

隧道工程混凝土喷射施工技术及其质量控制分析

卞魁明

中国水利水电第十四工程局有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i10.7283

[摘要] 本文探讨了隧道工程中混凝土喷射施工技术及其质量控制的重要性。随着隧道工程在基础设施建设中的广泛应用，混凝土喷射施工技术已成为确保隧道结构稳定性和耐久性的关键工艺。本文详细分析了喷射混凝土的基本原理、施工方法以及施工过程中可能出现的问题。重点讨论了如何通过技术创新和质量控制措施来提高喷射混凝土的施工质量，以确保工程的安全性和经济性。

[关键词] 隧道工程；混凝土喷射；施工技术；质量控制；结构稳定性

Analysis of Concrete Spraying Construction Technology and Quality Control in Tunnel Engineering

Bian Kui Ming

China Water Resources and Hydropower 14th Engineering Bureau Co.

[Abstract] This paper discusses the importance of concrete shotcrete construction technology and its quality control in tunnel engineering. With the wide application of tunnel engineering in infrastructure construction, concrete shotcrete construction technology has become a key process to ensure the stability and durability of tunnel structure. This paper analyzes in detail the basic principle of shotcrete, construction method and the problems that may occur in the construction process. It focuses on how to improve the construction quality of shotcrete through technological innovation and quality control measures to ensure the safety and economy of the project.

[Key words] tunnel engineering; concrete spraying; construction technology; quality control; structural stability

引言：

隧道工程是现代基础设施建设中的重要组成部分，尤其在交通运输和地下空间开发中占据重要地位。随着工程规模的扩大和技术要求的提高，混凝土喷射施工技术成为提高隧道结构性能的关键手段。喷射混凝土具有施工速度快、抗压强度高、适应性强等优点，但同时也面临着施工质量控制难度大、施工环境复杂等挑战。因此，研究喷射混凝土施工技术及其质量控制措施，对提高隧道工程的整体质量具有重要意义。

一、喷射混凝土施工技术概述

1.1 喷射混凝土的定义与分类

喷射混凝土是一种通过喷射设备将混凝土材料以高速喷射到施工面上并凝结成型的施工技术。这种技术的主要特点是在复杂地形和条件下进行快速施工，从而为隧道、矿山、地下工程等领域提供有效的支护和衬砌。喷射混凝土可分为干喷和湿喷两种类型。干喷法是将水泥、砂石等干料混合后通过喷射设备与水混合后喷射出去，该方法施工设备简单、成本较低，但施工过程中粉尘较大，对环境的影响较大。湿喷法是将混凝土拌合物先在地面搅拌好后，再通过喷射设备输送到喷嘴喷射到施工面上，具有施工粉尘小、混凝土强度高、施工质量好等优点，现已成为隧道工程中应用最为广泛的喷射混凝土施工方法。

1.2 喷射混凝土的基本原理

喷射混凝土施工的基本原理是利用空气压力或机械泵送系统将混凝土以高速喷射到待施工的表面。混凝土通过喷嘴时，受到高速气流的冲击，颗粒间的摩擦使其达到初凝状态，

并在施工表面形成致密的保护层。这一过程中，混凝土的粘聚性和粘附性是确保喷射效果的关键因素。在喷射过程中，混凝土需具备良好的可泵性和流动性，以保证其在喷射时能够顺利通过设备并均匀覆盖施工面。此外，喷射混凝土还需要具备一定的初凝速度，以便迅速固定在施工面上，从而形成稳定的支护结构。

1.3 喷射混凝土的施工方法

喷射混凝土的施工方法主要包括准备工作、施工准备、喷射施工和养护等步骤。在准备工作中，需要对施工面进行清理，确保无浮石和松动土壤，以提高混凝土的粘附性。在施工准备阶段，需要配置合适的混凝土材料并选择适当的喷射设备。喷射施工时，施工人员需控制喷射角度和距离，以保证混凝土均匀覆盖施工面并达到设计厚度。在喷射完成后，需要对喷射混凝土进行养护，通常采用喷水养护或覆盖塑料薄膜的方式，以确保混凝土在早期凝结过程中不失水分，从而提高其强度和耐久性。在实际施工中，例如中国的广州地铁隧道工程，采用了全自动化的湿喷技术，极大地提高了施工效率和质量。

二、隧道工程中喷射混凝土施工技术的应用

2.1 隧道工程特点与施工环境

隧道工程在施工过程中常常面临诸多挑战，这些挑战主要来源于隧道工程所处的特殊地质条件和施工环境。复杂的地质条件包括岩层、砂土、淤泥等多样性地质结构，使得施工技术需要具备高度的适应性和灵活性。施工环境也常常受到诸如空间狭小、环境湿度高以及地下水渗透等问题的制约。这些因素

不仅增加了施工难度，也对施工技术提出了更高的要求。为了应对这些挑战，施工单位必须结合地质勘测数据制定详细的施工方案，以此来应对各种不确定因素。在兰州至乌鲁木齐铁路工程中，由于地质结构复杂且气候条件恶劣，施工方选择了湿喷混凝土技术。这种技术的选择不仅有效应对了严峻的地质挑战，也显著提高了隧道的施工效率和质量。施工团队通过采用湿喷技术，克服了湿度大的困难，确保了混凝土在喷射后能够迅速凝结并形成坚固的支护结构。

2.2 喷射混凝土在隧道施工中的优势

喷射混凝土在隧道施工中的应用具有显著的优势，这些优势主要体现在施工速度快、适应性强以及施工质量高等方面。首先，喷射混凝土技术能够大幅缩短施工工期，其快速凝结和固化的特性使得施工进度得以显著加快，从而有效降低了施工成本。其次，喷射混凝土技术具备良好的适应性，能够在多种复杂地质条件下进行施工。这种适应性使其能够解决传统混凝土施工中所面临的许多问题，特别是在地质不稳定或地形复杂的环境中。此外，喷射混凝土通过其高速喷射和快速凝结的特性，能够在施工面上形成高度密实的支护结构，从而提高隧道的整体强度和稳定性。在郑西高铁的隧道建设过程中，施工团队采用了湿喷混凝土技术，这一技术的应用不仅显著加快了施工进度，还大幅提升了隧道的防水性能和耐久性。喷射混凝土形成的致密支护层在隧道防水中发挥了关键作用，为工程的长久稳定提供了有力保障。

2.3 不同地质条件下的喷射施工技术

在面对不同的地质条件时，喷射混凝土施工技术需要进行相应的调整，以适应不同地质特性的需求。在岩石地层中，喷射混凝土主要用于对岩面的加固和防止岩石崩塌。在这种条件下，施工方通常会选择高强度的混凝土材料，并采用较高的喷射速度，以确保混凝土能够迅速覆盖岩面并形成坚固的支护层。在砂土或软土地层中，由于地基较为松软，喷射混凝土需要具备更强的粘附性和韧性，以抵御地层的移动和变形可能带来的影响。在实际应用中，施工团队常常需要根据地质条件对混凝土的配合比和外加剂进行调整。比如在哈尔滨地铁的施工过程中，针对复杂的软土地质，施工团队采用了改性喷射混凝土技术。通过调整混凝土的配合比以及添加特定的外加剂，提高了混凝土的初凝速度和终强度，从而有效增强了隧道的支护能力。这种技术的应用不仅提高了施工效率，还增强了隧道的长期稳定性和安全性。施工团队的灵活应对和技术创新为项目的顺利推进提供了坚实保障。

三、喷射混凝土施工中的质量控制

3.1 质量控制的关键因素

在喷射混凝土施工中，质量控制是确保工程安全性和耐久性的重要保障。实现高质量的喷射混凝土施工，需要关注多个关键因素，包括混凝土材料的选择与配合比、喷射设备的性能与操作、施工环境的控制以及施工人员的技术水平。首先，选择合适的混凝土材料和合理的配合比直接影响到混凝土的强度、粘附性和耐久性。一个理想的水灰比能够确保混凝土的良好工作性能，而合理的骨料级配与外加剂的使用则能够增强混凝土的粘结力和抗裂性。其次，喷射设备的性能和操作对施工质量有直接影响。设备的性能决定了喷射的均匀性和密度，设备需要定期进行维护和校准，以确保其在最佳状态下运行。

控制施工环境同样是质量控制的关键一环。温度、湿度和风速等环境因素都会对混凝土的喷射效果产生影响，需要通过现场监测和控制来减少不利因素的影响。最后，施工人员的技术水平和操作经验至关重要。合格的技术培训和严格的操作规程能够保证施工的标准化和精细化。以广州地铁施工为例，项目引入了先进的喷射设备，并实施了严格的质量控制措施，显著提升了喷射混凝土的施工质量和效率。

3.2 施工过程中的常见问题及解决方案

在喷射混凝土施工过程中，施工团队通常会面临一些常见问题，如混凝土的回弹、喷射不均匀、粘附性差以及裂缝的产生等。这些问题可能由多种因素导致，通常包括混凝土配合比不当、喷射压力不足、操作不规范以及环境因素的影响。为了应对这些问题，施工单位应采取一系列措施来优化施工流程。首先，优化混凝土配合比，提高其粘附性和流动性，可以通过调整水灰比和添加外加剂来实现。其次，调整喷射设备的参数，如喷射压力和喷嘴口径，以确保混凝土在喷射过程中能够均匀覆盖施工面。施工过程中，加强对施工人员的技术培训，确保施工操作的规范性是解决问题的关键。此外，为了防止混凝土裂缝的产生，可以在混凝土中加入纤维材料，增强混凝土的抗拉强度和韧性。在深圳地铁的施工过程中，通过改进混凝土配合比和采用先进的湿喷设备，施工团队成功解决了喷射不均和回弹问题，显著提升了施工质量和工程耐久性。

3.3 质量检测与评估方法

喷射混凝土施工的质量检测与评估是保证工程质量的核心环节。为了确保施工质量符合设计标准，施工团队需要采用一系列检测和评估方法。常用的检测方法包括混凝土强度检测、粘结力测试、厚度测量和表面平整度检查。混凝土强度检测一般通过取样实验进行，通过对现场喷射的混凝土样本进行标准实验室测试来评估其抗压强度。粘结力测试通过现场拉拔试验，测量混凝土与基底之间的粘附强度。厚度测量可以使用无损检测技术，如雷达检测或超声波检测，以精确测量喷射层的实际厚度。表面平整度检查是通过目视检查和专用测量工具进行的，以确保喷射表面符合设计要求。在质量评估过程中，施工管理团队可以通过分析施工记录、检测数据和现场勘查结果，综合评估施工质量是否达到设计标准。成都地铁施工中，通过一系列的质量检测与数据分析，施工团队有效确保了喷射混凝土施工达到预期效果和质量标准，成功地满足了工程的安全性和耐久性要求。

四、喷射混凝土施工技术的创新与发展

4.1 新型喷射设备与技术

随着技术的进步，喷射混凝土施工中不断出现新型设备和技术。这些创新主要集中在提高施工效率、降低劳动强度和提高施工质量上。新型喷射设备采用了自动化控制系统，可以实现喷射参数的实时监控和调整，确保施工的精确性和稳定性。同时，机械手臂的应用使得喷射施工更加灵活和高效。在国内，三一重工研发的自动化湿喷机械手已在多个隧道工程中投入使用，大幅提高了施工效率和质量。此外，3D打印技术也开始应用于喷射混凝土施工，通过精确的控制和快速成型，实现了更复杂和精准的施工效果。这些新技术的应用不仅提高了施工效率，还显著改善了施工环境和操作安全性。

4.2 材料改性与配比优化

喷射混凝土的材料改性与配比优化是提高施工质量和性能的关键。通过引入高性能外加剂和纤维增强材料,可以显著提高混凝土的抗压强度、耐磨性和韧性。例如,聚丙烯纤维和钢纤维的添加可以增强混凝土的抗裂性能,而硅粉等矿物掺合料的使用可以提高混凝土的密实度和耐久性。在国内的西成高铁隧道工程中,通过调整混凝土的水灰比和掺加适量的矿物掺合料,不仅提高了混凝土的物理性能,还有效降低了施工成本。此外,绿色环保材料的引入也成为未来发展趋势,通过采用可再生材料和降低碳排放,实现施工过程的可持续发展。

4.3 施工信息化与智能化技术的应用

施工信息化和智能化技术的应用正在彻底改变喷射混凝土施工的传统模式。通过BIM(建筑信息模型)技术,可以实现施工全过程的数字化管理和协同。BIM技术的应用可以提前模拟施工过程,优化施工方案,提高施工效率和精确性。此外,智能化传感器技术的应用使得实时监控施工环境和混凝土质量成为可能。传感器可以实时采集施工过程中的温度、湿度、混凝土强度等数据,并通过无线网络传输到施工管理平台,实现对施工现场的远程监控和智能决策。例如,在北京新机场隧道工程中,通过引入BIM技术和智能监控系统,不仅提高了施工管理的效率,还确保了工程的高质量完成。未来,随着人工智能和物联网技术的进一步发展,喷射混凝土施工将更加智能化和高效化。

五、结语

综上所述,随着隧道工程的不断发展,喷射混凝土施工技术的作用愈发重要。通过不断创新施工技术和加强质量控制,能够有效提升工程的安全性和耐久性。未来,结合现代信息技术的发展,喷射混凝土施工将在智能化和自动化方向上取得更大突破。有效的质量控制和技术创新将为隧道工程提供坚实保

障,推动隧道建设事业的可持续发展。

[参考文献]

- [1]现浇筑混凝土道桥施工技术的要点探究.唐小萍.城市建设理论研究(电子版),2018(19)
- [2]道路桥梁施工中混凝土裂缝成因及应对措施分析.陈伟国.江西建材,2021(03)
- [3]关于现浇筑混凝土铁路桥梁施工技术的研究.杨植.居舍,2021(10)
- [4]混凝土技术在公路桥梁施工中的应用.胡旭峰.中国高新科技,2021(17)
- [5]现浇筑混凝土框架桥施工及质量控制策略.张杰.工程技术研究,2020(11)
- [6]混凝土技术在路桥施工过程中的应用分析.李莹.黑龙江科技信息,2016(27)
- [7]试论公路工程混凝土裂缝的防治与处理.张鹏伟.黑龙江科技信息,2011(01)
- [8]公路工程施工中混凝土常见裂缝产生原因及处置措施.陈锋.城市建设理论研究(电子版),2023(07)
- [9]隧道工程喷射混凝土施工质量控制分析[J].冯宝红.中国新技术新产品,2010(12)
- [10]浅谈隧道工程喷射混凝土施工质量控制的薄弱环节[J].李勇.广东土木与建筑,2004(01)
- [11]隧道工程混凝土喷射施工技术及其质量控制分析[J].段长高.交通世界,2019(20)
- [12]隧道钢纤维喷射混凝土施工技术[J].祝云华.建筑技术开发,2015(01)
- [13]隧道混凝土喷射施工技术及其机械化[J].耿继敏;董红波.建设机械技术与管理,2012(10)

上接第84页

够实时监控施工进度和质量,及时发现和解决问题。通过积极采纳和应用这些技术创新,企业不仅能够降低施工成本,还能够提升项目的竞争力和市场响应速度。技术创新是企业持续改进和适应市场变化的重要途径,对于实现成本管控的优化具有重要意义。

5.5 加强项目团队的成本意识,提升成本管理能力

项目团队是成本管控的执行主体,其成本意识和成本管理能力的强弱直接影响到成本管控的效果。为了加强成本意识,企业应当通过培训和教育,使项目团队成员充分认识到成本管控的重要性,理解成本控制的具体要求和方法。这包括对成本构成、成本控制流程和成本节约措施的深入了解。同时,企业还应当建立激励机制,将成本控制成效与团队成员的绩效考核和奖励挂钩,激发团队成员的积极性和主动性。提升成本管理能力的要求企业为项目团队提供必要的工具和资源,包括成本管理软件、数据分析工具和专业指导等。通过定期的成本管理培训和实践经验的分享,团队成员能够掌握先进的成本管理技能,如成本估算、成本分析和成本优化等。此外,企业还应当鼓励团队成员之间的交流与合作,通过团队协作解决成本管控中的难题,提高成本管理的整体效率和效果。

结束语

在建筑工程施工阶段,成本管控是确保项目成功的关键因素。通过加强预算编制的准确性、实施严格的成本控制措施、强化风险管理、推动技术创新以及提升项目团队的成本意识和管理能力,企业能够有效应对成本管控中的挑战,实现成本的优化和项目的可持续发展。随着建筑行业的不断发展和市场竞争的加剧,成本管控的重要性将日益凸显。因此,建筑企业应当持续关注成本管控的最新趋势和技术,不断提升自身的成本管理水平,以适应未来市场的变化和挑战。

[参考文献]

- [1]陈芹,薛江波.建筑工程施工阶段成本管控分析[J].中国招标,2024,(06):108-110.
- [2]杨魁.建筑工程施工阶段成本核算及控制措施分析[J].居舍,2023,(28):142-144+148.
- [3]赵菲.建筑工程施工阶段成本管控对策分析[J].中国建筑金属结构,2023,22(05):169-171.
- [4]张祖凯.建筑工程施工阶段成本管控对策分析[J].中国招标,2023,(02):104-105.
- [5]栗颖.建筑施工企业在工程施工阶段的成本控制分析[J].财会学习,2020,(10):166-167.
- [6]时政文.建筑工程施工阶段成本核算与控制分析[J].质量与市场,2020,(06):86-88.