

公路隧道初期支护喷射混凝土回弹率影响因素实地调查

向 焱

云南云岭高速公路工程咨询有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】：公路隧道初期支护施工中，喷射混凝土工序承担着保障隧道围岩稳定、防范坍塌事故的核心作用，其施工品质直接关系到隧道的长期服役安全与耐用性。回弹率作为衡量喷射混凝土施工质量的关键管控指标，通过前期实地调研发现，目前公路隧道喷射混凝土施工中，回弹率偏高的问题较为普遍，不合理的回弹现象不仅造成混凝土材料的不必要浪费，还可能导致初期支护结构存在薄弱环节，埋下安全隐患。本文将采用实地调查的方式，全面梳理影响回弹率的各类因素，剖析各因素的具体作用规律，提出影响回弹率的应对策略，以期优化现场施工工艺，有效降低回弹率，从而提升初期支护施工质量。

【关键词】：公路隧道；初期；支护喷射混凝土回弹率；影响因素

DOI:10.12417/2811-0528.26.09.030

引言

在新时代的发展过程中，公路隧道建设水平是我国交通运输水平得到提高的一种表现。在新的时代，我国交通运输工作面临的压力很大，因此必须加强公路隧道的初期支护工作。只有公路隧道的初期支护工作得到很好的开展，才能够令我国的交通运输业得到更好的发展。在公路隧道初期支护发展过程中，喷射混凝土施工技术发挥着非常重要的作用，其可以不断提高公路隧道的质量，提高公路隧道的工作效率，尽量避免安全隐患的发生。因此，针对公路隧道初期支护喷射混凝土回弹率影响因素进行实地调查极为关键。

1 公路隧道初期支护喷射混凝土回弹率影响因素

1.1 围岩地质条件对回弹率的影响

围岩地质条件是影响喷射混凝土回弹率的基础性因素，也是本次实地调查中发现的最核心影响因素之一，其影响主要体现在围岩的完整性、强度及表面状态三个维度。通过对不同地质条件隧道的实地调查发现，围岩完整性越好、强度越高，喷射混凝土的回弹率就越低；反之，当围岩处于破碎状态、强度较低时，回弹率会出现显著升高。当围岩为完整坚硬岩层时，其表面平整、承载力较强，喷射混凝土能够快速附着并凝结，回弹率普遍控制在8%~12%；而当围岩为破碎岩层、软弱围岩时，岩体裂隙发育、表面凹凸不平，部分混凝土会因围岩表面无法有效承接而脱落回弹，同时软弱围岩易受喷射冲击力影响发生局部坍塌，进一步增加回弹量，此类隧道的回弹率多在18%~25%。此外，围岩表面的洁净度也会对回弹率产生影响，实地调查发现，若围岩表面附着的浮渣、粉尘、积水未清理干净，会降低混凝土与围岩的黏结力，导致喷射过程中混凝土易脱落，回弹率可升高3%~5%。因此，围岩地质条件的差异，直接决定了喷射混凝土回弹率的基础水平，也是后续开展工艺优化工作需重点考虑的前提因素。

1.2 喷射混凝土材料性能对回弹率的影响

喷射混凝土材料性能直接影响其流动性、黏结性与凝结速度，进而显著影响回弹率，这是本次实地调查发现的关键可控因素。结合多隧道材料检测与实地观察，其影响主要集中在配合比、骨料级配与外加剂三个方面。

| 材料影响维度 | 具体参数/状态 | 回弹率影响结果 |
|--------|---------------------|------------------|
| 配合比 | 水泥不足/水胶比大；水泥过多/水胶比小 | 回弹率升高 6%~8%或明显上升 |
| 骨料级配 | 粒径>16mm/级配不均；级配合理 | 回弹率显著升高；降低 4%~6% |
| 外加剂 | 速凝剂不当/无黏结剂；掺量合理+黏结剂 | 回弹率升高；有效降低回弹率 |

配合比方面，水泥用量、水胶比偏离合理范围，均会导致回弹率升高；骨料粒径超16mm、级配不均会加剧回弹，级配合理可降低回弹率4%~6%。外加剂中，速凝剂掺量不当会升高回弹率，合理掺加速凝剂与黏结剂，可通过加快凝结、提升黏结力降低回弹率，这一结论经实地调查验证。

1.3 喷射施工工艺参数对回弹率的影响

喷射施工工艺参数的合理设置，是管控回弹率的核心所在，本次实地调查发现，多数隧道回弹率偏高的问题，均与工艺参数配置不当存在直接关联，核心影响参数涵盖喷射压力、喷射距离、喷射角度及喷射速度四大类。

| 工艺参数 | 合理控制范围 | 偏离后回弹率变化情况 |
|------|--------|------------|
| | | |

| | | |
|------|------------|--------------------------------|
| 喷射压力 | 0.3~0.5MPa | 偏离合理范围后升高 5%~10% |
| 喷射距离 | 1.0~1.2m | 距离过近或过远, 回弹率均会升高 |
| 喷射角度 | 与围岩表面保持垂直 | 偏离垂直方向超 15° 回弹率升高, 拱部可达 8%~12% |
| 喷射速度 | 保持匀速且速度适中 | 速度过快或过慢, 均会增加回弹量 |

喷射压力、距离、角度需严格控制在合理区间内, 喷射速度需保持匀速适中, 任何参数出现偏离, 都会明显升高回弹率, 其中拱部施工中, 喷射角度的控制对回弹率的影响更为突出, 这一结论均通过本次实地调查得到验证。

1.4 施工人员操作水平对回弹率的影响

喷射混凝土施工属于手工操作主导的工序, 施工人员的操作水平与责任意识, 对回弹率的影响具有直接性, 这也是本次实地调查中发现的易被忽视的重要因素。通过对不同施工班组的实地对比调查发现, 操作熟练、责任意识强的班组, 回弹率普遍偏低, 而操作不规范、责任心不足的班组, 回弹率往往超出规范范围。具体来看, 操作熟练的施工人员能够根据围岩地质条件、喷射部位的不同, 灵活调整喷射压力、距离与角度, 避免因参数不当导致的回弹; 同时, 能够控制好喷射节奏, 避免出现局部堆积或喷射不充分的情况, 减少回弹量。而操作不规范的人员, 往往固定参数不变, 不根据现场实际情况进行调整, 例如拱部与侧墙采用相同的喷射参数, 导致拱部回弹率偏高; 部分人员操作时敷衍了事, 未对围岩表面进行彻底清理, 或在喷射过程中随意改变喷射方向与速度, 进一步增加了回弹率。此外, 施工人员的培训程度也会影响操作水平, 实地调查显示, 经过系统培训的施工人员, 其操作规范性明显提升, 回弹率可降低 7%~9%, 而未经过专业培训的人员, 回弹率普遍偏高。

1.5 施工环境条件对回弹率的影响

施工环境条件虽不是影响回弹率的核心因素, 但实地调查发现, 其对回弹率的影响具有不可忽视的作用, 主要体现在环境温度、湿度与隧道内通风情况三个方面。在环境温度方面, 温度过低 (低于 5℃) 时, 混凝土凝结速度会变慢, 喷射后易出现脱落回弹, 同时混凝土的黏结性会下降, 回弹率会升高 4%~6%; 温度过高 (高于 35℃) 时, 混凝土中的水分蒸发过快, 易出现干缩开裂现象, 也会增加回弹量, 且会影响混凝土的最终强度。在环境湿度方面, 围岩表面过于干燥, 会快速吸收混凝土中的水分, 导致混凝土黏结力下降, 易脱落回弹; 而围岩表面过于潮湿、存在积水, 会降低混凝土与围岩的黏结效果, 同样会增加回弹率, 实地调查发现, 环境湿度控制在

60%~80%时, 回弹率最低。此外, 隧道内的通风情况也会影响回弹率, 通风不良时, 隧道内粉尘浓度过高, 会附着在围岩表面与混凝土表面, 降低两者之间的黏结力, 同时会影响施工人员的操作视野, 导致操作不规范, 进而增加回弹率。

2 影响回弹率的应对策略

2.1 适配围岩地质条件, 筑牢回弹率管控基础

结合隧道围岩的实际情况, 控制公路隧道初期支护喷射混凝土回弹率, 需采取针对性的预处理与适配措施, 切实提升围岩对喷射混凝土的承接能力和黏结效果。在施工开展前, 就对隧道围岩进行全面细致的勘察工作, 明确围岩的完整性、强度等级以及表面状态, 依据勘察结果划分围岩等级, 进而针对性制定围岩预处理方案。对于完整坚硬的围岩, 重点做好表面洁净处理工作, 彻底清除表面的浮渣、粉尘以及积水, 避免形成隔离层, 以此提升混凝土与围岩的黏结力; 对于破碎、软弱类型的围岩, 需先采取超前支护手段, 对围岩进行加固处理, 减少岩体裂隙发育, 同时对围岩表面进行找平作业, 增大混凝土与围岩的黏结面积, 降低喷射冲击力对围岩的扰动, 减少因围岩坍塌引发的回弹现象。此外, 还需根据围岩洁净度的不同等级, 规范表面清理流程, 确保清理工作到位, 针对软弱围岩受洁净度影响更为明显的特点, 可适当增加清理的频次与力度, 从基础层面做好回弹率管控, 确保喷射混凝土能够与围岩有效黏结、稳定附着。

2.2 优化喷射混凝土材料性能, 提升抗回弹能力

结合材料性能对回弹率的“区间适配性”作用规律, 相关部门需优化喷射混凝土材料配合比、规范骨料级配标准、合理选用外加剂, 以此提升混凝土的黏聚性、流动性以及凝结速度, 增强其抗回弹能力。在配合比优化环节, 需结合现场施工需求与所用材料的自身特性, 确定水胶比与水泥用量的最优区间, 避免出现水胶比偏离合理范围、水泥用量不足或过量的情况, 通过试验反复调整配合比参数, 确保混凝土的黏聚性与流动性能够适配喷射施工的实际需求, 减少因混凝土离析、脱落导致的回弹。在骨料级配控制方面, 严格筛选所用骨料, 将骨料粒径控制在 16mm 以内, 确保骨料级配连续且均匀, 补充足量的细骨料, 提升混凝土的黏聚性, 避免因骨料粒径过大、级配不均而引发的回弹问题。在外加剂的选用与掺加环节, 选用与混凝土适配性较强的速凝剂与黏结剂, 严格把控速凝剂的掺量在规范要求范围内, 确保掺加均匀, 加快混凝土的凝结速度; 合理掺加黏结剂, 提升混凝土与围岩之间的黏结力, 通过对材料性能的全面优化, 从源头降低回弹率, 同时保障喷射混凝土的强度与初期支护效果。

2.3 规范喷射施工工艺参数，精准控制回弹率

公路隧道初期支护喷射混凝土回弹率的控制，需规范喷射施工工艺参数设置，实现各参数之间的协同配合，确保所有参数均处于最优控制区间，减少因参数偏离引发的回弹现象。在喷射压力控制方面，根据围岩的实际条件与具体喷射部位，将喷射压力精准控制在 0.3~0.5MPa 的合理区间内，安排专人实时监测压力变化情况，及时调整喷射设备参数，避免出现压力过高或过低的问题，减少混凝土因反弹或附着不足导致的回弹。在喷射距离与角度控制方面，严格把控喷射距离在 1.0~1.2m 的最优区间，确保喷射方向与围岩表面保持垂直，针对拱部作业空间有限的问题，优化现场操作方式，尽量缩小喷射角度的偏离幅度，减少拱部回弹量的增加。在喷射速度与节奏控制方面，保持匀速喷射的状态，合理控制喷射速度，避免因速度过快导致混凝土无法充分附着在围岩表面，或因速度过慢造成混凝土局部堆积、脱落，同时根据混凝土的凝结速度，灵活调整喷射节奏，确保隧道各部位喷射均匀，通过对施工工艺参数的精准管控，实现回弹率的有效控制。

2.4 提升施工人员操作水平，强化责任管控

公路隧道初期支护喷射混凝土回弹率影响的控制过程中，需加强施工人员的培训与管理工作，提升其操作规范性与责任意识，确保各项回弹率管控措施能够落地执行。在建立完善的施工人员培训体系基础上，定期组织喷射混凝土作业人员开展专业技能培训，重点讲解喷射混凝土施工工艺要点、工艺参数调整方法、围岩预处理技巧等相关内容，结合各影响因素的作用规律，提升施工人员对现场实际情况的判断能力与应急应对能力，确保操作人员能够根据围岩条件、喷射部位的不同，动态调整操作参数。同时，建立健全岗位责任制，明确每一位操作人员的岗位职责，加强现场施工监管，规范操作流程，杜绝敷衍了事、操作不规范等行为，要求操作人员严格落实围岩表

面清理、工艺参数调整、喷射节奏控制等各项要求。另外，还要建立科学合理的奖惩机制，对操作规范、回弹率控制效果良好的人员给予适当奖励，对操作不规范、回弹率超出标准的人员进行相应处罚，充分激发施工人员的工作积极性与责任意识，通过提升施工人员的操作水平，实现回弹率的稳定控制。

2.5 优化施工环境条件，减少环境因素影响

公路隧道初期支护喷射混凝土回弹率影响的控制，需将施工温度、环境湿度、隧道内通风条件控制在适宜区间内，减少环境因素对回弹率的不利影响。在温度控制方面，现场环境温度低于 5℃ 时，采取有效的保温措施，对喷射设备、混凝土材料进行预热处理，加快混凝土的凝结速度，减少混凝土脱落回弹的情况；环境温度高于 35℃ 时，采取降温措施，避免混凝土中的水分蒸发过快，减少因干缩开裂导致的回弹，确保施工温度维持在 5℃~35℃ 的适宜区间内。在湿度控制方面，实时监测现场环境湿度，围岩表面过于干燥时，适当洒水进行湿润处理，避免围岩过快吸收混凝土中的水分；围岩表面过于潮湿、存在积水时，及时进行排水、擦干处理，提升混凝土与围岩的黏结效果，确保环境湿度控制在 60%~80% 的最优区间。在通风条件优化方面，完善隧道内部通风系统，保持良好的通风状态，降低隧道内粉尘浓度，改善操作人员的作业视野，避免因粉尘积聚导致混凝土与围岩黏结力下降、操作不规范等问题，同时减少粉尘对施工人员的影响，提升操作规范性，通过对施工环境条件的优化，进一步降低回弹率的波动幅度。

总而言之，通过对公路隧道初期支护喷射混凝土回弹率实施实地调查，全面梳理并深入剖析了围岩地质条件、混凝土材料性能、喷射工艺参数等核心影响因素及其作用逻辑。科学管控回弹率，可以有效减少材料损耗、压缩施工成本，切实提升初期支护施工品质，为公路隧道施工安全及长期服役可靠性筑牢基础。

参考文献：

- [1] 范诗浩.喷射混凝土在公路隧道初期支护中的应用[J].四川水泥,2025,(07):239-241.
- [2] 田冲冲,刘浏,贾占胜.公路隧道初期支护变形特性分析[J].工程建设与设计,2024,(11):89-91.
- [3] 张正蕾.公路隧道初期支护施工质量控制的有关思考[J].散装水泥,2024,(02):176-178.
- [4] 刘全胜,李大庆,刘海锋.公路隧道建设中的喷射混凝土支护施工工艺[J].四川建材,2023,49(09):131-133.
- [5] 黎育文.隧道初期支护变形问题及其措施[J].运输经理世界,2022,(22):98-100.