

桥梁隧道工程中的喷锚支护施工技术研究

王靖宇

中交一公局第六工程有限公司, 天津 300450

摘要：桥梁隧道工程建设规模不断扩大，施工环境日趋复杂，对支护技术提出更高要求。喷锚支护凭借快速施工、适应性强等优势在桥隧工程中得到广泛应用，其施工质量直接关系到围岩稳定性控制和工程安全。优化喷锚支护施工工艺，涉及混凝土配合比、锚杆布置、施工工序等诸多方面，还关系到新材料、新技术的应用，以及支护效果的动态监测评估。本文旨在系统阐述喷锚支护施工技术在桥梁隧道工程中的应用，分析关键技术并探讨发展趋势，为推动喷锚支护技术的创新发展提供有益参考，以促进桥隧工程建设水平的提升。

关键词：桥梁隧道工程；喷锚支护；施工技术；围岩稳定

Research on the Construction Technology of Spray Anchor Support in Bridge and Tunnel Engineering

Wang Jingyu

CCCC First Highway Engineering Co., Ltd. Sixth Engineering Co., Ltd. Tianjin 300450

Abstract： The construction scale of bridge and tunnel engineering is constantly expanding, and the construction environment is becoming increasingly complex, which puts forward higher requirements for support technology. Spray anchor support has been widely used in bridge and tunnel engineering due to its advantages of fast construction and strong adaptability. Its construction quality directly affects the stability control of surrounding rock and engineering safety. Optimizing the construction process of spray anchor support involves many aspects such as concrete mix ratio, anchor rod layout, construction process, etc. It also relates to the application of new materials and technologies, as well as the dynamic monitoring and evaluation of support effects. This article aims to systematically expound the application of spray anchor support construction technology in bridge and tunnel engineering, analyze key technologies, and explore development trends, providing useful references for promoting the innovative development of spray anchor support technology and improving the construction level of bridge and tunnel engineering.

Keywords： bridge and tunnel engineering; spray anchor support; construction technology; stability of surrounding rock

引言

桥梁隧道工程建设事关国计民生，对促进区域经济社会发展、完善现代综合交通运输体系具有重要意义。随着桥隧工程向复杂环境、极端条件不断拓展，支护技术面临前所未有的挑战。喷锚支护以其高效性、适应性、经济性的独特优势，在桥梁隧道施工中得到广泛应用，已成为围岩控制和结构防护的首选工艺。新时期如何进一步强化喷锚支护的理论基础，创新完善施工工艺，使其在保障工程安全、提升建设品质中发挥更大作用，值得深入研究。

一、喷锚支护施工技术概述

（一）喷锚支护的作用原理

喷锚支护是桥梁隧道工程中常用的初期支护方式，其通过喷射混凝土和锚杆的共同作用来加固围岩、控制变形。喷锚支护具有如下作用原理：喷射混凝土能迅速覆盖在开挖面上，填充岩体裂隙，提高岩体整体性和强度；同时喷层能起到封闭围岩、防止风化的作用^[1]。锚杆通过注浆锚固，可将喷层与围岩牢牢连接，使

二者共同承载，约束围岩变形。此外，喷层和锚杆还能改善围岩应力状态，减小应力集中，防止围岩松动破坏。综合来看，喷锚支护充分发挥了喷射混凝土和锚杆的各自优势，二者相辅相成，共同提高了围岩稳定性。

（二）喷锚支护技术的特点

喷锚支护技术具有施工速度快、初期强度高、适应性强等特点。喷射混凝土能在数小时内凝结硬化，快速形成支护，封闭围岩，从而有效缩短施工工期。同时，喷层能在早期达到较高强

简介：王靖宇（1994.10-），男，汉族，河南省扶沟县，大学本科，助理工程师，研究方向：土木工程。

度,及时阻止围岩变形,避免围岩松动滑落,是其他支护方式难以比拟的。此外,由于喷锚支护不需要大型模板,施工极为灵活方便,能适应各种不规则开挖断面,满足桥隧工程的特殊需求。再者,喷锚支护材料利用率高,作业机械化程度高,能有效节约工程成本,减轻作业人员劳动强度。正是由于喷锚支护的诸多优势,其已成为桥梁隧道工程支护施工的首选技术。

二、桥梁隧道工程中喷锚支护施工技术的必要性

(一) 复杂环境下的有效支护手段

桥梁隧道工程往往面临地质条件复杂、施工环境恶劣的挑战,这对工程支护技术提出了更高要求。喷锚支护技术凭借其独特优势,成为应对复杂环境的有效支护手段。首先,喷射混凝土能迅速填充围岩孔隙,防止岩体风化,并与锚杆协同作用,快速形成封闭支护,控制围岩松动变形^[2]。其次,喷锚支护不受断面形状限制,施工灵活,能适应各种不规则开挖面,满足桥隧工程复杂多变的支护需求。此外,恶劣环境下,喷锚支护机械化程度高,可远距离操作,大大改善了作业条件,保障了施工人员的安全。

(二) 确保施工进度与工程质量的必由之路

喷锚支护具有施工速度快、作业灵活的特点,喷射混凝土能与开挖同步进行,无需等待支护结构成型,大幅缩短了施工工期。同时,喷射机械化程度高,可实现远距离、全方位作业,弥补了空间受限区域的支护难题,显著提高了施工效率。此外,喷锚支护能快速形成封闭有效的初期支护,及时阻止围岩松动变形,为后续施工创造安全条件^[3]。喷层可在数小时内达到较高强度,有效约束围岩位移,防止过大变形影响衬砌施工质量。锚杆则通过注浆锚固,深入围岩增强整体稳定性,进一步提升支护效果。可见,喷锚支护技术在保障桥隧工程施工进度的同时,也为工程质量提供了坚实保障。

(三) 降低工程成本的经济之选

在桥梁隧道工程建设中,成本控制始终是备受关注的重点,喷锚支护所需的原材料主要为水泥、砂石骨料、速凝剂等,这些材料便于采购和运输,且用量相对较少,可有效降低材料成本。同时,喷锚施工高度机械化,劳动强度低,单位工程量所需人工费用大为减少。此外,得益于喷锚支护的快速施工特性,平面不规则的洞室断面可实施贴壁式支护,无需设置大型支撑系统或新砌隧道衬砌,施工工序简化明显,也由此缩短了总工期。而工期缩短意味着机械台班、人工工时等费用的节约。

三、桥梁隧道工程中的喷锚支护施工技术的应用

(一) 喷射混凝土配合比的优化设计

喷射混凝土性能的优劣直接关系到喷锚支护的施工质量和支护效果,而合理的配合比设计是确保喷射混凝土性能的关键。桥梁隧道工程中,喷射混凝土配合比设计需要综合考虑原材料特性、环境条件、设计要求等多方面因素,通过系统的试验研究和

优化调整,制定科学合理的配合比方案。

首先,在原材料选择方面,应根据工程所处环境条件和性能要求,选用强度等级适宜、与外加剂相容性好的水泥,并优选品质优良、级配合理的砂石骨料。尤其要重视骨料的级配优化,采用双掺或多掺技术,改善骨料级配,提高混凝土和易性和粘聚性,减少干喷回弹^[4]。

其次,在外加剂选用方面,应根据施工工艺需求,科学选择速凝剂、减水剂等外加剂品种和掺量。优选与水泥相容性好、能显著改善混凝土性能的高效外加剂,并通过适量掺加、优化组合,达到提高混凝土流动性、粘聚性,加快强度发展,改善干喷性能的目的。

再者,在配合比优化方面,应在满足设计强度和耐久性要求的前提下,通过科学试配,优化水胶比、砂率、掺合料用量等关键参数,使混凝土性能达到最佳平衡。对于喷射混凝土,要重点优化和易性、粘聚性、泵送性等新拌性能指标,兼顾早期强度和后期强度发展。必要时,还需开展现场试喷,评估混凝土实际喷射性能,并据此进一步完善配合比。

最后,喷射混凝土配合比设计还应与所采用的施工工艺相匹配。例如,采用湿喷工艺时,要特别注重混凝土的流动性和泵送性;采用干喷工艺时,要更加重视混凝土的粘聚性和抗离析性。同时,还应结合工程规模、施工强度等因素,合理确定混凝土拌合物的工作性能保持时间,避免发生早凝或离析现象。

(二) 锚杆体系的合理布置与构造

在桥梁隧道工程喷锚支护施工中,锚杆体系的合理布置与构造至关重要。锚杆参数的选择需要综合考虑围岩类型、地应力状况、开挖方法等因素,以发挥锚杆加固围岩的最佳效果。对于围岩较为破碎、完整性差的区段,宜采用预应力锚杆或带锚托盘的树脂锚杆,并通过缩小排距、优化角度,增强锚杆对围岩的约束作用^[5]。对于较完整的围岩,可采用普通锚杆,合理控制锚杆长度和间距,达到较好的支护效果。锚杆施工还应与开挖进度密切配合,及时跟进作业,避免围岩应力卸荷引发的松动变形。

锚杆的构造需满足强度、刚度和耐久性要求。锚杆材质可选用热轧螺纹钢筋、抗腐蚀钢筋或玻璃纤维筋等,并采取电镀等防腐措施。锚杆端部须设置专用连接件,确保锚杆与托盘可靠连接。对于永久性锚杆,要采用满足设计年限的封锚保护措施。锚杆注浆也是影响支护效果的关键因素。注浆材料应具有良好的流动性、凝结硬化性能与耐久性。注浆压力和用量须严格控制,以形成均匀密实的注浆体。对于易漏浆围岩,可采用阻塞剂控制钻孔漏浆。

桥梁隧道工程中锚杆体系的合理布置与构造须在设计阶段充分论证,在施工阶段精细管控,并与喷射混凝土形成联合支护,才能充分发挥喷锚支护体系对围岩稳定性控制的积极作用,为工程安全提供有力保障^[6]。

(三) 新材料、新工艺在喷锚支护中的应用

桥梁隧道工程喷锚支护施工技术的创新发展离不开新材料、新工艺的持续研究与应用。在喷射混凝土材料方面,以超高性能混凝土为代表的新型高强韧性材料备受关 注^[7]。这类材料通过优化

骨料级配、掺入高性能外加剂、复合纤维等，大幅提高了混凝土的抗压强度、抗拉强度和韧性，显著增强了喷层的抗裂性、抗冲刷性和耐久性，在复杂环境条件下展现出良好的适用性。部分纤维增强材料还具有可喷射性能，可直接用于隧道初期支护，减少施工工序，提高支护效率。

在锚杆材料方面，新型高强度锚杆钢材料不断涌现，热轧螺纹钢钢筋强度等级已发展到 HRB600 乃至更高，同时兼具良好的延性和焊接性能，能充分满足高应力或大变形环境下锚杆施工的要求^[8]。自凝混凝土锚固剂、复合树脂锚固剂、聚合物水泥砂浆锚固剂等新型锚固材料，具有凝结硬化快、流动性好、锚固力高等优点，为提高锚杆锚固质量、适应不同地质条件提供了更多选择。喷锚支护施工工艺与装备也实现了革新升级。湿喷机器人采用自动化数控系统，通过激光扫描、高精度定位等技术实现喷射轨迹、角度与厚度的精确控制，并结合视觉识别、机器学习算法，能够自主优化喷射操作，提高了混凝土喷层质量的均匀性，有效减少材料回弹损失^[9]。新型干喷设备配备除尘、除湿、加热等装置，改善了粉料输送性能，降低了施工粉尘污染，提升了施工环境品质。

（四）喷锚支护效果的动态监测与评估

喷锚支护效果的动态监测与评估是桥梁隧道工程喷锚支护施工不可或缺的重要内容。在喷锚施工过程中，需采用多点位、高精度的监测手段，全面获取围岩变形、支护结构应力、锚杆轴力等关键信息。利用自动化监测系统实现数据采集、无线传输、智

能分析，并结合数值模拟技术，能够深入揭示围岩变形机理与支护结构工作特性，为支护效果评估提供可靠依据^[10]。当监测数据出现异常时，必须及时启动预警机制，采取有针对性地补强加固措施，确保工程安全。另一方面，支护效果评估应贯穿于施工全过程，根据监测数据和现场条件，动态优化支护参数，实现喷锚支护效果的量化分析与反馈控制。建立健全喷锚支护效果的动态监测和科学评估体系，将现代信息技术与传统工程施工深度融合，是保证桥梁隧道工程安全高效建设、提升喷锚支护水平的关键举措。

四、结束语

综上所述，桥梁隧道工程喷锚支护施工技术是确保工程安全、提高施工效率的关键。本文从喷锚支护的作用机理出发，系统阐述了其在复杂环境下的适应性和必要性，重点探讨了喷锚支护施工的关键技术，包括喷射混凝土配合比优化、锚杆体系合理布置、支护效果动态监测评估，以及新材料新工艺的创新应用等，力求从材料、结构、工艺、检测、信息化等多维度全面解析喷锚支护技术的发展脉络。可以预见，随着现代科技和桥隧工程建设需求的不断进步，喷锚支护技术必将朝着材料高性能化、结构优化集成化、施工智能精细化、监测评估动态化的方向持续演进，为我国桥梁隧道工程建设提质增效，推动交通基础设施建设迈向更高水平。

参考文献

[1] 罗臣智. 公路桥梁隧道工程中的喷锚支护施工技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2021.
[2] 高亚鹏. 兰张三四线大岭沟明挖隧道黄土深基坑支护结构及地层变形规律研究 [D]. 兰州交通大学, 2023.
[3] 高云龙. 高原铁路隧道软岩大变形施工技术研究 [J]. 价值工程, 2023, 42(5):75-77.
[4] 王立昌. 水利工程隧道初期支护施工技术研究 [J]. 建筑机械, 2024(11).
[5] 曾令霞, 杨学兵. 公路桥梁隧道工程中喷锚支护施工技术 [J]. 中国地名, 2023(2):0181-0183.
[6] 李鳌. 东华山隧道机械化开挖施工及安全措施讨论 [J]. 低碳世界, 2024, 14(5):160-162.
[7] 王立昌. 水利工程隧道初期支护施工技术研究 [J]. 建筑机械, 2024(11).
[8] 肖明清, 徐晨, 崔岚, 等. 基于总安全系数法的喷锚组合支护承载能力试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024(10).
[9] 侯勇, 易祖辉, 邹顺青, 等. 早高强单层喷锚衬砌在隧道支护中的应用研究 [J]. 交通节能环保, 2024, 20(3):13-16.
[10] 王海亭, 王征, 王壮壮, 等. 砂页岩缓倾地层隧道锚杆支护参数研究 [J]. 铁路技术创新, 2024(1):96-104.