

隧道喷射混凝土施工质量检测与控制技术研究

毕俭耀 任浩 于启顺

华航检测认证(青岛)有限公司 山东 青岛 266000

摘要: 隧道喷射混凝土作为隧道支护核心结构,其施工质量直接影响工程安全与耐久性。本文聚焦质量检测与控制技术,通过分析强度、密实度、抗渗性等指标体系,结合原材料性能检测、施工参数动态监测及成型结构无损检测技术,构建全流程质量控制框架,实现从材料筛选到成型养护的闭环管控,提升隧道支护结构稳定性与长期安全性。

关键词: 隧道喷射混凝土;施工质量检测;质量控制技术

引言:隧道工程中,喷射混凝土承担围岩支护与结构成型双重功能,其施工质量受材料特性、工艺参数、环境条件等多因素影响。当前施工存在回弹率高、密实度不均、养护不到位等共性问题,易引发结构开裂、渗漏等隐患。通过系统分析质量影响因素,构建检测与控制技术体系,为提升隧道喷射混凝土施工质量提供方法指导,保障工程安全与耐久性。

1 隧道喷射混凝土施工质量核心内涵

1.1 隧道喷射混凝土质量的内涵与指标体系

隧道喷射混凝土质量的核心内涵在于其作为隧道支护结构的综合性能表现,需满足强度、耐久性、密实度及抗渗性等多维度指标要求。强度是基础保障,需确保混凝土在围岩压力下保持稳定,避免开裂、剥落或局部失效;耐久性则关注长期运营中的抗风化、抗侵蚀能力,直接影响隧道使用寿命与维护成本。密实度指标反映混凝土内部孔隙分布状态,高密实度可减少水分渗透路径,提升抗渗性,同时增强与围岩的黏结强度,防止因空隙导致的应力集中;抗渗性则需适应不同地质环境,如地下水丰富区域需重点控制渗透系数,避免渗漏引发围岩软化或结构失效。质量指标体系需贯穿施工全流程,从材料配比验证、喷射工艺参数调控到成型结构养护,均需围绕指标要求动态调整;例如,喷射厚度均匀性直接影响支护效果,过薄易导致应力集中,过厚则增加成本且可能引发收缩裂缝;回弹率控制则关联材料利用率与表面密实度,需通过设备调试与操作规范实现最优平衡。通过科学构建指标体系并实施动态管控,可确保隧道喷射混凝土从施工到运营的全周期质量稳定,为隧道结构安全提供可靠支撑。

1.2 隧道喷射混凝土施工质量的主要影响因素

隧道喷射混凝土施工质量受多维度因素交织影响,需从材料特性、工艺参数、环境条件及设备状态四方面系统分析。材料特性是质量基础,水泥品种需适配工程需

求,如早强水泥可加快初期支护强度形成;骨料级配需优化,避免粒径过小导致需水量增加或粒径过大引发喷射堵塞;外加剂类型与掺量需精准控制,减水剂可改善流动性,速凝剂则需匹配环境温度以避免凝结过快或过慢。工艺参数直接影响施工效果,喷射压力需根据围岩条件动态调整,压力过高易导致回弹率增加,压力过低则可能造成混凝土附着力不足;喷嘴角度与喷射距离需协同控制,通常以90°角垂直岩面、保持1-1.5米距离为宜,确保混凝土均匀覆盖;分层喷射厚度需严格把控,过薄易产生离析,过厚则可能引发收缩裂缝。环境条件需动态适配,温度影响水化反应速率,高温需加强保湿养护,低温则需采取保温措施;湿度影响混凝土凝结时间,干燥环境需增加喷水频次;风速过大易导致混凝土表面失水过快,需搭建防风屏障。设备状态需定期维护,喷射机、搅拌机需保持清洁无堵塞,压力表、流量计需定期校准,确保参数准确^[1]。通过多因素协同管控,可实现隧道喷射混凝土质量的稳定可控,为隧道结构安全提供坚实保障。

2 隧道喷射混凝土施工质量检测技术

2.1 原材料性能检测

原材料质量是决定喷射混凝土工程品质的先决条件,科学开展性能检测可有效规避材料缺陷带来的质量隐患,为后续配合比设计与现场施工奠定坚实的材料基础。隧道喷射混凝土原材料性能检测聚焦于核心指标的精准把控,确保材料特性满足工程需求。水泥检测重点涵盖强度等级、凝结时间及安定性,通过标准试块抗压试验验证其早期与后期强度发展规律,避免因强度不足引发结构安全隐患;骨料检测侧重粒径分布、含泥量及针片状颗粒含量,采用筛分法与水洗法评估级配合理性,减少离析风险并提升混凝土密实度。外加剂性能检测需关注减水率、保坍性及与水泥的相容性,通过流动度试验与凝结时间测试,验证其改善工作性能与延缓坍落度损失

的效果；矿物掺合料如粉煤灰、矿粉的活性指数与需水量比检测，则通过胶砂试验评估其对混凝土强度与耐久性的贡献；检测过程强调标准化操作与数据溯源，从取样、试验到结果分析均需符合规范要求。通过系统化的原材料性能检测，可提前识别材料缺陷，优化配合比设计，为喷射混凝土施工质量提供基础保障，最终实现材料性能与工程需求的精准匹配。

2.2 施工过程参数检测

施工过程参数是喷射混凝土成型质量的核心控制要素，实时监测与精准调控可有效减少施工缺陷，保障结构成型效果与长期稳定性。施工过程参数检测聚焦于动态施工环节的精准控制，通过实时监测与调整关键参数，保障喷射混凝土成型质量。喷射压力是核心指标之一，需根据混凝土配合比、喷射距离及围岩条件动态调整，利用压力传感器实现连续监测，避免压力不足导致密实度低或压力过高引发回弹浪费。喷射距离与角度直接影响混凝土附着效果，需通过激光测距仪与角度仪精确测量，确保喷射距离控制在0.8-1.2米范围内，喷射角度垂直于受喷面，偏差不超过 $\pm 5^\circ$ ，以实现均匀覆盖与最小回弹。喷射速度需结合泵送能力与施工效率综合控制，通过流量计与速度传感器实时反馈，避免速度过快导致离析或速度过慢影响施工进度；同时，施工环境温度湿度监测同样重要，需通过温湿度传感器记录环境变化，及时调整外加剂用量与养护措施，防止混凝土因环境变化产生裂缝或强度损失^[2]。通过系统化的施工过程参数检测，可实现施工参数的动态优化与精准控制，最终提升喷射混凝土的整体质量与结构耐久性，为隧道工程的安全运营提供可靠保障。

2.3 成型结构质量检测

2.3.1 外观质量与平整度检测

外观质量检测重点观察喷射混凝土表面是否存在蜂窝、麻面、裂缝等缺陷，通过目视检查与局部敲击判断密实度。表面应无显著色差、起砂或剥落现象，确保结构美观且无潜在隐患。平整度检测采用靠尺与塞尺组合测量，确保表面局部凹凸不超过5毫米，整体坡度符合设计要求。通过系统化的外观与平整度检测，可及时发现并修复表面缺陷，保障隧道结构的耐久性与安全性，为后续运营提供可靠基础，同时为二次衬砌施工创造良好条件，减少装饰修复成本，提升隧道全生命周期使用品质。

2.3.2 强度与密实度检测

强度检测通过回弹法、钻芯取样等手段验证混凝土抗压强度，确保其达到设计标准。密实度检测采用超声波探测或雷达扫描技术，识别内部孔隙与缺陷，保障结构整

体密实性。检测过程需结合现场环境与材料特性，动态调整检测参数，确保结果准确可靠。通过科学检测手段，可有效控制混凝土强度与密实度，提升隧道结构承载能力与长期稳定性，为工程安全运营提供坚实保障，从根本上杜绝因强度不足、密实度不够引发的结构开裂、剥落等安全风险。

2.3.3 厚度与背后空洞检测

厚度检测采用钻芯法与超声波法结合，通过钻取芯样直接测量厚度，或利用声波在混凝土中的传播速度推算厚度，确保符合设计要求。背后空洞检测运用地质雷达扫描，识别混凝土与围岩间的空隙，避免因空洞导致结构受力不均^[3]。检测过程需覆盖关键区域，如拱顶、边墙等，结合现场环境调整参数；通过精准的厚度与空洞检测，可有效预防结构缺陷，提升隧道整体安全性与耐久性，保障长期稳定运营，确保喷射混凝土与围岩紧密结合，充分发挥联合承载作用，筑牢隧道支护体系安全防线。

3 隧道喷射混凝土施工质量控制技术

3.1 原材料质量管控

3.1.1 胶凝材料质量管控

胶凝材料质量管控聚焦于水泥与矿物掺合料的性能优化。进场时严格执行验收流程，按规范批次进行见证取样，杜绝不合格材料用于实体工程。水泥需满足强度等级、凝结时间及安定性要求，通过进场抽检与定期复验确保稳定性。矿物掺合料如粉煤灰、矿粉需验证活性指数与需水量比，通过胶砂试验评估其对混凝土强度与耐久性的贡献。存储环节需控制温湿度，避免材料受潮结块或性能退化。通过精准的胶凝材料质量管控，可提升混凝土工作性能与长期稳定性，为隧道结构安全提供基础支撑，严控各项性能指标，从源头保障材料品质，为隧道混凝土结构耐久安全筑牢根基。

3.1.2 骨料质量管控

骨料质量管控需严格把控粒径、级配与清洁度。现场应提前开展筛分试验，保证级配连续合理，减少喷射过程中的堵管与回弹问题。粗骨料粒径应适配喷射设备要求，避免堵塞或离析；细骨料细度模数需稳定，确保混凝土流动性。含泥量与有害物质含量通过水洗法与化学分析检测，防止降低混凝土强度与耐久性。存储时需覆盖防尘，避免混入杂质。通过科学的骨料质量管控，可优化混凝土工作性能，减少施工缺陷，为隧道结构长期稳定性奠定基础，提升整体施工质量与安全性，严把骨料品质关口，优化混凝土配合比基础，有效规避施工质量隐患与结构病害。

3.1.3 外加剂质量管控

外加剂质量管控需聚焦其功能特性与适配性验证。使用前开展与胶凝材料的适配试验,根据现场环境确定最佳掺量,提升喷射效果。减水剂需检测减水率及保坍性能,确保混凝土流动性满足喷射要求,减少回弹损失。缓凝剂与早强剂需通过凝结时间试验,匹配施工环境温度湿度,避免过度缓凝或早强导致开裂。存储时需分类标识,防止混用或受潮失效^[4]。精准的外加剂质量管控可优化混凝土工作性能,提升结构密实度与耐久性,为隧道施工质量控制提供关键支撑,保障工程长期安全稳定,精准适配施工工况,提升混凝土综合性能,助力隧道工程全生命周期质量可靠。

3.2 施工工艺过程管控

施工工艺全过程管控,是喷射混凝土质量控制的核心环节。隧道喷射混凝土施工工艺过程管控是确保工程质量的核心环节,需从材料配比、设备操作、参数调控及实时监测四方面协同发力。材料选择上,严格筛选符合标准的水泥、骨料与外加剂,通过实验室试配确定最优配合比,避免因材料波动导致强度不足或开裂风险;设备操作需规范化,喷射机、搅拌机等设备需定期校准,确保出料均匀、压力稳定,防止因设备故障引发喷射不均或离析现象。施工参数调控需结合现场环境动态调整,如根据围岩湿度调整水灰比,根据喷射距离调整风压与喷嘴角度,确保混凝土与岩面紧密贴合,形成有效支护层;实时监测贯穿施工全程,采用无损检测技术监控混凝土厚度、强度及回弹率,利用激光测距仪与红外热像仪快速识别空洞、裂缝等缺陷,及时补喷修复。工艺过程管控需注重细节衔接,如喷射前岩面清洁度控制、喷射顺序分层推进、养护时间与湿度保障等,避免因工序疏漏导致质量隐患;通过系统化、精细化的工艺控制,可显著提升喷射混凝土的均匀性、密实度及耐久性,为隧道长期稳定运营提供可靠保障。

3.3 成型结构养护管控

规范养护是提升喷射混凝土强度与耐久性的关键,精细化管控可有效避免裂缝,保障结构长期稳定。成型结构养护管控是保障喷射混凝土后期性能的关键环节,需

围绕“时间-湿度-温度”三要素构建科学养护体系。养护时间需精准把控,初期养护应在喷射完成后立即启动,避免混凝土表面快速失水导致开裂;后期养护则需根据环境条件延长至7-14天,确保强度稳步增长。湿度控制需贯穿养护全程,通过定时喷水、覆盖湿润棉毡或使用养护剂等方式,维持混凝土表面湿润状态,防止干缩裂缝产生;温度管理需结合季节特点动态调整,夏季高温时采用遮阳、喷水降温措施,避免水分蒸发过快;冬季低温时通过覆盖保温材料、搭建暖棚等方式,防止混凝土受冻影响强度发展^[5]。养护过程中需注重细节操作,如避免直接冲刷混凝土表面导致骨料外露,养护用水需清洁无杂质,防止污染混凝土表面;通过系统化的养护管控,可有效提升混凝土的抗渗性、耐久性及整体稳定性,为隧道结构长期安全运营奠定坚实基础。养护效果需通过回弹强度测试、钻芯取样检测等方式进行验证,确保养护质量符合设计要求。

结束语:未来,需深化智能化检测设备研发,如集成智能传感器的实时监测系统,提升缺陷识别精度;拓展新型材料适配性研究,探索高性能混凝土、纤维增强材料在复杂地质条件下的应用潜力;强化施工环境自适应控制技术,结合大数据分析人工智能算法,实现温湿度、风速等环境参数的动态调节。通过技术协同创新,推动隧道工程向智能化、绿色化、可持续化方向演进,为地下空间安全高效开发提供全方位技术支撑。

参考文献:

- [1]蒋志彪.喷射混凝土技术在公路隧道施工中的应用研究[J].水泥,2025(4):99-101.
- [2]沈华,冯瑞科.隧道施工支护结构喷射混凝土技术研究[J].陶瓷,2025(10):209-211.
- [3]李蕙.公路隧道施工中喷射混凝土的质量控制分析[J].工程建设与设计,2024(9):221-223.
- [4]徐浩田,张金龙,马伟斌,等.基于三维激光扫描的隧道喷射混凝土施工管控技术[J].中国铁路,2024(11):45-52.
- [5]王虎.爆破近区喷射混凝土振动安全控制施工技术研究[J].现代工程科技,2024,3(2):93-96.