

隧道喷射混凝土施工的质量控制技术研究

苟海鳌, 龙东宏, 何俊亨, 杨楷

中铁五局集团成都工程有限责任公司, 四川 成都 610031

摘 要： 随着交通建设的快速发展, 隧道工程的质量和安全性越来越受到关注。喷射混凝土施工是隧道工程中常用的技术之一, 其质量控制对于确保隧道结构的稳定性和安全性具有重要意义。本文以 MM 工程为例探讨隧道喷射混凝土施工的质量控制技术, 包括材料选择、配合比设计、施工操作和后期养护等方面, 以期为提高隧道工程质量和安全性提供技术支持和理论依据。

关 键 词： 喷射混凝土; 质量; 控制要点; 控制数据

Research on quality control technology of tunnel shotcrete construction

Gou Haiao, Long Donghong, He Junheng, Yang Kai

China Railway No. 5 Engineering Group Chengdu Engineering Co., LTD. Chengdu, Sichuan 610031

Abstract： With the rapid development of traffic construction, the quality and safety of tunnel engineering have been paid more and more attention. Shotcrete construction is one of the common techniques in tunnel engineering, and its quality control is of great significance to ensure the stability and safety of tunnel structure. Taking MM project as an example, this paper discusses the quality control technology of tunnel shotcrete construction, including material selection, mix ratio design, construction operation and later maintenance, in order to provide technical support and theoretical basis for improving the quality and safety of tunnel engineering.

Keywords： shotcrete; quality; control points; control data

引言

隧道工程是交通建设中的重要组成部分, 而喷射混凝土施工技术则是隧道施工中的关键环节。喷射混凝土以其快速、经济、高效的特性, 在隧道支护结构中得到了广泛应用。然而, 隧道喷射混凝土施工质量控制技术的优劣直接关系到隧道工程的安全性和使用寿命。因此, 深入研究隧道喷射混凝土施工的质量控制技术, 对于提高隧道工程质量、保障行车安全具有重要意义。隧道喷射混凝土施工质量控制涉及多个方面, 包括材料选择、配合比设计、施工工艺控制、养护措施等。在实际施工过程中, 由于施工环境复杂多变、施工人员技术水平参差不齐等因素, 往往会导致喷射混凝土出现开裂、脱落、强度不足等质量问题。因此, 需要通过科学的技术手段和方法, 对隧道喷射混凝土施工进行全过程的质量控制, 确保喷射混凝土的性能稳定可靠, 满足隧道工程的要求。

一、相关概念

(一) 喷射混凝土施工

喷射混凝土施工是一种使用压力喷枪喷涂灌筑细石混凝土的施工方法。它常用于灌筑隧道内衬、墙壁、天棚等薄壁结构或其他结构的衬里以及钢结构的保护层。在喷射混凝土施工过程中, 将预先配好的水泥、砂、石子、水和一定数量的外加剂装入喷射机, 利用高压空气将其送到喷头和速凝剂混合后, 以很高的速度喷向岩石或混凝土的表面而形成。^[1]

喷射混凝土施工可以分为干法和湿法两种。干法是将水泥、砂、石在干燥状态下拌合均匀, 用压缩空气将其和速凝剂送至喷嘴并与压力水混合后进行喷灌。而湿法则是将原材料预先加水拌和后喷射。^[2] 在实际施工中, 一般多采用湿法进行喷射混凝土作

业, 因为这种方法混凝土回弹量少, 质量易于控制。

(二) 隧道施工中混凝土喷射施工的特点

隧道施工中混凝土喷射施工的特点主要体现在其高性能结构特性、经济高效、施工速度快以及优异的物理性能等方面。

高性能结构特性： 喷射混凝土具有较高的结构密度, 抗渗性优良, 黏结强度高, 且凝固速度快。这些特性使得喷射混凝土能够显著增强公路隧道工程围岩结构的整体性, 并与围岩共同作用, 有效固化围岩岩面的松动和风化区域, 从而保障隧道结构的长期稳定性和安全性。^[3]

经济高效： 喷射混凝土的施工工艺流畅, 无需模板, 显著减少了施工中的复杂性和成本。特别是在软弱围岩的公路隧道施工中, 与传统的模注混凝土相比, 喷射混凝土可以节省5%~10% 的施工成本, 有效地提高了工程的经济效益。

施工速度快：喷射混凝土的施工工艺简便快捷，终凝时间通常在几分钟到几十分钟内，具体取决于材料成分和环境条件。^[4] 其强度发展迅速，通常在喷射后的几小时内开始显著增长。虽然具体的强度增长数值可能因工程要求和材料配方而异，但喷射混凝土在24小时内通常可以达到相当高的结构强度。这种快速硬化的特性，使得喷射混凝土在需要快速支护的隧道施工场景中尤为适用。它不仅能够快速形成稳定的支护层，还能有效应对隧道施工中可能出现的各种地质变化和挑战。因此，喷射混凝土在隧道施工中以其高效、快捷和适应性强的特点，成为一种重要的施工方法。

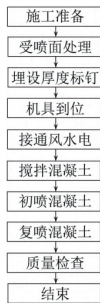
优异的物理性能：与模注混凝土相比，喷射混凝土具有更高的抗压强度、抗疲劳强度和抗渗能力。这些物理性能的提升使得喷射混凝土在隧道施工中能够更好地抵抗外部荷载、疲劳效应和渗透作用，从而延长隧道的使用寿命。

（三）隧道施工中混凝土湿法喷射施工工艺及优缺点

湿法喷射（湿喷工艺）是一种高效且重要的隧道支护施工方法。在此工艺中，按照精确比例将水泥、水和骨料混合，通过湿式喷射机充分搅拌和压送混凝土混合料。^[5] 在喷头处，加入速凝剂，使混凝土能在短时间内达到所需强度，并以高速喷射至隧道围岩岩面，形成致密的支护层。湿喷工艺的优点在于混凝土回弹量小，材料利用率高，且施工质量的控制相对容易，从而保证了施工质量。然而，该工艺也存在一些缺点，如喷射故障处理可能较为困难，机械设备清理相对不便，这可能会在一定程度上影响施工效率。^[6] 在本项目中，采用了阿里瓦湿喷机这款先进的设备。阿里瓦湿喷机以其高效、稳定、易操作的特点，确保了混凝土混合料的均匀搅拌和高速喷射。该设备采用了先进的技术和设计，不仅使混凝土能在短时间内达到所需强度，还显著减少了混凝土回弹量，提高了材料利用率。此外，阿里瓦湿喷机的维护和保养相对简便，这大大减少了施工过程中的故障和停机时间，从而提高了施工效率。通过采用这款先进的湿喷设备，不仅保证了施工质量，还降低了施工成本和维护难度，为项目的顺利推进提供了坚实的技术支持。

（四）隧道喷射混凝土施工流程

近年来，大量的新材料、新工艺、新设备被应用在隧道工程中。作为隧道施工应用技术之一的锚喷构筑法取得长足发展，其特点是：1. 速度快，支护及时、支护质量较好，强度高，密实度好；2. 省工且操作简单，支护工作量大大减少；3. 施工灵活性高，容易根据需要分次追加喷射混凝土以增加厚度。喷射混凝土施工流程见图1。



> 图1 施工流程

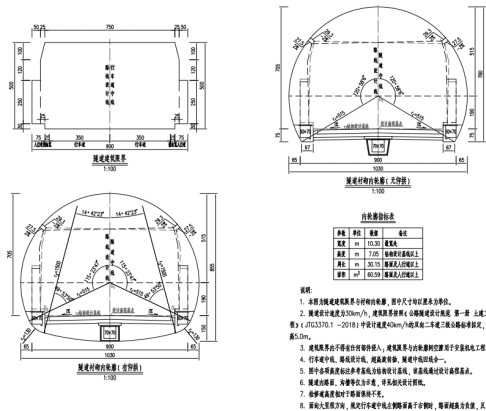
二、MM 工程隧道概况

本隧道工程位于喜马拉雅山脉，全长约9540米，设计为单洞双向两车道三级公路标准。工程地形、地质、气候条件极为复杂，涵盖积雪冰冻区、泥石流堆积扇、围岩破碎区等多种极端环境。主要岩性包括片麻岩、韧性剪切带糜棱岩和多雄拉混合岩，这些岩石类型给施工带来了高地应力、高地温、涌突水、冰冻积雪、危岩落石等多重不良地质挑战。^[7]

隧道进口段高程约3458米，出口高程约3183米，最大埋深约1300米。为确保施工安全和质量，喷射混凝土施工技术被广泛应用于隧道衬砌结构中。该技术涉及材料选择、配合比设计、施工操作、后期养护等多个环节的质量控制，每个环节都需严格控制，以确保喷射混凝土的质量和性能满足设计要求。

然而，喜马拉雅山脉的特殊地质条件使得隧道喷射混凝土施工面临诸多难题。例如，隧道进口段覆盖层厚、基岩破碎，自稳能力差，需特别加强支护和防排水措施。隧道出口则受危岩落石、崩塌和岩屑坡等多重地质因素影响，围岩稳定性极差，开挖时易发生掉块和坍塌。这些复杂的地质条件要求在施工过程中必须高度重视超前地质预报工作，并根据实际情况灵活调整施工方案。^[8]

为确保隧道喷射混凝土施工的质量和安​​全，已采取一系列质量控制措施。包括优化材料选择、严格控制配合比设计、提高施工操作的规范性和精度、加强后期养护等。同时，还引入了新技术、新材料和新工艺，以提高施工效率和质量。



三、MM 工程隧道施工中混凝土喷射施工质量控制

（一）MM 工程隧道工程喷射混凝土材料及机械质量控制

1. 原材料质量控制

在 MM 工程的喷射混凝土施工过程中，原材料的质量控制是确保整体工程质量和安全性的关键环节。为确保喷射混凝土的支护强度、减少回弹量，并防止管道堵塞，对各类原材料进行了严格筛选和控制。

首先，作为粗骨料的卵石或碎石，其粒径被严格控制在15mm以下。这一选择不仅有助于保证喷射混凝土的均匀性和密实性，还能有效减少回弹量，提高支护效果。其次，在水泥的选择上，

根据工程的具体需求, 选用了矿渣硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。特别是在软弱围岩施工中, 为了确保混凝土的早期强度, 特别选用了标号等级 ≥ 42.5 级的早强水泥。此外, 对于细骨料的选择, 注重其含水量和细度模数的控制。选用含水量适中、细度模数高的中、粗砂, 不仅可以提升喷射混凝土的结构强度, 还能有效减少施工过程中的粉尘产生, 改善施工环境。在使用外加剂如速凝剂时, 进行了严格的相容性和凝结效果试验。^[9] 这一步骤确保了外加剂与水泥之间的良好相容性, 并控制了喷射混凝土的终凝和初凝时间在规定范围内, 从而保证了混凝土的性能和稳定性。最后, 对于施工用水, 进行了严格的质量控制。严禁使用含硫酸盐量超标或 pH 值过低的酸性水, 以确保喷射混凝土的结构稳定和强度发展。

2. 配合比质量控制

在 MM 公路隧道的喷射混凝土施工过程中, 配合比的质量控制是确保混凝土性能至关重要的环节。配合比的合理性直接关系到喷射混凝土的支护强度、回弹量、凝结时间以及工程整体的安全性。

首先, 针对含砂率这一关键参数, 严格控制在 45%~55% 之间。过高的含砂率会导致混凝土收缩性增强, 强度不足; 而过低的含砂率则会引起混凝土回弹量增大, 增加喷射管堵塞的风险。因此, 在 MM 工程中, 根据施工条件和设计要求, 精确调整含砂率, 确保其在合理范围内。其次, 水灰比的选择也是至关重要的。经过多次试验和实践验证, 确定在 MM 工程中, 当水灰比在 0.40~0.45 之间时, 喷射混凝土的回弹量最小, 强度达到最优。这一比例的确定, 既保证了混凝土的流动性, 又确保了其力学性能的稳定性。此外, 砂石与水泥的干集料重量比以及水泥的用量也是影响混凝土性能的重要因素。在 MM 工程中, 严格控制干集料重量比在 1 : 4~1 : 4.5 之间, 同时确保水泥的用量在 375~400kg/m³ 左右。这些措施有效地控制了混凝土的回弹量, 提高了喷射效率。最后, 针对速凝剂的掺和量, 根据公路隧道的不同区域进行了精细化的控制。在边墙区域, 速凝剂的掺和量控制在 2%~4% 之间, 以确保混凝土能够快速凝结, 满足支护要求; 在拱部区域, 同样采用这一掺和量范围, 以保证混凝土的均匀性和稳定性。^[10]

3. 施工机具性能质量控制

在 MM 工程的喷射混凝土施工过程中, 确保相关机具的性能稳定是保障施工质量和效率的关键环节。为确保机具的完好性和高效性, 进行了全面的性能质量控制。首先, 所有参与喷射混凝土施工的机具都经过了严格的气密性和水密性检查, 确保不漏气、不漏水。这是保证混凝土施工质量的基础, 能有效防止因机具问题导致的施工中断和质量问题。其次, 对于干混合料的生产能力, 要求机具的生产能力必须达到 3~5m³/h 的标准。这一要求确保了施工过程中的连续性和高效性, 满足了工程对混凝土供应速度和量的需求。同时, 为了保证喷射混凝土的均匀性和密实性, 对骨料的最大粒径进行了严格控制, 确保其小于 25mm。这一措施有助于减少混凝土中的空隙和缺陷, 提高整体结构的强度和耐久性。在输送距离方面, 根据机具的性能和混凝土的特性, 合

理限制了水平与垂直方向的输送距离。水平输送距离控制在 100m 以内, 垂直输送距离则限制在 30m 以内。这些措施确保了混凝土在输送过程中的稳定性和连续性, 减少了因输送距离过长而导致的混凝土损失和质量问题。此外, 供水设施也是喷射混凝土施工中不可或缺的一环。对供水设施进行了精确调节, 确保喷射混凝土喷头处的水压在 0.15~0.2MPa 之间。这一水压范围既能保证混凝土的充分湿润和混合, 又能避免因水压过高或过低而对喷射效果产生不良影响。

4. 平整度的控制

平整度是评价喷射混凝土支护质量的重要指标之一, 它直接关系到隧道衬砌的稳定性和使用寿命。因此, 在施工过程中, 必须采取一系列有效的质量控制措施来确保喷射混凝土的平整度。

首先, 施工前的准备工作是确保平整度的基础。这包括准确测量和标定隧道轮廓线, 确保喷射混凝土的基准面准确无误。同时, 还要检查喷射设备的性能和喷射参数的设置, 确保设备处于良好的工作状态, 并根据工程要求调整喷射压力和速度等参数。其次, 在施工过程中, 要严格控制混凝土混合料的制备质量。确保水泥、骨料和水等原材料的质量符合规范要求, 按照设计比例准确计量和搅拌。此外, 还要定期检查混凝土混合料的均匀性和流动性, 及时调整配合比, 以保证喷射混凝土的质量稳定。另外, 喷射操作过程中的技术控制也是关键。操作人员应熟练掌握喷射技巧, 确保喷射过程中混凝土均匀覆盖在隧道岩面上, 避免出现凹凸不平的情况。同时, 要根据喷射混凝土的硬化情况及时调整喷射角度和距离, 确保混凝土能够充分密实并与岩面紧密结合。此外, 施工过程中还要进行定期的质量检测和评估。通过采用专业的检测工具和方法, 对喷射混凝土的平整度进行实时监测和记录。一旦发现平整度不符合要求的情况, 要及时采取措施进行修正, 确保施工质量符合要求。最后, 施工后的养护和维护也是保证平整度的重要环节。喷射混凝土完成后, 要及时进行养护和保湿, 防止混凝土出现干裂和收缩等情况。同时, 还要定期对喷射混凝土进行检查和维护, 及时修复和处理可能出现的缺陷和问题, 确保隧道支护的平整度和稳定性。

(二) 隧道工程喷射混凝土厚度控制

在 MM 工程的隧道施工中, 喷射混凝土的厚度控制是确保隧道支护结构质量和安全性的关键环节。针对 C30 喷射混凝土, 根据不同的设计要求, 厚度存在 23cm、25cm 和 27cm 三种形式。为确保施工质量和效率, 采取了分层喷射的施工方法。

对于 23cm 厚的 C30 喷射混凝土, 采用了两次分层喷射的策略。首先, 喷射约 12cm 厚的混凝土层, 待其充分硬化并达到一定的强度后, 再进行第二次喷射, 增加至总厚度 23cm。这种策略确保了每层混凝土的均匀性和密实性, 减少了内部空洞和裂缝的产生, 从而提高了支护结构的整体稳定性。

对于 25cm 和 27cm 厚的 C30 喷射混凝土, 则采用了三次分层喷射的方法。首先, 喷射约 8cm 或 9cm 厚的混凝土层, 待其硬化并达到一定强度后, 进行第二次喷射, 增加至总厚度的三分之二左右。最后, 再进行第三次喷射, 达到最终的 25cm 或 27cm 厚度。这种施工方法不仅提高了混凝土的均匀性和密实性, 还确保

了支护结构的整体性能。

在实施分层喷射的过程中，严格控制了每次喷射的厚度和均匀性，确保混凝土能够紧密贴合岩面，避免出现喷射痕迹或凹凸不平的情况。同时，还根据具体情况调整了喷射压力和速度，以确保混凝土能够充分密实。此外，喷射完成后，及时进行了养护和保湿工作，以防止混凝土出现干裂和收缩等问题。通过这一系列的质量控制措施和技术手段，成功地实现了 MM 工程隧道工程中 C30 喷射混凝土的厚度控制，确保了隧道支护结构的质量和安全性。

（三）隧道工程喷射混凝土回弹量质量控制

在 MM 工程的隧道施工中，喷射混凝土的回弹量控制是确保混凝土质量的核心环节。回弹量过大不仅意味着混凝土强度可能不足，还增加了裂缝等质量问题的风险，从而影响隧道的安全性和耐久性。

为了有效控制回弹量，的技术人员根据现场的具体情况，对水压进行了精确的计算和调整。确保在喷射混凝土过程中，水压稳定且适中，从而避免回弹量的不必要增加。同时，也特别关注水灰比的控制。将水灰比调整至 0.45-0.50 的范围内，有助于改善混凝土的流动性和粘聚性，进一步减少回弹。

除了水压和水灰比的控制，还严格把关砂石材料的质量。确保砂石材料的粒径和级配符合规范要求，以提高混凝土的均匀性和密实性。选择湿喷工艺进行施工，该工艺能够更好地控制混凝土的喷射速度和均匀性，从而减少回弹。

在隧道工程喷射混凝土回弹量质量控制中，为确保喷射混凝土的强度和均匀性，提高隧道的安全性和耐久性，在施工过程中实施了一系列质量控制措施。这些措施不仅包括定期清理围岩表面的粉尘和保持受喷面与喷头垂直，还通过控制喷射混凝土的间隔距离和倾角，以及合理设定分层喷射间隔时间和喷层厚度来进一步减少回弹量。此外，结合喷浆工艺的具体操作要点，施工人员应采取以下措施：在开始喷浆前，确保喷射设备处于良好状态，检查喷头、输送管道和计量装置等部件的完整性和准确性。在喷浆过程中，遵循自下而上的原则进行喷射。这意味着先喷射隧道底部，然后逐渐向上移动，确保每一层喷射的混凝土都能充分覆盖前一层，减少空隙和回弹量。控制喷射速度和角度，使混凝土能够均匀分布在受喷面上。避免喷射速度过快或过慢，以及喷射角度过大或过小，这些都可能導致混凝土回弹量增加。在喷射过程中，密切关注混凝土的回弹情况。如果发现回弹量较大，

应及时调整喷射参数，如减小喷射压力、调整喷射角度或增加分层喷射的间隔时间。在每层喷射完成后，及时检查喷射质量，确保混凝土表面平整、无空鼓和裂缝等缺陷。如有需要，应及时进行修补和处理。

通过以上措施的实施，可以有效控制隧道工程喷射混凝土的回弹量，提高喷射混凝土的强度和均匀性，从而确保隧道工程的安全性和耐久性。同时，这些措施也有助于提高施工效率和质量，降低工程成本和维护成本。

（四）隧道工程喷射混凝土养护质量控制

在 MM 工程的隧道施工中，喷射混凝土的养护质量控制是确保混凝土性能与耐久性的重要环节。由于隧道施工现场环境的特殊性，如高温、低湿度等不利条件，容易导致混凝土在养护过程中出现水分蒸发过快、水泥水化程度降低等问题，进而引发混凝土裂缝，破坏其抗渗性和稳固性。

为确保混凝土的质量，MM 工程在喷射混凝土的养护工作中采取了多项有效措施。首先，定期对混凝土表面进行洒水保湿处理，以减缓水分蒸发速度，保持混凝土表面的湿润状态。这不仅为水泥水化反应提供了必要条件，还有助于提高混凝土的强度和耐久性。

在养护期间，还持续监测隧道内部的环境条件，包括温度和湿度等参数。根据这些环境信息，科学制定养护计划，调整单次洒水量和洒水养护的频率，以适应不同的施工情况。这种灵活的养护策略确保了混凝土在不同环境条件下都能得到充分的养护。当混凝土出现裂缝等质量问题时，及时采取有效的处理措施。对于混凝土表面形成的微小裂缝，首先清理裂缝表面，确保裂缝内无杂物和灰尘。然后，均匀涂刷环氧树脂胶泥来封闭裂缝，以防止问题进一步恶化。这种快速响应和精准处理的方式确保了混凝土结构的完整性和安全性。

四、结语

隧道喷射混凝土施工的质量控制技术研究至关重要，因为喷射混凝土施工技术的合理应用直接关系到隧道衬砌结构的受力情况和实际使用寿命。为确保工程质量达标和技术优势充分发挥，企业需积极采取质量控制措施，如材料选择、配合比设计、施工操作和后期养护等环节的严格监管，并不断创新和优化施工技术。只有这样，才能确保隧道工程的安全性、稳定性和经济性，为地下交通建设做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 田伟宇，柏春林，姜嘉男. 隧道工程混凝土施工质量控制措施 [J]. 四川水泥, 2022(2):196-197
- [2] 张杰，蔡维山，陈诚，等. 基于正交试验的固液耦合相似材料研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(5):174-182.
- [3] 胡晓东，黄俊友，於林，等. 胶凝材料粒径分布及粉煤灰掺量对混凝土耐盐腐蚀能力影响的差异性分析 [J]. 水利水电技术, 2012, 43(3):95-98.
- [4] 张静，左双英，张彦召，等. 岩质相似材料配比的正交试验研究 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(3):161-168.
- [5] 杨永民. 配合比参数对喷射混凝土回弹率的影响研究 [J]. 人民珠江, 2021, 42(2):57-60.
- [6] 郭永忠. 隧道湿喷混凝土回弹率影响因素及施工工艺研究 [J]. 科技研究, 2021(3):18-21,178
- [7] 高雪. 长大铁路隧道多工区多工作面施工组织管理技术研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2019.
- [8] 张伟. 山岭隧道开挖灾害预防与控制技术研究 [D]. 湖南: 中南大学, 2008.
- [9] 全明威. 滇中引水洞Ⅳ类水平层状围岩爆破超挖机理及控制技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [10] 张明. 湿喷稠流混凝土技术研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2003.