

# 喷射混凝土技术在矿山井筒衬砌施工中的应用分析

陈学阳<sup>1</sup>, 张娟<sup>2</sup>

(1. 山东胜利建设监理股份有限公司, 山东 东营 257000;

2. 青岛建通浩源集团有限公司, 山东 青岛 266400)

**摘要** 矿山井筒是矿井的咽喉工程, 其衬砌质量直接关联矿井安全运行。喷射混凝土技术凭借凝结迅速、围岩适应能力强、施工流程简便等特点, 在井筒衬砌施工中展现出显著应用价值。本文针对井筒施工遇到的围岩稳定性差、涌水环境复杂等难题, 系统分析喷射混凝土技术的应用机理与施工要点, 通过优化配合比、分层喷射工艺及质量控制体系的建立, 形成完整的技术应用方案, 以期为同类型工程提供实践参考。

**关键词** 喷射混凝土技术; 矿山井筒; 衬砌施工; 支护结构

中图分类号: TD262.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.041

## 0 引言

随着矿山开采深度的持续增加, 井筒施工面临高地应力和强涌水等复杂地质条件的严峻挑战。传统的砌筑衬砌施工方法存在工期长、干扰大等固有缺陷, 已难以适应当前快速安全施工的工程需求。相比之下, 喷射混凝土技术能够及时构筑密实的支护结构, 有效封闭围岩并控制变形, 为复杂地质条件下的井筒衬砌工程提供了切实可行的技术方案。

## 1 喷射混凝土技术概述

喷射混凝土技术是利用压缩空气将混合料通过喷射管以高速喷向受喷面, 依靠动能压实并形成支护层的施工方法。该技术分为干喷、湿喷和潮喷三种工艺类型, 其中湿喷工艺因粉尘少、回弹率低、混凝土质量稳定而成为井筒施工的主流选择<sup>[1]</sup>。喷射混凝土在高速撞击下产生的压实作用使其与围岩形成有效的锚固结合, 同时速凝剂的加入实现了快速凝结硬化, 这种“喷射—压实—速凝”的三重机制确保了支护体系能够及时发挥承载作用, 有效控制围岩的松动变形。

## 2 矿山井筒衬砌施工中的常见问题分析

### 2.1 井筒围岩稳定性差

深部井筒开挖后, 围岩应力重新分布导致塑性区范围扩大, 破碎带厚度可达 1.5 ~ 2.0 m。在软岩或节理发育地段, 围岩自稳能力极差, 开挖后数小时内即

出现明显的片帮冒落现象。这种快速失稳特性要求支护必须及时跟进, 传统支护方式因准备工序烦琐而错失最佳支护时机<sup>[2]</sup>。围岩的持续蠕变还会对支护结构产生长期荷载, 若初期支护强度不足或与围岩结合不良, 将导致支护层开裂甚至整体失效, 严重威胁井筒施工安全。

### 2.2 涌水高湿环境影响

含水层发育的井筒施工中, 涌水量可达每小时数十立方米, 水流沿井壁下淌形成水膜, 严重影响混凝土与围岩的黏结。在高湿环境下, 普通混凝土难以正常凝结, 即使勉强附着也因水泥浆流失而导致强度大幅降低。涌水还会冲刷新喷混凝土, 造成局部厚度不足或形成空洞, 削弱支护的整体性<sup>[3]</sup>。在冻结法施工井筒中, 融化期涌水问题更为突出, 水温接近冰点使混凝土凝结时间显著延长, 给施工组织带来极大的困难。

### 2.3 传统工艺局限性大

砌筑式衬砌需要搭设模板、绑扎钢筋、浇筑混凝土等多道工序, 施工周期长达数天甚至数周, 此期间围岩持续暴露导致应力释放过度。模板支撑系统占据井筒空间, 影响通风排水, 增加了作业风险。浇筑过程中混凝土自重对模板产生侧压力, 在破碎围岩地段容易引发局部坍塌。混凝土养护期间需要保持适宜的温湿度条件, 在井筒特殊环境下难以实现, 导致衬砌质量波动较大。

作者简介: 陈学阳 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

### 3 喷射混凝土技术在矿山井筒衬砌施工中的具体应用

#### 3.1 配合比设计优化

面对井筒高湿涌水环境,配合比设计的核心目标是提升抗渗性与早期强度。采用强度等级 52.5 的普通硅酸盐水泥,掺 10% 硅灰优化孔隙结构,严格控制水胶比不超 0.40。骨料采用 5~10 mm 粒径的碎石和中砂,泥分占比不超 1%,保障和水泥浆牢固结合<sup>[4]</sup>。根据围岩涌水情况,动态调整速凝剂掺量,一般控制在胶凝材料总量的 6%~8%,使初凝时间缩到 3~5 min。破碎围岩段增配钢纤维,掺加量 30~40 kg/m<sup>3</sup>,纤维长度比 30~50,增强混凝土的韧性与抗裂能力。

#### 3.2 分层喷射施工

分层喷射工艺将总厚度 200 mm 的支护层分为三次施工完成,避免了一次喷射过厚导致的自重脱落问题。第一层厚度控制在 50 mm,采用较高的速凝剂掺量和较低的喷射速度,重点解决围岩封闭和初期支护问题。喷射时喷嘴与受喷面保持 0.8~1.0 m 距离,喷射角度接近垂直,确保混凝土充分压入围岩裂隙。第二层在第一层初凝后 2~4 h 进行,厚度增加至 70 mm,此时可适当提高喷射速度以提高施工效率。第三层作为最终防护层,厚度达到 80 mm,注重表面平整度控制,通过刮板及时修整确保厚度均匀。层间结合采用拉毛处理和喷水湿润相结合的方法,前一层表面在终凝前用钢刷拉出粗糙纹理,喷射前充分湿润但不得有明水,使新旧混凝土形成牢固的咬合连接(见图 1)。

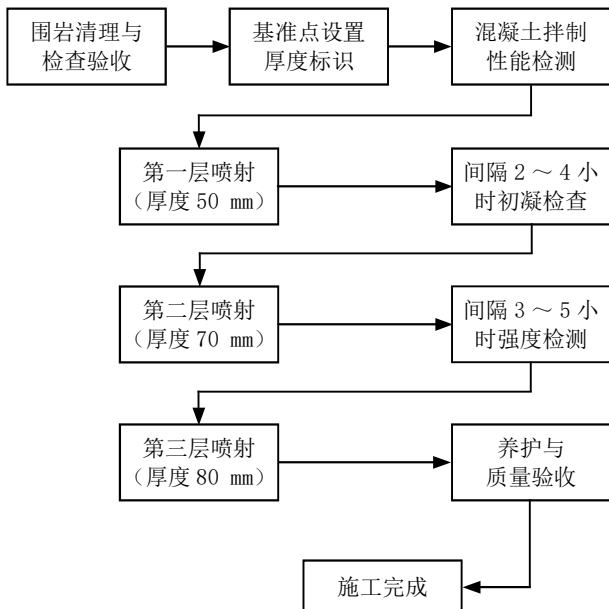


图 1 喷射混凝土施工工艺流程图

#### 3.3 喷射参数控制

喷射参数的精确控制直接决定混凝土的密实度和回弹率。工作风压须保持在 0.4~0.6 MPa 之间,风压较小情况下混凝土喷射速度缓慢、能量不足,无法有效压实使成型密实;而过大风压会使较多骨料反弹,造成浪费并且影响喷层平顺性。输料管道总长不应大于 80 m,弯头数量不应多余 3 个,减少摩擦力,避免混凝土离析以及堵塞。喷射手必须经过专业培训并且取得相应资格证书方可操作,用螺旋形方式缓慢移动,每次停留时间不能超过 1 s,使喷射厚度一致、表面光洁。涌水处施工前先使用速凝堵水材料封闭大量流水位置,之后再进行大面积喷射;对于漏水严重的部位,在其内部预设排水管,将水引流到集中排水沟内,防止流水冲击未初凝混凝土表面对其造成损害。喷射工作要分段进行,每一段长度为 2~3 m,由下至上逐层喷射,确保喷射质量可控。

### 4 施工质量控制与常见问题处理

#### 4.1 强度与厚度控制

强度检测采用钻芯取样及回弹仪结合方式,在每 100 m<sup>2</sup> 范围内至少需取 3 组芯样进行抗压试验,同时以 2 m×2 m 间距布置回弹点进行回弹值测量并绘制强度分布图以便查找较弱部位。施工现场每个班组应制备至少 2 组同条件养护试件。厚度检查通过预埋钢筋实现,在 1.5 m×1.5 m 范围内均匀布置,钢筋顶端距离围岩为设计厚度,以此作为喷射厚度依据。施工过程中使用激光测距仪进行跟踪测量,每向上喷射 1 m 高时进行截面扫描,根据实际情况调整喷射参数防止厚度超厚或者过薄<sup>[5]</sup>。对于厚度不够位置,在初凝之前进行补喷;而厚度过大地方,则先将其分段切除后再进行喷射作业,使厚度差控制在 ±10 mm 以内。所有的检测记录均纳入质量追踪系统进行管理。

#### 4.2 裂缝与脱落防治措施

裂缝与脱落是喷射混凝土常出现的质量问题,在施工中应从配合比选择、喷射方法以及养生等各个方面进行预防。对于裂缝,加入占胶凝材料总质量 8% 膨胀剂以补偿收缩变形,减少干缩裂缝产生;同时,严格控制第一层厚度不超过 50 mm,分层间隔 2~4 h,防止层间脱离;喷射完成后喷雾养生至少 7 天以上。已经产生的裂缝分级处置:裂缝宽度小于 0.2 mm 用表面封闭法处理,宽度大于 0.2 mm 用压力注浆法修补,注浆压力为 0.2~0.4 MPa。脱落主要是由于围岩处理不当或者喷射参数不合理造成的,在喷射前将松动围

岩、浮石及油渍清除,在破碎部位打入锚杆并铺设钢筋网;喷射过程中保持压缩空气压力在 0.4~0.6 MPa 之间,喷头距受喷面距离为 0.8~1.0 m,尽量使喷头垂直面向喷射,保证混凝土密实度高。采取“预防—控制—处理”的方式可以很好地保证支护质量和寿命。

#### 4.3 材料与设备质量控制

材料和设备的稳定性是喷射混凝土施工质量的基础。在材料上,水泥、骨料、速凝剂等进入施工现场需检查合格证及相关资料并且取样复试,水泥应采用强度等级不低于 52.5 的普通硅酸盐水泥,储存超过三个月需要重新测定安定性;骨料含泥量不大于 1%,含水量变化在  $\pm 0.5\%$  范围内要相应改变加水量;速凝剂必须与水泥做相容性试验,保证其初凝时间为 3~5 分钟。在设备方面,每天工作前要对喷射机、空压机、输料管道以及机械手进行全面检查,空压机出风口压力变化不超过  $\pm 0.05$  MPa,输料管线长度不超过 80 m,弯头不应超过 3 个,每班次完毕后用高压风吹净管内混凝土,以防堵塞。喷射机械手要定期标定臂架位置和喷嘴角度传感器,计量器具电子秤误差不能大于  $\pm 1\%$ ,强制式搅拌机每盘搅拌时间不少于 60 秒。通过“材料源头管控+设备预防维护”的双重保障机制,有效降低质量风险。

### 5 工程应用案例分析

#### 5.1 案例概况

某矿副井井筒设计深度 680 m,井筒净直径 5.5 m,穿越侏罗系砂泥岩互层和奥陶系灰岩含水层。井筒在

470~520 m 段遭遇强涌水层,涌水量达到  $15\text{ m}^3/\text{h}$ ,围岩破碎严重,自稳时间不足 6 h。该段原设计采用砌筑式混凝土衬砌,但模板支护困难且施工周期过长,经专家论证后改用喷射混凝土支护方案。施工采用湿喷工艺,配备两台自动化喷射机械手交替作业,配合比按照前述优化方案执行,速凝剂掺量提高至 8% 以适应强涌水环境。

#### 5.2 技术应用效果评估

在施工过程中,通过实时监测围岩变形和支护层应力状态,数据显示喷射混凝土支护后围岩变形速率迅速下降,24 h 内收敛率达到 85%,7 天后基本稳定。支护层厚度检测结果显示,95% 的区域厚度偏差在  $\pm 8\text{ mm}$  以内,满足设计要求。钻芯取样抗压强度测试表明,28 天强度平均值为 32.5 MPa,超过设计强度等级。与原砌筑方案相比,喷射混凝土施工使该段工期缩短 40 天,降低了工程成本约 18%。施工过程中回弹率控制在 12% 以内,明显低于干喷工艺的 25%~30%。井筒投入使用两年来,衬砌状态良好,未出现渗漏、开裂等质量问题,充分验证了喷射混凝土技术在复杂地质条件下的适用性和可靠性(见表 1)。

### 6 结束语

喷射混凝土技术依托高效施工、良好适配表现和可靠的支护效果,已成为矿山井筒衬砌施工的重要手段。通过优化配合比、改进分层喷射工艺、落实严格质量控制,有效解决深井复杂地质条件下的支护难题。工程实践证明,在保证施工质量的前提下显著缩短了

表 1 不同喷射工艺性能对比表

| 工艺类型 | 回弹率 (%) | 粉尘浓度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | 28 天强度 (MPa) | 施工效率 ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) | 适用环境   |
|------|---------|---------------------------------|--------------|--------------------------------|--------|
| 干喷法  | 25~30   | 80~150                          | 25~28        | 15~20                          | 干燥低湿环境 |
| 潮喷法  | 18~22   | 50~80                           | 28~32        | 20~25                          | 一般湿度环境 |
| 湿喷法  | 10~15   | 15~30                           | 30~35        | 25~35                          | 高湿涌水环境 |

工期、削减了成本,具有良好的推广实用价值。未来需深化智能化喷射装备和在线监测技术的研究,提高施工自动化程度和质量管控精度。

#### 参考文献:

- [1] 覃柏钧,蒋寅豪,梁龙群.大型地下洞库高延展复合纤维混凝土喷射施工技术探析[J].人民黄河,2025,47(S2):129-131.
- [2] 徐浩田,张金龙,马伟斌,等.基于三维激光扫描的隧

- 道喷射混凝土施工管控技术[J].中国铁路,2024(11):45-52.
- [3] 程伟峰,杨虹,仝德华,等.现场喷射成型双掺硅粉和钢纤维湿喷混凝土弯曲韧性研究[J].岩土工程学报,2025,47(05):1073-1081.
- [4] 李增林,张东升,王锐,等.大断面斜井富水砂化层段注浆改性及围岩控制技术研究[J].煤炭工程,2024,56(08):38-46.
- [5] 梁旭,席义苗,王小勇,等.多壁碳纳米管影响喷射混凝土力学性能研究[J].陕西煤炭,2024,43(05):41-45.