

公路路堑边坡喷射混凝土防护施工技术实践及优化研究

任云均

新疆北新路桥集团股份有限公司，新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要] 山区及丘陵地区公路路堑开挖后，原有岩土体应力平衡被打破，边坡易出现风化剥落、裂隙扩张、小型溜塌等病害，直接威胁道路运营安全。喷射混凝土凭借施工便捷、整体性强、防护效果稳定的优势，成为路堑边坡主流防护工艺。本文依托公路路堑边坡实体工程，系统阐述喷射混凝土防护施工原理与工艺流程，梳理坡面清理、配合比设计、分层喷射、养护管控等关键工序要点，分析回弹量大、表层开裂、厚度不均等常见质量问题成因，针对性提出工艺优化与质控改进方案。实践表明，优化后的施工技术可有效提升边坡防护整体性与耐久性，降低病害发生率，可为同类路堑边坡防护工程提供参考。

[关键词] 公路工程；路堑边坡；喷射混凝土；防护施工；工艺优化

DOI：10.64635/ja.2026.1522

中图分类号：U416.14

文献标识码：A

Practice and Optimization of Shotcrete Protection Construction Technology for Highway Cutting Slopes

Ren Yunjun

Xinjiang Beixin Road & Bridge Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000, China

Abstract: After the excavation of highway cuttings in mountainous and hilly areas, the original stress balance of rock and soil masses is disturbed, and slope defects such as weathering and spalling, crack expansion, and small-scale sliding collapse are likely to occur, directly threatening road operation safety. With the advantages of convenient construction, strong integrity, and stable protection performance, shotcrete has become a mainstream protection technology for cutting slopes. Based on a practical highway cutting slope project, this paper systematically expounds the construction principles and process flow of shotcrete protection, reviews key construction procedures such as slope surface cleaning, mix proportion design, layered spraying, and curing control, and analyzes the causes of common quality problems such as large rebound loss, surface cracking, and uneven thickness. Targeted process optimization and quality control improvement schemes are then proposed. Practice shows that the optimized construction technology can effectively improve the integrity and durability of slope protection, reduce the occurrence rate of defects, and provide reference for similar cutting slope protection projects.

Keywords: highway engineering; cutting slope; shotcrete; protection construction; process optimization

引言

公路路堑边坡开挖会扰动原始岩土结构，裸露坡面长期经受雨水冲刷、温差风化与地质应力作用，易产生松散掉块、裂隙贯通、局部滑塌等隐患，严重影响公路施工及运营安全。喷射混凝土防护能够快速封闭裸露坡面，固结松散岩土，提升边坡整体稳定性，具备工期短、适应性强、造价可控的技术优势，广泛应用于各类岩质、土石混合路堑边坡治理工程。

现阶段常规喷射施工普遍存在材料回弹率高、成型平整度差、后期干缩开裂、局部厚度不足等通病，粗放式施工难以满足高标准边坡耐久性要求。部分项目只重视前期喷射成型，忽略后期养护监测，防护层投入运营 2-3 年后便出现大面积网状裂缝、局部空鼓脱落，防护功能大打折扣。为解决现场施工短板，本

文结合实际工程施工经验，梳理标准化施工流程，剖析质量缺陷诱因，从材料配比、设备参数、作业工艺、养护体系多维度开展优化研究，形成适配路堑边坡的精细化施工技术体系。

1 路堑边坡喷射混凝土防护技术概述

1.1 技术原理

喷射混凝土防护属于坡面浅层加固与封闭防护技术，依托湿式喷射设备，将按标准配比拌合的混凝土混合料，以适宜高压气流高速喷射至清理完成的边坡坡面。混凝土颗粒高速撞击坡面后实现挤压嵌实、堆积成型，快速形成连续、致密的硬化防护层。

硬化后的混凝土层可全面封闭坡面岩土裂隙，阻隔雨水、空气与岩土体接触，弱化风化侵蚀作用；同时依托自身强度与坡面粘结锚固作用，约束浅层岩土

松散变形,抑制细小塌落与裂隙扩张,实现“封闭防水、固结护坡、整体防塌”的综合防护效果。对于岩体破碎、裂隙较发育的边坡,喷射混凝土还可与锚杆、钢筋网共同组成锚喷支护体系,进一步提高边坡浅层抗滑能力,有效提升路堑边坡长期稳定性。

1.2 技术适用条件与工程特点

该工艺主要适用于岩质路堑边坡、土石混合边坡及地质裂隙发育、表层松散的开挖坡面,尤其适合地形起伏大、坡面不平整、小型危石较多的路段,对复杂坡面适应性优于浆砌片石等传统工艺。当边坡存在深层滑动隐患时,不可单独采用喷射混凝土防护,需要结合锚杆、锚索等加固措施治理深层病害。

工程特点主要体现在三方面:一是施工成型速度快,开挖成型后可立即封闭坡面,缩短裸坡暴露时间,减少风化病害;二是整体密闭性好,能够贴合凹凸坡面形成无死角防护层,防渗防风化性能优异;三是施工灵活性强,可结合挂网、锚杆工艺形成锚喷联合支护,适配不同边坡坡度与地质条件。相较于浆砌片石防护,喷射混凝土施工所需工作面更小,无需大量石料外运,生态扰动更低。

1.3 常规施工现存主要问题

结合现场施工实况,传统喷射工艺普遍存在四类质量缺陷:一是喷射回弹率偏高,骨料反弹掉落严重,材料损耗大、成型密实度不均;二是坡面厚度偏差大,局部过薄存在防护短板,局部过厚易出现空鼓、下坠;三是表层干缩裂缝多发,养护不规范、配合比不合理极易引发网状裂纹,降低防渗耐久性;四是坡面平整度差、成型观感不佳,局部蜂窝麻面、孔隙较多,长期渗水后逐步引发内部风化破损。

除此之外,施工现场还经常出现挂网位置悬空、层间结合较差、喷射顺序混乱等管理类问题。很多施工人员没有严格执行分层喷射要求,一次性喷射过厚,混凝土自重流淌下坠,最终造成防护层内部疏松,后期开裂脱落风险大幅上升。

2 工程概况与施工准备

2.1 工程概况

本项目为山区二级公路改扩建工程,沿线多山地丘陵地形,路堑开挖段落较长,边坡以中风化、弱风化岩质边坡为主,局部夹杂破碎岩土体。边坡开挖坡度介于 1:0.75 ~ 1:1.25 之间,坡面裂隙发育、表层岩体破碎,裸露后易风化掉块。本项目采用 C20 喷射混凝土开展坡面防护,设计防护厚度 80mm,分两层喷射施工,局部破碎区域增设钢筋网加强防护,保障

边坡整体稳定。施工期间当地雨季集中,空气湿度大,昼夜温差可达 15℃,对喷射混凝土的凝结硬化与后期养护提出较高要求。

2.2 施工前期准备

2.2.1 坡面预处理

喷射作业前完成坡面全方位清理整治,人工配合机械清除坡面松动危石、松散浮土、杂草及淤积杂物,对凹凸差过大部位进行修坡找平,消除悬空岩块。针对坡面张开型裂隙,提前清理裂隙内部浮渣,保证后续混凝土可充分填充嵌固。清理完成后采用高压清水冲洗坡面,保持坡面洁净、湿润但无积水,提升混凝土与岩面粘结强度。坡面清理完成之后由质检人员进行隐蔽验收,验收合格方可开展喷射作业。

2.2.2 原材料控制与配合比设计

原材料是喷射混凝土质量的核心保障,水泥优先选用普通硅酸盐水泥,稳定性强、凝结硬化效果好;骨料选用洁净硬质中砂与 5 ~ 10mm 连续级配碎石,严控含泥量、针片状含量,避免杂质影响粘结强度与密实度;外加剂采用合规速凝剂、减水剂,适配现场温湿度条件。

结合规范要求与现场试配结果,确定 C20 喷射混凝土最优配合比,严控水灰比稳定在 0.40 ~ 0.45 区间,既保障混合料流动性满足喷射作业要求,又可规避水灰比过大引发的后期干缩开裂。速凝剂掺量根据气温与凝结试验确定,高温天气适当提高掺量,低温时段降低掺量,保证快速初凝成型,减少回弹与流淌问题。正式喷射前开展回弹试验,根据回弹率数据微调配合比参数。

2.2.3 钢筋网与锚杆布设(加强段)

对于岩体破碎的边坡区段,按照设计要求铺设 $\Phi 6$ 钢筋网,网格尺寸 20cm×20cm。钢筋网紧贴坡面布设,利用短锚杆进行固定,网片与坡面之间预留 2~3cm 间隙,保证喷射混凝土能够穿过钢筋网、完全包裹钢筋,杜绝钢筋悬空造成背后空洞。相邻网片搭接长度不小于 10cm,搭接位置采用绑扎牢固,防止喷射冲击造成网片移位。

2.2.4 设备与现场准备

采用湿式混凝土喷射机组作业,施工前全面调试设备风压、送料系统、搅拌系统,检查管路密封性,杜绝漏风、堵管问题。校准喷射压力、出料速度等核心参数,配套准备养护设备、厚度检测标尺、坡度控制线等工具。同时完成现场安全布控,搭设稳固作业脚手架,设置落石警戒区,杜绝高空坠物安全隐患。

高处作业人员佩戴安全防护装备, 落实边坡施工安全技术交底。

3 标准化施工工艺流程

3.1 拌合与送料

严格按照试验确定的配合比集中拌合混凝土, 精准计量各类原材料, 保证拌合均匀、色泽一致, 严控拌合时间, 杜绝离析、干稀不均问题。拌合完成后及时输送至喷射设备, 随拌随喷, 避免混合料静置超时出现初凝失效, 保障喷射成型质量稳定。运输过程中做好混合料遮盖, 防止水分快速蒸发改变水灰比。

3.2 分层喷射作业

施工遵循自下而上、分段分片、分层匀速的作业原则, 禁止自上而下喷射, 防止混合料流淌堆积。本项目设计厚度 80mm, 分两层喷射施工, 首层喷射厚度控制在 40 ~ 50mm, 主要实现岩面封闭、填充裂隙、初步固结坡面; 待首层混凝土初凝且强度稳定后, 再开展第二层复喷, 补足设计厚度、找平坡面。

喷射过程控制喷头与坡面垂直, 距离保持 0.8 ~ 1.2m, 匀速缓慢移动, 风压保持稳定, 避免忽快忽慢、忽近忽远造成厚度不均、回弹增大。挂网路段确保网片背后混凝土充盈密实, 无空洞、无露网现象, 保障支护整体性。边坡转角、边坡平台交接位置为喷射薄弱区, 作业人员应当放慢速度, 重点喷射补强。

3.3 收面整形与厚度检测

每层喷射完成后及时开展人工找平修整, 消除局部凸起、流淌、蜂窝缺陷, 保证坡面平顺连贯。全程采用厚度标尺、预埋标识点双重控制厚度, 逐段检测记录, 对偏薄区域及时补喷补强, 确保全段厚度满足设计规范要求, 杜绝局部防护薄弱区。每完成一个施工区段, 质检人员现场取样制作试块, 检测喷射混凝土后期抗压强度。

3.4 养护管控

喷射混凝土终凝完成 2h 后启动洒水养护, 山区昼夜温差大, 采用土工布全覆盖保湿养护, 避免表层水分快速蒸发引发干缩裂缝。养护周期不少于 7d, 重点边坡延长至 10d, 全程保持坡面湿润, 严禁养护期间暴晒、风干、缺水。养护阶段禁止撞击、踩踏坡面, 保障混凝土强度稳步增长, 提升整体耐久性。雨季施工还要做好坡面排水, 防止雨水直接冲刷尚未硬化的混凝土表层。

4 常见质量病害成因分析

4.1 混凝土回弹率过高

主要成因: 喷头角度偏移、喷射距离不当、风压

不稳定; 混合料水灰比失衡, 过干易反弹、过稀易流淌; 坡面清理不到位, 浮尘、松散层阻隔粘结; 作业速度过快、喷涂重叠不足, 成型不密实, 骨料大量脱落回弹, 造成材料浪费与表层疏松。

4.2 坡面开裂、起砂、掉皮

核心诱因: 水灰比偏大、速凝剂掺量不合理, 混凝土收缩变形过大; 养护不及时、保湿不到位, 表层快速失水产生干缩裂纹; 分层喷射间隔时间过长, 层间粘结薄弱, 出现分层开裂起皮; 坡面浮渣灰尘未清理干净, 层间结合强度不足。

4.3 厚度不均、局部空鼓

成因: 作业路线混乱、行走速度不均, 人工操作随机性大; 坡面凹凸起伏未提前修整, 低洼处积料、凸起处偏薄; 风压忽大忽小, 出料不均匀; 挂网支护区域网片悬空, 混凝土填充不密实, 后期形成空鼓缺陷。

4.4 后期渗水破坏

喷射层表面出现细微裂缝之后, 雨水顺着裂缝渗入防护层与岩体的接触面, 在温度变化与水压力反复作用下, 粘结界面逐步剥离, 最后出现大面积鼓包脱落。该病害隐蔽性较强, 施工验收阶段不容易被发现, 往往通车运营一段时间之后才显现。

5 施工技术优化措施

5.1 配合比与原材料优化

优化骨料级配, 严控碎石粒径与含泥量, 减少骨料回弹; 精准控制水灰比, 掺入适量高效减水剂, 提升混合料流动性与密实度, 降低孔隙率。根据现场气温动态微调速凝剂掺量, 高温适当增加掺量、低温合理降低掺量, 保证初凝时间适配施工节奏, 减少流淌、脱落问题。条件允许时可在混合料内掺入少量聚丙烯纤维, 提升喷射混凝土抗裂性能。

5.2 喷射作业工艺优化

统一标准化作业参数, 固定喷头垂直坡面、喷射距离 1m 左右, 保持匀速平移喷涂; 采用“薄层多遍、分层叠加”方式, 杜绝一次性厚喷。优化施工顺序, 分片分区有序作业, 保证喷涂重叠均匀, 消除漏喷、薄喷盲区。针对破碎松散坡面, 先薄喷一层封闭固结, 再分层加厚成型, 大幅降低回弹率。对高陡边坡优先选用长距离湿式喷射机械手, 降低人工操作带来的质量波动。

5.3 质控体系优化

建立全过程三级检查制度, 施工前核查坡面基底、原材料参数; 施工中实时监控风压、厚度、拌合质量;

成型后逐段检测厚度、平整度、密实度，对缺陷点位立即整改修复。规范挂网安装工艺，保证网片紧贴坡面、绑扎牢固，杜绝悬空鼓包，提升锚喷整体受力性能。留存完整施工影像记录，对喷射薄弱部位进行重点验收。

5.4 养护工艺优化

优化山区边坡养护方案，采用土工布全覆盖保湿养护，早晚定时洒水补水，规避正午高温暴晒、夜间低温风干造成的干湿温差裂纹。延长重点边坡养护时长，严控养护期人为扰动，保障混凝土强度均匀增长，提升防护层抗裂、抗渗、抗风化性能。雨季施工提前布设临时引排设施，减少雨水对新喷混凝土的冲刷。

5.5 后期监测优化

边坡喷射防护完工后，建立不少于 12 个月的后期观测计划，定期巡查坡面裂缝、空鼓、剥落情况。一旦发现细微开裂病害，及时采用封闭注浆处理，防止裂缝持续扩展引发大面积脱落病害。

6 施工效果与综合效益分析

6.1 施工质量效果

通过工艺优化与精细化管控，本项目喷射混凝土回弹率显著下降，材料利用率大幅提升；坡面厚度均匀、密实度良好，无空鼓、露网、蜂窝麻面等质量缺陷。成型坡面封闭性良好，可有效阻隔雨水下渗与岩体风化，边坡裂隙全部填充固结，整体稳定性显著提升。经过为期一年的跟踪观测，坡面仅出现极少量发丝裂纹，无风化剥落、小型溜塌病害，防护质量完全满足设计及规范要求。

6.2 综合效益

技术效益方面，优化工艺解决了传统喷射施工开裂、回弹、厚度不均等通病，大幅提升边坡防护耐久性，降低后期病害维修频次，保障公路长期运营安全。经济效益方面，有效减少材料回弹损耗，节约原材料成本，一次性成型质量高，返工率极低，缩短整体施工工期，节约机械与人工投入。社会效益方面，快速封闭裸坡、稳固边坡，杜绝施工期间落石安全隐患，保障道路施工及通行安全；湿式喷射施工粉尘更少，

施工污染更低，生态效益突出，适配山区公路边坡施工需求，推广价值较高。

7 结论

本文依托山区公路路堑边坡工程，系统研究喷射混凝土防护施工技术与优化方案，得出如下结论：

(1) 路堑边坡裸露风化、裂隙发育是边坡失稳的主要诱因，喷射混凝土可快速封闭坡面、固结松散岩土，是适配山区路堑边坡的高效防护技术。

(2) 原材料配比、喷射参数、作业工艺及后期养护是影响成型质量的核心因素，回弹量大、表层开裂、厚度不均现场高频质量通病，部分隐蔽空鼓病害会在运营阶段逐步显现。

(3) 通过优化配合比、标准化喷射作业、完善全过程质控体系、精细化保湿养护以及后期定期监测，可显著提升喷射混凝土成型质量与边坡防护耐久性。

(4) 优化后的施工工艺稳定性强、返工率低、材料损耗小，可有效提升路堑边坡整体防护效果，综合效益显著，适合在公路路堑边坡工程中广泛推广。

【参考文献】

- [1] 李君. 公路边坡锚喷支护施工技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2026(07): 111-114.
- [2] 马凯凯. 矿物掺合料对喷射混凝土回弹及力学性能影响研究[J]. 中外公路, 2025, 45(03): 134-138.
- [3] 王鑫. 山区公路路堑边坡喷射混凝土施工开裂成因及工艺优化[J]. 筑路机械与施工机械化, 2024, 41(05): 72-76.
- [4] 刘传明. 湿式喷射混凝土在破碎岩质路堑边坡防护中的应用[J]. 公路工程, 2023, 48(04): 207-212.
- [5] 赵亚文, 董金玉, 刘汉东, 等. 新型喷射混凝土防护边坡稳定性试验研究[J]. 地球科学, 2026, 51(4): 1499-1512.

作者简介：任云钧（1991.11—），男，汉族，籍贯：四川广元，学历：本科，职称：中级，研究方向：公路工程。