

# 公路隧道湿喷混凝土回弹率控制技术

文 / 王银庆 中铁上海工程局集团第一工程有限公司

**摘要：**公路隧道湿喷作业中，回弹率直接牵动材料利用、喷层厚度与作业安全。本文围绕材料体系、设备与工艺参数、施工组织管理，分别从配合比特性优化、喷射工艺参数调整与现场施工管理流程规范三方面着手，提出了公路隧道湿喷混凝土回弹率控制技术路径，为隧道湿喷回弹治理提供了可复制的工程范式。

**关键词：**湿喷混凝土；回弹率；公路隧道；材料配比

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.063

## 引言

在公路工程中，回弹率通常指喷射混凝土施工过程中，未与受喷面粘结而弹回的混凝土材料占喷射总量的百分比。它是衡量喷射工艺效率和施工质量的重要指标。喷射混凝土被广泛用于隧道（洞）的初期支护，对围岩起到临时支护作用。混凝土喷射施工过程中存在混凝土回弹率过大的问题。据典型工程统计，传统施工中每立方米混凝土回弹损失达25%~30%，折合材料成本增加20%~25%；施工效率方面，回弹料堆积需清理，占用单循环作业时间，延长工序衔接周期；结构质量层面，回弹率超标常伴随喷射层实际厚度不足，需二次补喷以满足设计要求，不仅增加工序复杂度，还可能因层间结合不良降低支护结构整体性，对隧道围岩稳定构成潜在风险。因此，探究喷射混凝土回弹率控制技术对节约隧道建设成本和提高工程质量具有积极意义。

## 一、工程概况

G106鄂州碧石至黄石铁山改建工程（鄂州段）项目全长6.904 km，采用一级公路技术标准，整体式路基宽度为31.5m，设计时速60km/h。全线设涵洞23道（其中圆管涵14道，盖板涵9道），分离式隧道1.386 km/1座（左线长1389.079m，右线长1383.641m）隧道设5处人行横洞，2处车行横洞，4处紧急停车带；养护工区和停车区各1处。

## 二、公路隧道湿喷混凝土回弹率的影响因素

### （一）材料体系因素

喷射混凝土的回弹率在很大程度上受到其所采用材料体系的直接影响。这一影响并非线性叠加，而是各参数相互耦合所致的复合结果。以水胶比为例，水胶比过大早期强度上升慢浆体缺乏粘结力，颗粒抵达岩面后往往形成短暂停留后被射流再度带离。若水胶比过小，早期强度上升较快，浆体变稠，雾化困难，粒团在喷嘴处聚集，一旦冲击面层，便以整块形式被反弹。类似地，骨料的粒径结构亦不可忽视。若细集料比例偏低，混合物结构松散，颗粒因缺少浆体包裹，落点接触不充分，极易弹回。若细料占比偏高，则在喷附表面形成浆膜层，要是厚度超过临界点，后续射流便将其连片剥离，表现

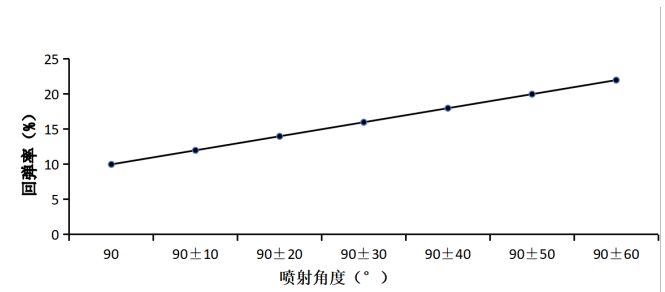
出团状回弹。粒径分布与喷射路径间的契合程度亦不可忽略。若最大骨料直径接近喷嘴口径或筋网净距，颗粒更容易在穿越路径中遭遇障碍并发生动量反向回射。此外，速凝剂的作用窗口必须精准控制，其掺量一旦偏高，雾化颗粒在离开喷嘴前便发生凝聚，形成硬团，撞击后无法压入而迅速弹离。

### （二）喷射设备与工艺参数

在湿喷作业过程中，设备状态与参数设置的细微变化会在短时间内放大成明显的回弹差异。例如，风压决定了颗粒获得的初始动能。压力设置不足，颗粒就会失去有效穿透表层的能力，多在接触点打滑后被抛离；若压力过高，则切向速度增加，冲击过程中发生滑移与二次弹跳，造成粒团回溅。人工操作喷射角度的微调也显著影响喷射效率。若角度逼近垂直，颗粒受力方向与目标面法向重合，更易嵌入粗糙界面；角度偏离增大时，射流在表面形成滑动轨迹，能量未被吸收便沿切向逃逸，造成条带状回弹。喷距的变化也具有临界性，过短时，浆料尚未充分分散，团状击打形成整体弹离；过长时，动能被空气耗散殆尽，最终抵达表面仅凭自重附着。摆动方式亦对整体稳定性提出挑战。喷头移动幅度过大或频率不稳，则射流覆盖区域波动，入射角呈周期性变动，易在间隔区出现高回弹带。

### （三）施工组织与管理因素

施工现场的组织效率与管理细节往往是决定回弹是否可控的隐性变量。混凝土的坍落度在运输与等待过程中持续损失，一旦坍落度损失过大，其流动性能变差，进入喷嘴后极易团聚，喷出时则形成断续性流束，引发块状撞击与大面积弹离。



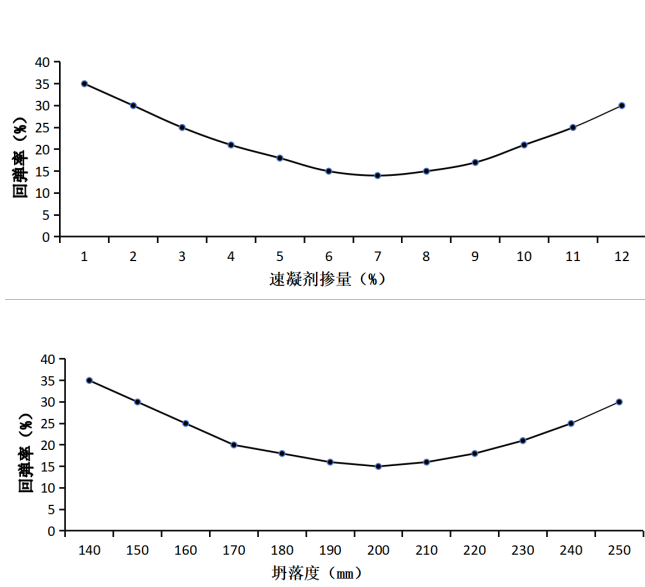


图 1: 速凝剂掺量、喷射角度及坍落度对回弹率影响

喷射操作手的熟练程度和身体状态是另一个关键变量。操作手对机械臂及喷头操控不规律，造成入射角和喷距在短时间内频繁变化，喷射面上形成交错的高回弹条纹。施工时照明条件不足也会放大误差，喷头偏移后指向性错误，使射流撞击非预期位置，如钢筋突出部或钢架边角，集中回弹现象严重。设备的日常清洗和保养工作若不到位，会使管道中残留硬块，这些硬块在高压输送过程中随料流一同喷出，对受喷面造成二次冲击，额外增加回弹物量。

表 1 影响因素

影响因素名称	所属类别	可导致回弹率变化幅度
配合比	材料因素	> 8%
骨料级配	材料因素	3% ~ 8%
速凝剂掺量	材料因素	> 8%
喷射风压	工艺因素	> 8%
喷嘴角度	工艺因素	3% ~ 8%
设备性能	工艺因素	3% ~ 8%
人员操作熟练度	管理因素	> 8%

### 三、公路隧道湿喷混凝土回弹率的控制技术路径

#### (一) 材料质量控制及施工配合比控制

在湿喷混凝土应用场景中，材料体系的细微波动往往是导致回弹率飙升的直接诱因。项目实验室应优先构建各原材料检测指标数据库，通过对进场原材料进行检测达到对各项原材料质量波动的提前预控，重点监控速凝剂指标，在速凝剂批次切换前应先完成复测，确认初凝终凝时间与含固量处于控制线以内，合格后方可入库。

设计配合比阶段需对水胶比、砂率、掺合料比例等核心变量逐一建档调整，并保持混凝土性能参数稳定，以实现回弹率影响的精确识别。每个配比都应同步开展坍落度测定及短段试喷操作，试喷环节需记录喷嘴角度、喷距刻度与回弹率三类数据，将以上结果分析整合确定最终使用的配合比。

施工阶段还需对每日首车出机前完成工作性能测试，

一旦检测值不符合要求，应及时对混凝土性能进行调整，再复验拌合状态。项目技术组将回弹率、坍落度与速凝剂实投比三类数据汇总于一张表格之中，任一指标出现趋势偏移，先溯源材料，再排查设备。材料体系所有变更必须返回阶梯掺量矩阵重新验证，闭环机制能够确保物理性能变化可控、可解释、可预测。

#### (二) 喷射设备与工艺参数

湿喷作业中，设备运行状态与工艺参数设定往往决定了料束成形的稳定性，从而直接影响回弹行为。现场及拌合站则需配套建立计量校准日历，明确不同计量设备的检定溯源周期。例如，喷浆机外加剂泵、水流量计每月溯源一次。搅拌站每周对各材料计量秤进行校准，保证施工配合比的准确性。

泵送环节强调“稳压稳流”优先原则。软管长度应控制在设备推荐值范围之内，连接部位增设抗扭支架，降低脉冲团堆积概率。机手需依据喷嘴摆幅频率调整泵速，使射流断续频率与料束周期保持同步。若观察到周期性条带状回弹，记录员应立即检查泵压变化与喷嘴摆幅记录，任一存在波动即触发参数修正。

作业动作要形成统一规范。喷嘴操控建议执行“近垂直、短喷距、薄层反复”三原则，拱顶部位采用扇形小摆幅分区推进方式，钢筋密集处以填充隙优先的短喷为先，成型层厚度由厚度针即时反馈。对于厚喷现象需现场修整，防止形成硬团后被后续射流剥离。拐角区段喷嘴手应主动收窄摆幅、减缓扫速，以维持稳定入射角。每班施工前拍摄全景图，施工中拍摄关键区域（如接缝处、转角处）的喷幅细节，施工后拍摄整体完成图。每班结束后对比图像检查喷幅是否出现重叠、漏喷等异常，若存在条纹重影，则调整下一班喷幅设定值。厚度记录与回弹率测量按喷幅编号归档，对应分析。任何参数调整均写入班后技术简报，次班对照执行，保证喷射状态稳定性不被操作者个人习惯左右。

#### (三) 管理制度构建全过程监督与纠偏机制的双重闭环

喷射施工的过程控制离不开人、料、机三方面的协调管理。项目应推行“三员分工”体系：喷嘴手负责姿态与方向控制，机手保障设备运行平稳，记录员专责数据采集与影像归档。记录员在班中不参与喷射操作，保证观测独立性。将施工过程划分为班前准备、班中检测与班后复盘三个阶段，每阶段均编制操作清单。班前需完成物料状态、设备点检、参数卡核对；班中需执行至少一次回弹量估测与一次厚度针复核；班后召开快速复盘会议，将异常数据与修正动作写入班组日志。

建立统一的数据汇总平台，收集拌和站计量、速凝剂投加、坍落度值、喷距刻度、入射角标定、回弹称量、厚度复测及影像资料八项关键要素。技术人员进行数据趋势研判，出现异常波动立即开具“微调单”，并明确负责人员、整改措施与复核节点。对连续多日数据无改善的喷段，项目总工需组织现场会商并暂停施工，直至

找出误差来源并消除。

**四、实践案例分析**

在 G106 线白雉山隧道喷射混凝土超耗调查基础上，依托施工过程跟踪，构建了一套以断面优化、配合比参数调控、速凝剂管理及喷层复核为核心的控制体系。该体系对湿喷过程中回弹量、喷层厚度与材料损耗实现精准调节，具有较强的实践导向与推广价值。

隧道上台阶段原始断面存在平均超挖约 15cm 的问题，下台阶则波动于 20cm ~ 30cm，局部拱脚出现高达 50cm 的超挖极值。借助 3D 激光扫描设备对断面进行高密度测量后，发现误差集中区主要位于拱脚外插角不当引发的扩张区。为减小开挖偏差，项目部调整轮廓线控

制方法，具体包括上台阶内收 5cm ~ 8cm、周边孔长延长 50cm、短眼长度增补 50cm，并接受小幅度欠挖采用炮击清面处理。这一策略以“错位边界”代替“对称修正”，有效压缩超挖容积，结合断面反馈闭环制度，将上台阶平均超挖控制于 10cm 以内。下台阶同步调整进尺机制，将钻杆从 6m 缩短至 4m，同时轮廓线做相同幅度内收。上述措施显著削减爆破轮廓外扩现象，为后续喷层厚度精确控制奠定空间基础。

配合比调整方面（表 2），10 月优化后配比在维持设计强度等级的前提下，显著改善了混凝土的流动性能与附着稳定性，喷层回弹量大幅降低，表现出材料体系参数优化的直接成效。

表 2 配合比调整

对比项目	5 月 14 日喷射 (左洞 ZK14+379.7 ~ 383.3)	10 月 16 日喷射 (右洞 YK14+569.3 ~ 572.8)
混凝土强度等级	C25	C25
水泥用量 (kg/m³)	470	420
粉煤灰用量 (kg/m³)	—	40
矿粉用量 (kg/m³)	—	40
砂用量 (kg/m³)	908	859
碎石用量 (kg/m³)	805	826
减水剂 (kg/m³)	9.4	8.5
拌合水量 (kg/m³)	174	175
速凝剂掺量 (kg/m³)	28	30
胶凝材料总量 (kg/m³)	470	500
水胶比	0.37	0.35
砂率 (%)	53	53
现场坍落度 (mm)	190	200
混凝土喷射方量 (m³)	32	24
实测回弹率 (%)	17.8	14.3

喷射结束后组织回弹料收集工作，采用“机械收集 + 人工辅助”的组合方式，确保数据完整性。第一车与第二车合计实测回弹及修面刮落质量为 6900kg，约合 2.875m³，同时存在约 0.5m³ 不可回收回弹料散落于裂隙中。将上述数据纳入统计，最终确认本段喷层总回弹量为 3.375m³。按 24m³ 混凝土喷射量折算，回弹率为 14.3%，较前期 17.8% 的基线值明显下降，反映出配合比调控在降低材料损耗方面发挥了明确作用。

修面刮落在总损耗中占比亦被纳入监测范围。通过区分回弹体堆积位置、粒径分布与落点区域，对掉落与反弹进行独立归类，排除数据混淆。其中回弹与修面各占损耗的 50%，从结构角度反映出喷射附着不足与钢拱架表面残留兼有存在。为抑制此类混合性损失，项目部进一步规范喷头动作，统一喷距 0.8 ~ 1.2m 区间，入射角限定在 75° 以上，并在拱顶部位试点实施分层短喷，逐步建立以“角度—压力—流态”三要素为核心的喷层形成逻辑。

该案例从爆破轮廓收缩、喷距参数固化、材料性能稳定出发，完成了对湿喷回弹问题的系统修正。后续如能将喷层厚度芯样抽查与回弹数据做时间—空间维度的联动分析，将进一步提升控制链条的稳定性与指导价值。

**结语**

本文围绕公路隧道湿喷混凝土回弹率控制问题，基于影响因素，从材料体系、喷射工艺与管理规范三个维度，提出了闭环控制路径、动态响应机制，构建了适配实际工程需求的系统性技术管理体系。关键环节为材料进场控制，配比特性优化，设备及施工工艺强化操控一致性，而管理层面则以数据统一汇总实时分析，有效压缩人为波动的干预空间。未来，随着施工信息化水平的持续提升与混凝土材料性能的不断优化，回弹率控制仍将面临更高标准的工程需求。

**参考文献**

[1] 刘长文. 公路隧道机制砂湿喷混凝土回弹率控制技术[J]. 市政技术, 2020, 38(06): 49-52.  
 [2] 康建荣, 罗鹏, 吕彩云, 等. 隧道湿喷混凝土回弹率控制技术[J]. 四川水力发电, 2021, 40(06): 87-91.  
 [3] 隆兰兰. 长大软弱围岩隧道湿喷混凝土回弹率控制技术[J]. 中国水能及电气化, 2021, (12): 14-19.  
 [4] 张晓东, 陈文渊, 冀亚锋. 隧道湿喷混凝土回弹率控制措施[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2022, 21(02): 39-43.  
 [5] 彭成炎, 李晓龙, 刘杨. 喷射混凝土回弹量控制技术研究[J]. 公路, 2024, 69(05): 403-408.