

隧道初期支护喷射混凝土回弹率控制

胡双龙

湖北交投建设集团有限公司桥隧分公司 湖北 武汉 433300

【摘要】：高速公路隧道初期支护喷射混凝土普遍存在回弹率过高、早期力学性能薄弱、长期耐久性性能不足等工程问题。依托流变调控思路，搭配专用复合功能材料与液体无碱速凝剂形成配套材料体系，结合标准化施工工艺搭建完整的回弹控制方案。分别在高寒、常温隧道开展现场应用检验，整套技术可同步优化喷射施工成型效果、早期承载能力与抗渗透耐久性能，适配复杂地质条件下隧道初期支护施工需求，可为同类工程回弹治理提供成套技术参考。

【关键词】：喷射混凝土；回弹率控制；功能材料；隧道初期支护；流变性能

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.061

国内高速公路隧道多采用复合式衬砌支护结构，喷射混凝土作为初期支护主要承载层，直接决定围岩变形约束效果与隧道长期服役稳定性。西部高速公路隧道地质环境复杂，常规喷射混凝土施工回弹量大，不仅造成原材料浪费，还易出现支护厚度不足、密实度偏低等缺陷。现有规范仅对后期强度作出规定，缺少针对回弹、早强及耐久性的系统管控方案。本文围绕喷射混凝土回弹率控制展开研究，通过优化复合功能材料配比、调控拌和物流变特性、规范现场喷射工艺，结合不同工况隧道现场试验验证整套控制技术的实际应用效果。

1 隧道喷射混凝土回弹率超标工程问题分析

高速公路隧道复合式衬砌体系中，喷射混凝土作为初期支护核心承载结构，施工阶段物料反弹脱落形成的高回弹现象会直接改变支护结构成型质量。回弹物料大多裹挟完整骨料，脱离围岩支护面后无法参与结构成型，持续增大砂石、水泥等胶凝原材料的实际消耗总量，同步产生大量硬化废渣，增加现场废渣转运与处置工作量。高回弹状态下围岩表层覆盖混凝土厚度难以达到设计标准，支护层局部存在薄浆、缺料区域，围岩与喷射混凝土贴合密实度下降，界面缝隙持续留存，地下水与围岩内部侵蚀介质易沿缝隙渗入支护内部^[1]。西部地区隧道普遍存在软岩大变形、富水、高地应力等复杂地质条件，高回弹带来的支护厚度不足问题会进一步削弱初期支护约束围岩变形的能力，施工工序无法快速衔接，整体掘进支护循环进度受到持续制约。

2 隧道喷射混凝土低回弹配套控制技术

2.1 功能材料复配优化流变参数

采用早强、增黏、增密、减缩四类组分复合制备专用功能材料，以硝酸钙作为早强核心组分，纳米纤维素承担增黏作用，微硅粉与超细矿粉构成填充体系，吸水树脂平衡体系收缩变形。材料按胶凝材料总质量 20% 恒定掺量掺入拌合体系，依

靠纳米纤维素在浆体内部搭建丝状网状结构，持续提升新拌混凝土宾汉姆模型中的屈服应力与塑性黏度两项核心流变指标。浆体内部结构稳定后，骨料与水泥浆体包裹粘结强度得到提升，骨料撞击围岩界面时不易发生剥离脱落，从材料本征性能层面削弱反弹趋势。

2.2 无碱速凝剂协同配比调控

选用液体无碱型速凝剂作为喷射混凝土配套专用外加剂，统一将速凝剂掺量设定为胶凝材料总质量的 6%，与自研复合功能材料搭配构建双组分协同掺配体系。仅单独掺入速凝剂会改变水泥水化产物形态，破坏水泥石原有孔隙结构，提升整体渗透性能，双组分复配体系能够抵消速凝剂造成的孔隙劣化问题，体系内增密组分可填充水化产生的粗大毛细孔道。两类材料同步投入搅拌工序后，水化反应分层有序开展，表层浆体快速凝结贴合围岩，内部浆体持续密实水化，防止骨料因表层过早凝固失去浆体包裹而大量脱落^[2]。这套协同配比确定两类外加剂适配掺量范围，形成可推广的标准化配比方案，完善湿喷混凝土外加剂复配适配方向的试验研究体系。

2.3 现场喷射施工工艺管控

拌合阶段精准调控拌和物工作性能，将混凝土出机扩展度稳定维持 600mm 标准区间，结合现场施工环境温度灵活调节拌合用水温度，高寒工况适当提高拌合水温，保障拌和物出机温度达到水泥水化所需基础温度条件。喷射作业按照边墙、拱顶划分独立施工区域，校准喷射枪头与围岩接触面垂直间距，采用匀速薄层分层喷射成型方式，单次喷射厚度严格遵循规范限值，规避厚层一次性喷射引发的浆体自重脱落问题。作业面全覆盖铺设防渗彩条布收集回弹物料，依据回弹物料称重数据动态调整拌合料黏聚特性。

3 隧道喷射混凝土回弹控制现场实效检验

3.1 高寒隧道回弹及强度指标检测

现场试验场地长期处于低温环境，环境温度稳定至-7.4℃，通过调整拌合用水、外加剂掺配比例调控拌合体系，使拌和物出机温度稳定维持6.6℃，隧道初期支护结构统一采用C40强度等级喷射混凝土。作业面铺设全覆盖防渗彩条布承接喷射过程中脱落的骨料与浆体，精准称量全部回弹集料总质量后计算整体回弹率，实测回弹率稳定至8.6%。采用大板切割法从实体支护层截取成型试块开展力学性能检测，成型8小时试件抗压强度测得13.7MPa，24小时试件抗压强度达到19.9MPa。同步预留标准试件养护至56d开展电通量耐久测试，最终检测数值为860C。整套低温环境下同步采集回弹、早强与耐久指标的检测流程，完善高寒地区喷射混凝土综合性能现场检测体系，为低温工况隧道支护材料综合性能评定提供完整可靠的实测数据参照。

3.2 常规隧道回弹耐久性能实测

试验区域整体环境温度稳定维持12℃，搅拌环节精准调控复合功能材料与无碱速凝剂的掺配比例，以此调节拌和物工作性能，使拌和物出机扩展度稳定维持600mm，拌和物整体出机温度稳定控制在17℃，支护结构统一采用C40强度等级喷射混凝土。喷射作业全程铺设彩条布完整收集脱落混凝土物料，通过称量物料质量完成回弹率测算，实测回弹率数值为7.5%。采用大板切割法截取现场成型实体试件，分时段开展抗压性能检测，测得8h抗压强度12.8MPa，24h抗压强度18.6MPa。试件标准养护至56d后开展电通量耐久检测，最终检测结果为950C。常温环境同步采集回弹、力学与耐久指标的实测方案，弥补常规山区隧道喷射混凝土现场耐久实测数据空白，为温和地质条件隧道支护耐久性评价提供完整实测参考。

3.3 回弹控制技术综合效益对比

依托高寒、常温两处温差明显的隧道现场实测数据开展多

维度性能指标横向对照分析，两处试验场地施工回弹率均稳定控制在10%的设计限值以内，和传统工艺30%~50%的高回弹区间形成显著差距。两处施工现场成型混凝土8h抗压强度全部超出10MPa控制标准，24h抗压强度均满足高于15MPa的规范要求，56d电通量检测结果均低于1200C耐久控制阈值。依托现场回弹物料称重结果统计原材料损耗降低幅度，结合实体结构力学、耐久检测结果搭建量化效益评判体系^[3]。多工况指标对比模式建立低回弹喷射技术量化评价路径，为各类复杂地质高速公路隧道支护方案开展经济、耐久双重性能综合评定搭建标准化数据对比体系。见图1。

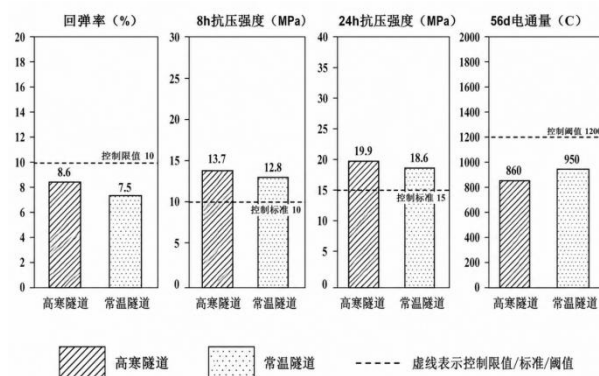


图1 高寒与常温隧道各项检测指标对比

4 结语

复杂地质高速公路隧道初期支护施工对喷射混凝土成型质量提出多重严苛要求，流变参数优化、外加剂协同配比、标准化施工管控协同作用，能够从材料与工艺层面同步解决回弹超标带来的各类施工隐患。高低温不同现场工况的实测结果印证整套管控体系具备良好环境适应性，可同步兼顾支护早期承载能力与长期抗渗耐久性能。该套回弹控制思路形成可落地的成套实施路径，为山区、高寒等特殊环境隧道喷射支护施工质量管控提供完善实操依据，对提升高速公路隧道支护整体施工水平具备实际推广价值。

参考文献:

- [1] 王国靖.公路隧道喷射混凝土回弹率的影响因素分析[J].建筑安全,2025,40(5):56-58+62.
- [2] 赵璐芳,张玉苇,孙林,等.降低隧道喷射混凝土回弹率的措施研究[J].城市建筑空间,2023,30(S1):365-366.
- [3] 王家赫,谢永江,冯仲伟,等.低回弹高早强喷射混凝土技术与工程应用[J].混凝土与水泥制品,2023,(2):5-9.