

隧道初期支护喷射混凝土回弹率控制的施工工艺优化

卢帅华

中铁十局集团第四工程有限公司 江苏 南京 210046

【摘要】：隧道初期支护中，喷射混凝土回弹率过高是普遍存在的施工难题，不仅造成大量材料浪费、显著增加施工成本，还会影响支护层的密实度与整体性，削弱初期支护的安全保障作用。本文以有效控制回弹率为核心目标，立足现场施工实际，围绕喷射参数调控、材料配合比改良、施工操作规范及设备维护等关键环节展开研究，提出针对性的施工工艺优化措施。实践验证表明，优化后的工艺可显著降低回弹率，提升初期支护结构施工质量，同时减少材料损耗、控制施工成本，为同类隧道初期支护施工提供了切实可行的参考依据。

【关键词】：隧道初期支护；喷射混凝土；回弹率控制；施工工艺优化

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.002

引言

隧道初期支护是维系施工安全、保障工程整体稳定性的核心环节，喷射混凝土凭借施工便捷、成型快速的优势，成为初期支护的关键工艺，其施工质量直接决定隧道支护体系的可靠性。在实际施工场景中，喷射混凝土回弹率过高是普遍存在的共性问题，不仅造成大量原材料浪费、推高施工成本，还会因回弹堆积阻碍施工进度，甚至影响支护结构的密实度与稳定性。基于此，优化施工工艺以有效控制回弹率，对提升隧道施工质量、保障施工安全具有重要现实意义。本文立足现场施工实际，聚焦喷射混凝土施工关键环节，探究回弹率控制的工艺优化路径，为隧道初期支护施工提供实践参考。

1 隧道初期支护喷射混凝土施工现状及回弹问题背景

喷射混凝土凭借施工便捷、能快速形成支护强度的特点，成为隧道初期支护的核心工艺，在各类公路、铁路隧道施工中应用广泛。当前施工中，多数项目采用干式或湿式喷射工艺，配合机械手或人工操作完成施工，整体施工流程已较为成熟，但实际作业过程中仍存在诸多影响施工质量的问题，其中回弹率过高是较为突出的共性问题。在隧道开挖后的围岩支护作业中，喷射混凝土需与围岩紧密贴合形成整体受力结构，而回弹现象的存在，导致混凝土无法充分附着于围岩表面，不仅干扰正常施工节奏，还对后续支护效果产生不利影响。

隧道施工环境的复杂性进一步加剧了回弹问题的普遍性。隧道内部空间狭窄，通风条件有限，围岩地质条件多样，部分区域存在裂隙发育、岩面不平整等情况，这些因素都会影响喷射混凝土的附着效果。同时，不同施工区域的围岩稳定性差异较大，为保障施工安全，喷射作业需在规定时间内完成初期支护，施

工人员往往难以充分调整作业参数以适配不同地质条件，进而导致回弹量增加^[1]。此外，施工设备的性能状态也会对施工质量产生影响，部分老旧设备的喷射压力不稳定、出料均匀性不足，进一步放大了回弹问题。

回弹问题不仅存在于单一隧道项目中，还广泛出现在不同地域、不同地质类型的隧道施工场景中，成为制约喷射混凝土施工质量提升的关键瓶颈。随着隧道建设规模的不断扩大，施工单位对施工效率和成本控制的要求不断提高，回弹率过高带来的负面影响愈发明显。大量回弹的混凝土材料无法有效利用，需额外清理外运，既增加了材料消耗，又延长了施工周期，还可能因清理不及时造成作业面堆积，影响后续工序开展。这种普遍存在的问题，使得优化施工工艺、控制回弹率成为隧道初期支护施工中亟待解决的重要课题。

2 喷射混凝土回弹率过高的影响因素分析

喷射混凝土材料自身性能是决定回弹率的基础因素，其性能参数的合理性直接影响回弹情况。混凝土配合比是否科学尤为关键，若骨料级配混乱，粗细骨料搭配失衡，或砂率控制不当，过高或过低都会破坏混凝土的黏聚性与流动性平衡。黏聚性不足时，喷射过程中骨料易与砂浆分离，无法形成整体附着于岩面，进而产生大量回弹；若水泥用量不足，会直接降低混凝土的黏结强度，使其难以牢固附着在围岩表面，增加脱落回弹的概率。此外，外加剂的选用与掺量把控也不容忽视，速凝剂作为核心外加剂，掺量不当会引发问题，掺量过少则混凝土凝结时间过长，在喷射冲击力和自身重力作用下易脱落回弹；掺量过多又会导致混凝土早期开裂，影响黏结效果，间接加剧回弹。

施工工艺参数的设置偏差是诱发回弹率过高的重

要原因。喷射压力的控制直接关系回弹效果，压力过大时，混凝土喷射速度过快，与围岩碰撞产生的反弹力增大，易造成大量回弹；压力过小时，混凝土动能不足，无法充分填充围岩裂隙，且难以克服自身重力附着于岩面，易发生滑落回弹。喷射距离与角度的把控也至关重要，距离过远会导致混凝土在传输过程中分散，冲击力衰减，无法有效附着；距离过近则冲击力过大，易反弹。喷射角度偏离垂直方向过多，会削弱混凝土与围岩的黏结力，增加回弹量^[2]。同时，喷射作业的连续性和均匀性不足，局部区域喷射不连贯、厚度不均，也会导致该区域回弹量异常增加。

施工环境与围岩条件的差异会进一步加剧回弹问题。隧道内部湿度、温度的波动会影响混凝土凝结速度，湿度较大时，围岩表面含水率过高，会降低混凝土与围岩的黏结力，导致回弹量增加。围岩自身条件更是核心影响因素，若岩面不平整，存在较多凸起或凹陷，混凝土难以形成均匀的附着层，凹陷处易产生空鼓，凸起处则会因喷射冲击产生大量回弹；在围岩稳定性较差的区域，为保障施工安全需快速完成喷射支护，施工人员难以充分调整工艺参数适配围岩条件，进而导致回弹率升高。

3 控制回弹率的喷射混凝土施工工艺优化措施

针对材料性能对回弹率的直接影响，核心优化方向聚焦于混凝土配合比的精准改良与材料适配性提升，从源头减少回弹隐患。在骨料选择与级配调整上，优先选用连续级配的骨料，严格控制粗骨料粒径上限，确保不超过16毫米，以此避免因骨料颗粒过大，在喷射过程中与围岩猛烈碰撞产生大量回弹；同时精准优化砂率，将其调控至适配工程需求的合理范围，通过提升混凝土的黏聚性，减少喷射时骨料与砂浆分离的现象，让混凝土整体附着性更强。水泥用量需结合不同段落的围岩条件灵活匹配，既要保证混凝土具备足够的黏结强度以紧密附着于围岩，又要避免用量过多造成浪费；搭配适量粉煤灰等掺合料，可进一步改善混凝土的工作性能，提升其流动性与和易性^[3]。速凝剂的选用需充分贴合隧道内的施工环境，优先采用环保型产品，掺量需通过现场多次试验确定，一般控制在水泥用量的2%—4%之间，确保混凝土能在喷射后3—5分钟内初凝、10分钟内终凝，有效减少凝结硬化前因自重或外力冲击导致的脱落回弹。

施工工艺参数的精细化调控是降低回弹率的关键环节，需根据现场实际条件动态调整以适配不同施工场景。喷射压力的控制需分区域细化，对于岩面平整、围岩稳定的区域，将喷射压力控制在0.3—0.5MPa，

保证混凝土具备足够动能附着于岩面；针对围岩裂隙发育、岩面破碎的区域，需适当降低压力至0.2—0.3MPa，避免压力过大导致混凝土冲击反弹，同时确保能填充围岩裂隙。喷射距离与角度的把控同样严格，将喷射枪与岩面的距离稳定在0.8—1.2米，尽量保持垂直喷射姿态；若遇拱顶、转角等特殊区域无法垂直喷射，需控制角度偏差不超过10度，以此提升混凝土与围岩的黏结力，减少回弹量。喷射作业采用分层分段推进的方式，每层喷射厚度严格控制在5—8厘米，待前一层混凝土达到初凝状态后再开展下一层喷射，既避免了一次喷射过厚因重力导致的脱落，又能保证喷射过程的连续性与均匀性，减少局部回弹堆积。

施工环境与作业流程的配套优化，是保障工艺优化效果充分发挥的重要补充。隧道内部作业环境复杂，湿度、粉尘等因素易影响混凝土黏结效果，需提前启动通风除湿设备，持续降低环境湿度，同时确保围岩表面干燥洁净；若岩面存在积水、浮尘或松动岩块，必须提前完成清理吹干、凿除加固处理，从基础层面消除影响混凝土与围岩黏结的不利因素，提升附着稳定性。针对岩面凹凸不平的区域，先采用水泥砂浆找平处理，细致填补凹陷部位，避免后续喷射时因受力不均产生空鼓、脱落等问题，减少回弹隐患；对于围岩稳定性较差的段落，需科学衔接开挖与喷射支护工序，严格缩短两道工序的间隔时间，防止围岩变形破坏喷射面平整度，保障喷射效果^[4]。同时，强化施工设备全周期管理，做好日常维护与定期校准工作，定期检查喷射机出料均匀性、压力稳定性及输送管道通畅性，及时更换磨损的出料口、密封圈等易损部件，确保设备性能稳定达标，从设备保障层面为回弹率控制筑牢基础。见图1所示：



图1 喷射混凝土施工工艺优化图

4 施工工艺优化后的回弹控制成效验证

为精准验证优化后施工工艺对喷射混凝土回弹率的控制效果，选取隧道施工中地质条件具有代表性的段落开展对比试验。试验段落与前期未优化工艺施工的段落处于同一隧道区间，确保围岩类型、岩面状态、

隧道断面尺寸及施工环境等核心条件完全一致,从试验基础上保障验证结果的客观性与可靠性。试验实施过程中,严格遵循优化后的施工工艺标准开展喷射作业,全程聚焦材料配合比精准把控、喷射压力动态调节、喷射距离与角度规范控制及作业流程有序推进等关键环节。同时,安排专人对施工全过程进行细致跟踪观测,全面记录回弹混凝土的产生量、堆积分布范围、清理所需工时等核心指标,并系统整理未优化工艺施工阶段的同期数据,形成完整的对比分析数据集。从现场直观观测结果来看,优化后工艺实施时,喷射混凝土与围岩的附着效果显著提升,混凝土能快速在岩面形成均匀、密实的支护层,无明显流淌或空鼓现象;回弹混凝土的产生量较优化前大幅减少,且堆积区域主要集中在作业面正下方的小范围区域,无大面积扩散情况,极大降低了作业面清理的难度。

工艺优化带来的回弹控制成效,进一步延伸到施工质量与施工效率的双重提升上。经现场质量检测,采用优化工艺施工完成的初期支护结构,混凝土表面平整光滑,无明显蜂窝、麻面及脱落痕迹,支护层厚度偏差控制在合理范围,整体均匀性良好,与围岩贴合紧密,有效保障了初期支护结构的承载稳定性与抗变形能力。在施工效率提升方面,由于回弹量大幅减少,原本需专门安排2-3人花费数小时清理的回弹堆积物,优化后仅需少量工时即可完成清理,大幅缩短了工序间隔时间,让喷射支护作业与后续工序的衔接更顺畅^[5]。同时,回弹材料的减少也降低了材料转运的频次,减少了喷射机等设备因频繁停机清理造成的无效损耗,避免设备长期空载运行导致的部件磨损,整体施工进度较优化前有明显加快,充分印证了优化工艺的实用性与可操作性,能够适配不同地质条件下的现场规模化施工需求。

参考文献:

- [1] 郭红先,李留兵.隧道初期支护喷射混凝土回弹量控制实践[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2025年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(中册).云南建投第四建设有限公司;中建六局水利水电建设集团有限公司,;2025:549-551.
- [2] 秦毅.浅谈隧道喷射混凝土湿喷机械手施工工艺[J].科学技术创新,2022,(06):109-112.
- [3] 陈杰,郭晓翠,宁钟祥.隧道初支喷射混凝土超耗原因与管控措施分析[J].四川水泥,2025,(05):231-233+239.
- [4] 渠忠,陈志永,任贵华.隧道初期支护喷射混凝土配合比优化设计[J].冶金与材料,2022,42(04):52-53+181.
- [5] 赵建祥.隧道工程中湿喷机械手喷射混凝土质量分析[J].交通世界,2020,(31):142-143.

从长期应用效果与综合效益维度考量,优化工艺的优势更为突出。对试验段落的初期支护结构进行长期跟踪观测,结果显示优化后施工的喷射混凝土支护层始终保持稳定状态,未出现开裂、变形、剥落等质量隐患,隧道围岩稳定性得到持续保障,后续无需投入额外人力物力进行加固修补作业,显著减少了后期维护的成本与工作量。在材料利用效益上,因回弹率有效降低,混凝土原材料的有效利用率大幅提升,避免了大量水泥、骨料等材料的浪费,直接降低了施工阶段的材料采购成本。此外,回弹堆积物的减少也改善了隧道内的施工环境,作业面能见度明显提升,减少了因回弹物滑倒、碰撞等引发的安全隐患,间接提升了施工安全保障水平。这些多维度的成效充分表明,优化后的喷射混凝土施工工艺能够有效控制回弹率,实现施工质量、效率与成本的协同提升,具备在同类隧道初期支护施工中广泛推广应用的价值。

5 结语

本文围绕隧道初期支护喷射混凝土回弹率控制展开研究,梳理了喷射混凝土施工现状及回弹问题的普遍背景,深入分析了材料性能、施工参数、环境与围岩条件等导致回弹率过高的核心因素,针对性提出了材料配合比改良、施工参数精细化调控、作业环境与流程优化等工艺措施,并通过现场试验验证了优化方案的成效。实践表明,优化后的施工工艺能显著降低回弹量,提升支护结构质量,同时提高施工效率、减少材料浪费与成本支出。该工艺优化方案贴合现场施工实际,操作简便、实用性强,可为同类隧道初期支护施工提供有效参考。后续可结合不同地质条件的施工需求,对工艺参数进一步细化调整,让回弹率控制效果更贴合各类施工场景,助力隧道施工质量与效益的稳步提升。