

# 隧道工程喷射混凝土超耗原因分析及管控措施探讨

芦长顺

(杭州强隧建设工程有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要** 喷射混凝土是隧道工程初期支护的主要环节, 其施工质量以及材料耗费与隧道施工的安全质量存在密切联系。喷射混凝土超耗问题普遍存在, 在实际施工中会增加工程成本, 还会由于材料浪费而导致支护结构强度不够、施工效率降低等状况, 影响隧道工程顺利进行。本文以隧道工程施工实际为基础, 对喷射混凝土超耗的影响因素进行系统的分析, 从线性超挖、喷射混凝土回弹、现场组织管理这三个主要方面展开深入的剖析, 进而有针对性地提出具有可行性的控制办法, 并且用具体的隧道工程实例检验控制措施的效果, 以期隧道工程喷射混凝土施工降耗增效和提高施工质量提供参考。

**关键词** 隧道工程; 喷射混凝土; 超耗原因; 线性超挖

**中图分类号**: U455.4

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.040

## 0 引言

随着我国交通基础设施建设速度的不断加快, 隧道工程在公路、铁路、城市轨道交通等领域中的使用也越来越普遍。喷射混凝土由于施工方便、适应性好、可以迅速形成支护结构等特点, 是隧道初期支护的主要工艺之一, 主要用以加固围岩、封闭围岩裂隙、防止围岩风化坍塌, 为隧道后续施工提供安全保证。喷射混凝土施工质量的好坏是决定初期支护体系稳定性的重要因素。合理控制材料用量, 既是对项目成本优化的一种有效手段, 又是保证工程质量合格的主要保证。针对喷射混凝土损耗机理进行深层次的分析, 同时提出相应的改进建议, 具有十分重要的现实意义。

## 1 隧道喷射混凝土超耗的主要影响因素

### 1.1 线性超挖

从地质条件上看, 隧道经过的围岩类型决定着开挖是否稳定, 从而导致线性超挖。在软弱围岩中, 由于围岩稳定性差、容易坍塌, 在施工过程中为了保证施工的安全性, 会增大开挖断面, 导致实际的开挖轮廓线超过设计值。

从开挖工艺上看, 不同开挖方法对线性超挖影响是不一样的。目前隧道开挖大多采用钻爆法、盾构法等, 其中钻爆法使用最多, 但是超挖控制难度大。钻爆法施工时, 炮孔布置精度、炸药用量、起爆顺序等因素

都会对开挖轮廓线的平整度和准确性产生影响, 炮孔布置偏移会导致爆破后围岩过度破碎、轮廓线不规则, 出现超挖现象, 起爆顺序不合理会引发局部围岩坍塌或者过度开挖<sup>[1]</sup>。

从测量放线精度上看, 精度不足是导致线性超挖的主要人为原因。隧道工程开工之前要利用精密测量技术对开挖轮廓线进行标定。如果测量仪器的精度不够、测量方法不对或者测量人员的操作失误, 会引起放线误差, 导致实际开挖轮廓线与设计轮廓线相偏离, 从而产生超挖现象。

### 1.2 喷射混凝土回弹

在喷射工艺中, 喷射压力、喷射距离、喷射角度等参数的设置会直接导致回弹值的变化。喷射压力过大时, 会导致混凝土颗粒的冲击力过大, 无法很好地与围岩黏结, 反弹量增大; 喷射压力过小时, 混凝土颗粒动能不够, 无法有效地附着在围岩上, 也会增大回弹量。喷射距离太远, 混凝土颗粒在空中飞舞时动能损失太大, 碰到围岩表面后很难产生黏附效果, 容易出现回弹现象; 喷射距离太近, 会导致混凝土颗粒的冲击力过大, 反弹率增大。

在材料配合比中, 混凝土的骨料级配、水胶比、外加剂掺量等都会影响回弹值。骨料级配不合理, 粗骨料粒径大于 16 mm, 会使混凝土流动性变差, 黏结力下降, 喷射时容易出现回弹现象; 细骨料含量不够,

**作者简介**: 芦长顺 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 轨道交通及隧道施工技术。

会导致混凝土浆体含量低,无法很好地包裹住粗骨料,还会增大回弹量<sup>[2]</sup>。

### 1.3 组织管理不强

在管理制度上,部分施工单位没有形成完备的喷射混凝土施工管理制度,缺少对喷射混凝土材料消耗、施工工艺、质量控制等方面的具体规定和考核办法,造成施工中无章可依、责任不明。没有明确的超耗控制目标,没有建立超耗统计和分析制度,不能及时发现问题、解决问题,不能对超挖、回弹等现象进行有效控制。

在人员管理上,施工人员、管理人员专业水平低,未能对超耗进行有效的控制。管理人员缺少隧道喷射混凝土施工专业知识,不能及时发现施工过程中出现的超耗隐患,并且管控措施不到位。

从材料管理角度来看,由于材料采购、存储、使用等各方面的管理不善造成材料的浪费和损耗。材料采购时没有严格控制质量,采购的骨料、水泥等原材料不符合设计要求,骨料级配不合理、水泥强度不够会造成喷射混凝土性能下降,增加回弹量和超耗量<sup>[3]</sup>。

质量管控体系存在系统性漏洞,未能建立“事前预防、事中监控、事后追溯”的全流程管控机制,导致施工过程中的各类问题无法被及时识别、干预和解决。

## 2 隧道喷射混凝土超耗管控措施

### 2.1 控制线性超挖

第一,加强地质勘察和预测,改善开挖方案。施工前要对隧道穿过区域的围岩种类、地质构造、地下水状况等做详细的调查工作,编制出详尽的地质勘察报告,确定各个段落的围岩稳定程度。根据地质勘察结果,对不同的围岩类型采取不同的开挖方法,硬质围岩用钻爆法施工,炮孔布置和爆破参数合理选择,减小超挖;软质围岩用台阶法、CD法等浅埋暗挖法施工,控制开挖进尺,及时做初支,防止围岩变形、塌方,减少超挖。

第二,改善开挖工艺,提高开挖精度。使用钻爆法施工时,严格控制炮孔布置、炸药量和起爆顺序,炮孔布置要准确地按设计轮廓线确定,周边眼间距控制在 30 cm~50 cm 之间,眼底偏差不得超过 5 cm,保证爆破后的轮廓线平顺,炸药用量应根据围岩类别进行合理调整,周边眼采用不耦合装药,减小爆破对围岩的扰动,防止过度开挖;采用毫秒微差起爆技术,使爆破能量均匀释放,减少局部超挖。

第三,加强测量放线和复核工作,保证开挖误差在允许范围之内。采用精度满足要求的测量仪器,由专业的测量人员进行放线工作,按照设计图纸上所标明的开挖轮廓线进行放线,放线结束后需要经过两人

复查确认无误后才能使用。隧道开挖时,每开挖一个环都要做中线、高程复测,及时发现开挖误差并加以修正,防止误差积累<sup>[4]</sup>。

### 2.2 控制喷射混凝土回弹量

第一,改变喷射工艺参数以改善喷射效果。按照围岩类型、喷射部位等具体情况,合理调节喷射压力、喷射距离和喷射角度,即喷射压力控制在 0.3 MPa~0.5 MPa 之间,软弱围岩可减小喷射压力,防止冲击破坏围岩;喷射距离控制在 1.0 m~1.5 m,使混凝土颗粒有足够的动能。

第二,改善材料配合比以提高混凝土的性能。按照设计要求和施工实际情况,对喷射混凝土配合比进行调整,保证喷射混凝土有较好的流动性、黏结性及强度。合理控制骨料级配,粗骨料粒径为 5 mm~16 mm,细骨料为中砂,细度模数为 2.3~3.0,保证骨料级配合理;控制水胶比在 0.45~0.55 之间,使混凝土浆体有较好的流动性和黏结性,防止过稀或过干;合理掺入外加剂,速凝剂掺量控制在 3%~5%,加快混凝土凝结速度,减少回弹和流淌,提高混凝土早期强度;减水剂掺量根据试验确定,改善混凝土的流动性,降低水泥用量,降低成本。

第三,规范施工操作,提高操作水平。加强喷射作业人员的技术培训,使喷射工人会使用好喷射工艺、喷射操作规程及参数调节的方法。操作人员要控制喷头移动速度均匀,防止过快或者过慢导致喷射不均;喷头要做螺旋式移动,保证混凝土喷射密实均匀,减少局部过厚或者过薄的现象。为了改善施工现场技术控制水平,必须由专人驻现场予以检查、指挥。对作业人员的不规范操作行为要立刻进行纠正,根据喷射过程中出现的具体情况指导操作人员调节喷射参数,降低回弹量<sup>[5]</sup>。

第四,提高回弹料的回收利用率,减少材料浪费。喷射施工时及时清除掉掉落回弹料,挑选出满足标准的回弹料,按一定比例掺入新拌和的混凝土混合料里再利用,削减材料损耗。

### 2.3 加强现场组织管理

加强现场组织管理是控制喷射混凝土超耗的保证,应建立健全管理制度,对人员、材料、质量进行规范管理,明确各方面的责任分工,使各项管控措施落到实处。

第一,建立完善的管理制度,确定好责任分工。建立完善的喷射混凝土施工管理制度、操作规程和超耗控制考核制度,确定超耗控制目标,将超耗控制的责任落实到个人。建立超耗统计和分析制度,定期统

计喷射混凝土实际消耗量及超耗率,分析超耗原因,及时采取措施;将超耗控制结果与绩效考评相联系,对于超耗控制较好的个人、班组予以嘉奖,对超耗较大的实行惩罚,以此调动施工人员的工作积极性和责任感。

第二,加强人员管理,提高人员素质。加强管理人员及操作人员的专项技术培训工作,管理人员要懂隧道喷射混凝土施工专业知识、超耗控制办法和质量管控要点等,从而提升管理控制水平,操作人员须经系统的技术培训并考核通过方能持证上岗。还要建立人员档案,对施工人员实施继续教育和技能考核制度,从而不断改善施工队伍的专业素质。

第三,对材料进行规范化的管理,避免出现浪费现象。建立健全材料采购、储存、使用的管理制度,严格控制原材料的质量,采购前对供应商进行资质审核,采购过程中对原材料进行抽样检测,保证原材料满足设计要求;材料储存时采取有效的防护措施,水泥存放在干燥、通风的库房里,骨料分批堆放,防止混入杂质和受潮;材料使用时实行限额领料制,按施工进度及设计用量发放材料,不得任意领用。

第四,加强质量控制,及时消除隐患。建立完善的现场质量检查和验收制度,安排专业的质量检查人员到现场进行监督,对开挖轮廓线、喷射混凝土配合比、喷射工艺参数、喷射厚度等进行全过程的检查。开挖完毕后立即检查开挖轮廓线,对于超挖部分应及时处理;喷射时检查喷射压力、距离、角度等参数是否符合要求;喷射完成后检查喷射混凝土厚度、强度等质量指标,用钻孔检测法检测喷射厚度,保证厚度符合设计要求,对厚度不够或者回弹量过大处及时补喷。

### 3 管控效果验证分析

为了检验以上喷射混凝土超耗控制措施是否有效,本文选取某公路隧道工程作为研究对象,根据该工程的施工特点及超耗情况,采用上述管控措施进行管控,并对管控效果进行分析,以供同类工程参考。

该公路隧道长1 200 m,双向四车道隧道,设计速度80 km/h,隧道穿过围岩主要是Ⅳ级、Ⅴ级软弱围岩,地质情况比较复杂,围岩稳定性不好,施工难度大。本隧道工程初期支护中使用了喷射混凝土工艺,设计厚度为10 cm,材料强度等级设为C25。初期施工时超挖率达到16.8%,超出规范要求的上限,不但加大了工程造价,而且影响到施工进度和支护质量<sup>[6]</sup>。

施工单位根据本文提出的方法对隧道喷射混凝土超耗严重问题进行了改进,从控制线性超挖、控制回弹量、加强现场组织管理三个方面入手。一是优化开挖方案,对于Ⅳ级、Ⅴ级围岩采用台阶法施工,控制开挖进尺在0.5 m~1.0 m之间,改善炮孔布置和爆

破参数,加强地质超前预报及测量复核工作,削减线性超挖;二是改良喷射混凝土配合比,改变骨料级配和水胶比,加入适量的速凝剂和减水剂,改良喷射工艺参数,严格操作人员培训,规范操作程序,加强回弹料回收利用;三是建立完善的管理制度,确定超耗控制的责任人,加强人员管理和材料管理,加强现场的质量控制,建立超耗统计和整改制度。

经过以上控制措施后,该隧道喷射混凝土超耗现象得到很好的控制,超耗率由16.8%下降到4.2%,小于规范规定的5%,管控效果明显。

### 4 结束语

在隧道工程中,喷射混凝土超耗问题已成为目前亟需解决的重要技术问题。该种现象会导致资源浪费、成本上升,并且会对工程质量、施工安全和工期安排造成不利的影响。本文主要从三个方面提出对策:一是根据开挖设计的优化、施工精细度的提高、测量控制系统升级三个方面来减少线性超挖;二是分析喷射工艺参数设置、材料配比的设计、回弹物料回收利用方案的实施,有效降低回弹损耗;三是建立完善的管理制度,对施工现场的资源配置、质量检验进行专业的管理和有效的监督,提升各项措施的实际应用效果,确保效益最大化。

### 参考文献:

- [1] 陈涛,吴怀娜,文嘉,等.喷射超高性能混凝土-普通混凝土界面剪切性能试验及理论分析[J/OL].中国公路学报,2026-03-04[2026-04-01]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=1VJ3acR1kaW\\_TBc5x4E9yDbBK5d07PzqjegZNzxAsI5WIqP3H4TEGnwB9Bby6rO3-wwHspO\\_IraB2b3cF-HT\\_hU-25CoOX\\_T7lbZge9FJ9OVcMGTHMk8-hx4Fo8G4REKSizWpR6fnft3TR1DQ--UMjuJO9F6L6CCSxnOIg01gUgufEFWS8-yEA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=1VJ3acR1kaW_TBc5x4E9yDbBK5d07PzqjegZNzxAsI5WIqP3H4TEGnwB9Bby6rO3-wwHspO_IraB2b3cF-HT_hU-25CoOX_T7lbZge9FJ9OVcMGTHMk8-hx4Fo8G4REKSizWpR6fnft3TR1DQ--UMjuJO9F6L6CCSxnOIg01gUgufEFWS8-yEA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [2] 刘奇.隧道喷射水泥混凝土施工质量控制关键技术[J].水泥,2026(03):106-108.
- [3] 方园.喷射混凝土-围岩界面粘结特性对围岩稳定性的影响机制[J].价值工程,2026,45(06):1-4.
- [4] 张晓江,杨永超,姬勇刚,等.基于水文地质特征的云贵地区隧道喷射混凝土耐久性研究概述[J].混凝土世界,2025(11):80-85.
- [5] 于本田,赵康康,杨玉祥,等.铁路隧道排水盲管结晶堵塞机理及喷射混凝土钙溶蚀研究[J].中国铁道科学,2025,46(06):99-110.
- [6] 宋恒祥,戴晓威,周凯.隧道喷射混凝土钙溶蚀抑制技术及其工程应用[J].工程技术研究,2025,10(18):41-44.