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

NASS
NAN YANG ACADEMY OF SCIENCES

工程研究前沿 Frontiers of Engineering Research
Volume 2 · Issue 3 · March 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(online)

NASS
NAN YANG ACADEMY OF SCIENCES

工程研究前沿
Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 3 · March 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(online)

Google Scholar
Crossref
CNKI 中国知网 www.cnki.net

ISSN 3060-9054
03
9 773060 905257

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.

Database Inclusion

Google Scholar

Crossref

China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

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

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

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
Email: info@nassg.org
Tel: +65-65881289
Website: http://www.nassg.org

《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

出版格式要求：

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

出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 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 3 March 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 二氧化钛在湿部脱水过程增加保留的应用探索
/ 徐匡荣
4 黄白茨煤矿沿空留巷水力压裂技术应用模拟研究
/ 王建刚 王滨 张富强 郭龙 刘永强 李明轩
7 高层住宅建筑深基坑监测技术研究
/ 尹思琦
10 机械制造企业安全生产中常见的安全隐患与应对建议
/ 刘雪松 李雨心 贾小恒
13 高压电气设备过热故障的分析与解决方案
/ 刘旭强
16 新时期公路工程中沥青路基路面平整度控制研究
/ 梁斌
19 建筑结构检测鉴定加固若干问题的综合分析
/ 吴志球 缪赟 丁雪
22 深部资源勘探中钻探工艺优化策略
/ 周宣扬
25 公路路基路面弯沉试验检测技术应用分析
/ 李明阳

1 Application exploration of titanium dioxide in wet dehydration process to increase retention
/ Kuangrong Xu
4 Simulation study on the application of hydraulic fracturing technology along the goaf
/ Jiangang Wang Bin Wang Fuqiang Zhang Long Guo Yongqiang Liu Mingxuan Li
7 Study on deep foundation pit monitoring technology for high-rise residential buildings
/ Siqi Yin
10 Common safety hazards in the production of mechanical manufacturing enterprises and corresponding suggestions for prevention
/ Xuesong Liu Yuxin Li Xiaoheng Jia
13 Analysis and solution of high voltage electrical equipment
/ Xuqiang Liu
16 Research on the Control of Asphalt Roadbed and Pavement Flatness in Highway Engineering in the New Era
/ Bin Liang
19 Comprehensive Analysis of Several Issues Concerning the Inspection, Appraisal, and Reinforcement of Building Structures
/ Zhiqiu Wu Yun Miao Xue Ding
22 Optimization strategy of drilling technology in deep resource exploration
/ Xuanxuan Zhou
25 Analysis of the Application of Bending and Settling Test Detection Technology for Highway Subgrade and Pavement
/ Mingyang Li

Application exploration of titanium dioxide in wet dehydration process to increase retention

Kuangrong Xu

Kingdecor (Zhejiang) C., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324022, China

Abstract

To explore the application potential of titanium dioxide in papermaking wet-end dewatering processes, this study systematically investigated its physicochemical properties and functional behaviors. By analyzing the dispersion characteristics of titanium dioxide in pulp systems and evaluating its theoretical suitability as a wet-end additive, we investigated its feasibility for wet-end processes. Through evaluating its regulatory effects on dewatering rates via different addition methods, we further explored its synergistic and substitution potential with traditional additives. The research demonstrates that titanium dioxide can effectively enhance dewatering efficiency while improving paper optical properties and physical strength. Its functional performance is significantly influenced by pulp type, addition concentration, and the wet-end chemical environment.

Keywords

titanium dioxide; wet section dehydration; paper performance

二氧化钛在湿部脱水过程增加保留的应用探索

徐匡荣

浙江夏王纸业有限公司，中国 · 浙江 衢州 324022

摘　要

针对二氧化钛在造纸湿部脱水过程中的应用潜力，本文系统研究了其物化特性与功能行为。通过分析二氧化钛在纸浆体系中的分散性及作为湿部添加剂的理论适配性，探讨其应用于湿部工艺的可行性。通过不同添加方式评估其对脱水速率的调控作用，并探究其与传统助剂的协同与替代潜力。研究表明，二氧化钛可有效提升脱水效率并改善纸张光学性能与物理强度，同时其功能表现受浆料种类、添加浓度及湿部化学品环境显著影响。

关键词

二氧化钛；湿部脱水；纸张性能

1 引言

在造纸过程中，湿部脱水阶段直接影响纸张质量、生产效率及资源利用效率。提高湿部保留率是提升脱水效率和纸张性能的重要途径。近年来，二氧化钛因其良好的物理化学稳定性、表面活性和功能多样性，被广泛应用于多个工业领域。

2 二氧化钛的物化特性与湿部应用可行性分析

2.1 二氧化钛在纸浆体系中的分散行为研究

二氧化钛（TiO_2）是一种广泛应用于多个工业领域的无机材料，其在纸浆体系中的分散行为直接影响其在湿部过程中的功能发挥。由于纸浆悬浮液体系复杂，其中包含纤维、填料、溶解物质及多种添加剂，二氧化钛的分散性受到多种因素的调控，其中 pH 值、离子强度及搅拌方式是关键影响参数 [1]。在不同 pH 条件下，二氧化钛表面的电荷状态发生变化，进而影响其与周围组分的相互作用。通常在中性至弱酸性环境中，其表面正电性较强，有利于与带负电的纤维或填料形成静电吸附，提升分散稳定性。离子强度的增加会压缩双电层，降低颗粒间的排斥作用，易导致团聚现象，尤其在高电解质浓度下，二氧化钛的分散性显著下降。搅拌方式则通过影响剪切力和混合均匀度，对二氧化钛的初始分散效果起重要作用。高速剪切搅拌有助于打破颗粒聚集，提高其在悬浮液中的分布均匀性，而普通机械搅拌在分散效率上相对有限。此外，纸浆中木质素、半纤维素等组分的存在也可能影响二氧化钛的界面行为，需结合实际体系进行评估。

2.2 二氧化钛作为湿部添加剂的理论适配性评估

从湿部化学原理出发，二氧化钛的物化特性决定了其在纸浆体系中具备一定的功能适配性。湿部过程涉及纤维、填料、细小纤维组分（fines）及助剂之间的复杂相互作用，核心目标在于提高保留率、加快脱水速率并优化纸页成型质

【作者简介】徐匡荣（1985–），男，中国江西上饶人，本科，助理工程师，从事特种纸的研发和生产研究。

量。二氧化钛在中性至弱酸性条件下表面呈正电性，可与带负电的纤维和填料发生静电吸引，有助于增强组分间的结合强度，提升保留效率。其纳米至亚微米级粒径使其能够填充于纤维间隙，在一定程度上改善滤水通道的结构，可能对脱水速率产生积极影响 [2]。比表面积较高意味着其具备一定的吸附能力，有助于捕捉细小组分，减少流失。

在纸页结构方面，二氧化钛的加入可能通过调控纤维间结合力和填料分布均匀性，影响纸张的孔隙率与紧度，从而对物理性能产生间接作用。然而，其本身不具备传统助剂如阳离子聚合物的桥联或絮凝功能，单独使用难以实现高效保留，更可能作为辅助性功能材料参与湿部反应。因此，从湿部化学机制来看，二氧化钛虽不具备主导湿部功能的能力，但在特定条件下可作为功能性添加剂，参与保留、脱水及结构优化过程。

3 二氧化钛对湿部脱水过程的调控作用

3.1 不同添加方式对脱水速率的影响

在湿部脱水过程中，二氧化钛的添加方式对其作用效果具有显著影响。常见的添加方式主要包括预混添加和分段添加，二者在作用时机、空间分布特性以及与体系中其他组分的相互作用机制上存在差异，从而对脱水速率和滤水性能产生不同程度的影响。预混添加是指在纸浆制备初期即将二氧化钛均匀地混入浆料体系中。该方式有助于颗粒在整个浆料系统中实现更充分的分散，并提前参与纤维与填料之间的界面相互作用，促进形成较为均匀的初始网络结构，有利于提高整体的结构稳定性和初步脱水效率。

相比之下，分段添加则是在浆料进入成型部前或成型过程中分批次引入二氧化钛。这种添加方式能够使其更集中地作用于脱水过程的关键阶段，增强细小组分的局部聚集与保留性能，从而显著改善滤水曲线中后段的脱水速率表现。此外，分段添加更有利于与湿部其他功能性化学品协同作用，提升整体湿部化学体系的协同效应和脱水效率。在实际生产中，应根据纸品类型、浆料组成、设备条件及工艺参数等因素综合考量，选择最适宜的二氧化钛添加策略，以实现对脱水性能的优化调控与最大化提升。

3.2 与传统助剂的协同与替代潜力分析

二氧化钛在湿部体系中的作用机制以物理吸附和界面调控为主，虽不具备传统助剂如阳离子聚合物的强絮凝或桥联能力，但在特定条件下可与其形成协同效应，提升整体湿部性能。阳离子聚合物（如聚乙烯胺、阳离子淀粉等）主要通过电荷中和与桥联作用增强纤维与填料间的结合，提高保留率和脱水效率。在阳离子助剂存在的情况下，二氧化钛可进一步吸附于纤维表面或填料颗粒之间，增强局部结合强度，减少细小组分流失，从而在不显著增加化学品用量的前提下优化保留效果。此外，其正电性特征使其能够部分替代低分子量阳离子助剂，在某些低强度需求的纸种中实现减量使用甚至局部替代，降低化学品成本及残留风险。

4 二氧化钛对纸张成型与物理性能的影响

4.1 对纸张光学性能的影响

二氧化钛因其高折射率和优异的光散射能力，被广泛用于提升纸张的光学性能。在湿部添加过程中，二氧化钛颗粒可随浆料均匀分布在纤维网络中，形成更为致密且散射能力更强的纸页结构，从而在不依赖额外涂布的前提下改善纸张的白度、光泽度和不透明度。在常规加填量范围内（通常为纸张干重的 1%~3%），二氧化钛的引入可使白度提升 1~3 个 ISO 单位，不透明度提高 2%~5%，其效果优于常规填料如高岭土或碳酸钙。光泽度的改善则主要体现在纸张表面平滑度的优化，二氧化钛颗粒在纤维间隙中的填充作用有助于减少表面粗糙度，提升光的规则反射能力。值得注意的是，光学性能的提升程度与二氧化钛的粒径、晶型及分散状态密切相关，粒径过大会导致分布不均甚至降低滤水性能，粒径过小则可能因团聚而削弱光散射效率。在实际生产中还需平衡其对脱水和保留性能的影响，避免因光学性能优化而牺牲湿部效率。其在湿部的合理应用，为简化工艺流程、减少涂布工序提供了可行路径。

4.2 对纸张物理强度性能的作用分析

二氧化钛的加入对纸张物理强度性能的影响与其在纤维网络中的分布状态及作用机制密切相关。抗张强度和耐破度作为衡量纸张承载能力的重要指标，主要受纤维间结合强度及纸页整体结构的影响。在适量添加范围内（一般为纸张干重的 1%~2.5%），二氧化钛可通过填充纤维间隙、改善纸页均匀性，对紧度产生适度提升，从而增强纤维间的接触与结合，使抗张强度和耐破度略有提高，提升幅度通常在 5% 以内。然而，当添加量超过临界值或分散不均时，二氧化钛颗粒可能在局部形成应力集中点，反而削弱纤维结合，导致强度下降。此外，其对纸张紧度的提升作用在一定程度上也影响了透气性和柔软性，需根据纸种用途进行调控。值得注意的是，二氧化钛本身不具备增强纤维结合的化学活性，其对物理强度的改善主要依赖于结构优化而非化学键合，因此在高强度要求的纸种中难以替代专用增强剂。

4.3 对纸张均匀性与结构稳定性的影响

二氧化钛的纳米至亚微米级粒径使其能够在纤维交织过程中填充局部空隙，调节纤维间的分布密度，减少因填料或细小组分流失造成的局部疏松或结构不均现象。在适度添加条件下，二氧化钛有助于提升纸页的成形均匀度，降低两面差和局部克重波动，尤其在高填料体系中表现更为明显。其正电性特征还可促进细小组分在脱水过程中的定向聚集，增强纤维与填料之间的结合稳定性，减少因流失或迁移造成的结构扰动。此外，在纸页干燥过程中，二氧化钛颗粒可作为热传导介质，使水分蒸发更趋均匀，进一步降低纸页内部应力分布的不均衡，提升结构稳定性。然而，过量添加或分

散不良时，二氧化钛可能形成局部团聚，反而破坏纤维网络的连续性，导致纸页强度下降或表面缺陷增加。

5 二氧化钛在湿部体系中的工艺适配性

5.1 浆料种类对二氧化钛功能表现的影响

二氧化钛在不同浆料体系中的功能表现存在明显差异，主要体现在其分散性、保留率及对湿部性能的调控作用上。在阔叶木浆体系中，由于纤维较短、比表面积较大，二氧化钛颗粒更易均匀分布并与细小组分结合，表现出较好的保留效果，对填料滞留率的提升作用相对显著。针叶木浆纤维较长、结构较疏松，滤水性能本身较强，二氧化钛的加入对脱水速率影响较小，但可通过改善纤维间结合状态提升纸页结构的均匀性。而在废纸浆体系中，情况更为复杂，由于废纸浆中残留的油墨粒子、胶黏物及较高电解质含量，容易造成二氧化钛颗粒的团聚，降低其分散稳定性，从而削弱其在湿部的功能表现。实验数据显示，在相同添加量下，废纸浆中二氧化钛的保留率普遍低于原生浆体系，需通过调节 pH 值或引入分散剂以改善其分散状态。废纸浆较高的阴离子垃圾含量也可能影响二氧化钛与纤维之间的静电作用，限制其功能发挥。因此，在实际应用中，应根据浆料种类差异调整二氧化钛的添加策略，以确保其在不同原料体系中实现稳定的功能输出。

5.2 添加浓度与作用效果的非线性关系

二氧化钛的添加浓度与其在湿部体系中的作用效果并非线性关系，而是呈现出明显的阈值效应和饱和趋势。相关实验显示，在低添加量（纸张干重的 0.5%~1.5%）范围内，二氧化钛对脱水速率和保留率的提升作用较为明显，表现为滤水阻力适度降低、填料和细小组分流失减少。这一区间内，其正电性与分散性优势得以充分发挥，能够有效增强纤维与填料间的结合，提升湿部保留效率。随着添加量进一步增加至 2.5% 以上，脱水速率提升趋于平缓，保留率的改善幅度减小，部分指标甚至出现下降趋势。这主要是由于过量的二氧化钛颗粒在浆料中易发生局部聚集，堵塞纤维间隙，反而增加滤水阻力，并影响纸页结构的均匀性。

在纸张性能方面，适量添加可改善白度和不透明度，但超过 2.5% 后，因颗粒分布不均导致纸面粗糙度上升，光泽度下降，紧度增加的同时抗张强度反而减弱。此外，高浓度添加还可能干扰其他湿部助剂的作用机制，削弱整体化学品协同效应。因此，二氧化钛的使用存在一个功能最优区间，通常在 1%~2% 之间，超出该范围不仅难以获得额外性能提升，还可能带来负面效应。实际应用中应结合浆料类型、助剂体系和产品要求，精准控制添加浓度，以实现性能与成本的最佳平衡。

5.3 湿部化学品环境对其行为的调控作用

湿部体系中通常包含多种功能性化学品，如助留剂、施胶剂和 pH 调节剂，这些成分对二氧化钛的分散状态及其功能发挥具有显著影响。助留剂（如阳离子聚丙烯酰胺）通过电荷中和与桥联作用提升填料和细小组分的保留效率，二氧化钛在该体系中可作为辅助颗粒参与形成更致密的絮聚结构，增强整体保留效果 [3]。但在高助留剂浓度下，浆料体系的絮聚强度增加，可能限制二氧化钛的局部迁移与均匀分布，影响其界面调控能力。施胶剂（如烷基烯酮二聚体 AKD）通常以乳液形式加入，其表面活性成分可能与二氧化钛颗粒发生吸附作用，改变其表面性质，进而影响其在纤维网络中的定位与功能表现。在施胶体系中，二氧化钛的加入可能略微延缓施胶剂的固着过程，需适当调整添加顺序或分散条件以维持施胶效率。pH 调节剂对二氧化钛行为的影响主要体现在其表面电荷状态的变化上，在碱性条件下，其表面正电性减弱，与纤维和填料的静电作用力下降，导致保留率降低，需配合使用电荷调节剂以维持功能稳定性。

6 结语

二氧化钛的功能表现受添加浓度、浆料类型及化学品环境等多因素影响，需在实际应用中合理控制添加方式与用量，避免因分散不良或过量使用带来的负面影响。总体来看，二氧化钛在湿部过程中可作为功能性辅助材料，与现有化学品体系协同使用，提升湿部整体运行效率。进一步探索其在不同纸种和生产条件下的适用性，为其在造纸工业中的推广和应用提供更明确的技术支持。

参考文献

[1] 肖凡月,王金霞,陈晓燕,等.造纸体系中水质差异对二氧化钛分散性的影响[J].中华纸业,2023,44(04):34-37.

[2] 王超.分散剂对纳米二氧化钛分散稳定性的影响[J].化工设计通讯,2021,47(04):126-127.

[3] 张海宁,张志东,任政,等.印刷装饰原纸针眼纸病的形成原因与调控方法[J].中国造纸,2023,42(12):169-172+179.

Simulation study on the application of hydraulic fracturing technology along the goaf

Jiangang Wang[1,2] Bin Wang[3,4,5] Fuqiang Zhang[1,2] Long Guo[5] Yongqiang Liu[3,4,5] Mingxuan Li[3,4,5]

1. National Energy Group Wuhai Energy Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia, 016000, China
2. Guoneng Wuhai Energy Huangbaizi Mining Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia, 016000, China
3. Tiandi Technology Co., Ltd., Beijing, 100013, China
4. China Coal Mining Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100013, China
5. China Coal Technology (Xi'an) Mining Engineering Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

The 0213 $^{upper\ 2}$02 fully mechanized mining face of Huangbaici Coal Mine adopts the technique of leaving roadway along the goaf for mining. In order to prevent the destructive effect of strong dynamic pressure on the roadway after mining, hydraulic fracturing technology is used to cut the overlying hard roof slab. To ensure the reliability of the hydraulic fracturing cutting technology developed, numerical simulation research was conducted. FLAC3D simulation results showed that the optimal cutting angle for the transportation trench cutting of the 0213 $^{upper\ 2}$02 working faces using the long borehole hydraulic fracturing cutting technology was 45 °. Hydraulic fracturing measures were developed, and four fracturing boreholes were designed with a fracturing layer at a depth of 10m from the coal seam roof. The research results and methods have certain guiding significance for the application of hydraulic roof cutting technology in other mines.

Keywords

leaving alleys along the air; Hydraulic fracturing; Numerical simulation; Top cutting angle; Fracturing measures

黄白茨煤矿沿空留巷水力压裂技术应用模拟研究

王建刚[1,2] 王滨[3,4,5] 张富强[1,2] 郭龙[5] 刘永强[3,4,5] 李明轩[3,4,5]

1. 国家能源集团乌海能源有限责任公司，中国 · 内蒙古 乌海 016000
2. 国能乌海能源黄白茨矿业有限责任公司，中国 · 内蒙古 乌海 016000
3. 天地科技股份有限公司，中国 · 北京 100013
4. 中煤科工开采研究院有限公司，中国 · 北京 100013
5. 中煤科工（西安）开采工程技术有限公司，中国 · 陕西 西安 710000

摘　要

黄白茨煤矿0213^{上2}02综采工作面采用沿空留巷技术进行开采，为防止采面回采后强动压效应对留巷产生的破坏效应，采用水力压裂技术对上覆坚硬顶板进行切顶。为保证制定的水力压裂切顶技术可靠，进行数值模拟研究，FLAC^{3D}模拟结果表明：采用长钻孔水力压裂切顶技术对0213^{上2}02工作面运输顺槽切顶最佳切顶角为45°，制定水力压裂措施，设计压裂钻孔4个，压裂层位为煤层顶板10m位置。研究成果和研究方法对于其他矿井水力切顶技术应用具有一定指导意义。

关键词

沿空留巷；水力压裂；数值模拟；切顶角度；压裂措施

1 引言

近年来，随着工程技术不断发展，无煤柱沿空留巷开采技术逐步成熟。沿空留巷通过对上一采面运输顺槽进行维护，作为下一采面回风顺槽，开采面和备采面之间不留煤柱，大大提高煤炭资源开采率。开采区域顶板坚硬，采面上部采空区垮落会形成强矿压效应，导致留巷围岩失稳。顶板水力压裂技术以水为介质，高压水对坚硬顶板版进行切顶，可以有效控制矿压灾害。针对水力压裂切顶技术，我国专家学者进行了大量研究，王华针对干河煤矿工作面切顶技术展开研究，提出长钻孔水力压裂技术应用，取得良好效果；史刘飞采用短孔压裂技术对总采面上部坚硬顶板进行卸压，卸压效

【基金项目】国家能源集团乌海能源有限责任公司科技项目《近距离煤层群沿空留巷条件厚硬顶板多维卸压关键技术研究与应用》资助（项目编号：WHNY-KX-23-24）。

【作者简介】王建刚（1985-），男，蒙古族，中国内蒙古乌兰察布人，本科，助理工程师，从事采矿工程研究。

果良好。聂嘉汾，张海东针对不同切顶角度下围岩动力进行理论研究，确定最优切顶角度，为水力压裂技术工程应用具有一定理论意义。其他专家学者分别针对水力压裂切顶技术进行了深入研究，分别取得丰硕成果。黄白茨煤矿 0213^{上2}02 工作面运输顺槽作为留巷，顶板坚硬，为防治采面回采完毕后垮落强动压现象对破坏留巷，拟采用水力压裂技术进行顶板切顶，为确定切顶角度，采用软件 FLAC^{3D} 进行围岩稳定性模拟研究 [1]。

2 工程概况

0213^{上2}02 综采工作面距地表垂深约 170~185m；0213 上 202 综采工作面北为井田西北边界煤柱；东部为已经准备的 0213 上 206 综采工作面，南部为 1312 轨道上山、1311 皮带上山开拓巷道，西部为 F22 正断层及保护煤柱 [2]。

0213^{上2}02 综采工作面位于 13 上 2 煤层，与上部 12 煤层距离为 6.82~20.30m，平均距离为 14.38m。0213 上 202 综采工作面两巷编录厚度为 1.2-1.86m，大部分 1.40m，为中厚层煤，煤层较稳定。

煤层结构较简单，夹矸一般为 1 层或不夹矸，夹矸岩性多为炭质泥岩、粘土岩和泥岩。顶板岩性多为砂质泥岩及泥岩，少数钻孔可见粉砂岩和细砂岩，厚度为 0.4~9.3m。底板岩性以泥岩为主，有少量的炭质泥岩及粘土岩，厚度为 0.19~5.54m。

黄白茨煤矿 0213^{上2}02 综采工作面采用走向长壁、综合智能化、一次采全高、全部垮落采煤法，采用全部垮落法控制顶板，采空区顶板随支架前移自行垮落充填。生产过程中在工作面受临近采空区和上覆顶板坚硬岩层活动影响，形成强矿压，导致 0213^{上2}02 综采工作面回风巷和胶带巷超前应力集中、巷道变形较大，制约工作面安全生产，为有效保障工作面初采厚硬顶板分层有序及时垮落，消除工作面厚硬顶板大面积悬顶隐患，及大面积突发垮落引发的顶板灾害，有效控制厚硬顶板沿空留巷强烈动压导致的留巷变形破坏。

3 数值模拟研究

拟采用水力压裂技术对坚硬顶板进行切顶处理，为提高保证切顶措施有效性，采用数值模拟研究确定切顶角度。

3.1 力学模型

坚硬顶板视为两端固支 " 梁 " 结构，分析模型见图 2。顶板切顶弱化后，如图 3，可将其视为 " 楔形 " 岩层体，将“楔形”岩层体单独取出简化为物理模型。在弱化面位置岩体中以弱化面线为对角线取微元体，软弱面处微元体正应力 σ 和切应力 τ 为：

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_v) - \frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v)\cos 2\theta \\ \tau = -\frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v)\sin 2\theta \end{cases}$$

式中：σ_h—微元体受到的水平应力，m；σ_v—微元体受到的垂直应力，m；θ—软弱面倾角，(°)。

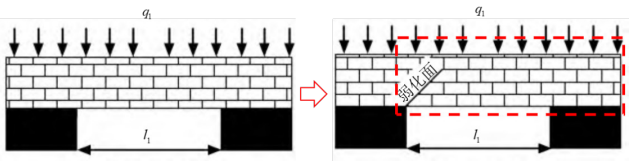

图 2 固支“梁”结构分析模型

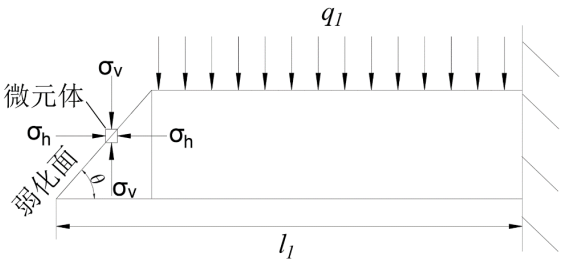

图 3 “楔形”岩层体物理模型

3.2 数值模拟

采用数值模拟方法进行研究确定 0213^{上2}02 工作面运输顺槽合理钻孔倾角，采用数值模拟方法进行研究。基于现场工程地质条件，采用 FLAC^{3D} 软件建立长 423m，宽 100m，高 100m 计算模型，本模型共计 321903 个实体单元，56820 个结构单元。同时标定水力压裂所产生的软弱面，对模型顶部施加原岩自重应力，底部进行全约束，其余四面只施加水平方向约束。各岩煤层采用摩尔库伦理论分析。对模型顶部施加 10MPa 的应力，模拟上覆岩层自重，通过改变不同钻孔倾角，弱化切顶区域，获得巷道与采空区所受的最大主应力与最大位移分布情况 [3]。

图 4 对比了在不同钻孔倾角下的工作面顶板及煤柱应力情况预计位移情况。可知，当钻孔倾角为 35° 时，巷道非工作帮应力集中明显，最高达 32~34MPa，大范围的应力集中使巷道非工作帮产生大变形，巷道位移量最高达 1200~1500mm。当钻孔倾角逐渐增大至 55° 时，该应力集中现象逐渐减弱至 10~12.5MPa，巷道最大位移量降低至 500~600mm，切顶效果较好。当钻孔倾角为 35° 时，上覆岩层中部优先接触底板，工作面两端仍存在空区，切顶效果较差。当钻孔倾角增大至 45° 时，上覆岩层位移量逐渐向巷道侧转移，且顶板与底板接触较好，未存在空区。直至倾角增加到 55° 后，巷道侧空区重新显现，这是由于弱面的存在，导致上覆岩层沿着弱面滑移 [4]。

综上所述。随着钻孔倾角的增大，巷道非工作帮应力集中显现情况逐渐减少。同时考虑工程施工难度及成本，最终确定 0213^{上2}02 运输顺槽水力分段压裂钻孔倾角 45°。

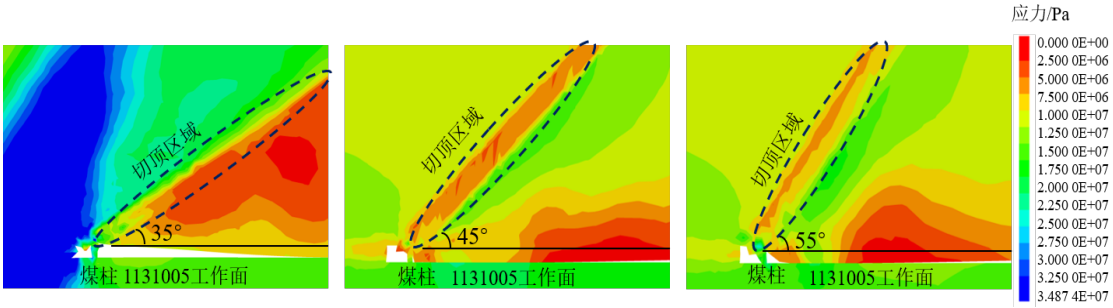

图 4 不同倾角压裂钻孔顶板应力

4 水力压裂技术措施

根据图 1 可知，煤层顶板上方 0~17m、8.98~14.02m、2.07~12.33 范围内较厚页岩顶板不易垮落。因此确定压裂层位 10m。同时根据长孔压裂裂缝扩展规律，压裂至 30min 时，水力裂缝扩展半径为 30m，为避免破坏运顺顶板，钻孔与顺槽水平距离为 30m。

根据数值模拟研究结果可知，0213^{上2}02 运输顺槽水力分段压裂钻孔倾角最优值为 45°。制定 0213^{上2}02 运输顺槽顶板水力压裂措施如图 5 所示。利用 0213^{上2}02 运巷内现有硐室，初步设置 1 个钻场，定向长钻孔 4 个，依次扰乱工作面来压步距进一步控制来压强度。运巷厚硬顶板切顶护巷钻孔布置如图 5 所示。其中，Z1、Z3 位于 02 工作面侧，与柔膜挡墙水平距离为 30m，垂高位于煤层顶板以上 10m。Z2、Z4 位于 Z1、Z3 钻孔内侧，与 02 运巷水平距离为 60m，垂高位于煤层顶板以上 10m。打钻时需要考虑实际揭露的顶煤厚度。采用水平后退式分段压裂方式，分段压裂距离 30m 左右，分段压裂时间不小于 30min。压裂泵施工排量 1.5m³/min。

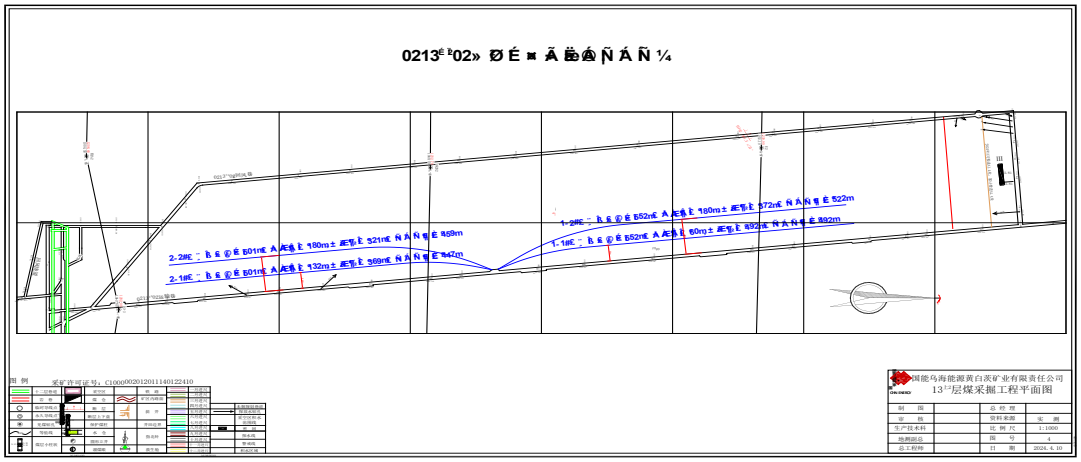

图 5 运巷厚硬顶板切顶护巷水力压裂示意图

5 结语

黄白茨煤矿 0213^{上2}02 运输顺槽顶板坚硬，存在采面回采后留巷围岩失稳危险。为保证 0213^{上2}02 工作面回采过程中留巷围岩稳定，采用水力压裂切顶技术进行顶板弱化，采用数值模拟确定水力压裂切顶切角，制定水力压裂措施，得到以下结论：①对 0213^{上2}02 工作面区域地质条件进行分析，确定坚硬顶板垮落产生强矿压，容易导致 0213^{上2}02 工作面巷道超前应力集中、巷道变形较大，制约工作面安全生产；②采用水力压裂措施对 0213^{上2}02 工作面顶板切顶切角进行数值模拟分析，确定最优切顶角度为 45°；③依据数值模拟成果制定 0213^{上2}02 运输顺槽水力分段压裂措施，施工钻孔 4 个，钻场位于 0213^{上2}02 运巷现有中部硐室。

参考文献

[1] 王华.干河煤矿D工作面水力压裂切顶技术应用[J].江西煤炭科技,2025,(01):82-85.

[2] 史刘飞.综采工作面水力压裂切顶卸压技术的应用研究[J].石化技术,2024,31(12):300-301.

[3] 聂嘉汾,张海东.不同切顶角度下临空巷道围岩力学响应特征及控制效果[J].山西煤炭,2024,44(04):120-127.

[4] 刘俊旭.棋盘井煤矿110901工作面末采期切顶卸压技术研究[J].能源技术与管理,2024,49(05):54-57.

 DOI: https://doi.org/10.12349/foer.v2i3.6603

Study on deep foundation pit monitoring technology for high-rise residential buildings

Siqi Yin

Beijing Zhongliankan Engineering Technology Co., Ltd., Beijing, 100072, China

Abstract

The excavation of deep foundation pits in high-rise residential buildings is usually carried out in urban areas, where there are many pipelines underground and heavy traffic above ground, making the construction difficult. Monitoring work needs to be carried out during the construction of deep foundation pits to prevent foundation pit accidents. Therefore, relevant projects can introduce advanced monitoring technology, carry out comprehensive monitoring work, leverage the application advantages of traditional monitoring technology and automated monitoring technology, understand the specific situation in deep foundation pit construction, take appropriate measures, provide support for construction management, and ensure the smooth progress of construction. In view of this, the research work of this article mainly analyzes the necessity and specific content of monitoring deep foundation pits in high-rise residential buildings, explores the monitoring technologies and related monitoring points applied, and provides reference for relevant personnel to ensure the safety of deep foundation pit operations.

Keywords

high-rise residential buildings; Deep foundation pit; monitoring technology

高层住宅建筑深基坑监测技术研究

尹思琦

北京中联勘工程技术有限责任公司，中国 · 北京 100072

摘　要

高层住宅建筑深基坑的开挖通常是在市区内，地下存在很多管线、地上交通繁忙，施工难度大，在深基层施工中需要通过开展监测工作，防止发生基坑事故。因此相关项目可以引进先进的监测技术，开展全面的监测工作，发挥传统监测技术和自动化监测技术的应用优势，了解深基坑施工中的具体情况，采取适当措施，为施工管理提供支持，确保施工能够顺利进行。鉴于此，开展本文的研究工作，主要分析高层住宅建筑深基坑监测的必要性以及具体的内容，探究应用到的监测技术和相关的监测要点，以供相关人员参考，保障深基坑作业的安全性。

关键词

高层住宅建筑；深基坑；监测技术

1 引言

深基坑施工是高层住宅建筑施工作业中一项十分重要的内容，它直接影响到整个建筑的安全性和稳定性。然而在施工过程中会受到诸多因素的影响，导致深基坑的施工质量不佳，也会引发相关的安全事故。因此相关工程项目应当重视先进技术的融入，开展基坑本体以及周围环境的监测工作，收集数据，为施工管理和风险管控提供依据。可以实现预期的施工质量目标，保障高层住宅建筑的安全性和稳定性。

2 高层住宅建筑深基坑监测的必要性

近些年高层住宅建筑的相关建筑工程迅速发展，规模扩大数量不断增多，因此对施工质量提出更高的要求，基坑开挖是高层住宅建筑现场施工中的重要组成部分，大部分的施工质量关系到工程的整体质量以及高层住宅建筑使用的安全性和稳定性。综合当前情况来看，深基坑施工区域附近地下管线布置难度比较大，管线布置比较密集以及存在诸多建筑物，一旦深基坑施工出现事故问题，势必会对整体质量造成不良影响 [1]。施工过程中也会出现围护结构变形、周边土体沉降、地下水位异常等一系列问题，若没有及时发现和处理，可能会引发基坑坍塌、管线断裂等安全事故，因此开展深基坑监测工作尤为必要。可以实现安全预警、指导施工和责任追溯等各项功能，是当下高层住宅建筑施工管理的必然选择。首先通过实时监测数据，可以发现基坑及其周边环境出现的异常情况，提供预警信息。相关工作人员提高重视，采取适当的防治措施，排除隐患，避免发生安全事故。其次，施工人员可以获得实时的监测结果，分析现阶段施工

【作者简介】尹思琦（1998–），女，中国河北深州人，硕士，助理工程师，从事工程测量与地理信息技术研究。

的具体情况，优化施工参数。例如开挖的速度、支护方案等，可以确保施工更加科学合理。最后监测数据也能为工程质量评估、事故原因分析等提供依据，实现责任追溯。

3 高层住宅建筑深基坑监测的具体内容

3.1 基坑监测

高层住宅建筑深基坑监测工作中，重点要对基坑本体进行监测，而监测内容则聚焦于围护结构、支撑体系以及坑内主体的稳定性。在对围护结构开展位移监测时，需要关注桩顶水平垂直位移、墙体深层位移，可以评估围护结构变形是否超限 [2]。开展围护结构应力监测时，主要监测桩体和墙体的钢筋应力以及混凝土应变情况，判断结构受力是否符合设计要求。开展支撑体系的监测工作，评估内支撑轴力、锚杆锚索拉力情况，分析判断支撑结构的承载能力是否安全。对坑底土体隆起进行监测，评估坑底中心及周边土体的垂直位移，防止坑底突涌或者过大隆起，影响施工的整体质量和安全性。

3.2 周边环境监测

开展周边环境监测工作，也能保证深基坑施工的整体质量，而监测的目的主要是分析基层施工对周边土体建筑地下管线的影响情况。首先要开展周边土体沉降与位移监测工作。主要的内容有垂直沉降和水平位移，用来反映土体的变形趋势。其次监测邻近建筑物的情况，包括建筑物沉降、倾斜、裂缝情况，重点要关注一些老旧建筑。第三，开展地下管线监测工作。针对给水管、电缆、燃气管的各类管线，监测它们的沉降位移变形速率，防止管线出现破裂泄漏的安全事故 [3]。第四，加强地下水位监测工作。监测坑内外地下水位变化，预防水位骤降引起土体固结沉降或者管涌的情况。

4 高层住宅建筑深基坑监测的相关技术

4.1 传统监测技术的应用

高层建筑深基坑施工过程中及时准确地监测基坑内的情况，可以保障工程的安全和结构的稳定性，因此要选择合适的监测仪器。常用的监测仪器有精密水准仪、全站仪、测斜仪、重力仪、应力传感器。精密水准仪是最传统也是最基础的沉降监测工具之一，可以测量两个点之间的高程差，推算出被测物体的沉降量，用于精度要求较高的环境，不过操作比较复杂。全站仪是一种集测量、距离、角度、坐标于一体的测量机器，可以进行传统的水准测量，也可以通过测量两个点间的三维坐标计算出沉降值 [4]。它具有测量速度快、精度高、操作简便等一系列优点，因此可以应用于大规模的沉降加速度的测量。测斜仪通过埋设在围护结构或者土体中的测斜管，测量不同深度的测斜角度，从而计算深层水平位移。可以应用于围护结构、墙体深层位移和土体侧向变形的监测中，获得深层变形的曲线。不过需要人工逐点测量，数据的连续性比较差。重力仪可以直接测量物体所受重力加速度的变化，进而推测出物体的沉降情况。应力传感器主要是通过钢筋计、轴力计的传感器，直接测量结构内力，应用于围护结构、钢筋应力、内支撑轴力和锚杆拉力等监测中，可以实时反映结构受力状态，不过易受到干扰，需要定期校准。

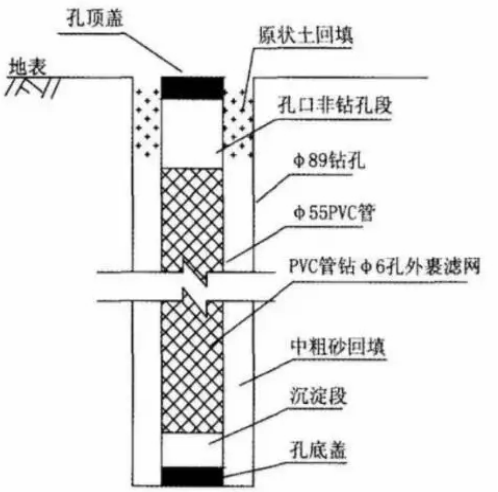

图 1 测斜管安装示意图

4.2 自动化技术的应用

自动化监测技术的应用实现了深基坑监测工作的有效升级，尤其是随着物联网和传感器技术的不断发展应用，可以为实时监测提供重要支撑。因此在深基坑监测工作中，施工单位应当注重自动化监测系统的打造，可以发挥各项技术优势，实现系统连接。采集全面的数据信息应用来反映深基坑施工的具体情况。首先打造自动化全站仪监测系统，将全站仪与自动目标识别模块和数据传输终端相结合，优化系统设计和各项功能，进行远程控制测量操作，监测频率高，数据可以实时上传。其次，应用全球导航卫星系统进行监测，实时获取监测点的坐标。计算位移变化的情况，可以应用于开阔区域的周边土体位移以及高层建筑物倾斜监测工作中，实现全天候监测，覆盖的范围广泛。第三，应用分布式传感器。在深基坑监测中进行合理布设，可以用于围护结构应力、地下水位、土体孔隙水压力等各方面的监测，采取实时的数据信息。该方法布置比较灵活，可大规模组网。数据采集与传输设备，将传感器采集到的各项数据实时传输到监测中心。监测中心配备专业的数据分析软件，可以实时显示深基坑的变化情况，包括沉降、倾斜、水平位移等参数，并将数据储存在数据库中，便于历史数据的查询和分析。在分析软件的支持下对监测数据进行滤波、平滑处理，提高数据的可靠性，并根据预设的预警阈值，对异常数据进行预警和报警，确保施工更加安全可靠。

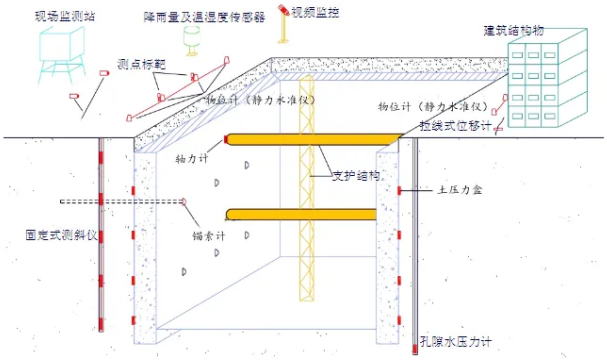

图 2 基坑自动化监测的布置

5 高层住宅建筑深基坑监测技术应用的要点

5.1 优化深基坑设计，完善管理

高层住宅建筑的深基坑施工中开展监测工作，需要进一步优化基坑的设计，根据这一要求合理布设监测工作，从而确保监测技术得到充分地发挥。首先建筑单位要分析施工设计图纸，制定合理的计划，明确深基坑施工中的关键环节和技术要点，进行合理分工。并制定详细的监测计划，选择合适的监测技术，优化布设，从而提高监测的覆盖率和工作效率，用于消除施工中的干扰因素。其次，制定完善的管理制度。施工单位需要结合高层住宅建筑工程项目的特点，明确管理工作的具体内容，落实责任制，提高各部门对监测工作的重视，确保监测工作得到足够的重视后，顺利开展，相关人员部门积极配合，获得更加全面详细的监测数据。

5.2 合理布设基坑监测点位

基坑监测工作中必须设置稳定的水准点，确保高程基准的稳定性，在布置水准点时，技术人员要充分考虑其稳定性。可以在基坑 50m~100m 的范围以外的稳定位置设置三个水准点，形成封闭的水准路线 [5]。地表观测时沿基坑边缘每隔 15m~20m 设置地表沉降点。在设置沉降点时，需要考虑附近道路的沉降情况，确保人体布设的科学性和合理性。在观测建筑物的沉降点时，监测点应该布置在基坑开挖深度的 1.5 倍以内。而在表面管道和壳体的沉降监测中，可以使用精密的仪器测量参考点和不同测量点之间的高度差，与以往的测量值进行比较分析，将高度差作为基线值。

在布设监测点位需要遵循适当的原则。监测点应当按照一定间距均匀地分布在基坑周围以及关键区域，确保覆盖范围广，而且数据具有代表性。考虑到关键位置这一原则，监测点应该重点布置在建筑物的周边、基础边缘、地下结构等关键部位。监测这些区域的沉降情况，及时发现潜在的问题。而对于对称结构或复杂形状的建筑物，监测点应尽可能地保持对称分布，确保数据的对称性和分析的准确性。此外，设置监测点位需要尽可能避开一些会产生干扰的因素，例如大型机械作业区。

5.3 控制监测频率和周期

沉降监测是保证施工安全预测和控制沉降变形的关键环节，因此要控制好监测频率和周期，便于准确获得沉降数据，及时发现问题。首先要根据基坑周边的土质类型、地质构造以及地下水情况等因素，分析不同区域的沉降敏感性，确定监测的频率 [6]。例如一些地基承载力比较低的地区，可以适当地增加监测频率。其次，考虑施工进度情况，施工进度会直接影响沉降的发展速度。施工初期由于基坑开挖、支护结构施工等因素，沉降速度比较快，因此应当增加沉降监测的频率。而随着施工的进行，监测速度会逐渐缓慢，因此可适当地降低监测频率。

5.4 数据的处理应用

采集全面的沉降数据后开展详细的分析工作，首先要对数据进行预处理，剔除其中的异常值，对检测过程中出现的缺失数据，可采用线性插值、曲线拟合的方法进行插补。将不同监测点的沉降数据归一化处理，可用于后续的分析。在沉降变化趋势分析中，主要进行沉降量分析、沉降速率分析和沉降分布规律分析。在沉降量分析方面，可分析不同监测点的沉降量，判断基坑的整体沉降情况。在沉降分布规律分析方面，要观察沉降数据分析沉降的分布规律，为后续施工提供指导。还需计算不同监测点的沉降速率，评估基坑的稳定性。超过预警值时，需要采取适当的措施及时处理。通过分析沉降数据，判断具体的影响因素，包括地质条件、施工因素和外部因素，有针对性地采取处理和防治措施，避免引发严重后果。

6 结语

综上所述，深基坑作业在高层建筑施工中发挥着重要的作用，是关键技术内容，也是施工的基础环节。因此施工单位需要提高对高层住宅建筑深基坑监测的重视，选择传统技术与自动化技术结合的方式，开展对基坑本体和周边环境的监测工作。确定合适监测点位，优化整体布局，控制监测的频率和周期，并采集全面的数据信息，用来分析基坑的沉降情况。施工人员根据这些数据分析情况，采取适当措施，保障深基坑的安全性和稳定性，实现高层住宅建筑预期的施工目标。

参考文献

[1] 杨晓岚.高层住宅建筑深基坑支护变形监测与控制策略[J].居舍,2025,(17):166-169.

[2] 陈启帆. 高层住宅建筑深基坑监测方案研究[J].工程技术研究,2023,8(03):210-212.

[3] 崔峰.高层住宅建筑深基坑施工沉降监测技术[J].砖瓦,2021,(12):131-132.

[4] 祁玉涛. 高层住宅建筑深基坑施工沉降监测技术研究[J].工程技术研究,2020,5(10):45-46.

 DOI: https://doi.org/10.12349/foer.v2i3.6604

Common safety hazards in the production of mechanical manufacturing enterprises and corresponding suggestions for prevention

Xuesong Liu Yuxin Li Xiaoheng Jia

Shaanxi Province Military-Civil Fusion Technology Center, Xi'an, Shaanxi, 710061, China

Abstract

As a highly specialized task, mechanical manufacturing may encounter safety hazards during the production process due to factors such as technology and management, which can limit manufacturing quality and efficiency. This necessitates that mechanical manufacturing enterprises place greater emphasis on safety management in the production process, analyze potential safety hazards based on production technology and processes, study the types, causes, and impacts of these hazards, and develop response strategies based on relevant data. This paper starts from mechanical manufacturing enterprises, analyzes safety hazards in combination with production processes, and formulates practical solutions to ensure production safety.

Keywords

mechanical manufacturing; safety management; process control

机械制造企业安全生产中常见的安全隐患与应对建议

刘雪松 李雨心 贾小恒

陕西省军民融合技术中心，中国 · 陕西 西安 710061

摘 要

机械制造作为专业性较强的作业，企业在生产环节就可能由于技术以及管理等因素出现安全隐患，制约制造质量以及效率。这就需要机械制造企业加强对生产环节的安全管理重视，根据生产技术以及生产流程，分析生产环节可能存在的安全隐患，研究隐患的类型、成因以及危害，并且综合相关数据制定应对策略。本文就从机械制造企业入手，结合生产流程分析安全隐患，并且针对这些隐患，制定切实可行的解决对策，以保证生产的安全性。

关键词

机械制造；安全管理；流程管控

1 引言

机械制造企业在作业环节，一些机械需要高温高压的环境，就导致机械制造环节的环境存在风险，可能出现安全隐患。针对这一状况，企业就需要结合整个生产流程，开展安全生产管理，保证生产的安全性。然而机械制造本身较为复杂，不同机械对于环境的需求也存在差异，进一步增强生产难度，影响安全生产的落实。此背景下，机械制造企业就需要加强对安全生产规范的研究，通过先进的监测设备与仪器，分析生产环节安全隐患的来源、类型以及危害，在此基础上收集隐患信息，然后综合这些信息，制定合适的应对策略，针对性地对安全隐患进行管控，保证机械制造的安全性。

【作者简介】刘雪松（1992–），男，中国河北保定人，本科，工程师，从事金属冶炼、机械制造研究。

2 机械制造企业安全生产概述

机械制造企业指的是从事机械产品设计、生产、加工、装配和销售的公司或工厂。它们通常生产各种机械设备、部件和系统，主要任务是通过先进的生产工艺和技术，制造符合市场需求的机械产品，以实现商业利润。

而在作业环节，由于机械制造过程中涉及大量的重型设备、复杂的工艺和危险物质，安全生产显得尤为重要。机械制造企业的安全生产也就成为确保员工身体健康、生产顺利进行并防止事故发生的关键。

一般而言，机械制造企业安全生产的主要内容包括安全管理制度、员工安全培训、设备安全、环境与作业条件、危险源识别与控制、应急处理与救援以及安全文化建设等[1]（如图 1 所示）。综上，机械制造企业的安全生产工作就需要企业管理层和全体员工共同参与，采取预防和控制措施，尽可能消除安全隐患，保障员工的生命安全和企业的可持续发展。

图 1 机械制造企业安全生产的内容

3 机械制造企业安全生产环节常见的安全隐患

机械制造企业的安全生产中，常见的安全隐患通常涉及设备、环境、操作人员、作业方式等多个方面，需要相关人员深入分析。

3.1 设备安全隐患

首先，生产设备在长期使用过程中可能出现磨损、老化、故障等问题，导致设备无法正常运行或发生事故；其次，未能按时进行设备检修与维护，也可能导致设备出现故障或事故隐患；然后，一些高危设备如切割机、铣床、冲压机等，可能缺乏防护装置，增加了意外事故发生的风险。而且锅炉、压缩机等设备还存在未进行有效安全检查和管理的状况，容易发生爆炸或泄漏等严重事故。

3.2 作业环境安全隐患

首先，部分车间空气不流通，导致有毒气体、粉尘等积聚，增加了职业病、火灾和爆炸的风险；其次，生产过程中会产生过大的噪声，未采取有效的噪音控制措施，长期暴露在噪声中会导致员工听力损失或其他健康问题。而且工作环境光线不足，可能导致操作失误、碰撞或受伤。

3.3 操作人员安全隐患

一方面，操作人员未经过充分培训或不熟悉操作流程，容易造成事故或设备损坏。而且员工存在未穿戴必要的个人防护装备（如防护眼镜、手套、安全鞋等）的状况，在操作过程中容易受到伤害。另一方面，员工长时间高强度工作，容易出现疲劳驾驶或工作失误，增加了事故的风险。

3.4 消防安全隐患

部分企业缺乏必要的消防设备（如灭火器、消防栓等），设备也长期未检查维护，也存在疏散通道被占用或堵塞的状况，这些状况都会导致火灾或其他灾难时员工无法安全撤离。此外，制造企业还存在在高温、易燃环境中，未做好火源控制或防火措施的状况，也容易发生火灾事故。

综上所述，机械制造企业的安全隐患涉及多个方面，严重影响制造企业生产的安全性，需要管理人员针对性地进行处理。

4 机械制造企业安全生产中常见安全隐患的应对建议

机械制造企业安全生产环节，存在多样化的安全隐患，为了保证安全生产的落实，就需要相关人员针对这些隐患，开展针对性地管控，常见应对策略包括以下几种。

4.1 设备安全隐患的应对

在机械制造企业中，设备安全隐患是造成事故的主要原因之一，因此，针对设备安全隐患的应对措施非常重要。

首先，针对设备老化或故障，需要制定并执行定期的设备检查和维护计划，确保设备始终处于良好的工作状态。对于已老化、故障频发的设备，应及时进行技术升级或更换，避免因设备老化导致安全隐患。还需要通过安装设备监控系统（如远程监控、振动监测、温度监控等），实时掌握设备状态，预防设备故障。

其次，针对缺乏定期维护问题，则需要为每台设备建立详细的档案，记录设备的使用年限、维修记录、故障情况等，确保设备维护有据可依。还需要制定设备的日常检查、月度检查和年度大修计划，确保设备按期维护和检修。

再次，针对设备安全防护缺失问题，必须配置完善的安全防护装置，如防护罩、安全栏杆、急停装置等。还需要在高危设备旁设置明显的安全警示标志，提醒操作人员注意安全。并且为设备加装防护罩或围栏，避免操作人员接触到设备的危险部位，减少机械伤害风险。

最后，针对高温或高压设备问题，需要对锅炉、压缩机等高温高压设备进行定期检查和压力、温度监控，确保其工作在安全范围内。还需要为高温或高压设备配备安全阀门、压力表和温度报警装置，确保在出现异常时能够及时采取应对措施[2]。

综上，设备安全隐患的应对需要多方面的综合措施，以确保机械制造企业的安全生产。

4.2 环境隐患的控制

在机械制造企业中，作业环境的安全隐患是影响员工健康和生产安全的重要因素，需要相关人员通过以下手段进行管控。

第一，针对噪声问题，应识别车间内的主要噪声源，采取隔音措施，如安装隔音墙或隔音罩等，减少噪声的传播。也需要选用低噪声、高效能的设备，避免使用过于老旧或噪声过大的机械设备。还需要为员工提供耳塞或耳罩等听力保护装备，特别是在噪声较大的工作区域。

第二，针对粉尘污染，需要在车间内安装有效的除尘系统，如集尘装置、空气净化设备等，降低粉尘浓度。还需要定期清理车间地面、设备和工作台面，避免粉尘积聚。并且为员工提供适合的防尘口罩或呼吸防护装备，避免因吸入过量粉尘而影响健康。

第三，针对高温环境，可以通过安装空调、风扇等设备降低车间温度，或通过加装遮阳设施来避免阳光直射。还需要在高温车间内设置温度监控系统，并根据温度变化调整工作时间和休息时间，避免员工因高温而中暑。

综上，通过采取科学的安全管理措施、改进工作环境、加强员工安全培训，可以有效降低作业环境中的安全隐患，保障员工的身体健康和企业的生产安全。

4.3 人员安全隐患的应对

在机械制造企业中，人员安全隐患主要涉及员工在工作过程中可能遭遇的身体伤害、健康问题以及操作失误等，应通过以下手段进行应对。

首先，针对机械伤害，所有机械设备应安装必要的防护装置（如护栏、挡板、手指保护装置等），防止员工因接触机械部件而受伤。还需要对操作人员进行严格的操作培训，确保他们了解设备操作规程，并在工作中严格遵守。并且制定并严格执行安全操作规程，要求员工在操作时佩戴必要的个人防护装备（如手套、安全鞋等）。

其次，针对电气安全隐患，需要定期检查电气设备和电缆线路，确保没有破损、老化和短路现象，避免电气设备故障引发火灾或电击事故。确保所有电气设备正确接地，配备漏电保护装置，避免电气泄漏引发电击事故。还需要设置紧急停电按钮或电气控制系统，确保发生电气故障时可以迅速断电，避免灾难性后果。

再次，针对高空作业与高处坠落，应为高空作业人员提供防坠落保护设备（如安全带、安全网等），并确保其在作业前进行安全检查。还需要在高处作业区安装安全栏杆或围挡，避免人员意外坠落。

最后，还需要制定详细的操作规程，确保每个环节都有标准化的操作流程，严格执行。并且对生产过程进行监督检查，及时发现并纠正不当操作，确保安全规程的执行。

综上，机械制造企业中人员安全隐患多种多样，需要通过上述手段进行应对，以确保员工的生命安全和健康，促进企业的持续稳定生产。

图 2 消防安全隐患应对

4.4 消防安全隐患的应对

在机械制造企业中，消防安全隐患也是常见的风险，要求企业管理人员根据实际进行设计，并通过以下手段进行解决（如图 2 所示）。

首先，易燃物质应存放在通风良好、防火隔离的专用仓库内，远离热源和火源。所有易燃、易爆物品必须进行明显标识，并按照规定的安全标准分类储存。还需要定期检查易燃物质的存放环境，确保储存容器完好，避免泄漏和损坏。

其次，生产车间应配置适当的通风设备，保持良好的空气流通，及时排放有害气体和易燃气体。还需要清理通风管道中的积尘，防止积尘引发火灾。并且在有易燃气体或蒸汽的区域安装泄漏报警器，并确保设备处于良好状态[3]。

再次，需要定期对设备进行检查与维护，确保设备正常运行，避免因设备故障导致的火灾。还需要对可能产生火花的设备部件采用防火、防爆材料，避免火花引发火灾。

最后，需要在车间内安装灭火器、灭火器箱、消防水龙带、自动喷水灭火系统等，确保设施完好、有效。并且确保消防通道、疏散出口畅通无阻，不得堆放物品或进行其他阻碍消防的行为。还需要定期对消防设施进行检查和保养，确保设备处于有效状态。并定期开展消防演练，提高员工的应急反应能力。

综上，通过严格执行消防安全管理制度、加强消防设备的配置与维护、定期进行消防演练，可以有效降低火灾风险，确保企业生产安全。

5 结语

机械制造企业中的安全隐患需要通过设备维护、环境管理、员工培训、设施检查等多方面的综合管理来应对。所以在机械制造企业安全生产环节，就需要管理人员深入分析可能存在的安全隐患，探究其类型，然后综合上述手段进行解决，以保证企业生产的安全性，推动企业的发展。

参考文献

[1]舒伟君. 安全生产标准化在机械制造企业管理中的应用 [J]. 中国金属通报, 2024, (11): 105-107.

[2]魏童,梁家辉,白光,等. 浅析机械制造企业安全监管信息化平台建设与应用 [J]. 华北科技学院学报, 2024, 21 (03): 26-31.

[3]张蓝珠,张婷,狄莎莎. 机械制造企业安全生产流程化管理实践研究 [J]. 安全, 2023, 44 (11): 57-62.

Analysis and solution of high voltage electrical equipment

Xuqiang Liu

State Grid Lvliang Power Supply Company, Lvliang, Shanxi, 033000, China

Abstract

Overheating problem has long been a key factor affecting the normal operation and service life of high voltage electrical equipment. This paper first analyzes the possible causes of overheating of high voltage electrical equipment, such as increased resistance at conductor contact, equipment assembly defect and high ambient temperature, and discusses the direct effects of these factors on equipment performance and service life. Then, the basic steps and methods of troubleshooting and troubleshooting high voltage electrical equipment are introduced in detail. Among them, the use of thermal imaging instrument to conduct high temperature point positioning, voltage test to check the insulation and other scientific and effective detection tools, to find and solve the problem of high voltage electrical equipment overheating in time and to ensure the normal work of the equipment to provide important support. Finally, according to the practical work experience, the suggestions and countermeasures to prevent and handle the overheating failure.

Keywords

high voltage electrical equipment; overheating fault; fault diagnosis; thermal imaging instrument; equipment maintenance

高压电气设备过热故障的分析与解决方案

刘旭强

国网吕梁供电公司，中国 · 山西 吕梁 033000

摘　要

过热问题长期以来一直是影响高压电气设备正常运行和使用寿命的关键因素。本文首先分析了各种引起高压电气设备过热的可能原因，如导体接触处电阻增大、设备装配缺陷、环境温度过高等，并探讨了这些因素对设备性能和使用寿命的直接影响。继而，详细介绍了对高压电气设备进行故障诊断和故障排除的基本步骤和方法。其中，运用热影像仪进行高温点定位、电压试验检查绝缘情况等科学有效的检测工具，为及时找到并解决高压电气设备过热问题，确保设备正常工作提供了重要的支持。最后，依据实际工作经验，提出了有效防止和处理设备过热故障的建议和对策。

关键词

高压电气设备；过热故障；故障诊断；热影像仪；设备保养

1 引言

高压电气设备在现代社会的各个领域中都有广泛的应用，从电力输送、工业生产到家庭生活，它们发挥着关键的作用。然而，在使用过程中，高压电气设备往往会出现过热问题。过热不仅威胁到设备的正常运行，降低了设备的性能和效率，同时也可以大幅缩短设备的使用寿命，甚至可能引发电气火灾等严重事故。这些问题对社会生产和人民生活造成了严重影响。因此，对高压电气设备过热故障的原因进行深入剖析，寻找解决方案，无疑具有重要的实践和理论意义。本研究以解决这个问题为目标，从导体接触处电阻增大、设备装配缺陷、环境温度过高等多个角度，对过热故障进行深入分析。同时，提出了一系列有效的故障诊断和排除方法，并提供了一些实际可行的预防和改进措施。希望本文的成果能为高压电气设备的操作、维护和改进提供有效的参考资料，同时为保障高压电气设备的正常运行和延长设备使用寿命贡献力量。

【作者简介】刘旭强（1991–），男，中国山西吕梁人，硕士，工程师，从事电气试验（高压试验）研究。

2 高压电气设备过热原因分析

2.1 导体接触处电阻增大引发的过热问题

导体接触处电阻增大是高压电气设备中常见的过热原因之一 [1]。这种过热问题主要源于接触面不良，通常由于接触面氧化、腐蚀、机械应力不足或材料老化等因素导致。接触面的不良会显著增加局部电阻，进而导致电流通过时产生过量的热量。由于电阻增大，热量积聚在接触点上，未能有效散去，导致局部温度迅速升高。当温升超过设备设计的耐热限值时，会引发绝缘材料的热老化和损坏，严重时甚至可能引发电气火灾。

过热不仅降低了设备的运行效率，而且加速了设备的损耗，缩短使用寿命。电气设备通常配有绝缘结构，长时间的过热会导致绝缘性能下降，加大设备因绝缘故障而发生击

穿的风险[2]。持续的高温可能导致接触条件进一步恶化，形成恶性循环，导致故障的进一步加剧。

为避免这种问题，确保导体接触处的电阻保持在最小，关键措施包括定期维护检查接触面状态，清除氧化和腐蚀物质，保证接触面的清洁和平整。采用更高质量的导体材料和先进的接触技术以保证接触压力和导电性能的稳定性，对于提高设备运行可靠性至关重要。

2.2 设备装配缺陷导致的过热现象

高压电气设备的装配缺陷是导致设备过热的一项常见因素。在设备制造和安装过程中，若存在装配不当，如紧固件未拧紧、组件未正确对齐或安装顺序错误，这些都会导致电气设备在运行中产生局部应力集中，从而引起过热现象。装配缺陷可能导致接触电阻增加，使电流无法顺畅通过，产生额外的焦耳热。这种热量积聚不易被散热机制及时释放，进一步加重设备的温升。装配缺陷可能导致电气间隙不足，增大了击穿和短路的风险，进而间接造成设备发热。设备中如未能正确安装绝缘材料，也会出现过热问题，因为绝缘材料的偏移或磨损会导致电场不均匀分布，加强局部电场强度，从而引发热故障。预防装配缺陷引起的过热现象，应在设备制造和安装阶段严格执行质量控制，实施精准度高的装配技术和重新检验制度，以减少此类故障的发生。通过提升制造和装配工艺的标准，改进现场安装人员的操作技能，可以有效缓解由于装配缺陷导致的设备过热问题。

2.3 环境温度过高引起的设备过热

环境温度过高是引发高压电气设备过热的重要因素之一。高温环境下，电气设备的热耗散能力受到限制，导致设备内部无法有效散热。环境温度的升高会使设备材料的电阻增加，从而增加电流通过时的热损耗，这成为设备整体过热的潜在隐患。高温还可能导致绝缘材料的老化加速，降低其介电强度，从而使得设备更易发生绝缘故障，进一步引发热量积累。长期处于高温环境中的设备，其连接部件如接头和紧固件等可能因热胀冷缩导致接触性不良，增加电阻和发热。这些因素共同作用，加剧了设备的热应力，缩短了设备的使用寿命。为应对环境温度升高带来的影响，需在设备设计和材料选用上充分考虑耐高温性能，并制定严格的热管理策略以维持设备运行的稳定性。

3 高压电气设备的故障诊断与排除

3.1 热影像仪定位高温点的方法与应用

热影像仪在高压电气设备过热故障的诊断中起到关键作用。这种非接触式检测技术通过捕捉设备表面的红外热辐射，使得设备的温度变化可视化，在高温点的定位中具备显著优势。通过热影像仪，能够准确地识别出设备中异常热区域，避免传统检测方法需要直接接触设备的缺陷，提高了检测的安全性与效率。在高压电气设备的常规检修中，运用热影像仪对设备的连接节点、导体表面、绝缘部件等进行检测，能够迅速找出可能存在的过热隐藏点。这种技术在设备运行状态下实施，不影响设备的正常运行，更大程度上保障了电力系统的稳定性。检测过程中，设备的热分布图像由专业人员进行分析，不仅可以判定设备是否存在过热问题，还能帮助预测设备潜在的老化或损坏风险。通过对比热成像数据与设备的标准运行温度，实现对设备健康状况的全面评估。热影像仪的应用为高压电气设备预防故障、减少非计划停机、延长设备使用寿命提供了强有力的技术支持，极大提升了设备管理与维护的科学性和预见性。

3.2 电压试验检查设备绝缘情况

在高压电气设备的故障诊断中，电压试验作为检查设备绝缘情况的一种关键方法，发挥着不可或缺的作用。电压试验通过对高压设备施加一定的试验电压，观察和测量设备的绝缘性能，以确定其是否存在绝缘破损或者劣化的现象。在进行电压测试时，通常会采用工频耐压试验和直流耐压试验等多种技术手段，以全面评估绝缘状态。

工频耐压试验是通过持续施加工频电压于设备上，检验其在规定时间内能否承受所加电压而不发生绝缘击穿。直流耐压试验则通过施加稳定的直流电压，从而定位潜在的绝缘故障点。两种方法都能有效揭示设备的耐压能力，进而判断其绝缘性能是否合格。这些试验结果对于判定绝缘材料的劣化程度、识别设备潜在的电气性能问题具有重要意义。

电压试验在设备检测中提供的数据，不仅帮助维护人员及早发现和解决过热故障，也在优化高压电气设备的运行和管理中，提供了重要依据。如果试验结果显示绝缘不合格，需及时采取修复或更换措施，以避免因绝缘损坏导致更严重的设备故障或安全隐患。

3.3 实际案例中的故障诊断与排除流程展示

在实际案例中，高压电气设备的故障诊断与排除流程通常始于对设备运行数据的全面收集，以识别异常状况。通过历史数据分析，识别出异常温度上升区域。一旦检测到可疑区域，热影像仪被用来确认和精确定位设备的热点。这一步尤为重要，有助于缩小故障范围。在确定位点之后，使用电压试验来检查这些区域的绝缘完整性，从而评估设备内部可能隐藏的绝缘问题。当热影像和电压试验结合使用时，能够显著提高故障诊断的准确性。施工和设备安装记录的审查也必不可少，以查明是否存在拼装缺陷或材料老化等问题。深入分析故障发生的环境条件，有助于发现由外部因素引发的过热，例如环境温度过高或湿度变化[3]。在这种综合诊断流程下，高压电气设备的过热故障能够被高效、准确地鉴定和排除，保障设备长期稳定运行。

4 预防与解决高压电气设备过热的对策与建议

4.1 高压电气设备的日常保养与维护

高压电气设备的日常保养与维护是确保设备长期安全稳定运行的关键环节。定期的保养与维护能够有效预防过热故障，从而提高设备的使用寿命。应确保设备的工作环境清洁，保持设备表面和周围环境的整洁，防止灰尘和杂物堆

积，因此可能导致设备散热效果不佳，增加过热风险。应定期检查导体连接处，确认其紧固程度，以避免因接触电阻增大而产生的过热问题。设备的绝缘部分同样需要获得定期检修，及时修复或更换老化的绝缘材料，以防因绝缘失效而引发的过热。环境温度的监控也是保养维护的重要组成部分，应确保设备在设计允许的温度范围内运行，并采取必要的通风或冷却措施。在设备运行过程中，通过借助先进的监测工具，如在线热成像监测等，可以实现对设备工作状态的实时监控，快速识别潜在的过热区域，采取针对性的处理措施。建立完善的设备维护档案，记录每次检修的情况和发现的问题，为日后维护提供数据支持和参考依据。通过系统、细致的日常维护，高压电气设备的过热故障能被有效预防和处理，进而保障设备的安全稳定运行。

4.2 设备设计与选材的改进提案

高压电气设备的设计和选材在预防过热故障中起着关键作用。优化导体材料是一个重要策略，使用高导电率的材料可以显著降低导体接触处的电阻，从而减少发热量。设计过程中需考虑设备的散热性能。通过增加散热片、采用强制风冷或液冷系统等手段，可以有效提升设备的散热效率，降低设备运行温度。在选材方面，应优先选择耐高温、耐腐蚀的特殊材料，确保设备在恶劣条件下依然能够可靠运行。引入先进的绝缘材料也能提高设备的耐压和安全性能，减少因绝缘老化导致的热失控风险。合理的结构设计同样重要，优化设备内部布局，使散热路径更为直接，有助于快速降低系统温度。高压设备组件间的接合处应采用更为精细的制造工艺，以减少装配误差引起的局部过热可能性。在选材及设计过程中，需综合考虑设备的工作环境及工况要求，以确保解决方案的实效性和经济性。通过科学合理的设计和选材，高压电气设备的性能与稳定性将得到显著提升，过热故障的发生率也会随之降低。

4.3 针对特定问题提出的预防与解决策略

在高压电气设备过热故障的预防与解决中，针对特定问题的策略尤为关键。为避免导体接触处电阻增大，应定期进行设备连接部位的检查与维护，确保接触紧密且无氧化现象。设备装配时，必须严格遵循技术规范，确保各部件的精确匹配，并在生产阶段实施全面的质量控制。针对高环境温度引发的过热，可以优化设备散热设计，增加通风装置，并选用具有良好导热性能的材料，以提升整体耐热性能。部署智能监控系统，以实时监测设备的运行温度和其他关键参数，预防性地识别和处理潜在故障。通过结合科学合理的方法，对症下药，提高设备的可靠性和运行稳定性。

5 结语

本文对高压电气设备过热故障进行了深入的研究，并提供了解决此类问题的详细方案。我们初步分析和确定了过热的主要原因，并通过具体案例，详细介绍了对设备进行故障诊断和排除的方法，其中包括采用热影像仪和水压试验等科学有效的工具，为及时准确地解决过热问题，确保设备运行正常，提供了技术支持和依据。同时，根据实际工作和经验，我们也提出了一些预防和处理设备过热的建议，例如加强设备的日常保养、改进设计和选材等，从而达到预防和解决设备过热问题的目标。虽然我们的研究已经取得了一些成果，但在实际操作中仍需结合设备的具体情况进行细致入微的观察和调整。针对不同类别和材质的设备，可能需要采取更多综合且定制化的解决方案。以后可以侧重于开发更高效、更精确诊断过热故障的方法，进一步改进设备的设计和材料选择，并探索更多可能的预防过热故障的措施。

参考文献

[1] 王宇驰.有关高压电气设备故障分析[J].汽车世界,2019,(26):0003-0003.

[2] 王宏.高压电气设备状态监测和故障诊断技术应用[J].电子乐园,2019,(05):0301-0301.

[3] 李燕.高压电气设备故障诊断中红外检测技术的应用[J].光源与照明,2021,(03):59-60.

 DOI: https://doi.org/10.12349/foer.v2i3.6606

Research on the Control of Asphalt Roadbed and Pavement Flatness in Highway Engineering in the New Era

Bin Liang

Alxa League Transportation Development Center Bayanhot Highway Maintenance Work Area, Alxa, Inner Mongolia, 750306, China

Abstract

With the rapid development of transportation infrastructure such as highways in China, highways, as an important component of the comprehensive transportation system, have become a focus of people's attention on whether traffic is smooth and safe. Due to its advantages in driving comfort and maintenance, asphalt subgrade and pavement have been widely used in highway construction in recent years. However, the unevenness of the pavement is also an important factor affecting the performance of asphalt subgrade and pavement. The author combines relevant construction technologies and standards in the new era to summarize the factors that affect the smoothness of asphalt subgrade and pavement, and proposes control measures from the dimensions of raw materials, construction technology, and process control. This provides theoretical support and practical guidance for improving highway quality and extending the service life of asphalt pavement, and helps to promote the sustainable development of transportation infrastructure in the construction of a strong transportation country in China.

Keywords

New Era; Highway engineering; Asphalt roadbed and pavement; Flatness control; Construction technology

新时期公路工程中沥青路基路面平整度控制研究

梁斌

阿拉善盟交通运输事业发展中心巴彦浩特公路养护工区，中国 · 内蒙古 阿拉善 750306

摘　要

随着我国公路等交通基础设施建设的快速发展，公路作为综合交通大运输体系中的重要组成部分，交通是否顺畅及安全成为人们关注的焦点。由于沥青路基路面在行车舒适性、养护等方面具有一定的优势，近年来公路建设中沥青路基路面应用较为广泛，但路面不平整度也是影响沥青路基路面使用性能的重要因素。笔者结合新时期相关施工技术及施工规范，梳理总结了影响沥青路基路面平整度的因素，并从原材料、施工工艺、过程控制等维度提出了控制措施，为提升公路质量、延长沥青路面使用寿命提供理论支撑与实践指导，为我国交通强国建设中交通基础设施的可持续发展提供助力。

关键词

新时期；公路工程；沥青路基路面；平整度控制；施工工艺

1 引言

新时期以来，我国的公路建设正在步入高质量发展阶段，在规模持续扩张的过程中对于工程的质量要求也在进一步提高，沥青路基路面作为公路结构的核心层，其平整度直接影响到行车舒适性、安全性和耐久性，路基路面的平整度可以降低冲击，减少行驶阻力，降低车辆的早期破坏程度，反之，则增加行驶中的阻力，增加油耗并引起交通事故，减少车辆使用寿命。当前施工中，受材料性能变化、施工工艺不良、机具精度不足、环境干扰等因素，在平整度控制中尚存有：基层处理不当导致的沉降不均；混合料配比不当导致的离析；碾压参数不当导致的密实度不匀等问题，给使用和养护带来额外成本，有悖于“提质增效、绿色可持续”建设理念。因此探索平整度控制措施，对提高工程质量、满足社会发展需要具有重要意义。

2 沥青路基路面平整度的影响因素分析

沥青路基路面平整度的影响因素是多方面的，从设计到施工，从材料到环境，多种因素都在其中发挥作用，只有了解各种因素的作用机理，才能采取行之有效的控制措施。

2.1 基层施工质量的影响

基层作为沥青路面结构的承载层，其平整度是保证面层平整度的基础，基层面凹凸不平、局部沉降、松散会使面层摊铺厚度不均，导致面层平整度不佳。基层碾压不到位，极易产生塑性变形，随着行车荷载的作用会逐渐沉降，导致

【作者简介】梁斌（1974–），男，中国甘肃民勤人，工程师，从事道路高效预防性养护与再生利用研究。

面层凹陷。基层边缘碾压不充分，易造成面层边缘破碎，出现台阶高差。基层面层施工过程中，对施工高程控制不到位，超过偏差规范要求，同样对面层平整度产生直接影响 [1]。

2.2 材料性能的影响

沥青混合料的性能是影响路面平整度的主要因素之一，一方面，沥青的标号、针入度、延度等性能影响混合料的粘聚性、稳定性，沥青标号选择不当，易导致高温车辙、低温开裂，破坏路面平整度；另一方面，集料的级配、粒径、棱角性等性能影响沥青混合料的均匀性，集料级配选择不当，易造成混合料离析，粗集料富集区易产生松散、麻面，细集料富集区易产生壅包，两者均易降低路面平整度。

2.3 施工工艺的影响

施工工艺是平整度控制的重要环节，例如摊铺、碾压等。摊铺过程中摊铺机前进速度不一致，速度过快易导致摊铺厚度不均且沥青易老化，过慢则会因集料摊铺不到位、混合料流动性差造成摊铺不均。碾压工艺中，碾压温度、碾压速度、碾压次数、碾压方式的选择至关重要：碾压温度低则混合料不易压实，易造成摊铺不均；碾压速度不一致或碾压次数不足会导致路面密实度不均，产生高低差。

2.4 环境因素的影响

环境条件对沥青路基路面平整度的影响也不可忽视，温度是影响路基路面平整度的最主要因素，温度高时沥青混合料容易发生塑性变形，在车辆荷载作用下容易出现推移车辙；温度低时沥青混合料易呈现脆性，容易因收缩产生裂缝，影响平整度。此外，雨后基层含水率增大，基层承载力变差，雨后施工易导致基层下沉；大风天气会使沥青混合料摊铺温度下降，局部温度下降过快，碾压效果差。

2.5 设备与人员因素的影响

施工机械设备的性能精度，直接关系到施工的质量。摊铺机的熨平板磨损、振捣器工作异常，都会导致摊铺不平整；压路机的压轮磨损、碾压机位偏差、碾压轮不平稳，均会影响碾压质量；此外，施工人员自身的水平和责任心也非常关键，如果施工人员对设备的参数控制不正确、对施工要求不严格执行，随意调整摊铺厚度，碾压漏压、过压等现象都会导致路面不平整 [2]。

3 沥青路基路面平整度控制的关键措施

3.1 材料选择与质量控制

材料是沥青路面平整度的源头及根本因素，其优劣直接决定了后续施工及路用寿命的稳定性。故应尽可能从源头上保障沥青路面的使用寿命。合理选用沥青材料，结合本工程所在气候分区、极端气温、降雨量等条件进行选用，并通过试验选取适宜沥青型号，如：高温区（年最高气温≥ 35℃）选用 PI ≥ -1.0，软化点≥ 50℃的高温型改性沥青，其具备粘度大、抗变形能力强的特性，减少车辙；严寒区（冬季最低气温＜ -20℃）选用延度（10℃）≥ 20cm 的低温型沥青，其具备良好的低温柔韧性，不易产生收缩裂纹。合理选用集料级配，集料级配应结合设计要求的混合料类型（AC、SMA、T3、T4、T6、T7）及粒级范围等进行沥青混合料选用，施工前应进行粗集料与细集料筛分试验，使各沥青混合料筛孔（0.075mm、2.36mm、4.75mm）的偏差在 ±2% 以内 [3]。同时，粗集料选用压碎值≤ 26%、洛杉矶磨耗损失≤ 28% 的玄武岩或者花岗岩，保证棱角性和嵌挤性，细集料控制含泥量≤ 3%，防止粘土颗粒影响沥青与集料的粘附性，从源头降低离析发生概率。严控拌合质量需要依托于智能化拌合站：油石比差值控制在 ±0.3% 以内，实时监控沥青喷量，防止油石比过大或者过小造成沥青泛油或松散；拌合温度按照沥青种类进行控制，普通沥青为 150-170℃，改性沥青为 165-185℃，保证沥青能够充分裹附集料且不发生老化；拌合时间干拌 10-15 秒，湿拌 30-45 秒，确保混合料颜色均匀、无花白料，卸料时采取防离析装置，防止粗细集料发生离析，为后期摊铺平整度打下基础。

3.2 基层施工质量控制

基层是沥青路面铺筑的基础结构，基层的平整稳定为路面铺筑提供施工基准，基层的施工必须全过程控制，才能确保路面铺筑质量。加强基层地基基础处理，因地基土质不同，选用不同的处理方法：当软土地基≤ 3m 时采用砂垫换填砂土 + 塑料排水板排水固结，换填砂土为中粗砂，压实度控制在 96%-98%，当软土地基＞ 3m 时采用水泥土搅拌桩复合地基，当桩端进入硬土层≥ 1m、桩的承载力≥ 150kN，地基承载力特征值达到设计要求的 180kPa 以上时，方进入下道工序施工。基层高程与平整度控制采用数字化施工技术：摊铺前利用全站仪三维坐标系统控制基层高程，控制在 ±10mm 以内，摊铺时摊铺机采用超声波找平机实时测量和自动调整控制基层表面高程，摊铺厚度偏差控制在≤ 5mm。摊铺后及时用平地机精细整平，采用先低后高、先边后中的方法，每次刮平≥ 50m，精平后用 3m 直尺检查平整度，误差≤ 5mm，局部超差时，需人工找补或铣刨处理，确保基层表面平整度顺接。加强基层碾压，根据不同基层材料选择适宜的碾压参数，水泥稳定碎石基层，选用振动压路机（20t）碾压，初压静压 1 遍，速度为 1.5km/h，复压动压 3-4 遍，动频 30-50Hz，速度为 2km/h，终压静压 2 遍，速度 2.5km/h，先轻后重，先慢后快，先低后高，碾压至压实度≥ 98%，碾压后及时覆盖土布，洒水养护。养护时间不少于 7d，养护期间严禁一切车辆通行，确保基层不干缩变形或下沉出现裂缝，为面层施工打下良好的稳定基础。

3.3 沥青面层施工工艺优化

沥青面层是受行车直接碾压的结构层次，面层的施工工艺是对沥青路用平整度起决定作用的关键工序，摊铺工艺参数控制，摊铺前将摊铺机调整好后，确保熨平板温度达到 100-120℃，沥青混合料的振捣次数根据沥青混合料类型不同调整，AC 型沥青混合料 40-50Hz，SMA 型沥青混合

料 30-40Hz，使沥青混合料的摊铺层初层密实度均匀一致，摊铺机前进速度 2-6m/min，拌合站根据产量持续供料，使摊铺机不出现等料停机情况，摊铺机停机时间超过 30 分钟时，将摊铺层设置成施工缝。摊铺机在摊铺前进时，派专人检测摊铺厚度，钻芯法每 50 米检查 1 次，摊铺厚度控制在 -5mm 到 +10mm 之间，弯道、坡道等特殊部位摊铺机行驶速度放缓至 2-3m/min，同时调整摊铺机熨平板的仰角度，与路面的横坡相适应，摊铺后用铝合金直尺检查平整度，偏差不超过 3mm，确保摊铺层平整无波浪形起伏 [4]。碾压温度和步骤要正确：初压，10-12t 双钢轮压路机在沥青混合料 130-150℃时压 2 遍，碾压速度 1.5-2km/h，从低向高碾压，轮迹重叠 1/3 轮宽，压紧混合料防止推移；复压，25t 胶轮压路机在沥青混合料 110-130℃时压 4-6 遍，通过胶轮揉搓滚压密实，碾压速度 2.5-3.5km/h；13t 双钢轮振动压路机用于 SMA 型混合料碾压，在 130-150℃时碾压 3-4 遍，频率 40-50Hz，压实度 96% 以上；终压，10t 双钢轮压路机在沥青混合料 80-100℃时压 2 遍，碾压速度 2-3km/h，碾压结束时，确保轮迹平整。接缝要平顺：纵缝梯队摊铺时，前幅摊铺预留 10-20cm 宽度不碾压，确保接头处温度不低于 100℃，后幅摊铺时将熨平板搭在前幅预留的 10-20cm 宽度上，一起滚压，接头处的纵缝高程误差≤ 3mm；冷接缝，已压实的路面边部，用切缝机切垂直面，剔出碎料，涂乳化沥青粘层油至路面边缘，用量 0.3-0.5L/m²，摊铺机熨平板预热接缝，温度不低于 80℃，新摊铺的沥青混合料比已摊铺路面高出 5-10mm，碾压时先横压后纵压，接头平顺，不得出现台阶。横向接缝采用平接法，摊铺时直尺端部平接摊铺，不合格部分需切除，摊铺前涂粘层，摊铺机从接缝处开始摊铺，碾压时先横压 1-2 遍，再纵压 1 遍，确保横缝处密实平整，3m 直尺平整度偏差≤ 3mm，确保路面平整连接。

4 质量检测与后期养护管理

新时期公路工程必须要进一步严格质量检测，构建全程检测体系，做好养护工作，保障路面质量。

4.1 施工过程中的质量检测

施工过程中的质量检测是沥青路基路面平整度控制的关键，建立实时检测和抽检相结合的控制机制。实时检测摊铺参数，用全站仪每 50m 监测一次，高程偏差 ±5mm。用水准仪每 20m 检测摊铺厚度一次，偏差≤ ±10mm。用专职人员每 10min 检测一次温度，混合料温度在 135-165℃之间时，改性沥青混合料温度控制在 165-185℃之间，温度异常时，需及时调整拌合站或摊铺机参数。

采用灌砂法每 200 米检查 2 处，碾压压实度≥ 96%；2m 直尺每 200 米检测 10 处，平整度超过 5mm 时，铣刨重铺；连续式平整度仪每公里检查一次，IRI 指标满足设计值要求。材料试验贯穿全过程，每日从拌合站及现场取样 3 个，检查其马歇尔稳定度（≥ 8kN）、流值（20-40×0.1mm）及空隙率（3%-5%），发现问题立即停工整改 [5]。

4.2 后期养护管理措施

后期养护是平整度保持的长效保证，建立“日常检查 + 定期检测”制度。每日进行日常检查，排查裂缝、坑槽等病害；每月用激光平整度仪检查，每 500 米取点，绘制趋势图辅助决策。

针对性治理病害：局部壅包、坑槽＜ 5cm 时，铣刨重铺并保持四周与周边高差≤ 3mm；0.2-5mm 裂隙采用灌注胶封处理；针对车辙，＜ 5mm 时采用微表处处理，＞ 15mm 时采用 4-6cm 薄层罩面处理。合理制定养护计划，结合使用年限（每 3 年一个周期）、车流量，动态调整养护计划，重点养护平整度不满足要求的路段；采用雾封层等技术强化养护，控制病害发展，降低养护费用 30% 以上，延长路面平整状态的持续时间。

5 结语

沥青路面平整度作为沥青路面路基路面质量检测的一个关键性指标，也是影响道路交通运行质量的关键因素，沥青路面的平整度水平直接影响到交通运营质量和工程使用寿命。影响沥青路面平整度的因素包括基层质量、材料质量、施工质量、环境因素，要从材料源头、基层施工、路面面层施工、质量检测等各方面加强控制。在施工环节，要结合实际，灵活运用施工技术，提升施工人员的专业能力，将技术标准与施工实际充分结合，通过有效的平整度控制来最大程度地避免路面早期病害的出现，延长路面使用寿命，节省养护成本。在智慧建造技术广泛应用的背景下，平整度的控制效果将更为精准、有效，为交通强国公路建设打下良好的基础。

参考文献

[1] 董梦雨.基于路基表面不均匀特性的沥青路面受力研究[D].东南大学,2023.

[2] 赵寿基.沥青公路路基路面排水设计研究[J].黑龙江交通科技,2021,44(11):17+19.

[3] 张印.公路工程中沥青路基路面平整度控制研究[J].工程技术研究,2020,5(04):147-148.

[4] 李永刚.路基对沥青路面平整度的影响机理及防治措施[J].交通世界,2022,(14):131-133.

[5] 杨永朋.沥青公路路基路面排水设计探讨[J].四川建材,2021,47(06):150-151.

 DOI: https://doi.org/10.12349/foer.v2i3.6607

Comprehensive Analysis of Several Issues Concerning the Inspection, Appraisal, and Reinforcement of Building Structures

Zhiqiu Wu Yun Miao Xue Ding

Huaian Construction Quality Inspection Center Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu, 223003, China

Abstract

With the increasing emphasis on building safety, especially concerns about aging buildings and special building stability issues, structural testing, identification, and reinforcement are important links to ensure building safety. However, carrying out structural testing, identification, and reinforcement work will face many technical problems. This article elaborates on the main technical means of building structure inspection, identification, and reinforcement, deeply analyzes the prominent problems in the strengthening stage, and proposes solutions. Based on the actual situation in Beijing, compare the application effects of new and old technologies in new and traditional buildings, in order to provide reference for the development and practical application of new technologies.

Keywords

Building structure testing; Structural identification; Structural reinforcement; Technical challenges

建筑结构检测鉴定加固若干问题的综合分析

吴志球 缪赟 丁雪

淮安市建筑工程质量检测中心有限公司，中国 · 江苏 淮安 223003

摘 要

随着人们对建筑物安全性的重视，尤其是老化的建筑物和特殊的建筑物稳定性问题的担忧，建筑结构检测、鉴定及加固是确保建筑物安全的重要环节，而开展建筑结构检测、鉴定和加固工作会面临很多技术问题。本文阐述了建筑结构检测、鉴定和加固的主要技术手段，深入分析加强阶段存在的突出问题，并提出了解决对策。根据北京地区实际，比较新老技术在新型建筑和传统建筑上的应用效果，以期对新技术的开发和实际应用提供参考。

关键词

建筑结构检测；结构鉴定；结构加固；技术挑战

1 引言

城市发展使楼房数目和年限在不断地提升，这也加重了人们对建筑安全性检查的重视。尤其是处于老旧状态的建筑及危险区域的建筑，它们更需要对其进行结构检查、检测、评定和加厚处理，虽然人们较早就采用了此方法，但此方法的准确性和适用性仍有待改善，随着现代科技的发展，更加方便的结构检查方法以及更高层次结构加固材料的出现，也可以在一定程度上提升建筑结构的安全系数，但是，在工程现实施工中还存在着如何正确和有效组织结构检查及加固处理等诸多问题。本文研究的主要目的是详细阐述建筑结构检定评定及加厚处理的主要难点，分析目前存在的一些技术问题，并尝试通过新型技术提出一些解决方案，以便更好地促进这一领域的技术探索与创新，为这一问题的解决提供借鉴 [1]。

【作者简介】吴志球（1986–），男，中国江苏淮安人，本科，高级工程师，从事建筑工程质量检验检测、施工质量评价、建筑安全评价等研究。

2 研究背景与意义

2.1 城市化进程中的建筑安全问题

随着中国的都市化进程加快，新增和改扩建的建筑物日益增多，建筑结构的安全问题日益凸显，尤其是历史悠久的旧有建筑物、改、扩建的建筑结构，由于长期缺乏维修、规划设计观念陈旧、改变其使用功能、建筑外部环境改变等因素造成建筑结构安全性不断下降。根据近年来北京大量的城市建设及改扩建计划，对旧城的改造、提升是城市进化的必然要求，但在这一过程中对旧有建筑物的安全状态评估并进行有效的加固改造也是一个极其重要的工作。为确保建筑结构的长久安全，对建筑结构的检验评价起着关键性的作用。随着城市化进程的加快导致了建筑密度的增加，对建筑

结构的检测需求愈加迫切，尤其是当发生地震、恶劣气候等灾害性的事件，建筑结构安全的重要性更为突出。因此，对建筑结构检验鉴定技术现状的研究和分析，对未来发展方向的研究，对保障城市安全，维护社会稳定，保障人民群众的利益至关重要。

2.2 检测鉴定与加固的应用重要性

建筑设计检测评估是为建筑物安全和延长使用年限做保证的重要措施，它可以及时发现建筑物存在的潜在危险隐患，比如裂缝、变形、材料老化等，并以此为基础决定后期加强处理的手段。建筑设计加强是对建筑物安全、抗地震能力、新功能等的延续重要保证。随着科技发展，建筑物加强类型越来越丰富，既有传统的内部加强型又有新型的复合材料型加强法，有利于不断延长建筑的使用寿命和安全性。尤其像北京人口多密集的城市，建筑设计检测评估与加强工作有重要意义。建筑物加强法既是对建筑物抗地震能力的一种加强，也可以辅助保护古代建筑物本身价值，避免因破坏而产生安全事故的发生。因此建筑设计检测评估与加强技术不仅关系到建筑物本身的安全，还有更深远的影响城市发展趋势和人们的生活 [2]。

3 建筑结构检测技术的现状与挑战

3.1 传统检测技术的应用与局限

对于检测建筑物的检查方法，检测过程始终采用非常关键的无损检测技术与有损检测技术作为两种最常见的检测技术。

3.1.1 无损检测技术

无损检测方法是指能够在不损害建筑结构总体的前提下对其健康状态和功能进行评定的技术。常用的无损检测技术有超声波检测、雷达技术、红外线检测等。此类检测方法具有方便快捷、不需要破坏建筑结构的优点，因此适用于对墙壁、横梁或其他结构的检测，例如超声波检测能够基于声在建筑材料中的传播情况去分析物质内的缺陷，从而发现诸如裂隙、孔洞等缺陷。红外线检测则是基于温度差的变化，通过热敏元件将表面上的异常变化记录下来。这类非侵入式的检测方法虽然是无害、有效的，然而在面对复杂的建造结构或者大批量的建筑设施时，准确性与深入性总会受限，此外，这些检测方法针对不同材料与结构时可能会存在差异，因此需结合不同的检测仪器以全面解析。

3.1.2 有损检测技术

有损检测技术是指通过轻微的破坏来测得较精确的检测结果，包括钻芯检测、材料强度试验等多种手段。可以实测建筑结构材料的物化性能和耐力、强度及结构承载能力。而有损检测虽然能够让我们获得更多更准确的结果，但是却破坏了建筑结构，会影响建筑的使用价值和结构稳定性，因此必须要控制好破坏的范围以及深度。此外，由于有损检测多用做局部检查，也可能导致施工周期和成本的增长，常常作为一种辅助检测方法，与无损检测共同使用 [3]。

3.2 新型检测技术的出现与发展

科学技术的发展使得传统的检测方式逐步凸显出不足，新的检测技术也得到了应用与发展。这样的检测技术可以提高检测的精度以及检测的效率，并在大体量以及复杂结构当中发挥重要作用。

3.2.1 激光扫描与三维建模技术

激光扫描技术可以及时获取建筑内外部的构成信息并形成三维集合体，建立详细的三维模型，描述建筑外形构造，没有建筑无法适用，特别适用于高大建筑或大型建筑工程。通过分析、研究这些扫描数据，就可以实时获取有关建筑的位置转移或下沉的数据，从而对它的稳定情况进行评估，在三维建模技术下，健康状况信息也可以直观呈现，有利于读取效果的提高。而这个技术精准度和设备价格相对于其他技术相对较高，所以在真正应用时应该根据实际建筑的类型和检测要求进行合理选择。

3.2.2 无线传感技术

无线传感技术是指通过在关键地点布设传感器实时监测结构应力变化的方法。这种传感器可将测量结果通过无线通讯传输至管理中心室以实现实时信息监测与分析。该无线传感技术具备高效性、及时性和非侵入性特点，可以对建筑整个生命周期内进行监测，适合于老化或存在缺陷的建筑物、桥梁等结构长时间监测，相较人工检测方法，提供更详尽、多样化的监测结果。而这种技术虽在持续监测和数据分析方面优势突出，但是其初次配置成本较高，对于传感器的精度与稳定性要求较高。

4 工程结构加固法的应用问题及难点

4.1 传统加固技术的回顾与问题

4.1.1 外部加固法

外加加固技术即对建筑体附加加固构件，或者增加其承载能力和耐久性进行加固，目前常见的加固方法主要有黏钢加固、外包钢加固、碳纤维增强复合材料 (FRP) 加固。外加加固方法较为简便且无需拆除过多部分，可用于不同的建筑加固；但该方法也存在一定的缺陷。例如在进行黏钢加固时，需要将墙体表面处理，此外，钢自身有耐久性限制，当处于水蒸气环境中时，钢会容易被氧化，使加固效果变差。同时在外包钢加固时会对建筑整体重量增加，影响了结构本身的稳定性和安全性；由于碳纤维增强复合材料抗拉强度极大，在操作过程中必须将原料作仔细处理，而长期处于环境作用下，其粘结强度存在衰减的可能。

4.1.2 内部加固法

核心支撑加固一般是通过改变建 (构) 筑的内部结构增强建 (构) 筑的整体承载能力。该方式通常包括增设支柱、横板等，或者改变楼板结构等。采用此种方法能够大幅提高建筑物的稳定性、抵抗外界不利因素影响，具有较强的耐久

性。但采取此种方法可能会对原有建筑物产生一定的损伤或改造，从而对原有功能造成一定的影响，且耗时较长。例如增设支柱时可能需要对原有墙壁进行拆除，增加了建 (构) 筑物的工作量。同时因为内支撑无法完全适应部分区域的荷载需求，特别是对地基和楼层的加强，常需要结合外部加固进行应用。

4.2 新型加固技术的推广与挑战

4.2.1 纤维增强复合材料（FRP）加固

纤维增强聚合物 (FRP) 加固方法近年来被广泛使用。纤维增强聚合物 FRP 具有的高强度与高韧性、自重轻、抗腐蚀、操作简单等特点，使其成为建筑加固加强刚度和抗剪切力的重要方法。通过将碳纤维或玻璃纤维等合成材质粘贴在建筑的表层，来增强抗弯抗剪能力，从而延长建筑的寿命。对于腐蚀严重的恶劣环境下，FRP 的长期性以及其耐腐蚀性能具有显著特点，是建筑加强的理想材料。但是由于 FRP 黏结性能受施工环境的温度、湿度等制约，这也决定了其加固效果; 其次，对 FRP 的使用周期需要更多的证据予以佐证，尤其对于恶劣环境下的长期耐久性如何，仍然是迫切需要解决的问题 [5]。

4.2.2 自修复材料在加固中的应用

新型自修复性材料作为一种全新的加固手段，具有自我修复损坏及裂纹等特点，因此在建筑加固领域有着巨大的开发潜力。这类材料是经过特殊设计使其在建筑物出现问题裂痕或损坏时自动释放修补剂并将它们填充入建筑之中从而复原材料最初的性能。由于自修复性材料具有极强的维护性质和作用时效长等特点，因此适合用于经久运行的建筑设施构件中，例如年代久远的桥梁建筑和摩天大楼等。虽然自修复性材料有诸多的优点和发展潜力，但也面临着技术研发和经济管理方面的考验。自修复性材料的制作和原料成本较高，而且其修复效果是否能够达到理想化还需要继续针对不同材料进行各种不同环境条件下的实验和研究。因此，在实际应用领域一般要结合其它加固方法与之联合使用才能使效果更佳 [4]。

4.3 加固技术的适用性与经济性分析

4.3.1 针对不同类型建筑的加固方案

根据不同的建筑类型的独特构造特性、作用目的以及所受到压力状况，对其采取的加固手法也可能不一样。例如老式公寓楼和超高层建筑需要采取的加固方法就大相径庭。前者注重的基础下沉、墙体裂缝等的问题，后者是注重的提高建筑对抗地震和大风的能力。因此，要想适应不同建筑需要采取的加固措施，就应当依据建筑的情况采取合适的加固技术。就基础下沉问题而言，则需要采用的深基础混合法、灌浆加固技术等；对于抗震能力差的大型建筑，则可采用周边的加固技术、设置内柱加固的方法等。根据正确的技术选用，提高建筑物的安全系数，延长它的寿命。

4.3.2 成本与效益的权衡

强化工程施工过程中的利益和成本是一个很关键的问题。通常，由于强化工程必然会造成较多的成本消耗，包括材料费、人工费和机械费等，因此我们要将预期强化过程的强化效果和实施过程所消耗的代价相对比较一下。有时候选择高等级的技术可能会产生比较好的强化效果，比如增强结构物的安全强度、提高使用年限和降低维修费用等等，但是高等级的技术虽然前期投入成本较高，但同时也有可能会造成整个工程成本超出计划的总额。有时候，会选择成本比较低的技术，节约了初期投入的成本，但是后期如果出现问题可能需要更多的时间进行修复或维护，这样也会造成后期成本的增高。综合考虑成本收益状况，以建筑本身为基础，强化的需求、计划约束条件为基础，科学进行强化方式的选择，达到社会成本和工程安全的利益双赢。

5 结论

建筑物需要在检查、评估、修缮的过程中保持稳固的运行，但目前存在检测方法不准、评价标准不全、修复方法有限等问题。对于复杂的建筑物，传统的方法未必能带来足够高的精度和全面性，针对新型的材料或是特殊的建筑模式，目前的评价规范也欠完善。对于修复方案而言，新型的材料和新型技术虽然被使用，但其是否能达到长久的稳固、带来的经济效益、是否具有绿色环保能力还需验证。为了增加建筑物的稳固程度，应加大智能化和信息化的投入，推动检查和修复技术的发展和集成，寻求更为高效并且可持续发展的方式处理不断出现的建筑问题，来维护城市的安宁和可持续。

参考文献

[1] 王国华; 陈明宇; 李晓辉. 建筑结构检测技术的现状与发展趋势[J]. 建筑工程技术与设计, 2023(4): 45-48.

[2] 张继伟; 刘建国; 黄子俊. 城市建筑加固技术的应用与挑战分析[J]. 建筑科学, 2022(8): 71-74.

[3] 杨光明; 刘飞翔; 胡泽涛. 结构鉴定方法的研究进展与应用[J]. 土木工程学报, 2021(12): 56-59.

[4] 孙泽仁; 李永安; 赵文斌. 老旧建筑加固中的问题与对策研究[J]. 现代建筑技术, 2023(5): 112-115.

[5] 周志刚; 王瑞杰; 马志鹏. 建筑结构加固设计中的关键技术分析[J]. 工程建设与设计, 2024(3): 89-92.

 DOI: https://doi.org/10.12349/foer.v2i3.6608

Optimization strategy of drilling technology in deep resource exploration

Xuanxuan Zhou

Anhui Provincial Coalfield Geological Bureau First Exploration Team, Huainan, Anhui, 232000, China

Abstract

With the gradual depletion of shallow and shallow resources in China, deep resource exploration has become an important direction to ensure national energy security. The deep geological environment has high temperature, high pressure, complex geological structure, low drilling efficiency, frequent accidents, and serious equipment losses. This article takes deep resource exploration as the background and drilling technology optimization as the starting point. Starting from four aspects: drilling method selection, equipment upgrading, drilling fluid system optimization, safety control, and intelligent application, a systematic optimization plan is proposed. By verifying a case study of deep metal mineral resource exploration, we aim to effectively improve the efficiency and safety level of deep resource exploration, and provide reliable technical references for similar deep exploration in China.

Keywords

deep resource exploration; Drilling technology; optimization strategy

深部资源勘探中钻探工艺优化策略

周宣扬

安徽省煤田地质局第一勘探队，中国 · 安徽 淮南 232000

摘　要

随着中国浅部浅层资源日趋枯竭，深部资源勘探已成为保障国家能源安全的重要方向。深部地质环境温度高，压力大，地质结构复杂，钻井效率低，事故频发，设备损失严重。本文以深部资源勘探为背景，以钻井技术优化为切入点，从钻井方式选择、装备升级、钻井液体系优化、安全控制和智能应用四个方面入手，提出一套系统的优化方案。通过对某深部金属矿产资源勘探实例进行验证，以有效提高深部资源勘探效率和安全水平，为中国类似深度勘探提供可靠的技术借鉴。

关键词

深部资源勘探；钻探工艺；优化策略

1 引言

当前全球对资源需求的不断增加，深部资源（一般为 1000 m 以下）已成为世界各国争夺资源的战略焦点。中国深部资源潜力巨大，地质调查表明 1000-2000 m 深部蕴藏着 3-5 倍的矿产资源，但目前深部勘探程度还不到 20%。深部地质环境明显不同于浅部，随着深度的增大，地温梯度增大，百米地温梯度一般在 2~5℃左右，部分地区地温达 150℃以上；地应力随着深度的增加呈线性增加，2000 m 以下地应力达 50~80 MPa；同时，深部地层普遍伴有断层破碎带、高压水等复杂结构，造成钻进过程中钻头磨损加剧、井眼失稳、卡钻等现象，严重影响勘探进度和成本。因此，针对深部地质特征进行钻井工艺优化是突破深部勘探技术瓶颈的核心任务。

【作者简介】周宣扬（1980–），男，中国安徽安庆人，本科，工程师，从事探矿工程研究。

2 深部地质条件对钻探工艺的影响分析

2.1 深部地质环境特征

深部地质环境具有三方面的特殊性：1）高地温环境，1000 m 以下（2000 m~80-150℃）地层温度＞ 40℃；高温不仅对钻井液胶体稳定性产生影响，而且使材料力学性能下降，如：当温度升高时，钢的屈服强度下降，120℃时可达 20% 以上。2）是高地应力环境，深部地层受水平和垂向应力耦合作用，应力分布复杂，成井后应力集中现象明显，极易引起井壁坍塌或缩径，特别是靠近断层时，应力释放可引起井壁瞬时失稳 [1]。3) 复杂的地层结构，深部地层经历了多期次的地质活动，断裂、褶皱和裂缝发育，常伴有高压水、破碎带和硬夹层，在钻井过程中极易发生漏失、突水、卡钻等地质灾害。

2.2 对钻探工艺的核心挑战

在钻井效率上，由于硬岩（单轴抗压强度大于 100 MPa)，金刚石钻头钻进硬岩深度不到浅部 1/3，起钻频繁，非生产

时间增加。在钻孔稳定性方面，由于高应力和地层渗透率的差异，使得井眼容易发生坍缩或扩径，某深部金矿勘探资料表明，破碎带区井眼扩展率高达 30%-50%，造成套管下困难 [2]。在井内安全方面，钻井液性能在高温高压环境中失效易诱发井喷，复杂地层中易发生磨损性加剧，导致钻断事故比浅部高出 4-6 倍。在装备适应性方面，传统钻井装备的动力系统和冷却系统很难满足深部钻井作业的需求，如高温下液压系统易发生渗漏，影响钻井参数的稳定性。

2.3 工艺优化的理论依据

钻进工艺优化是破岩力学、井眼力学和流体力学等多学科交叉的理论基础。岩石破岩理论认为，深部岩石脆 - 塑转换特征要求钻进模式由冲击破碎向剪切破碎转变，提高钻头齿比压力，实现高效破岩。根据井眼力学分析结果，根据霍克—布朗判别准则，确定钻井液密度和地应力之间的平衡关系，确定合理的钻井液密度窗口 [3]。以流体动力学理论为指导，考虑粘度 - 温度 - 压力多场耦合作用对钻井液流变性能的影响，并通过添加剂分子设计实现其性能稳定。同时，深部钻进经济性分析要求工艺优化兼顾效率提高和成本控制，形成技术经济协同优化模式。

3 深部钻探工艺的多维度优化策略

3.1 钻进方法与钻头选型优化

针对深部不同岩性地层，需要建立差别化钻井方法体系，在花岗岩等硬岩地层（如花岗岩），推广高效潜孔锤空气钻进工艺，采用高气压（110-150 mm）潜孔锤（工作压力 1.5-2.5 MPa)，配合球齿合金钻头，利用高频冲击（每分钟 800-1200 次）破岩破岩，比传统旋转钻进效率提高 2-3 倍。针对软、中硬地层（砂岩、泥岩等），采用 PDC 钻头定向钻进技术，选用胎体 PDC 钻头，设计合理的刀翼倾角（15° -20°)和布齿密度，利用多晶金刚石的高耐磨特性，实现连续切削；同时，采用随钻测量系统对井眼轨迹进行控制，满足勘探精度要求。

针对复杂夹层地层，创新性地提出复合钻井模式：遇“硬岩 - 软岩互层”地层时，利用自动送钻系统实时调整钻进压力（波动范围不超过 ±5%)，避免软岩段钻进压力过大引起井眼扩径、硬岩段钻进压力不足而影响效率的问题。钻头材质方面，研制耐高温耐磨复合材料，如在钻头胎体中加入碳化钨颗粒，使钻头在 150℃高温下耐磨，使钻头使用寿命超过 40%。

3.2 钻探设备性能升级

深钻装备的升级换代，重点需要解决动力、散热和控制三个方面的协同强化问题。钻机采用双变量活塞泵驱动，输出功率可提高到 300-500 kW，峰值扭矩 8000 N. m，可满足 2000 米以下深度钻井动力要求；同时配有电液比例控制系统，无级调钻压力、速度和给进速度，以适应不同地层条件下钻进参数的匹配。冷却方式为双循环冷却方式，主循环采用强制风冷式散热器控制液压油温度（≤ 60℃），辅助循环采用井口换热器对钻井液进行预冷，降低井底钻井液温度 15-20℃，缓解高温对钻井液性能的影响。

在设备智能化改造方面，集成物联网模块，实现关键参数实时监控，如在钻杆接头安装温度传感器（-40-200 oC)，动力头安装扭矩传感器（精度 ±1%)，将采集到的数据通过 5 G 传输到地面控制系统，当参数超过临界值时，自动报警并启动保护机制，如扭矩超限，则自动降速。另外，研制模块化钻机结构，采用快速拆卸设计，缩短设备迁移时间，以适应深部勘探场地狭窄的特点。

3.3 钻井液体系配方优化

深部钻井液具有携岩、护壁、降温润滑等功能，针对高温高压环境，研究耐盐耐高温钻井液体系。基本配方为膨润土，加入复合处理剂：高温稳定剂选择有机硅树脂（添加量 3-5%)，在粘土颗粒表面形成一层保护膜，阻止高温下粘土的水化分散；选用 2-4% 的磺化酚醛树脂作为降滤失剂，其芳环结构在 180℃温度下仍然稳定，钻井液滤失量可控制在 5 mL/30 分钟以内；选用植物油基酯（添加量 1-2%)，使钻具摩擦系数小于 0.15，降低卡钻风险。

以高压含水层为研究对象，优化钻井液密度调控方法，采用分层密度均衡技术，依据地层压力预测资料，将钻井液密度由井口至井底分 3-5 个井段进行调整，各井段密度差值为 0.05-0.1 g/cm³，以防止因密度过高引起井漏和因密度不足引起井涌。将纳米碳酸钙(粒径 50-100 nm，添加量 1%-3% ）作为堵剂，利用纳米级颗粒填充岩石裂隙形成致密滤饼，封堵效率较传统堵剂提高 50% 以上。

3.4 孔内安全控制技术优化

井下安全管理的重点是事故的预防和快速处置，利用随钻测井技术获取地层电阻率、声波时差等参数，并结合地质模型，对可能发育的断层和含水岩层进行预调整，提前调整钻井液密度和钻进参数。当发现声波时差增加超过 20% 时，应立即降低钻井速度，增加钻井液粘度。

研发智能解卡技术，在发生卡卡时，利用地面控制系统对卡卡类型进行分析：如果是粘卡卡，则启动循环冲洗系统，泵入解卡剂（柴油、表面活性剂和水 =3:1:6)，并借助钻杆轴向振动（10-20 Hz)，利用振动和化学作用协同解除粘卡。对于缩径卡钻时，应采用渐进式倒划法，控制起钻速率（≤ 0.5 m/s)，以防止强力起钻而造成钻断。另外，通过在杆柱设计中增设减震节，减小钻柱纵向振动，降低钻具的疲劳损伤。

4 案例分析

4.1 项目概况

深部铜镍矿勘探工程位于中国西北某成矿带，勘探深度 1500-2500 m，构造复杂，出露 3 条主断裂断裂带，地层以花岗岩、片麻岩为主，夹有大理岩，井底高温 120℃，地

应力 65 MPa。项目设计钻孔总进尺 5000 m，钻孔垂向误差不超过 1%，取心率≥ 85%。在前期的钻井过程中，机械钻速较低（平均 1.2 m/h）和井内事故频发，严重影响了钻探进度。

4.2 地质条件专项分析

通过详细的地质调查和地球物理测量，查明该区主要地质特征：1) 花岗岩单轴抗压强度 120-150 MPa、大理岩 80-100 MPa、片麻岩 60-80 MPa，并有 0.5-3 m 厚的破碎夹层。2) 地应力分布不均匀，断层附近的水平应力集中，为垂向应力的 1.5~2 倍，容易造成钻孔塌陷；3) 高温高压水共存，在 2000 m 以下存在高达 15 MPa 的承压含水层，再加上高温环境的影响，钻井液控制难度增大。在此基础上，提出硬岩高效破岩、井筒稳定控制和高温高压钻井液调控等工艺优化措施。

4.3 优化方案实施

根据项目的特点，提出了多维优化方案：

①钻孔系统：花岗岩段采用 200 Mpa 高风压潜孔锤，配合球齿钻头，冲击频率每分钟 1000 下，钻孔压力 18~22 kN；在片麻岩段更换为转速 80~100 r/min 的 5 刀翼 PDC 钻头，利用 LWD 系统实时调整井眼轨迹。

②钻井液系统：采用耐高温钻井液配方，以含水层段为 1.5 g/cm³，含水层段为 1.5 g/cm³，含水层段为 1.5 g/cm³。

③设备改造：对钻机进行改造，采用 400 KW 动力头钻机，采用双循环冷却系统，液压油温度低于 55℃；安装了智能监控系统，实现了扭矩、钻井压力和井温等 12 个参数的实时采集。

④安全措施：采用超前注浆预处理方法，注水泥 - 水玻璃双浆体（体积比 1:1），固化时间控制在 30 分钟以内；配有智能解卡装置，反应时间不超过 10 秒 .

4.4 实施效果

优化前后钻井技术指标有明显提高：钻井效率，平均机械钻速提高到 1.62 米 / 小时，较优化前提高 35%。井内安全方面，井内事故发生率下降到 1.4 公里 / 千米，下降 60%，没有出现大的卡钻、井喷事故；勘探质量方面，岩芯取芯率达 90% 以上，垂直度误差不超过 0.8%，达到了地质勘探的要求；经济效益上，单米钻进费用减少 18%，总工期减少 25 天，提前完成勘探任务。经一年多的跟踪监测，井眼稳定，井眼未见明显变形，说明优化设计是可行的。

5 结语

本文以深部资源勘探为背景，系统地开展了钻探工艺优化研究，发现：1）深部高温、高压和复杂结构是制约钻井效率和安全的核心因素；基于多学科交叉理论，有针对性地开展工艺优化设计。2）从钻井方式、装备性能、钻井液系统、安全控制和智能技术等五个方面建立一套能够有效提高深部钻井适应能力的优化体系，其中，高效破岩技术和智能监测系统的协同应用是关键突破口。3）通过工程实例验证，该方法可明显提高机械钻速，降低事故发生率，具有较好的技术经济价值和推广价值。今后的研究重点应集中在三个方面：1）研发抗高温钻井液处理剂和超硬复合材料钻头。2）系统智能化升级，以深度学习算法为基础，建立自主钻井决策模型，实现井眼状态预测和参数调整的完全自动化。3）技术集成创新，将定向钻井技术和 LWD 技术相结合，形成“探采结合”的综合钻井模式，提升深部资源勘探的综合效益。随着科技水平的不断提高，深部资源勘探钻井技术将不断向高效率、智能化和安全性方向发展，为中国深部资源开发利用提供技术支持。

参考文献

[1] 王宁.矿山地质钻探在资源勘探中的应用与优化研究[J].中国金属通报,2024,(12):167-169.

[2] 侯兴博.地质岩心钻探技术在矿产资源勘探中的应用[J].世界有色金属,2024,(03):160-162.

[3] 刘浩.地质岩心钻探技术及其在资源勘探中的应用研究[J].中国金属通报,2022,(01):181-183.

 DOI: https://doi.org/10.12349/foer.v2i3.6609

Analysis of the Application of Bending and Settling Test Detection Technology for Highway Subgrade and Pavement

Mingyang Li

Cangzhou Jingtong Engineering Testing Co., Ltd., Cangzhou, Hebei, 061000, China

Abstract

In recent years, with the continuous development of highway construction in China, the quality of pavements and subgrades has been increasingly valued. Road bending and settling detection, as a key means to evaluate highway quality, has been widely applied in multiple tasks such as highway construction and maintenance. This paper analyzes the current situation of bending and settling detection work, detection methods, and their actual roles in road construction, probes into the technical characteristics, detection methods, and influencing factors of bending and settling determination technology, aims to discuss the applicability and development trends of bending and settling detection in various types of pavements, and puts forward corresponding improvement suggestions, so as to provide references for improving road quality.

Keywords

highway subgrade; pavement bending and settling; test detection technology; application analysis; pavement quality

公路路基路面弯沉试验检测技术应用分析

李明阳

沧州市精通工程检测有限公司，中国 · 河北 沧州 061000

摘　要

近年来，随着中国公路建设的持续发展，路面与路基的质量愈发受到重视。道路弯沉检测作为评价公路质量的关键手段，在公路建设、养护等多项工作中得到了广泛应用。本文通过对弯沉检测工作的现状、检测方法及实际在道路施工中的作用进行分析，对弯沉测定技术的技术特点、检测方法及影响因素进行探究，旨在探讨弯沉检测在各种类型的路面的适用性及发展趋势，并对其给出了相应的改进建议，为提高道路质量提供参考。

关键词

公路路基；路面弯沉；试验检测技术；应用分析；路面质量

1 引言

随着中国公路建设的高速发展，公路基层路面及结构的性能对道路寿命及行车的安全性有着十分重要的影响。公路的强度、公路平顺度以及承载能力直接影响车辆的行车安全及舒适性。弯沉检测是一种评价路基路面施工质量、路面维修养护以及评定与检测的主要测试手段，具有无破坏性、简便易于操作的优势，目前在公路建设、路面养护与评定中应用极为广泛。弯沉检测可精确检测路面和路基的承载力与弯沉特性，帮助工程技术人员及时发现公路病害并做出必要的修复措施。本文主要研究弯沉检测技术在不同类型路面中的应用状况，及其在提升公路质量、保障交通安全方面的地位与作用。

【作者简介】李明阳（1996–），男，中国河北沧州人，本科，助理工程师，从事工程检测研究。

2 公路路基和路面质量的重要性

2.1 路基和路面对公路的影响

路面和路基作为公路组成结构中最为基础且关键的部分，其质量和承载力会直接影响到公路功能的有效发挥及使用寿命的长短。作为承受并传递车辆荷载的核心结构，路基必须具备足够的强度与刚度，以防止因地面沉降、结构变形引发的路基破坏，同时避免由此导致的路面施工条件恶化等问题，因此具有良好的路基是保证良好路面施工和形成顺利行车条件的基础，路基的行车质量直接影响了行车人用车的行车舒适程度和公路行车安全的重要性。而路面是整个道路直接承受由汽车交通所产生的冲击及磨耗等的作用部位，路面的行车条件不仅关系着人们的乘车舒适度，且对公路交通安全负有相当重要的作用。若路基、路面发生损坏，出现路基沉降、裂缝、滑塌等问题，不仅可能引发安全事故、缩短道路使用寿命，还会造成社会经济损失，因此维护高标准的道路路基路面是保障公路道路安全顺畅运行的重要因素 [1]。

2.2 路面质量检测的必要性

为了保障道路交通的安全性以及通行的舒适性，我们需要对公路的路况进行时时的检验与评定。汽车重量及交通量的增长都加速了路面的磨损程度，对公路的质量造成了较大的破坏，导致诸如路面的凹陷、龟裂、变形等问题加剧。因此，对其进行定期的路面路况评定，及时发现可能存在的道路质量问题，避免由于时间过长而未发现质量问题或是没有维护保养而造成的重大破坏和损失，为编制适当的维修与修理费用预算提供依据，从而尽可能的延长其使用寿命，获得更好的社会及经济价值，已经成为目前公路维修必不可少的步骤，公路弯沉试验已经成为其中重要的方式。

3 弯沉试验检测技术概述

3.1 弯沉试验的基本原理

弯沉法作为一种反应公路路面受力后弯沉值的路基路面质量检测方法，主要是向公路上施加特定的压力，观测和检测路表面中间和周边的垂直位移 (即弯沉值)，由此变化数据可以反映出路基和路面的抗压能力和形变性，并能在真实交通压力情况下反映路面状况，方便相关人员了解和确定路基路面状态，而弯沉值的大小和分布则主要受到路基土质、路基厚度和结构层材质以及受压程度等多种因素影响，弯沉值越大，表明路面结构的承载能力越弱，可能存在的问题主要包括路基沉降、路面结构性裂缝、局部变形等，因此通过弯沉法进行检测有利于准确进行道路健康状况评级 [2]。

3.1.1 弯沉试验设备与检测原理

（1）贝克曼梁弯沉仪：由杠杆式百分表组成，通过静态加载（通常采用标准车）测量路面回弹弯沉。其原理是利用杠杆放大效应，将路面微小变形转化为百分表读数，精度可达 0.01mm，但检测效率较低。（2）落锤式弯沉仪（FWD）：通过重锤自由下落产生瞬时冲击荷载，同步采集多测点弯沉值，生成弯沉盆曲线。可计算路面结构层模量，检测效率是贝克曼梁法的 8-10 倍，适用于大规模检测。

3.2 弯沉试验的常用方法

3.2.1 静态检测法与动态检测法

方法	原理	优势	局限	适用场景
贝克曼梁法	静态加载测回弹弯沉	设备简单、成本低	效率低，受人为操作影响大	农村公路、小型养护工程
FWD 法	动态冲击荷载测瞬时弯沉	数据全面，可反算模量	设备昂贵，需专业操作	高速公路、城市主干道验收及大规模检测等场景

3.2.2 操作流程与规范

（1）贝克曼梁法：在检测点放置测头，标准车（后轴重 100kN）缓缓驶至指定位置；待百分表稳定后读取初始值，车辆驶离后读取回弹值，差值即为回弹弯沉；检测需在气温 20±5℃条件下进行，沥青路面需进行温度修正。（2）FWD 法：将传感器阵列按 30cm 间距布设在测点前方；设定落锤重量（50-100kN）与落高，触发冲击后自动记录各测点弯沉值；每测点需重复检测 3 次，取后两次的平均值作为结果。

4 弯沉试验检测技术在公路路基路面中的应用

4.1 路基弯沉检测的应用

4.1.1 路基承载力评估

路基承载力是公路结构安全的核心保障，贝克曼梁法通过静态加载测量回弹弯沉直观反映其承载能力。操作需将后轴重 100kN 的标准车置于检测点，利用杠杆原理放大变形，通过百分表读取精确至 0.01mm 的弯沉值。不同等级公路弯沉阈值不同，一般公路≤ 230-250（0.01mm），高速公路≤ 25（0.01mm）。某高速公路 K12+300 段检测值达 450（0.01mm），经碎石桩处理后降至 280（0.01mm），满足通车要求。

4.1.2 路基沉降分析与优化

FWD 法凭借动态冲击荷载优势，通过多测点弯沉盆数据反算路基回弹模量，为沉降预测提供量化依据，尤其适用于软土地区公路。在某沿海软土路段施工中，原状路基回弹模量仅 18MPa，初始沉降速率达 15mm/ 天，远超规范限值。技术团队采用 FWD 每周监测，通过弯沉盆曲线特征分析地基固结程度：预压 20 天时，模量升至 32MPa，沉降速率降至 8mm/ 天；45 天时模量达 50MPa，沉降速率稳定在 3mm/ 天以下，据此判断地基已完成 80% 以上固结，适时终止预压，既保证了路基稳定性，又缩短了 10 天工期 [3]。

4.2 路面弯沉检测的应用

4.2.1 路面强度评估

路面强度直接决定其抵抗荷载变形的能力，而弯沉值是衡量承载能力的核心指标。在沥青路面设计中，顶面弯沉值需严格匹配交通荷载等级，例如高速公路沥青路面的设计上限为 20（0.01mm），一级公路则放宽至 30（0.01mm）。FWD 检测通过动态冲击荷载模拟重车行驶状态，能精准捕捉路面结构的瞬时变形特性。实际检测数据显示，当沥青路面弯沉值超过 25（0.01mm）时，面层与基层的粘结力下降 30% 以上，车辙深度月均增长可达 5mm，远超正常损耗速度。某省道养护工程中，FWD 检测发现 K34+100-K34+500 段弯沉值达 32（0.01mm），现场取样显示沥青混合料马歇尔稳定度不足，随即采用铣刨 4cm 面层后重铺改性沥青的方案，处理后弯沉值降至 18（0.01mm），车辙发展得到有效控制。

4.2.2 病害预警

弯沉检测对路面隐性病害的预警作用尤为关键，尤其适用于水泥混凝土路面的结构健康监测。由于板块间接缝是应力集中区域，接缝处弯沉差超过 0.5mm 时，表明基层与面板间已出现脱空，若持续承受荷载，6 个月内板块断裂概率可达 60%。某城市主干道检测中，FWD 对 2000 个接缝

点的弯沉差进行筛查，发现 23 处差值在 0.6-1.2mm 的脱空区域，集中分布在公交站台附近——长期重载导致基层压实度下降是主因。通过高压注浆填充脱空层后，复测弯沉差均控制在 0.3mm 以内，成功避免了次年雨季可能发生的板块碎裂事故，减少直接经济损失约 80 万元。

4.3 不同类型公路的应用差异

4.3.1 高速公路

高速公路作为大运量、重荷载交通载体，对路面结构整体性要求极高，FWD 法凭借高效动态检测特性成为核心技术手段。其全断面检测方案需覆盖行车道、超车道及硬路肩，每公里按梅花形布设 10 个测点，纵向间距 100 米，横向在路宽方向均匀分布 3-4 个检测点，确保数据能反映路面整体承载状态。重点监控区域包括桥面铺装层，此处因刚性基层与柔性面层结合处易产生应力集中，需每 50 米增设 1 个测点，弯沉值需控制在 15（0.01mm）以内；桥头跳车段则需加密至每 20 米 1 个测点，通过对比台背与路基的弯沉差值（允许差≤ 5（0.01mm））评估过渡段处理效果。某高速扩建工程中，FWD 检测发现 K78+200 桥尾弯沉差值达 8（0.01mm），及时采用注浆加固台背填土，使差值降至 3（0.01mm），有效消除跳车隐患 [4]。

4.3.2 城市道路

城市道路交通流复杂，需结合贝克曼梁法静态精准度与 FWD 法动态效率优势。在主干道交叉口，因频繁启停导致路面受力集中，采用“FWD 法全范围扫描 + 贝克曼梁法重点复测”模式：先以 FWD 每 50 米 1 个测点筛查，对弯沉值超 25（0.01mm）区域，用贝克曼梁法按 2 米间距加密检测，精准定位破损范围。公交站台区域则需单独制定检测方案，在站台边缘 1 米范围内布设 5 个测点，要求回弹弯沉≤ 30（0.01mm）。某市中心道路改造中，通过该组合方法发现 3 处公交站台弯沉值达 42（0.01mm），经铣刨重铺后降至 22（0.01mm），保障了重载条件下的路面稳定性。

5 弯沉试验检测技术面临的挑战与发展趋势

5.1 当前检测技术的局限性

虽然弯沉检测是目前一种较为常见的路面检测方法，但其误差和精度问题还是不能解决。由于温度、气候、仪器、检测人员技术等多种外在因素的存在，会导致测量得到的弯沉值发生一定程度的误差，如温度、天气、地面状况等各种不同因素可能会对弯沉测试结果产生影响，使检测数据的准确性无法做到保证。除此之外，目前的弯沉检验仪器在普遍检测过程中还有一些缺陷和不足，需要重点解决数据准确度和准确定位的问题，这是目前技术主要发展之一。

5.2 弯沉试验技术的未来发展方向

弯沉测试未来技术的发展趋势是朝着智能化、自动化检测技术研究发展。用人工智能、大数据、物联网技术可以实现使弯沉检测仪器能够自我诊断检测仪器的问题，实时传输数据，同时能够对数据进行智能化分析，例如智能化检测系统可依据当前交通量大小、气象条件变化等多种因素自适应调整检测计划，自动生成自动化的报表以及报警。通过智能化、自动化的检测，可实现对路面质量监控工作有效而精确地执行，并可为公路营运管理养护工作提供科学和有效的解决方案。

6 结论

弯沉检测技术作为公路建造和维修的重要方法，能够客观真实地检测路面路基的承载能力和变形潜力，为其检测质量提供了科学依据。当前，随着科技技术的进步和创新，弯沉检测的方法手段还渐渐完善了检测精准度和便捷性，并且逐步发展出智能化、自动化、更快、更精准的检测手段。未来，弯沉检测技术与先进的信息技术相结合显得非常必要，更能服务于公路的建造、维修管理。除此之外，对于不同类型、不同级别的公路，还应编制细化检测计划，实现更好的公路质量检测。

参考文献

[1] 张晓明;李明伟.公路路基路面弯沉试验技术应用研究[J].交通工程与技术,2023(6):45-50.

[2] 王建华;高志涛.弯沉试验检测技术在公路质量控制中的应用[J].公路工程,2022(8):12-16.

[3] 刘俊峰;杨国华;徐文杰.弯沉试验在高速公路路面检测中的应用探讨[J].现代交通科技,2021(4):65-69.

[4] 周鹏飞;陈志刚.弯沉检测技术的创新与发展趋势分析[J].道路建设与管理,2023(1):75-80.

[5] 张瑞霞;陈文杰.公路路基弯沉试验检测技术的现状与发展[J].交通科学与工程,2022(10):100-104.