameter regulation), and acceptance evaluation (three-dimensional detection). Propose a three-dimensional optimization strategy covering technology, management and monitoring. Research shows that this control system can increase the strength compliance rate of grouting bodies to over 95%, effectively control the settlement of roadbeds, and provide a reference for the quality assurance and efficient application of minimally invasive reinforcement of highway roadbeds.

Keywords

Highway subgrade; Grouting reinforcement; Quality control

公路路基注浆加固新工艺质量控制研究

蒋海洋

滨海县公路事业发展中心，中国·江苏 盐城 224500

摘要

为解决公路路基注浆加固新工艺质量管控不规范、效果不稳定等问题，本研究结合理论分析与实践验证，系统探究其质量控制路径。明确注浆加固核心原理与新工艺特点，梳理地质条件、浆液性能等关键影响因素，拆解施工准备（地质勘察、浆液试验）、核心施工（参数动态调控）、验收评估（三维检测）全流程控制要点。提出技术、管理、监测三维优化策略。研究表明，该管控体系可使注浆体强度达标率超95%，有效控制路基沉降，为公路路基微创加固的质量保障与高效应用提供参考。

关键词

公路路基；注浆加固；质量控制

1 引言

在我国公路网长期运营与建设向复杂地质区域延伸的双重背景下，路基病害已成为影响公路通行安全与使用寿命的核心问题。据交通运输部养护数据统计，近五年全国各省干线公路因路基沉降、裂缝、空洞引发的路面破损占比超40%，其中山区公路因岩土体稳定性差，病害发生率较平原地区高25%，不仅导致年均养护成本超30亿元，更易引发路面塌陷等安全事故。传统路基修复多采用开挖重建方式，存在施工周期长、交通干扰大、破坏周边环境等弊端，难以适配当前公路“高效养护、绿色运维”的需求。

在此背景下，开展公路路基注浆加固新工艺质量控制

研究，理论上可完善新工艺的质量管控理论体系，填补参数优化与效果评估的研究空白；实践中能为施工单位提供标准化的质量控制流程，减少因管控不当导致的工程隐患，降低养护成本，同时推动注浆新工艺在公路路基加固中的规范化应用，为公路基础设施的长期稳定运营提供技术支撑。

2 公路路基注浆加固新工艺相关理论基础

2.1 注浆加固核心原理

注浆加固通过“浆液填充-结构固化”实现路基补强，核心原理依据注浆方式差异分为三类：渗透注浆适用于孔隙率 $\geq 20\%$ 的砂性土路基，浆液在压力作用下渗透填充岩土体孔隙，凝固后形成“骨架-浆液”复合结构，提升路基密实度；压密注浆针对黏性土或低孔隙率土体，通过高压注入浓浆挤压周边土体，迫使土体压缩密实，同时浆体凝固后形成柱状加固体，增强路基承载力；劈裂注浆则用于密实度高

【作者简介】蒋海洋（1971-），男，中国江苏盐城人，本科，高级工程师，从事公路桥梁管理研究。

的硬塑黏性土或岩质路基，高压浆液劈裂土体形成裂隙通道，浆液填充裂隙后与土体咬合，形成连续加固帷幕，阻断地下水渗透并提升整体稳定性。

2.2 常见注浆新工艺类型及特点

相较于传统注浆工艺，新工艺更聚焦“精准、高效、环保”：超细水泥注浆采用粒径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的超细水泥，浆液流动性好、可灌性强，能填充传统水泥无法渗入的微小孔隙，且固化后强度高、收缩率低，适用于精细加固场景；高分子化学注浆以聚氨酯、丙烯酸盐等为原料，浆液凝固速度可调控（几秒至数分钟），遇水膨胀后能快速封堵空洞与裂隙，抗渗性优异，但需控制毒性与环保性；靶向注浆结合地质雷达探测技术，精准定位路基缺陷区域，通过定向钻孔与可控压力注浆，实现“哪里有缺陷、哪里就加固”，大幅减少浆液浪费，施工效率较传统工艺提升30%以上。

2.3 影响注浆加固质量的关键因素

质量控制需重点关注四大核心因素：地质条件是基础，土体孔隙率、渗透系数决定注浆方式与浆液类型选择，如砂性土需选渗透注浆，黏性土宜用劈裂注浆；浆液性能直接影响加固效果，需控制浆液浓度、黏度、凝固时间与抗压强度，如超细水泥浆液水灰比通常控制在0.8-1.2，确保流动性与强度平衡；施工参数是关键，注浆压力（砂性土0.2-0.5MPa、黏性土0.5-1.5MPa）、流量（10-30L/min）与注浆顺序（由外围向中心、由下向上）需严格匹配工况；设备精度是保障，注浆泵压力控制精度、钻孔机定位误差（ $\leq 5\text{cm}$ ）直接影响参数执行准确性，设备校准不合格易导致注浆不均^[1]。

3 公路路基注浆加固新工艺施工全流程质量控制要点

3.1 施工准备阶段控制：筑牢质量前置防线

施工准备阶段需以“精准适配”为核心，规避源头性隐患。在地质勘察精度控制上，需结合钻探与物探技术实现“双维验证”：采用地质钻机获取路基岩土芯样，分析土体孔隙率、渗透系数等参数，明确缺陷区域（如空洞、裂隙）的深度与范围；同步使用地质雷达进行无损探测，生成路基内部结构剖面图，对比钻探数据修正勘察结果，避免因单一勘察方式导致的缺陷漏判——例如对疑似空洞区域，需加密钻孔至每 50 m^2 1个，确保勘察误差 $\leq 10\%$ 。

浆液配比设计与试验需按“工况定制+性能验证”流程开展：根据勘察得出的地质参数确定浆液类型（如砂性土选超细水泥浆液，裂隙发育区选高分子化学浆液），再通过室内试验调整配比——以超细水泥浆液为例，需测试不同水灰比（0.8-1.2）下的黏度（控制在20-50s）、初凝时间（6-12h）与28d抗压强度（ $\geq 15\text{MPa}$ ），筛选最优配比；对高分子化学浆液，需额外测试遇水膨胀率（ $\geq 150\%$ ）与抗渗系数（ $\leq 1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ ），确保满足加固与防渗需求，试验数据需经第三方检测机构复核确认。

设备校准是保障施工精度的关键：注浆泵需校准压力控制精度（误差 $\leq \pm 0.05\text{MPa}$ ）与流量稳定性（波动范围 $\leq \pm 5\%$ ），通过压力传感器与流量计联动校验，确保注浆参数可精准调控；钻孔机需校准定位系统，采用全站仪复核钻孔机位偏差（ $\leq 5\text{cm}$ ）与钻孔倾角误差（ $\leq 1^\circ$ ），对靶向注浆专用的定向钻机，需额外校准钻杆导向精度，避免因设备偏差导致注浆点偏离缺陷区域。

3.2 核心施工阶段控制：聚焦参数与流程管控

核心施工阶段需通过“参数严控+顺序优化”确保加固效果。孔位定位偏差控制需执行“双重复核”：钻孔前按设计图纸用全站仪标注孔位，由技术负责人复核孔位坐标与间距（偏差 $\leq 10\text{cm}$ ）；钻孔过程中每钻进 50cm ，用测斜仪检测钻孔垂直度，若发现偏差超 1° ，需立即调整钻杆角度或重新钻孔，尤其对靶向注浆孔，需通过地质雷达实时监测钻孔轨迹，确保精准抵达缺陷区域。

注浆压力、流量与时间控制需按“分阶段动态调整”原则执行：初始阶段采用低压慢注（压力为设计值的50%，流量10-15L/min），避免浆液快速流失；当压力升至设计值80%时，维持流量稳定，观察压力变化——若压力骤降，可能存在浆液泄漏，需暂停注浆排查封堵；若压力稳步上升，达到设计值（砂性土0.2-0.5MPa、黏性土0.5-1.5MPa）后，保持压力稳压3-5min，确保浆液充分填充。同时需记录单孔注浆时间与注浆量，若实际注浆量与设计值偏差超20%，需分析是否存在地质勘察误差或孔位偏差，及时调整参数。

注浆顺序优化需遵循“由外及内、由下向上”原则：对大面积路基加固，采用“外围封闭、内部填充”顺序，先施工周边孔形成封闭帷幕，防止内部注浆时浆液外溢；对分层路基，按“下层-中层-上层”顺序注浆，每层注浆完成后间隔24h（待浆液初凝）再进行上层施工，避免下层浆液被扰动；对存在空洞的路基，优先注浆空洞区域，再加固周边土体，确保浆液集中填充缺陷部位，提升加固效率^[2]。

3.3 验收与效果评估阶段控制：实现质量全面验证

验收阶段需通过“实体检测+动态观测+无损验证”三维度评估加固质量。注浆体强度检测需采用“取样试验+现场检测”结合方式：在注浆完成28d后，钻孔取注浆芯样，测试其抗压强度（需满足设计值的90%以上），每个检验批取样数量不低于3组；对无法取样的区域，采用回弹仪检测注浆体表面强度，结合钻芯数据修正检测结果，若强度不达标，需制定补注浆方案并重新检测。

路基沉降观测需建立“短期+长期”监测体系：注浆完成后1周内，每天采用水准仪观测路基沉降量（日沉降量 $\leq 0.5\text{mm}$ ）；1周后改为每周观测1次，持续1个月，若沉降量累计超 5mm ，需分析是否存在注浆不饱满或浆液收缩问题；长期观测需每月1次，持续6个月，确保路基沉降稳定，沉降速率满足公路运营要求（年沉降量 $\leq 10\text{mm}$ ）。

无损检测技术应用需覆盖关键区域：采用地质雷达对加固区域进行二次扫描，对比注浆前后的雷达图像，若原缺陷区域反射波信号消失或减弱，说明注浆填充效果良好；对重要路段（如桥梁引道、隧道洞口），额外采用超声波检测技术，探测注浆体连续性，若发现注浆盲区（面积超 0.5 m^2 ），需标记位置并组织补注浆；所有无损检测数据需形成报告，与实体检测、沉降观测数据共同作为验收依据，未通过综合评估的加固区域，不得通过验收。

4 提升公路路基注浆加固新工艺质量的优化策略

4.1 技术优化：以材料与设备创新突破质量瓶颈

技术优化需聚焦“性能升级”与“效率提升”。在新型浆液材料研发上，针对传统浆液适配性不足的问题，可开发“超细水泥-纳米硅复合浆液”，粒径缩小至 $5\mu\text{m}$ 以下，可灌性提升40%，28d抗压强度提高25%，适配砂性土微小孔隙；针对高含水率路基，研发“水性聚氨酯-膨润土改性浆液”，遇水膨胀率达300%，快速封堵地下水且无毒环保。在智能化注浆设备应用上，推广搭载PLC控制系统的智能注浆泵，压力控制精度提升至 $\pm 0.02\text{ MPa}$ ，参数超限时自动报警；引入“定向钻进-注浆一体化设备”，结合北斗定位，钻孔误差缩小至 $\pm 3\text{ cm}$ ，同时实时上传施工数据，为质量管控提供技术支撑。

4.2 管理优化：以体系与团队建设压实质量责任

管理优化需构建“全流程、强责任”体系。全流程质量追溯体系可采用“二维码+电子台账”模式，为每批次浆液、每个注浆孔分配唯一二维码，扫码可查材料检验、施工参数等信息，实现“一孔一档”；搭建追溯平台整合勘察、施工、验收数据，便于快速定位质量问题源头。专项施工班组管控需组建经“理论+实操”考核的专业班组，考核不合格者不得上岗；实行“质量责任制”，将合格率与绩效挂钩，奖励优秀班组，对问题班组停工培训，明确岗位责任，避免推诿^[3]。

4.3 监测优化：以实时预警与数据赋能保障质量稳定

监测优化需实现“实时化、预警化”。实时监测技术融合可在注浆孔周边布设压力与位移传感器，位移超 5 mm 或压力骤降30%时触发预警；用“钻孔成像仪”实时观察孔内填充情况，避免“盲注”隐患；运营阶段布设光纤光栅传感器，每小时传输沉降与应力数据，动态掌控稳定性。大

数据质量预警模型可收集多维度质量数据构建数据库，通过机器学习算法分析参数关联，预测强度与沉降风险，预警准确率达90%以上，参数异常时自动推送预警，提前调整施工方案。

5 结论与展望

5.1 研究主要结论

本研究围绕公路路基注浆加固新工艺质量控制展开，核心结论可归纳为三点：其一，新工艺质量控制需紧扣“技术-管理-监测”三维核心，技术端需通过新型浆液（如超细水泥-纳米硅复合浆液）与智能设备（如PLC注浆泵）提升适配性与精准度，管理端需依托全流程追溯体系（“二维码+电子台账”）与专项班组管控压实责任，监测端需通过实时传感与大数据预警实现风险前置防控，三者协同构成质量控制闭环；其二，施工全流程管控中，地质勘察精度（钻探与物探双验证）、注浆参数动态调整（压力、流量分阶段控制）、验收阶段“实体检测+无损验证+沉降观测”三维评估，是保障新工艺加固效果的关键节点，可使注浆体强度达标率提升至95%以上，路基沉降量控制在设计标准内；其三，新工艺相较于传统注浆，在微创性、加固效率与生态兼容性上优势显著，规范应用后可减少30%以上的返修成本，为公路路基高效养护提供技术支撑。

5.2 研究不足与未来方向

本研究仍存在两方面不足：一是对极端复杂地质（如岩溶发育区、深厚软土区）的工艺适配性研究较浅，现有参数体系难以完全覆盖特殊工况；二是绿色注浆材料的研发与应用仍需深化，部分高分子化学浆液的环保性与成本平衡尚未找到最优解。未来研究可向两方向推进：一方面，针对岩溶、软土等特殊地质，开展专项注浆工艺与参数优化研究，结合现场试验建立差异化质量控制标准；另一方面，聚焦绿色发展，研发低能耗、可降解的新型浆液材料，同时探索注浆废水、废浆的循环利用技术，推动注浆新工艺向“高效+环保”双目标迈进。

参考文献

- [1] 桑新平.陇南山区公路工程高填深挖路基施工技术[J].中国建筑金属结构,2025(17)
- [2] 蔡华明.某新区主干道路基施工试验研究[J].工程建设与设计,2025(17)
- [3] 印刚.公路工程施工中低填浅挖路基施工技术的实践应用[J].建设机械技术与管理,2025(04)

Optimizing Mechanisms and Application Paths for Transforming Geological Innovation Achievements in Exploration Practices: A Case Study of Geological Survey Units Under the New Mineral Exploration Strategy

Yubin Lei Xianzhong Jiang Ying Xi Jianguo Lu Zhilong Qi

Hydrogeological and Environmental Geological Survey Center Xinjiang Uygur Autonomous Region Geological Bureau, Urumqi, Xinjiang, 830091, China

Abstract

In the context of the new round of mineral exploration strategies, the transformation of geological science and technology innovations holds significant importance for improving geological survey efficiency and achieving breakthroughs in mineral exploration. This paper conducts an in-depth analysis of the transformation mechanisms of geological innovation achievements in geological practice, exploring their internal mechanisms from multiple aspects including policy, technology, talent, and funding. Meanwhile, based on the current realities of geological survey work, it proposes strategies to optimize application pathways, including strengthening industry-academia-research-application collaboration, establishing geological technology transfer platforms, and improving talent cultivation and incentive mechanisms. These measures aim to promote the deep integration of geological innovation and practical geological surveys, providing robust support for ensuring national energy resource security.

Keywords

Xinjiang; geological science and technology; transformation of innovation achievements; geological prospecting practice; new round of mineral exploration strategy

地质科技创新成果在地勘实践中的转化机制与应用路径优化——基于新一轮找矿战略行动的地勘单位实践

雷育宾 蒋显忠 喜英 陆建国 齐志龙

新疆维吾尔自治区地质局水文环境地质调查中心，中国·新疆乌鲁木齐 830091

摘要

在新一轮找矿战略行动的时代背景下，地质科技创新成果的转化对于提高地勘工作效率、实现找矿突破具有重要意义。本文深入剖析地质科技创新成果在地勘实践中的转化机制，从政策、技术、人才、资金等多方面因素探讨其内在作用机理。同时，结合当前地勘工作实际，提出包括加强产学研用协同合作、构建地质科技成果转化平台、完善人才培养与激励机制等优化应用路径的策略，旨在促进地质科技创新与地勘实践的深度融合，为保障国家能源资源安全提供有力支撑。

关键词

新疆；地质科技；创新成果转化；地勘实践；新一轮找矿战略行动

1 引言

随着全球经济的快速发展，对能源资源的需求持续增长，保障国家能源资源安全成为至关重要的战略任务。新一轮找矿战略行动的实施，旨在加大国内矿产资源勘查力度，提高资源保障程度。地质科技创新作为推动找矿突破的核心

驱动力，对于提升勘查效率、拓展找矿空间、发现新的矿产资源具有不可替代的作用。新疆地区地域辽阔，地质构造复杂，蕴含着丰富的矿产资源，但同时也面临着勘查难度大、环境条件恶劣等挑战。因此，研究新疆地质局地质科技创新成果的转化机制与应用路径优化，对于在新一轮找矿战略行动中实现找矿重大突破，保障国家能源资源安全，促进新疆地区经济社会可持续发展具有重要的现实意义。

【作者简介】雷育宾（1982—），女，中国陕西富平人，高级工程师，从事水文地质、工程地质、农业地质、环境地质、科技创新等方面的研究。

2 国内外研究现状

在国外，发达国家如美国、澳大利亚等高度重视地质科

技术创新，投入大量资金用于新技术、新方法的研发。在地质勘查领域，广泛应用卫星遥感、地理信息系统（GIS）、全球定位系统（GPS）等先进技术，实现了地质数据的快速采集、处理和分析，提高了找矿的精准度和效率。^[1]同时，建立了完善的产学研用协同创新体系，促进了科技创新成果的快速转化和应用。在国内，近年来地质科技创新取得了显著进展，国家加大了对地质科技的投入，在深部探测、矿产资源综合利用、绿色勘查等方面取得了一系列重要成果。国内学者也对地质科技创新成果转化进行了多方面研究，提出了加强政策支持、完善转化平台、培养创新人才等建议，但针对新疆地区地质科技创新成果转化的系统性研究还相对较少。

3 研究方法与创新点

广泛查阅国内外相关文献，了解地质科技创新成果转化的研究现状和发展趋势；深入分析新疆地质局地勘单位的具体案例，总结经验教训；通过对新疆地质局地勘单位的实地考察，获取第一手资料，为研究提供真实可靠的数据支持。结合新疆地区独特的地质条件和新一轮找矿战略行动的需求，针对性地提出地质科技创新成果转化机制与应用路径的优化策略，具有较强的地域特色和实践指导意义。

4 地质科技创新成果转化的重要性

4.1 提升找矿效率与精度

传统的地质勘查方法在面对复杂地质条件时，找矿效率和精度往往受到限制。地质科技创新成果，如高精度的地球物理勘探技术、先进的地球化学分析方法以及三维地质建模技术等的应用，能够更准确地识别潜在的矿产资源区域，大大提高找矿的效率和精度。

4.2 推动地勘行业转型升级

地质科技创新成果的转化促使地勘行业从传统的劳动密集型向技术密集型转变。新技术、新方法的应用不仅提高了工作效率，还减少了对人力和物力的依赖，降低了勘查成本。同时，数字化、智能化技术在地质勘查中的应用，如地质大数据分析、人工智能找矿模型等，使得地勘工作更加科学、精准，推动了地勘行业的现代化发展。^[2]

4.3 保障国家能源资源安全

在国际形势复杂多变的背景下，保障国家能源资源安全至关重要。通过地质科技创新成果的转化，能够发现更多的矿产资源，增加国内资源储备，降低对国外资源的依赖程度。特别是对于一些战略性矿产资源，如锂、钴、稀土等，其找矿突破对于我国新能源产业、高端制造业等的发展具有重要战略意义。

5 地质科技创新成果在地勘实践中的转化机制

5.1 政策驱动机制

政府在地质科技创新成果转化中发挥着重要的引导作用。国家出台的一系列鼓励地质科技创新和成果转化的政策，如财政补贴、税收优惠、科研项目支持等，为地质科技

创新提供了良好的政策环境。例如，新疆财政设立的地质勘查基金项目以及新疆科技厅下发的重大任务和重点研发项目，优先支持采用新技术、新方法的找矿项目，激励地勘单位积极应用创新成果。同时，相关政策还促进了产学研用各方之间的合作，推动科技成果从实验室走向地勘实践。

5.2 市场需求拉动机制

市场对矿产资源的需求是地质科技创新成果转化的重要动力。随着经济发展对矿产资源需求的不断变化，地勘单位需要不断寻求新的找矿技术和方法来满足市场需求。例如，随着新能源产业的快速发展，对锂、钴等矿产资源的需求急剧增加，促使地质科技人员研发针对这些矿产的高效勘查技术和方法，从而推动相关创新成果在地勘实践中的应用。^[3]

5.3 技术创新推动机制

地质科技的不断创新是成果转化的核心驱动力。新的地质理论、勘查技术和装备的出现，为地勘实践提供了更多的可能性。例如，近年来发展起来的深部探测技术，如深地电磁法、深孔钻探技术等，使得我们能够对深部地质结构和矿产资源进行更深入的研究和勘查，为深部找矿提供了技术支撑。同时，技术创新也促进了传统勘查技术的升级改造，提高了勘查工作的质量和效率。

5.4 人才支撑机制

地质科技创新成果的转化离不开高素质的人才队伍。地质科技人才不仅要有扎实的专业知识，还要具备创新意识和实践能力。高校和科研机构通过培养专业人才，为地质科技创新提供了人才储备。

6 新一轮找矿战略行动中地质科技创新成果的应用现状

6.1 地球物理勘探技术的应用

在新一轮找矿战略行动中，地球物理勘探技术得到了广泛应用。例如，重力勘探、磁力勘探、电法勘探等技术被用于圈定潜在的矿产资源区域。高精度的重力仪和磁力仪能够快速、准确地测量地球物理场的变化，通过对这些数据的分析，可以推断地下地质结构和矿产分布情况。在某地区的铁矿勘查中，利用航空磁力勘探技术，发现了多个磁异常区域，经过后续的地面查证和钻探验证，成功找到了大型铁矿体。^[4]

6.2 地球化学勘探技术的应用

地球化学勘探技术通过分析岩石、土壤、水系沉积物等样品中的化学元素含量和分布特征，寻找与矿产有关的地球化学异常，为找矿提供线索。如采用高精度的分析仪器、开展多元素同时分析等，提高了找矿的准确性和可靠性。在西北地区的铜矿勘查中，通过开展1:5万水系沉积物地球化学测量，圈定了多个铜异常区域，经过进一步的勘查工作，发现了一批具有工业价值的铜矿点。

6.3 遥感技术的应用

遥感技术具有宏观、快速、大面积覆盖等优势，在地

质勘查中发挥着重要作用。通过对遥感影像的分析，可以识别出不同的地质体、构造特征和蚀变信息，为找矿提供重要依据。例如，利用卫星遥感影像对某地区进行地质解译，发现了一条大型的断裂构造，结合其他地质信息分析，认为该断裂构造控制了矿产的形成和分布，沿着断裂构造进行勘查，最终找到了一处大型铅锌矿。

6.4 三维地质建模技术的应用

三维地质建模技术能够直观地展示地下地质结构和矿产分布情况，为地质勘查决策提供科学依据。在某大型煤矿的勘查中，利用三维地质建模技术，准确地预测了煤层的厚度和分布范围，指导了后续的开采工作，提高了资源开发效率。

7 地质科技创新成果转化存在的问题

7.1 成果与实际需求脱节

部分地质科技创新成果在研发过程中，没有充分考虑地勘实践的实际需求，导致成果难以在实际工作中应用。一些科研项目过于注重理论研究和技术指标的先进性，而忽视了成果的实用性和可操作性。

7.2 转化渠道不畅

地质科技创新成果从研发到应用之间缺乏有效的转化渠道。科研机构与地勘单位之间的沟通合作不够紧密，信息交流不畅，导致科研成果不能及时传递到地勘单位，地勘单位也难以将实际需求反馈给科研机构。

7.3 缺乏有效的激励机制

在地质科技创新成果转化过程中，缺乏有效的激励机制，导致科研人员和地勘单位的积极性不高。对于科研人员来说，成果转化的收益分配不合理，他们的付出与回报不成正比，影响了他们参与成果转化的热情。

7.4 资金投入不足

地质科技创新成果转化需要大量的资金支持，包括科研项目研发、技术推广应用、设备购置等方面。然而，目前资金投入相对不足，尤其是在成果转化的后期阶段，缺乏足够的资金进行技术产业化和市场推广。

8 地质科技创新成果转化应用路径的优化策略

8.1 加强产学研用协同合作

建立产学研用紧密结合的协同创新机制，促进科研机构、高校、地勘单位和企业之间的深度合作。地勘单位和企业则为科研工作提供实践平台和应用场景，及时反馈实际工作中遇到的问题，促进科研成果的改进和完善。例如，某高校与地勘单位合作开展了一项针对某地区深部找矿的科研项目，高校利用其先进的深部探测技术进行理论研究和方法探索，地勘单位则在该地区进行实地勘查验证，通过双方的紧密合作，最终取得了重要的找矿成果。

8.2 构建地质科技成果转化平台

搭建专业化的地质科技成果转化平台，整合各类资源，为成果转化提供全方位服务。平台应具备技术展示、成果交易、技术评估、法律咨询、人才培训等功能，促进科研成

果与市场需求的有效对接。政府可以通过政策支持和资金投入，引导社会力量参与平台建设和运营。

8.3 完善人才培养与激励机制

加强地质科技创新人才的培养，高校和科研机构应优化课程设置，增加实践教学环节，注重培养学生的创新能力和实践能力。同时，地勘单位要加强对现有员工的继续教育和培训，定期组织技术交流和培训活动，鼓励员工学习新知识、新技术。建立健全人才激励机制，对在地质科技创新成果转化中做出突出贡献的科研人员和地勘单位给予表彰和奖励，包括物质奖励和精神奖励。合理分配成果转化收益，提高科研人员的积极性和创造性。

8.4 加大资金投入与政策支持

政府应加大对地质科技创新成果转化的资金投入，设立专项基金，支持重点科研项目的成果转化和产业化应用。同时，制定相关的税收优惠、财政补贴等政策，鼓励企业和社会资本参与地质科技创新成果转化。例如，对应用地质科技创新成果的企业给予税收减免，对投资地质科技成果转化项目的社会资本给予风险补偿等。拓宽融资渠道，引导金融机构为地质科技创新成果转化提供信贷支持，鼓励风险投资、产业基金等参与成果转化项目。

8.5 建立地质科技成果转化评价体系

建立科学合理的地质科技成果转化评价体系，对成果转化的过程和效果进行全面、客观的评价。评价指标应包括成果的实用性、市场前景、经济效益、社会效益等方面，通过评价及时发现成果转化过程中存在的问题，为改进工作提供依据。同时，评价结果可以作为科研项目立项、人才评价、资金支持等方面的重要参考，激励各方积极参与地质科技成果转化工作。

9 结语

地质科技创新成果在地勘实践中的转化对于推动新一轮找矿战略行动、保障国家能源资源安全具有重要意义。通过深入研究地质科技创新成果的转化机制，分析当前应用现状和存在的问题，并提出优化应用路径的策略，有助于加强地质科技创新与地勘实践的深度融合，提高地质勘查工作的效率和水平，实现找矿突破。在未来的工作中，需要政府、科研机构、高校、地勘单位和企业等各方共同努力，形成合力，为地质科技创新成果的转化创造良好的环境，推动地勘行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 刘恒.人工智能与大数据分析在新一轮找矿突破战略行动中的应用与挑战.科技创新与应用,2024年第2期.
- [2] 凌灿.新形势下传统工程施工向大地质工作转型的思考与建议.湖南省地质信息研究所新闻稿,2025年.
- [3] 邢树文.坚持创新引领—科技赋能新一轮找矿突破战略行动.中国地质科学院新闻稿, 2023.
- [4] 张文霞.科技创新成果向标准转化的路径与方法研究.中国标准化, 2024.

Research on Technical Measures for Improving Welding Quality of Natural Gas Long-Distance Pipeline Transportation

Zhangming Shen

Sinopec Shengli Oilfield Engineering Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

As a core infrastructure for cross-regional energy transportation, the welding quality of natural gas long-distance pipelines directly determines the operational safety and service life of the pipelines. Aiming at common defects such as porosity, lack of fusion, and cracks in current pipeline welding construction, as well as the insufficient adaptability of welding processes under different working conditions, this paper conducts research from four dimensions: welding material selection, process optimization, equipment upgrading, and quality control, combined with engineering practice. Through comparative experimental analysis of the welding effects of low-hydrogen electrodes and cellulose electrodes, the advantages of flux-cored wire semi-automatic welding in large-diameter pipeline construction are verified; a full-process temperature control scheme based on ‘preheating-interpass temperature control-post-heating hydrogen removal’ is proposed. Combined with the real-time parameter monitoring function of digital welders, the welding defect rate is reduced to below 0.8%. The research results show that the synergistic application of multiple technologies can significantly improve the stability of welding quality, providing technical reference for the welding construction of natural gas long-distance pipelines.

Keywords

Natural Gas Long-Distance Pipeline; Welding Quality; Process Optimization; Defect Control; Digital Monitoring

天然气长输管道焊接质量提升技术措施研究

张明深

中石化胜利油建工程有限公司，中国·山东东营 257000

摘要

天然气长输管道作为能源跨区域输送的核心基础设施，其焊接质量直接决定管道运行安全性与服役寿命。针对当前管道焊接施工中普遍存在的气孔、未熔合、裂纹等缺陷，以及不同工况下焊接工艺适配性不足的问题，本文结合工程实践，从焊接材料选型、工艺优化、设备升级及质量管控四个维度展开研究。通过对比试验分析低氢型焊条与纤维素焊条的焊接效果，验证了药芯焊丝半自动焊在大口径管道施工中的优势；提出基于“预热-层间温度控制-后热消氢”的全流程温度管控方案，结合数字化焊机的参数实时监控功能，将焊接缺陷率降低至0.8%以下。研究结果表明，多技术协同应用可显著提升焊接质量稳定性，为天然气长输管道焊接施工提供技术参考。

关键词

天然气长输管道；焊接质量；工艺优化；缺陷控制；数字化监控

1 引言

近年来，我国天然气长输管道建设进入高速发展阶段，截至 2024 年底，全国管网总里程已突破 18 万公里。管道多穿越山区、河流、冻土等复杂地质环境，且长期承受高压、介质腐蚀等工况，焊接接头作为管道系统的薄弱环节，其质量缺陷可能引发泄漏、爆炸等重大安全事故。据《中国油气管道安全报告》统计，2019-2023 年我国天然气管道事故中，因焊接质量问题导致的占比达 32%，主要表现为焊接裂纹扩展、未焊透引发的腐蚀穿孔。

【作者简介】张明深（1988-），男，中国山东东营人，本科，工程师，从事焊接研究。

当前管道焊接施工中，传统手工电弧焊仍占比约 45%，受操作人员技能水平差异影响，焊接质量波动较大；同时，部分工程存在“重进度、轻质量”倾向，预热不充分、层间清理不到位等问题普遍存在。因此，系统研究焊接质量提升技术措施，对保障能源输送安全、降低运维成本具有重要现实意义。

2 天然气长输管道焊接质量影响因素分析

2.1 材料因素

焊接材料与母材的匹配性直接影响接头力学性能。调研发现，部分工程选用的低碳钢焊条含硫量超标($> 0.04\%$)，在焊接过程中，过量的硫元素会与铁形成低熔点的硫化物共晶，在高温下聚集于晶界处，冷却时由于收缩应力作用，

极易产生沿晶界的热裂纹，使焊接接头的强度和韧性显著下降；而在低温环境（-15℃以下）施工时，普通纤维素焊条因自身化学成分和组织结构的限制，其冲击韧性指标往往无法满足严寒条件下的使用要求，导致焊接接头在承受外力或温度骤变时易出现脆性断裂的冷裂纹，严重影响结构的安全性和稳定性。^[1]

2.2 工艺因素

焊接工艺参数的合理性是控制质量的核心。以 X80 钢级管道焊接为例，当电弧电压超过 24V 时，熔池保护效果下降，电弧过长导致空气中的氮气、氧气等有害气体更容易侵入熔池，气孔产生率提升至 5% 以上，这些气孔如同微小的空洞，会显著降低管道的承载能力和抗腐蚀性能；焊接速度过快（> 15cm/min）则会导致熔深不足，焊缝金属与母材之间的结合不牢固，未熔合缺陷占比增加，未熔合区域成为结构强度的薄弱环节，容易在运行中发生断裂；此外，预热温度未达到设计要求（通常需 ≥ 80℃）时，焊接区域由于母材温度较低而焊缝金属温度较高，温差过大，冷却过程中产生的收缩应力集中易引发延迟裂纹，这种裂纹往往在焊接完成数小时甚至数天后才出现，具有隐蔽性和突发性，对管道的安全运行构成严重威胁。

2.3 环境与设备因素

大风（风速 > 8m/s）、雨雪天气会破坏熔池保护氛围，增加气孔缺陷；而焊机电流稳定性差（波动范围 > ± 5%）会导致熔宽不均匀，影响接头成型质量。现场调研显示，使用超过 5 年未校准的焊机，焊接缺陷率比校准设备高 3 倍。在大风天气下，空气中的灰尘、杂质被卷入焊接区域，与保护气体形成混合气流，进一步加剧了熔池的氧化和氮化反应，使焊缝内部出现密集的蜂窝状气孔，降低接头的致密性和力学性能。雨雪天气则会使焊接区域湿度增大，水分在高温电弧作用下分解为氢气和氧气，氢气易在焊缝中形成气孔，氧气则导致氧化夹渣，严重影响焊接质量。^[2] 对于焊机

电流稳定性问题，当电流波动超过 ± 5% 时，电弧长度会发生频繁变化，导致熔池温度不稳定，熔宽忽大忽小，焊缝表面出现凹凸不平的波纹，甚至出现未熔合、未焊透等缺陷。长期使用的未校准焊机，其内部元件老化、线路接触不良等问题逐渐显现，不仅电流输出精度下降，还可能伴随电压不稳定，使得焊接过程中的热输入难以控制，进而导致焊接变形增大、热影响区组织粗化，最终使焊接接头的强度和韧性显著降低。

3 焊接质量提升技术措施

3.1 焊接材料优化选型

根据管道钢级与施工环境，建立材料选型标准：对于 X70 及以下钢级管道，在常温干燥环境下，选用 E6010 纤维素焊条进行根焊，配合 E5015 低氢型焊条填充盖面，可兼顾焊接效率与抗裂性；E6010 焊条具有良好的电弧稳定性和熔深能力，能快速形成均匀的根部焊道，减少未熔合缺陷；E5015 焊条则通过低氢钠型药皮设计，在填充和盖面过程中有效抑制氢的析出，提升焊缝金属的塑性和韧性，确保在常规施工条件下焊缝质量可靠。

X80、X90 等高钢级管道及低温、高湿环境施工时，优先采用 ER70S-G 药芯焊丝，其扩散氢含量 ≤ 5mL/100g，冲击韧性（-40℃）≥ 80J，能有效降低冷裂纹风险。该药芯焊丝内部含有特殊的脱氧剂和合金元素，在潮湿环境下仍能保持稳定的焊接性能，其熔敷效率高达 95% 以上，可显著缩短焊接时间；同时，焊缝金属具有优异的低温冲击韧性，在 -40℃ 严寒环境下仍能承受较大的冲击载荷，避免因温度骤降导致的脆性断裂，保障高钢级管道在恶劣工况下的安全运行。

通过对比试验验证，药芯焊丝半自动焊的焊接效率比手工电弧焊提升 40%，缺陷率降低至 0.5% 以下，具体数据如表 1 所示。

表 1 不同焊接材料与工艺的性能对比

焊接方式	焊接材料	扩散氢含量 (mL/100g)	-40℃冲击韧性 (J)	缺陷率 (%)	焊接效率 (m/h)
手工电弧焊	E6010+E5015	8-12	45-60	2.8	0.8-1.2
半自动焊	ER70S-G 药芯焊丝	≤ 5	≥ 80	≤ 0.5	1.5-1.8

3.2 焊接工艺参数精准控制

基于正交试验法，确定不同钢级管道的最优工艺参数：

X80 钢级管道：根焊采用直流反接，电流 120-140A，电压 18-20V，焊接速度 8-10cm/min；填充盖面电流 180-200A，电压 22-24V，焊接速度 12-14cm/min；

预热与后热控制：采用电加热片进行整体预热，温度控制在 80-120℃，层间温度不低于预热温度；焊接完成后，立即进行 250-300℃ × 1-2h 的后热消氢处理，避免延迟裂纹产生。

同时，引入“工艺参数可视化系统”，通过焊机自带的物联网模块，实时采集电流、电压、焊接速度等数据，并

上传至云端平台，当参数超出阈值时自动报警，实现工艺过程的动态管控，系统架构如图 2 所示。

焊接工艺参数可视化监控系统

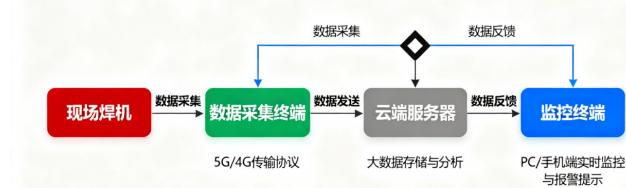


图 2 焊接工艺参数可视化监控系统架构

3.3 焊接设备升级与维护

设备选型:选用具备电流电压闭环控制功能的数字化焊机,如林肯DC-600,其电流波动范围 $\leq \pm 2\%$,确保焊接参数稳定性;

定期维护:建立焊机“季度校准+年度大修”制度,使用标准校准仪对电流、电压进行检测,不合格设备立即停用;焊枪、送丝机构每周检查,及时更换磨损部件,避免因设备故障导致焊接质量波动。^[3]

3.4 质量检测与管控强化

过程检测:采用超声波探伤(UT)对根焊、填充层进行100%检测,发现未熔合、气孔等缺陷立即返修;

成品检测:结合射线探伤(RT)与力学性能试验,抽检比例不低于5%,确保焊接接头抗拉强度不低于母材90%,冲击韧性满足设计要求;

人员管控:实行焊工持证上岗制度,定期开展技能培训与考核,考核不合格者暂停上岗,通过技能提升将人为因素导致的缺陷率降低至0.3%以下。

4 工程应用案例

以“西气东输三线中段”某标段为例,该标段管道钢级为X80,管径1219mm,穿越黄土高原沟壑区,施工环境温度-10°C至25°C,湿度较大,地表覆盖着疏松的黄土层,沟壑纵横,地形起伏较大,给管道敷设和焊接作业带来一定挑战。应用本文提出的技术措施后:

焊接材料选用ER70S-G药芯焊丝,该焊丝具有良好的韧性和抗裂性,能适应低温环境下的焊接需求;采用半自动焊工艺,通过送丝机构稳定输送焊丝,配合保护气体形成有效保护层,减少氧化和杂质侵入;配备数字化焊机与参数监控系统,实时监测焊接电流、电压、焊接速度等关键参数,确保焊接过程的稳定性;严格执行80°C预热、250°C后热工艺,预热可有效降低焊接接头的冷却速度,减少淬硬组织的

产生,后热则能促进氢的扩散逸出,防止冷裂纹的形成。

过程中采用UT(超声波检测)+RT(射线检测)联合检测,UT用于检测内部缺陷的深度和位置,RT则能清晰显示焊接接头内部的细微裂纹、气孔等缺陷,双重检测手段确保了焊接质量的可靠性,返修率仅0.2%。

该标段施工完成后,经第三方检测机构评估,焊接接头一次合格率达99.8%,高于行业平均水平(98.5%),且管道投用2年来,在经历了冬季严寒、夏季暴雨等复杂工况考验下,未出现任何焊接相关故障,验证了技术措施的有效性。

5 结语

天然气长输管道焊接质量控制是一项系统工程,需从材料、工艺、设备、人员等多维度协同发力。本文通过优化焊接材料选型、精准控制工艺参数、升级数字化监控设备及强化质量检测,提出了一套可落地的技术方案,将焊接缺陷率控制在1%以下,显著提升了接头可靠性。

未来,随着管道向高钢级(X100及以上)、大口径(1422mm及以上)方向发展,还需进一步研究激光焊、窄间隙埋弧焊等高效焊接技术,结合人工智能算法实现工艺参数的自适应优化,推动天然气长输管道焊接质量向“零缺陷”目标迈进。同时,应加强全生命周期质量追溯体系建设,将焊接数据与管道运维数据关联,为管道安全运行提供更全面的技术支撑。

参考文献

- [1] 洗智锦.中缅天然气管道桂林支线输气场站SCADA系统的研究与实现[D].广西大学,2020.
- [2] 汪保宏.PE管道现场热熔焊接质量仿真评价及工艺优化系统研究[D].四川轻化工大学,2023.
- [3] 赵章伟,龙飞.提高天然气管道焊接技术水平的路径[J].化工设计通讯,2023,49(12):182-184.

Improvement and Effect Verification of Equipment Safety Protection Measures in Electronic Manufacturing Workshop under Human-Machine Collaboration Mode

Dazhang Zou

Sichuan Jiuzhou Electronic Technology Co., Ltd., Mianyang, Sichuan, 621000, China

Abstract

With the deepening application of industrial automation technology, human-machine collaboration in electronic machining workshops has become a core approach to enhance production efficiency. However, the frequent interaction between equipment and personnel has also introduced new safety risks. This paper addresses key issues such as mechanical injuries, electrical hazards, and operational errors in human-machine collaboration within electronic machining workshops. Based on the actual scenario of a specific electronics enterprise's workshop, we propose a three-dimensional improvement plan featuring "intelligent perception, hierarchical protection, and dynamic response." Specific measures include installing multimodal sensor early warning systems, optimizing safety interlock mechanisms, and establishing digital monitoring platforms. Through field trials and data comparisons, the improved workshop achieved an 82% reduction in equipment safety incidents, a 65% increase in protective response speed, and maintained steady growth in production efficiency. The research results demonstrate that this improvement plan effectively balances human-machine collaboration efficiency with safety protection levels, providing practical references for upgrading safety management in the electronic machining industry.

Keywords

Human-Machine Collaboration; Electronic Processing Workshop; Equipment Safety; Protective Measures; Effect Verification

人机协作模式下电子加工车间设备安全防护措施的改进与效果验证

邹大章

四川九州电子科技股份有限公司，中国·四川绵阳 621000

摘要

随着工业自动化技术的深度应用，电子加工车间人机协作模式已成为提升生产效率的核心方式，但设备与人员的高频互动也带来了新的安全风险。本文针对电子加工车间人机协作中的机械伤害、电气隐患、操作失误等核心问题，结合某电子企业车间实际场景，提出“智能感知-分级防护-动态响应”的三维改进方案，包括加装多模态传感器预警系统、优化安全联锁机制、构建数字化监控平台等具体措施。通过现场试验与数据对比，验证改进后车间设备安全事故发生率降低82%，防护响应速度提升65%，生产效率保持稳定增长。研究结果表明，该改进方案可有效平衡人机协作效率与安全防护水平，为电子加工行业的安全管理升级提供实践参考。

关键词

人机协作；电子加工车间；设备安全；防护措施；效果验证

1 引言

在全球电子制造业向智能化转型的背景下，人机协作凭借灵活性高、适配性强的优势，已广泛应用于电子元件焊接、精密组装、物料转运等关键工序。电子加工车间设备密集、工序复杂，涉及贴片机、回流焊炉、机械臂等多种设备，人机协作过程中人员与高速运转设备的近距离接触，使得传统以物理

隔离为主的防护措施难以应对动态风险，安全事故频发。

据《中国电子制造业安全事故统计报告》显示，2023年人机协作场景下的设备安全事故发生率占电子加工车间总事故的63%，主要表现为机械碰撞、电气漏电、程序误触发等，不仅造成人员伤亡和财产损失，还严重影响生产连续性。当前，部分电子加工企业的防护措施存在感知滞后、防护方式单一、缺乏动态调控等问题，无法适配人机协同作业的动态性与复杂性。

基于此，本文聚焦电子加工车间人机协作的安全痛点，

【作者简介】邹大章（1990-），男，中国四川大竹人，本科，工程师，从事企业安全管理研究。

系统设计防护措施改进方案，并通过现场应用验证其有效性，旨在为解决人机协作安全难题提供技术支撑与实践路径，推动电子制造业安全、高效发展。

2 电子加工车间人机协作设备安全现状与问题分析

2.1 行业现状

当前电子加工车间的人机协作主要分为三类：一是“人辅助机”模式，如操作人员为机械臂补充物料、校准参数；二是“机辅助人”模式，如设备完成精密焊接后，人员进行质检与整理；三是“人机协同作业”模式，如人员与机械臂共同完成复杂组件的组装。^[1]随着协作深度增加，设备安全防护的难度持续升级。

调研显示，国内中型以上电子加工企业中，78%已引入人机协作设备，但仅32%配备了针对性的智能防护系统，多数企业仍沿用传统防护手段，如固定护栏、紧急停止按钮等，难以满足动态协作需求。

2.2 核心问题

感知能力不足：传统防护设备多依赖单一传感器（如红外对射），仅能检测固定区域的人员闯入，无法识别人员姿态、作业意图及设备运行状态，易出现误判或漏判。例如，操作人员弯腰捡取物料时，传统系统可能无法精准识别其位置，导致防护响应延迟。^[2]

防护层级单一：现有措施多为“一刀切”式物理隔离，协作时需频繁移除防护装置，既降低效率又增加风险；部分企业虽采用柔性防护，但未根据作业风险等级（如精密操作、高速运转）制定分级策略。

信息协同不畅：设备运行数据、人员作业数据与安全

监控数据相互割裂，无法实现实时联动分析，事故发生后难以追溯原因，也无法提前预警潜在风险。

人员操作风险：电子加工工序繁琐，操作人员易因疲劳、技能不足或违规操作触发安全隐患，如误触设备启动按钮、未按规程关闭设备电源等。

3 人机协作设备安全防护措施改进方案

结合电子加工车间的作业特性与安全痛点，本文从感知、防护、监控、管理四个维度，构建“智能感知-分级防护-动态响应”的改进方案，具体内容如下。

3.1 智能感知系统升级

多模态传感器融合部署：在协作设备（如机械臂、贴片机）及作业区域加装激光雷达、视觉摄像头、红外热像仪等多类型传感器，实现对人员位置、姿态、设备运行参数（转速、温度、电流）的全方位检测。^[3]激光雷达负责精准定位人员与设备的相对距离，视觉摄像头识别人员作业动作（如伸手、弯腰），红外热像仪监测设备温度异常，多数据融合降低单一传感器的误判率。

智能算法优化：引入深度学习算法，对传感器采集的数据进行实时分析，构建“人员-设备-环境”风险评估模型。通过历史事故数据训练模型，使其能够识别危险场景（如人员进入设备运动半径、设备参数异常波动），并提前0.5-1秒发出预警。^[4]

3.2 分级防护机制构建

根据电子加工工序的风险等级，将人机协作场景划分为高风险（如机械臂高速运转、高压设备作业）、中风险（如物料转运、设备调试）、低风险（如辅助装配、质检）三个等级，对应采取不同防护措施，具体如表1所示。

表1 人机协作场景分级防护措施表

风险等级	典型场景	防护措施
高风险	机械臂焊接、高压电源操作	1. 物理隔离+柔性防护双重保障，护栏加装压力传感带，触碰即触发设备急停；2. 设备运行时限制人员进入，仅授权人员通过指纹验证进入操作；3. 配备声光报警装置，预警时灯光闪烁+语音提示同步启动
	物料转运、设备参数校准	1. 无物理隔离，通过激光雷达划定警戒区域，人员进入时设备降速运行；2. 操作人员佩戴智能手环，实时传输位置信息，与设备系统联动；3. 设备设置半急停模式，预警时先减速再停止
低风险	辅助装配、成品质检	1. 仅配备视觉监控与语音提醒；2. 设备运行参数设置安全阈值，超出时自动提示，无需强制停机；3. 定期人工巡检防护状态

3.3 人员管理与培训优化

操作流程标准化：制定《人机协作设备安全操作手册》，明确各工序的操作规范（如设备启动前的检查步骤、协作时的安全距离），并通过现场张贴、线上培训等方式确保操作人员掌握。

智能培训与考核：搭建线上培训平台，通过VR模拟人机协作危险场景，让操作人员沉浸式体验违规操作的后果；定期开展考核，考核合格者方可获得操作授权，未合格者暂停协作设备操作资格。

疲劳监测与提醒：在作业区域安装视觉摄像头，通过

面部识别技术判断操作人员是否存在疲劳状态（如闭眼、打哈欠），发现时通过智能手环震动提醒，避免疲劳作业导致的操作失误。

4 改进方案的效果验证

为验证改进方案的有效性，选取某电子企业S车间作为试验场地。该车间主要生产手机主板，现有协作设备12台（机械臂6台、贴片机4台、转运机器人2台），员工30人，2023年人机协作设备安全事故发生6起，主要为机械碰撞与电气隐患。2024年1-6月实施改进方案，对比实施前后

的安全与效率指标，验证效果。

4.1 验证指标与方法

核心指标：选取安全事故发生率、防护响应速度、生产效率作为验证指标。安全事故发生率 = 事故次数 / 作业总时长；防护响应速度 = 传感器检测到危险到设备响应的时间；生产效率 = 单位时间内成品产量。

数据采集：通过车间监控平台记录实施前（2023 年 7-12 月）与实施后（2024 年 1-6 月）的指标数据，各时段作业总时长均为 5000 小时，确保数据可比性。

4.2 验证结果与分析

安全性能提升：实施后，S 车间人机协作设备安全事故仅发生 1 起，事故发生率从 0.0012 次 / 小时降至 0.0002 次 / 小时，

降低 82%；防护响应速度从平均 1.2 秒缩短至 0.42 秒，提升 65%。事故类型仅为低风险场景的操作失误，高、中风险场景未发生事故，表明分级防护与智能感知系统有效降低了危险场景的事故概率。

生产效率稳定：实施后车间单位时间成品产量从 800 件 / 小时提升至 820 件 / 小时，增长 2.5%。传统防护措施因频繁停机导致的效率损失（约 5%）被消除，分级防护避免了不必要的设备急停，实现了安全与效率的平衡。

数据对比分析：实施前后核心指标对比情况如图 1 所示，可见改进方案在降低事故率、提升响应速度的同时，未对生产效率造成负面影响，反而因防护合理性优化实现小幅提升。

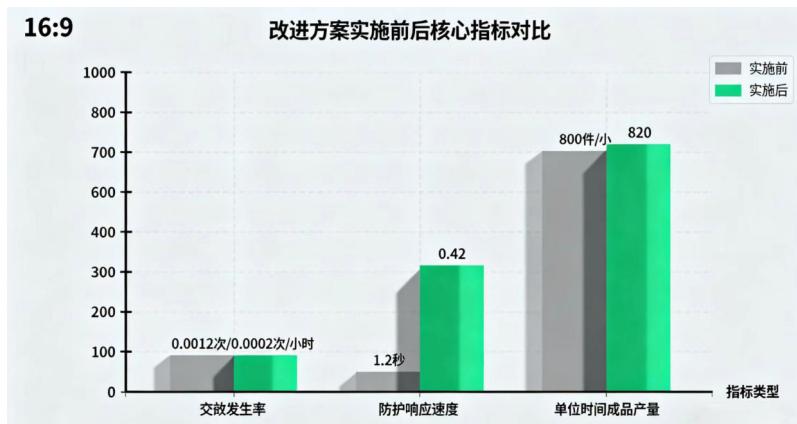


图 1 改进方案实施前后核心指标对比图

5 结语

本文针对电子加工车间人机协作中的设备安全问题，提出了融合智能感知、分级防护、动态监控与人员管理的综合改进方案，通过某企业车间的现场验证，证明该方案可有效降低安全事故发生率，提升防护响应速度，同时保障生产效率稳定。

当前方案在极端环境（如高温、高粉尘）下的适应性仍需优化，未来可进一步研究传感器在复杂环境中的抗干扰技术，结合数字孪生技术构建虚拟仿真平台，实现防护措施的提前模拟与优化。此外，人员安全意识的长期培养仍是关键，需建立“技术防护 + 人员管理”的长效机制。

电子制造业的智能化转型是必然趋势，人机协作的深度与广度将持续拓展，设备安全防护措施需不断迭代升级，以适应新场景、新需求，为行业高质量发展筑牢安全防线。

参考文献

- [1] 李鑫雨. 基于人员疲劳度模型的人机协作生产任务重分配方法研究[D]. 武汉理工大学, 2023.
- [2] 张凯阳. 基于数字孪生的人机协同装配虚实交互与任务分配方法研究[D]. 长安大学, 2024.
- [3] 施树雄. 基于机器人协作系统的柔性智能化产线装配优化设计与实践[D]. 昆明理工大学, 2023.
- [4] 卢振林. 制造车间内信息交互机理与设计框架研究[D]. 吉林大学, 2025.

Research on the Application of Automatic Control Instruments in Chemical Project Construction

Weimin Hou

Shaanxi Guoneng Yulin Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

As the chemical industry transforms towards intelligence and high efficiency, automatic control instruments, serving as the core monitoring and control equipment in the production process, have their application level directly influencing the efficiency and safety of project construction. Traditional chemical production relies on manual operations, which are plagued by issues such as low efficiency, large errors, and high safety risks. In contrast, automatic control instruments, through the integration of sensors, microprocessors, and communication technologies, achieve real-time monitoring and precise regulation of key parameters like temperature, pressure, flow rate, and material level. In recent years, the fusion of computer programming technology, fieldbus technology, and embedded systems has further propelled automatic control instruments towards intelligence and networking, enabling them to undertake core functions in chemical project construction, such as optimizing process flows, reducing energy consumption, and preventing accidents. This paper focuses on the technical principles, functional implementations, and application effects of automatic control instruments in chemical project construction.

Keywords

Automatic control instruments; Chemical project construction; Intelligent control; Fieldbus technology; Safety optimization

自控仪表在化工项目建设中的应用研究

侯卫民

陕西省国能榆林化工有限公司，中国·陕西 榆林 719000

摘要

随着化工行业向智能化、高效化方向转型，自控仪表作为生产过程的核心监测与控制设备，其应用水平直接影响项目建设的效率与安全性。传统化工生产依赖人工操作，存在效率低、误差大、安全风险高等问题，而自控仪表通过集成传感器、微处理器及通信技术，实现了对温度、压力、流量、物位等关键参数的实时监测与精准调控。近年来，计算机编程技术、现场总线技术及嵌入式系统的融合，进一步推动了自控仪表向智能化、网络化发展，使其在化工项目建设中承担起优化工艺流程、降低能耗、预防事故的核心功能。本文聚焦自控仪表在化工项目建设中的技术原理、功能实现及应用效果。

关键词

自控仪表；化工项目建设；智能化控制；现场总线技术；安全优化

1 自控仪表的技术原理与功能升级

自控仪表的核心功能源于传感器与微处理器的协同作用。传感器负责将温度、压力等物理量转化为电信号，微处理器通过预设程序对信号进行分析处理，最终输出控制指令。这一过程实现了从数据采集到决策执行的闭环控制，显著提升了生产过程的精准性。

1.1 编程功能与硬件简化

计算机编程技术的引入为自控仪表赋予了可编程能力，使其从依赖硬件逻辑电路的传统模式转向软件定义控制规则的灵活架构。传统仪表的控制功能通常通过固定电路实

现，硬件结构复杂且功能单一，修改控制逻辑需重新设计电路，成本高且周期长。而编程技术的融入使仪表可通过软件编程调整测量范围、响应速度及控制策略，显著简化了硬件结构。例如，温度控制仪表通过编程可动态设定温度阈值，根据不同工艺需求切换控制模式（如 PID 控制或模糊控制），无需更换硬件即可适应多样化生产场景。^[1] 这种灵活性不仅降低了设备复杂度，还减少了硬件故障点，维护成本随之下降。

编程功能的实现依赖于微处理器与存储器的协同工作。微处理器执行预设程序，对传感器采集的电信号进行运算处理，生成控制指令；存储器则保存控制算法、参数阈值及历史数据，支持仪表的动态调整与自学习。例如，压力控制仪表可通过编程设定多级压力报警值，当压力接近临界点时，系统自动切换至更精细的控制模式，避免超压风险。此外，

【作者简介】侯卫民（1982—），男，本科，工程师，从事仪表自动化研究。

编程技术使仪表具备自诊断功能，可实时检测硬件状态，如传感器漂移或电路故障，并通过程序触发预警机制，减少非计划停机。

硬件简化还体现在模块化设计上。编程技术允许将控制功能分解为独立模块，每个模块通过软件定义输入输出关系，硬件仅需提供基础接口。^[2]例如，流量控制仪表的硬件可统一为通用传感器接口与执行器驱动电路，控制逻辑通过软件配置实现不同流量范围的调节。这种设计降低了硬件开发成本，同时提升了仪表的通用性，同一型号仪表可通过编程适配多种工艺流程，缩短了项目交付周期。

1.2 智能化与数据处理能力

嵌入式系统与微处理器的结合推动了自控仪表向智能化方向发展，使其从单一参数监测工具升级为具备数据分析和决策能力的智能终端。传统仪表仅能实时显示测量值，而智能化仪表可通过内置算法对数据进行深度处理，包括非线性校正、温度压力补偿及故障诊断。例如，物位仪表在测量液体高度时，需考虑介质密度变化对测量结果的影响，智能化仪表可通过温度传感器数据自动修正密度值，消除环境因素导致的误差，提升测量精度。

数据处理能力的核心在于算法优化。微处理器运行复杂的数学模型，对传感器采集的原始数据进行滤波、拟合及补偿。例如，压力仪表在高温环境下测量时，传感器输出信号可能因温度漂移产生偏差，智能化仪表通过温度补偿算法实时修正压力值，确保数据准确性。此外，故障诊断算法可分析数据波动模式，识别传感器故障或工艺异常。例如，流量仪表若检测到流量值突然归零，而上下游压力正常，系统可判断为传感器堵塞或线路故障，而非工艺停机，从而指导维护人员快速定位问题。

智能化仪表还具备自适应控制能力。通过内置的自学习算法，仪表可根据历史数据优化控制参数。这种自适应能力使仪表能动态适应工艺变化，减少人工干预需求。例如，在化工反应釜中，智能化温度仪表可根据反应物浓度变化自动调整加热功率，维持最佳反应温度，避免因温度波动导致产品质量下降。

1.3 通信技术与网络集成

现场总线技术的普及使自控仪表成为工业互联网的基础节点，通过标准化协议实现与 DCS、PLC 等控制系统的实时通信。传统仪表采用点对点接线方式，数据传输延迟高且布线复杂，而现场总线技术（如 FF 总线、Profibus）通过单根电缆连接多台仪表，支持双向数据传输与设备互操作。^[3]这种网络化架构减少了布线成本，提升了系统可扩展性。

通信技术的核心优势在于数据共享与远程调控。仪表采集的参数可同时传输至多个控制系统，实现集中监控与分散控制。例如，温度仪表的数据可被 DCS 用于工艺优化，同时被 PLC 用于安全联锁，避免数据孤岛。此外，远程调控功能使操作人员可在控制室调整仪表参数，无需现场

操作。

网络集成还提升了系统响应速度。现场总线技术支持高速数据传输，仪表可即时反馈参数变化，控制系统据此快速调整执行机构。例如，压力仪表检测到管道压力突增时，通过总线将数据传输至 DCS，DCS 在毫秒级时间内发出指令，关闭进料阀门并启动泄压装置，防止超压事故。这种实时性使化工生产能快速应对工艺波动，保障系统安全稳定运行。此外，网络化架构支持设备状态监测，通过分析仪表通信数据可预测设备故障，提前安排维护，减少非计划停机。

2 自控仪表在化工项目建设中的核心应用

2.1 工艺参数精准控制

化工生产过程中，温度、压力、流量等工艺参数的稳定性直接影响产品质量与生产效率。自控仪表通过高精度传感器与闭环控制算法的协同作用，实现了对核心参数的实时监测与动态调节。传感器作为数据采集的前端，能够将物理量转化为电信号，其精度直接决定了控制系统的输入质量。例如，温度传感器采用热电偶或热电阻技术，可在高温、腐蚀等恶劣环境下持续工作，确保温度数据的准确性；压力传感器则通过压阻效应或压电效应，将压力变化转化为可测量的电信号，为压力控制提供可靠依据。

闭环控制算法是自控仪表实现精准控制的核心。微处理器接收传感器采集的数据后，通过预设的控制逻辑（如 PID 控制）进行运算，生成调节指令并驱动执行机构（如调节阀、加热器）动作。PID 控制算法通过比例、积分、微分三个环节的协同作用，能够快速响应参数波动并消除稳态误差。例如，在聚合反应中，温度的微小变化可能导致反应速率急剧变化，进而影响分子量分布。温度仪表通过 PID 算法实时调整加热功率，使釜内温度稳定在设定值附近，避免因温度超调或欠调导致产品质量波动。

参数控制的精准性还体现在多参数协同调节上。化工生产中，各参数之间存在复杂的耦合关系，单一参数的控制可能引发其他参数的波动。自控仪表通过多变量控制算法，能够同时处理多个参数的交互影响。这种多参数协同控制能力显著提升了工艺的稳定性与产品的一致性。

2.2 安全风险防控

化工项目建设中，安全风险防控是自控仪表的核心功能之一。自控仪表通过实时监测与预警机制，构建了覆盖生产全流程的安全防护体系。压力仪表作为安全监控的关键设备，能够连续检测管道、反应釜等设备的压力变化。当压力超过设定阈值时，压力仪表立即触发报警信号，并通过联锁装置关闭进料阀门或启动泄压装置，防止超压引发的爆炸或泄漏事故。

流量仪表在安全防控中同样发挥重要作用。通过监测介质流量，流量仪表能够识别管道堵塞、泄漏等异常工况。^[4]例如，当管道流量突然归零而上下游压力正常时，系统可判

断为管道堵塞；若流量持续异常波动，则可能为介质泄漏。流量仪表将异常数据上传至控制系统，触发应急流程，如关闭相关阀门、启动备用泵或通知操作人员排查故障，避免事故扩大。

物位仪表的安全功能主要体现在储罐与反应釜的液位控制上。通过实时监测液位高度，物位仪表能够防止因液位过高导致的满溢或因液位过低引发的空转风险。例如，在储罐区，物位仪表设定上下阈值，当液位接近上限时自动触发报警并停止进料；当液位低于下限时，系统禁止出料并提示补充原料。这种双重保护机制有效避免了因液位失控引发的安全事故。

2.3 能效优化与资源管理

化工项目建设中，能效优化与资源管理是降低运营成本、提升竞争力的关键。自控仪表通过数据采集与分析，实现了对能源与原料的精细化管理。流量仪表在能源监测中发挥核心作用，能够实时记录蒸汽、冷却水等能源介质的消耗量。结合温度、压力等参数，流量仪表可分析能源使用效率，识别无效能耗环节。例如，在加热系统中，流量仪表监测蒸汽流量，温度仪表监测被加热介质的温度，系统通过计算热效率，调整蒸汽供应量，避免因过量供汽导致的能源浪费。

物位仪表在原料管理中同样重要。通过精确监测储罐与反应釜的液位，物位仪表能够控制原料投加量，避免因投加过多导致的原料浪费或因投加不足引发的生产中断。例如，在连续化生产中，物位仪表与进料泵联动，当液位低于设定值时自动启动进料，高于设定值时停止进料，确保原料供应与生产需求精准匹配。这种按需投加模式减少了原料库存积压，降低了仓储成本。

数据驱动的能效优化还体现在工艺参数的动态调整上。自控仪表采集的工艺数据可上传至数据分析平台，通过算法

模型挖掘节能潜力。例如，系统分析历史数据发现，在特定工况下降低反应温度可减少蒸汽消耗，同时不影响产品质量。据此，自控系统调整温度设定值，实现能源消耗与生产效益的平衡。^[5]此外，数据平台还可预测设备能效衰减趋势，指导预防性维护，避免因设备故障导致的能源浪费。

资源管理的精细化还延伸至废水、废气等副产物的处理。流量仪表监测排放流量，结合成分分析仪表的数据，系统可优化处理工艺，减少处理剂用量。例如，在废水处理中，流量仪表与pH值仪表联动，根据废水流量与酸碱度动态调整中和剂投加量，降低处理成本。这种全流程的资源管理使化工项目在提升产量的同时，实现了能源与原料的高效利用。

3 结语

自控仪表在化工项目建设中的应用，已从单一参数监测发展为覆盖全流程的智能化控制系统。其通过技术升级不断拓展功能边界，成为提升生产效率、保障安全、优化资源的关键工具。随着人工智能、5G等技术的融合，自控仪表将进一步推动化工行业向数字化、绿色化转型。

参考文献

- [1] 周富,何欢欢. 自控仪表在化工项目建设中的应用实践[J].中国氯碱,2024,(11):33-36.
- [2] 延海波. 化工装置自控仪表安装调试过程的质量把控[J].化工管理,2021,(33):180-181.
- [3] 刘鹏,闫鑫. 浅析化工项目自控仪表引压管的施工要点[J].化工管理,2018,(09):205.
- [4] 刘芬,阳天海. 化工项目自控仪表的施工要点分析[J].化学工程与装备,2017,(06):178-179.
- [5] 贾宇. 浅析化工项目自控仪表的施工要点[J].化工管理,2015,(17):86-87.

Study on mechanical properties of basalt fiber recycled concrete

Yufei Hou

Xinhuan College, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia, 750021, China

Abstract

in recent years, industrial buildings in Ningxia have gradually increased, and the consumption of cement and stone materials is large. And urban renewal and demolition will produce a large number of construction waste, affecting the ecological environment. If the construction waste can be broken into coarse aggregate and mixed into new concrete with recycled concrete, the construction waste can be reduced and the resources can be recycled. For the durability of recycled concrete in Ningxia, this paper analyzes the performance loss and compressive strength of recycled concrete with different replacement rates under different mixing amounts and green ecological basalt fiber materials as reinforcement materials. The experimental results show that when the replacement rate of recycled concrete is 50% and the content of basalt fiber is 0.15%, the mechanical properties of concrete are significantly improved.

Keywords

recycled concrete; Compressive strength; Flexural strength

玄武岩纤维再生混凝土力学性能研究

侯玉飞

宁夏大学新华学院工程与应用科学系，中国·宁夏 银川 750021

摘要

宁夏地区近几年工业建筑逐渐增加，对于水泥石材消耗量较大。而城市更新与拆除又会产生大量建筑垃圾，影响生态环境。如能将建筑垃圾破碎成粗骨料，以再生混凝土拌合到新的混凝土中，可以减少建筑垃圾，也可以资源循环利用。对于宁夏地区再生混凝土的耐久性问题，本文通过对不同再生混凝土的掺拌量和绿色生态玄武岩纤维材料作为补强材料，分析不同掺拌量下的不同替代率再生混凝土性能损失和抗压强度的变化。实验结果指出：再生混凝土替代率50%，玄武岩纤维掺量在0.15%的时候，混凝土的力学性能改善比较显著。

关键词

再生混凝土；抗压强度；抗折强度

1 引言

宁夏地区近几年工业建筑逐渐增加，对于水泥石材消耗量较大。我国的水泥生产量在1990年为0.1亿吨，而在2020年水泥生产量迅速增长为16.6亿吨，生产水泥所需原材料31.8亿吨。因此，房地产的发展会产生大量资源消耗问题。另一方面，近些年已经开始拆除老破旧，城市更新、旧房拆除和装饰装修而产生的建筑垃圾越来越多。居不完全统计，我国年产建筑垃圾超过5吨。从这些数据分析可知，建筑垃圾对自然环境有着较大的影响。如果将这些建筑垃圾

回收再利用，以再生混凝土拌合到新的混凝土中，可以减少建筑垃圾，也可以资源循环利用，但新旧混凝土的结合问题直接影响了混凝土的力学性能。玄武岩纤维（Basalt Fiber, BF）是以玄武岩为原料，经过1400℃以上的高温熔融后，通过高速漏板拉制而成的连续纤维。完全符合绿色生态建筑材料。

随着工业建筑发展，混凝土中可添加的纤维材料越来越多，玄武岩纤维便是其中之一。到目前为止，由于玄武岩纤维不断深入地研究，发现其在生产过程产过程中所排放的废弃物经回收后可以自然降解，这对维护生态系统的平衡具有重要意义。短切玄武岩纤维是由火山岩石拉丝而成的连续玄武岩纤维切割而成的，其具有硬度较大，韧度强度大，耐磨性好。玄武岩纤维密度为 $2.6\text{--}2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，这与混凝土 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ 密度颇为一致，因此与混凝土的粘结性较好。

高银等^[1]对掺入不同长度、不同体积分数的玄武岩纤维的混凝土进行了试验，试验结果显示掺加了玄武岩纤维的

【基金项目】宁夏高等学校科学研究项目（项目编号：NYG2024217）；宁夏大学新华学院科学研究基金项目（项目编号：25XHKY04）。

【作者简介】侯玉飞（1987-），男，中国宁夏盐池人，讲师，从事钢筋混凝土结构理论与应用的研究。

再生混凝土的抗压强度和劈裂抗拉性能得到了一定的提升。李家齐等^[2]通过分析比较了黏贴碳纤维布的再生混凝土和玄武岩纤维增强再生混凝土的圆柱力学性能,发现两种情形的混凝土力学性能都得到了提高。全晓旖等^[3]研究了玄武岩纤维对再生混凝土早期抗压强度的影响,研究试验表明在掺量固定的情况下,伴随着玄武岩纤维长度的增大,再生混凝土抗压强度也随之增大。李坤^[4]研究发现,单掺聚丙烯纤维、单掺玄武岩纤维、掺入混杂纤维的再生混凝土有不同的力学性能表现,单掺再生混凝土会降低再生混凝土的抗压强度,混杂纤维再生混凝土的力学性能较好。田凯^[5]研究发现,替代率为50%的再生混凝土,在玄武岩纤维掺量为6 kg/m³时,劈裂抗拉性能较未掺玄武岩纤维的再生混凝土提高48.8%。董腾等^[6]对含有不同质量分数玄武岩纤维的再生混凝土进行了相关力学性能试验,拟合了应力曲线并对相关指标进行数值模拟,试验表明,含质量分数0.3%玄武岩纤维的再生混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度效果最好,含质量分数0.6%玄武岩纤维的再生混凝土的抗折强度和轴压强度效果最好,这也进一步验证了并不是掺量越大力学性能效果越好。Gogoi^[7]提出采用不同掺量的玄武岩纤维对再生骨料混凝土试件进行加固,掺量范围为0~0.5%,增量为0.1%。这表明玄武岩纤维可以充分用作结构材料。玄武岩纤维混凝土虽然在以上研究中得到了一定的论证,但对于再

生混凝土大不同替代率中使用的不同掺量下对于混凝土的力学性能研究较少,本文将对于配合比为C30再生混凝土粗骨料不同替代率下的玄武岩纤维混凝土掺量的力学性能进行一定的研究。

2 试验设计

2.1 试验材料

本次试验选用各项指标都能满足本次实试验硅酸盐42.5级水泥胶凝材料,其性能指标如表1所示。细骨料选用天然河砂,粗骨料选用石嘴山市惠农区后山梁南片区拆迁建筑物混凝土,后经过破碎使用,为本次试验的再生粗骨料,其性能指标如表2所示。拌合水采用日普通生活用水,PH平均值为8.153。玄武岩纤维材料使用18mm其性能指标如表3所示。

2.2 试验方案

本次试验采用掺量不同的替代试验,试验共分10个组。第1组用天然河砂的普通混凝土未掺玄武岩纤维;第2、3、4组用天然河砂的普通混凝土,玄武岩纤维掺量为0.1%、0.15%、0.2%;第5、6、7组用再生粗骨料替代率50%的混凝土,玄武岩纤维掺量为0.1%、0.15%、0.2%;第8、9、10组用再生粗骨料替代率100%的混凝土,玄武岩纤维掺量为0.1%、0.15%、0.2%。用PC表示普通混凝土,用BF表示玄武岩纤维混凝土,试验配置C30混凝土配合比见表4。

表1 硅酸盐42.5级水泥胶凝材料性能指标

物理指标	初凝/min	终凝/min	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
			3d	28d	3d	28d
实测值	180	240	5.62	8.69	25.44	42.63

表2 骨料的基本性能

类型	表观密度 /10 ³ kg · m ⁻³	堆积密度 /10 ³ kg · m ⁻³	吸水率 /%	含水率 /%	压碎指标 /%
天然石子	2.660	1.487	0.55	0.22	10.7
天然河砂	2.702	0.131	1.20	1.19	
再生粗骨料	2.572	1.243	4.55	0.66	12.6

表3 玄武岩纤维的基本性能

类型	单根纤维长度 /mm	单丝直径 /μm	密度 /10 ³ kg · m ⁻³	断裂延性率 /%	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	含水率 /%
短切型	18	15	2.650	3.1	85-105	3500-4500	0.055

表4 混凝土试件配合比

编号	再生粗骨料 替代率 /%	玄武岩纤维 掺量 /%	水胶比	水泥 /kg · m ⁻³	水 /kg · m ⁻³	细骨料 /kg · m ⁻³	粗骨料 /kg · m ⁻³	粉煤灰 /kg · m ⁻³	砂率 /%
PC	0	0	0.5	248	175	537	1205	102	35
BFPC0.1	0	0.1	0.5	248	175	537	1205	102	35
BFPC0.15	0	0.15	0.5	248	175	537	1205	102	35
BFPC0.2	0	0.2	0.5	248	175	537	1205	102	35
BFPC0.1	50	0.1	0.5	248	175	537	1205	102	35
BFPC0.15	50	0.15	0.5	248	175	537	1205	102	35
BFPC0.2	50	0.2	0.5	248	175	537	1205	102	35
BFPC0.1	100	0.1	0.5	248	175	537	1205	102	35
BFPC0.15	100	0.15	0.5	248	175	537	1205	102	35
BFPC0.2	100	0.2	0.5	248	175	537	1205	102	35

每组试验制作9块混凝土试块,6块 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的立方体试块用于抗压强度试验,3块长方体试块 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 用于抗折强度试验。试验过程先将玄武岩纤维与骨料充分混合后再与水搅拌。

3 试验结果

3.1 实验结果分析

试验表明,再生混凝土的粗骨料体积比是其流动性的主要影响因素。取每组试件强度值的平均值作为最后的压力值,试验结果见表5。

表5 抗压抗折试验结果

组号	再生粗骨料 替代率/%	纤维 掺量/%	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa
PC	0	0	25.66	4.05
BFPC0.1	0	0.1	27.43	4.27
BFPC0.15	0	0.15	28.18	4.37
BFPC0.2	0	0.2	26.77	4.31
BFPC0.1	50	0.1	26.58	4.12
BFPC0.15	50	0.15	27.64	4.29
BFPC0.2	50	0.2	26.47	4.21
BFPC0.1	100	0.1	23.74	4.08
BFPC0.15	100	0.15	24.91	4.15
BFPC0.2	100	0.2	23.79	4.11

3.2 抗压强度试验

由表5分析可知,当再生粗骨料的替代率由0增大到100%时,相比于PC,BFPC轴心抗压强度值逐渐在减小,玄武岩纤维掺量为0.1%、0.15%、0.2%时,替代率在50%的混凝土轴心抗压强度值平均下降了2.05%;再生粗骨料替代率在100%时,玄武岩纤维掺量为0.1%、0.15%、0.2%时轴心抗压强度值平均下降了12.06%。试验表明,当再生粗骨料替代率在50%时,抗压强度较好,均高于PC值。

3.3 抗折强度试验

由表5分析可知,当再生粗骨料的替代率由0增大到100%时,相比于PC,BFPC轴心抗压强度值逐渐在减小,其中当再生粗骨料替代率在50%时,玄武岩纤维掺量为0.1%、0.15%、0.2%时抗折强度值平均下降了7.7%;再生粗骨料替代率在100%时,玄武岩纤维掺量为0.1%、0.15%、0.2%时抗折强度值平均下降了14.1%。试验表明,当再生粗骨料替代率在50%时,抗折强度较好,均高于PC值。

3.4 玄武岩纤维试验

由表5分析可知,玄武岩纤维掺量为0.1%、0.15%、0.2%时,BFPC的强度先增大后减小。当再生混凝土替代率为50%时,玄武岩纤维掺量为0.15%时抗压强度和抗折强度最大,分别为27.64MPa和4.29MPa;当再生混凝土替

代率为100%时,玄武岩纤维掺量为0.15%时抗压强度和抗折强度最大,分别为24.91MPa和4.15MPa。实验表明,当再生粗骨料替代率在50%时,玄武岩纤维掺量为0.15%时,混凝土抗压抗折强度较好,均高于PC值。

4 机理分析

再生混凝土表面有很多旧水泥,当其与新水泥结合时,新老混凝土表面结合黏结力较弱,再生混凝土体积占比越多越显著。且再生混凝土在机械破碎过程中会产生裂缝,试件在液压式万能试验机的压力下会产生一定的扩展并贯通。玄武岩纤维能在裂缝处起到很好的拉结作用,起到一定的补强效果。当提高玄武岩纤维掺拌量时,其吸水能力变强,产生一定的空隙,在有一定程度上影响了混凝土的强度。

5 结语

本文分析研究了不同玄武岩纤维掺拌量下的不同替代率再生混凝土性能损失和强度的变化规律,实验结果表明:

当控制玄武岩纤维含量不变时,替代率50%、100%的再生混凝土均会使其新拌合的混凝土强度降低,但替代率50%的再生混凝土抗压强度仅下降了2.05%,可以起到节约原材料的效果。

如控制再生粗骨料替代率不变时,玄武岩纤维掺量为0.1%、0.15%、0.2%时,BFPC的强度先变大随后变小,当掺拌量在0.15%时效果较为明显。

当再生混凝土替代率为50%,玄武岩纤维掺量在0.15%的时候,混凝土的力学性能改善比较显著。

参考文献

- [1] 高银,宗翔.玄武岩纤维对再生混凝土基本力学性能的影响[J].长江大学学报(自然科学版),2018,15(21):6-10,4.
- [2] 李家齐,李诗娴,胡皓,等.FRP约束玄武岩纤维再生混凝土圆柱力学性能试验研究[J].混凝土,2018(12):57-61.
- [3] 全晓旖,刘康宁,王社良,等.玄武岩纤维再生混凝土基本力学性能试验研究[J].混凝土,2019(6):47-50.
- [4] 李坤.纤维增强再生骨料混凝土基本力学性能试验与分析[J].混凝土与水泥制品,2019(2):60-62.
- [5] 田凯.玄武岩纤维对再生混凝土力学性能的影响研究[J].新型建筑材料,2019,46(6):22-24,103.
- [6] 董腾,廖文激,刘佳婕,等.玄武岩纤维对再生骨料混凝土力学性能的影响与数值模拟研究[J].混凝土,2022(1):92-96.
- [7] Gogoi, Ripunjoy; Dutta, Bhupali; Mahakavi, P.; Chithra, R.; Surya, S. An Experimental Investigation on the Impact of Basalt Fibres on Recycled Aggregate Concrete[J]. International Journal of Pavement Research and Technology. Volume 16 ,Issue 1.2022.PP1-19.

Discussion on Safety Management Measures for Construction of Super High-Rise Buildings^c

Qiufang Pan

China Communications Construction Ocean Investment Holdings Co., Ltd., Sanya, Hainan, 572000, China

Abstract

Safety management is the foundation for ensuring the smooth implementation of super high-rise building projects. Super high-rise buildings have characteristics such as complex construction environments, frequent high-altitude operations, and numerous safety hazards, resulting in a significantly higher probability of safety accidents compared to ordinary buildings. Based on years of practical experience, this paper systematically analyzes the characteristics, safety risks, and influencing factors of super high-rise building construction, and proposes a series of scientific and reasonable safety control measures. The aim is to improve engineering quality and safety levels from the source, thereby providing for the smooth progress of the project.

Keywords

Super high-rise buildings; Steel structure; Construction safety; Risk management; Control measures

超高层建筑施工安全管理措施的探讨

潘秋芳

中交海洋投资控股有限公司，中国·海南三亚 572000

摘要

安全管理工作是保障超高层建筑项目顺利实施的基础。超高层建筑具有施工环境复杂、高空作业频繁、安全隐患多等特点，安全事故发生概率显著高于普通建筑。本文基于多年实践经验，系统分析超高层建筑施工的特点、安全风险及其影响因素，提出一系列科学、合理的安全管控措施，旨在从源头上提升工程质量与安全水平，为项目顺利推进提供保障。

关键词

超高层建筑；钢结构；施工安全；风险管理；管控措施

1 超高层建筑施工特点

超高层建筑施工具有技术复杂、风险高、管理难度大等特点。施工过程涵盖基坑开挖、钢结构安装、二次结构及幕墙施工等多个环节，大型机械设备（如塔吊、施工电梯、吊篮）使用频繁，安装与拆卸风险突出。同时设备使用率高，磨损率大，维修保养不到位容易引发设备故障，导致安全事故的发生。且超高层建筑施工一般位于城市中心区域，施工场地狭小，材料堆场、加工厂及生活临建布置困难，大型机械设备作业面也较为集中，加之市中心超高层项目基本属于省市重点项目，政府以及媒体关注度高，整体安全文明施工要求高。此外，超高层建筑多采用钢结构框架体系，高空作业与上下立体交叉作业频繁，施工人员素质参差不齐，易发生高处坠落、物体打击等突发事件，因此，超高层建筑施工必须强化安全管理，制定科学合理的施工计划，以确保工程

安全、顺利地推进。

2 超高层建筑施工安全风险识别

2.1 高空及立体上下交叉作业风险

在超高层建筑工程建设中，高空作业及立体上下交叉作业具有显著的风险特征，主要风险因素包括：高空坠落风险：由于下层结构板未及时安装，作业面防护不完善，导致坠落风险显著增加；坠物风险：施工材料、工具等高空坠落可能造成下方人员伤害；防护设施风险：梯笼、操作平台、安全带悬挂点等安全防护设施的可靠性直接影响作业安全；“四口、五临边”防护风险：防护设施的防碰撞系数不足或安装不规范可能引发安全事故。

2.2 大型机械设备安拆及作业风险

在超高层建筑施工中，大型机械设备的安拆与作业是关键且高风险的环节。塔式起重机安拆风险：塔式起重机在安拆及顶升过程中易发生设备倾覆、地基失稳及附壁失效等事故；施工升降机风险：立柱轨道故障、安全装置失效、超载运行等可能导致严重事故；吊篮作业风险：受大风天气、

【作者简介】潘秋芳（1988—），女，中国海南海口人，本科，从事安全工程研究。

超载及安全防护缺失等因素影响，存在倾覆风险。因此，加强对大型机械设备的安全管理，确保其稳定运行，是超高层建筑施工中不可或缺的一环。

2.3 钢结构安装风险

钢结构安装是超高层施工中风险最高的工艺环节，其风险贯穿于运输卸车、构件堆放、吊装及安装固定全过程。卸车风险：若构件捆绑不牢、指挥人员缺失或随车吊具损坏，极易导致构件坠落。堆放风险：若不同类型、尺寸的构件混乱叠放或超高摆放，易引发构件倒塌伤人事故。吊装风险：若未使用卸扣而将钢丝绳直接穿过吊耳，会因过度磨损导致断裂；指挥人员缺失或违反“十不吊”原则，均可能引发坠落事故。安装固定风险：钢结构材料若未及时固定或焊接不牢，将面临倾倒风险。因此在超高层建筑施工时，加强钢结构安装全过程检查，确保钢结构安装安全，极为重要。

2.4 消防安全风险

在超高层建筑工程建设中，消防安全是一个不容忽视的问题，^[2] 其风险主要集中在动火作业与临时用电并存、以及可燃物管理不善等方面。精装修阶段尤为突出，复杂的临电线路与频繁的动火作业极大增加了火灾隐患。施工现场若随意堆放保温及装饰等可燃材料，将加速火势蔓延。此外，超高层建筑特有的“烟囱效应”会通过未密闭的管井迅速扩大火情，并伴随大量有毒烟雾，后果极为严重。同时，临时用电线路长期高负荷运行及老化问题也是潜在诱因。因此，必须从源头管控，严格执行动火审批、清理作业环境、规范用电管理，并配足消防设施，以彻底消除火灾隐患。

3 超高层建筑施工安全的影响因素

3.1 施工人员综合素质

随着我国经济社会发展水平的不断提高，我国建筑业的发展水平也在不断提高，施工人员的综合素质是影响超高层建筑施工安全的关键因素。调研显示，建筑工人队伍呈现老龄化、流动性大、整体素质偏弱的特点，给安全管理带来严峻挑战。具体问题突出表现为：安全培训效果不佳：部分人员在接受教育后仍出现违规操作；风险识别能力不足：对现场安全隐患的识别和报告意识不足；个人防护意识薄弱：安全带、安全帽等个人防护用品使用不规范。这些问题相互叠加，极大增加了安全管理难度，成为亟待解决的重要任务。

3.2 不利环境因素

在超高层建筑工程中，不利的施工环境对安全管理构成巨大挑战。以海南地区为例，其自然环境复杂多变，主要风险包括：高温环境：夏季持续高温易导致作业人员中暑，体力下降进而增加高空作业风险；雨季和台风：强降雨和强风天气，可能引发大型设备倾覆、临时结构失稳，同时因工期延误带来的赶工压力也进一步放大了安全风险。面对这些不利条件，必须科学制定施工组织设计，提前研判气象变化，并采取针对性的防范与调度措施，才能确保施工安全受控。

3.3 施工机械设备因素

超高层建筑施工中，大型机械设备使用频繁、连续作业时间长，易因疲劳磨损引发设备故障。同时，塔吊、施工电梯等设备若出现无证操作、指挥失当或吊索吊具磨损未及时更换等现象，极易导致安全事故。这些问题多源于设备维保不到位导致的零件老化、性能下降，以及从业人员安全意识薄弱、心存侥幸违规作业。因此，必须全面强化机械设备的安全管理，严格持证上岗，落实定期检查与维护保养制度，以有效防范设备相关事故的发生。

3.4 施工组织不合理

在超高层建筑施工中，不合理的施工组织是引发安全事故的重要因素。具体表现为：场地平面布置混乱：材料无序堆放不仅影响施工流程，更直接导致作业交叉混乱和安全隐患。工序衔接不科学：在转换阶段易出现安全管理漏洞。支撑体系验收不严格：若未达到稳固要求即进入后续施工，将给整体结构安全带来严重威胁。因此，必须高度重视施工组织设计的科学性与合理性，严格审核并持续优化施工方案，确保每个施工环节符合安全规范，从而系统提升施工现场的安全管理水平。

4 超高层建筑施工安全的管控措施

4.1 高空作业安全管控：细致防护，规范操作

为确保高空作业安全，必须落实细致的防护措施并规范操作流程。

首先，应合理协调立体交叉施工，在上方作业区域下方设置安全网与警戒线，防止人员或物体坠落。针对钢结构安装等凌空作业，须安装牢固的梯笼、防坠器及专用操作平台，设置可靠的生命绳用于安全带悬挂。

其次，作业人员必须正确佩戴符合国家标准的五点式安全带，并确保挂钩固定在可靠支点上。

再者，必须强化“四口五临边”的硬质防护，其材料规格、搭设高度、结构强度和连接方式均需符合安全标准，在建设施工中可参照厦门市住房和建设局组织编写的《建设工程临边洞口安全防护手册（2024）版》等相关规范执行。

4.2 大型机械设备安全管控：严格验收，强化维保

大型机械设备是超高层建筑施工的关键，须实施全生命周期一体化管理。应建立“一机一档”安全技术档案，完成从合同签订、方案编制、设备进场、安装、验收、使用、维保、拆除等一体化管理。

首先，编制专项施工方案，其中塔吊专项施工方案应经专家论证；其次，严格设备进场验收，进场的设备外观、性能、安全装置等方面应符合相关法律法规标准；再次，强化安拆及顶升加节过程监督，作业前必须进行安全交底、核查人员证件、设置警戒区并实施旁站监督，确保各项措施落实到位方可作业；此外，强化过程监督保养，要定期对塔吊、施工电梯、吊篮等进行维修保养，填写维修保养记录，确保

设备安全运行；最后，强化过程巡查，要加强对“十不吊”、吊篮作业个人防护、施工电梯运行的巡查，杜绝违章作业。

4.3 强化钢结构安装过程管控：严控流程，确保可靠

在超高层建筑施工中，钢结构工程是危险性较大、风险较高的一项工作，做好钢结构过程安装的安全管控至关重要^[3]。

首先应编制专项安全施工方案，明确从构件进场、堆放至安装全流程的安全质量措施，并对施工人员进行详细的安全技术交底。其次，必须严格检查吊装索具，严禁使用不合格器材，吊装作业须严格执行“十不吊”规定，并通过加强巡查杜绝违章行为。最后，安装过程中应确保钢柱精准对接并牢固焊接，保证当日吊装的钢柱及时形成稳定的结构单元，从根本上保障施工安全与结构稳定。

4.4 加强安全教育：提升意识，普及知识

安全教育是预防和控制安全事故的一项重要预防措施^[5]。为将被动安全转化为主动安全，必须系统性地提升全员安全意识。

首先，严格执行工人进场三级安全教育，确保全覆盖，使员工掌握基本安全知识与技能。其次，开展岗位安全操作专项培训，确保各工种人员熟练掌握本岗位的安全规程、作业流程及防护要求。最后，组织全体人员参与应急救援培训，普及应急知识，提升现场人员在突发事件中的初期响应与自救互救能力，有效控制事态发展。

4.5 极端天气施工应对：预警机制，灵活调整

超高层建筑施工极易受极端天气影响，必须建立完善的预警与响应机制。

首先，应与属地气象部门保持密切沟通，及时获取预警信息，并据此提前调整施工安排。例如，在大风、暴雨等恶劣天气来临前，须对脚手架、起重机械及临时设施等进行加固，必要时将人员撤离至安全区域；其次，应制定并完善应急预案，确保在极端天气发生时能迅速启动，有效组织抢险救援，并加强对现场的监控与管理，保障人员及时疏散与财产安全。

4.6 强化消防安全管理：预防为主，综合施策

消防安全管理是超高层建筑施工安全的重要组成部分，尤其是钢结构建筑，电焊作业属于高空作业，除了做好高空作业防护，更要做好高空动火作业的防护^[4]。

首先，建立完善的动火管理制度，严格执行动火审批程序，明确监督责任人，彻底清除作业面及下方易燃物，高

空动火须悬挂接火斗，设置警戒区并配备足量灭火器材；其次应加强临时用电巡查，及时更换老化线路和损坏元件，合理分配负荷防止过载。此外，须制定详细的火灾应急预案，建立快速响应机制，确保一旦发生火情能够立即启动救援程序，有效组织抢险工作，形成全过程防火管控体系。

4.7 合理组织施工措施：科学规划，精细管理

在超高层建筑施工安全管控中，科学合理的施工组织是确保工程顺利推进的核心。必须从项目全局出发，系统规划各阶段目标与工序衔接，实现有序高效推进。实施精细化管理，严格把控场地布置、材料堆放、人员设备调度等各个环节。规划阶段需综合评估环境风险，制定专项应对预案。通过优化施工组织设计，合理配置资源，动态监控进度，有效减少安全隐患。同时应建立完善的安全责任体系，强化人员培训，全面提升安全意识与应急能力，为工程建设提供全方位保障。

5 结语

超高层建筑是现代城市发展的重要标志，其施工安全管理直接关系到工程质量与人员生命安全。本文系统分析了超高层建筑的施工特点与管理现状，深入探讨了面临的施工工艺复杂、作业环境多变及人员素质不均等主要挑战。基于多年工程实践，提出了优化施工组织设计、加强风险识别与控制、提升人员安全素质等切实可行的管理措施。通过这些系统性方法，能够有效适应复杂多变的施工环境，保障项目顺利实施，并显著提升工程的社会与经济效益。超高层建筑施工安全管理是一项需要各方协同、持续完善的长期工作，应不断优化管理机制，为城市建设可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 赵世宝.高层建筑施工安全管控要点及措施[J].建材发展导向,2024,22(3): 166-169.
- [2] 张田金,廉波,李建锋.实例分析高层建筑施工安全的控制措施[J].工程建设与设计,2022(19): 192-194.
- [3] 施丹美.高层建筑施工质量管理措施的探讨[J].建筑·建材·装饰,2021(23): 34-36.
- [4] 王丹.超高层建筑安全风险管理要点研究[C]//2024人工智能与工程管理学术交流会论文集.2024: 1-3.
- [5] 邢龙龙.高层建筑施工安全风险评估与防控策略研究[J].中华建设,2024,(08):43-44.