

# 地下水封洞库施工中湿喷混凝土回弹率控制 关键技术研究

袁洪飞, 李斌, 林举徽, 段平凡, 王丹石

中国石油管道局工程有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月23日

## 摘要

湿喷混凝土支护是地下水封洞库等大型地下空间工程施工中的关键工序, 其回弹率高低直接影响工程质量、成本与施工环境。针对此类工程中喷射混凝土回弹损失率居高不下的行业共性难题, 本研究系统剖析了回弹形成的力学机理与主要影响因素。研究表明, 回弹率主要受材料体系性能、喷射工艺参数及岩面作业条件三大类因素共同制约。其中, 混凝土拌合物的工作性能、速凝剂效能与掺量是内在主因; 喷射机手操作技能, 特别是喷嘴与受喷面的距离、角度以及风压的匹配性是关键工艺参数; 而开挖面的平整度、洁净度及渗涌水状况则是重要的外部边界条件。基于此, 本文提出了一套综合性的回弹率控制关键技术体系, 包括: 优化混凝土配合比并采用纤维增强与高性能速凝剂以提升材料粘聚性与早期强度; 通过标准化培训与过程监控, 严格将喷射距离控制在0.8~1.2 m、角度保持近垂直(针对立面)、风压稳定于0.4~0.6 MPa的优化区间; 以及对超挖凹槽进行挂网补喷、对渗涌水面实施引排或预注浆等岩面预处理措施。在QZGC工程实践表明, 集成应用上述技术可使边墙与拱部综合回弹率有效降低至15%以下, 显著节约材料成本、提升支护质量并改善洞内作业环境, 为类似地下工程的绿色、高效施工提供了可靠的技术路径。

## 关键词

地下水封洞库, 湿喷混凝土, 回弹率, 速凝剂, 喷射工艺, 岩面处理

# Research on Key Technologies for Rebound Rate Control of Wet Sprayed Concrete in Underground Water-Sealed Cavern Construction

Hongfei Yuan, Bin Li, Juhui Lin, Pingfan Duan, Danshi Wang

China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

文章引用: 袁洪飞, 李斌, 林举徽, 段平凡, 王丹石. 地下水封洞库施工中湿喷混凝土回弹率控制关键技术研究[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(2): 252-257. DOI: 10.12677/jogt.2026.482029

## Abstract

Shotcrete support is a critical process in the construction of large underground spaces such as groundwater-sealed caverns, and the rate directly affects engineering quality, cost, and the construction environment. Addressing the industry-wide challenge of persistently high rebound loss rates in such projects, this study systematically analyzes the mechanism and primary influencing factors of rebound formation. The research indicates that the rebound rate is primarily constrained by three categories of factors: material system performance, spraying process parameters, and rock face work in conditions. Among these, the workability of the concrete mixture, the efficiency and dosage of accelerators are the intrinsic primary causes; the operator's skill, particularly the matching of nozzle distance and angle with the receiving surface, and air pressure, are key process parameters; while the flatness, cleanliness, and seepage conditions of the excavation face constitute important external boundary conditions. Based on this, this paper proposes a comprehensive technical system for rebound rate control, including: optimizing concrete mix proportions and adopting fiber reinforcement and high-performance accelerators to enhance material on and early strength; strictly controlling spraying distance within 0.8~1.2 m, maintaining a near-vertical angle (for vertical faces), and stabilizing air pressure at 0.4~0.6 MPa through standardized training and process monitoring; and implementing rock face pre-treatment measures such as mesh hanging and supplementary spraying for over-excavation grooves, and drainage or pre-grouting for seepage surfaces. Practical application in the QZGC project demonstrates that the integrated application of these technologies can effectively reduce the comprehensive rebound of side walls and arches to below 15%, significantly saving material costs, improving support quality, and improving the working environment within the cavern, providing a reliable technical pathway for green construction of similar underground projects.

## Keywords

Underground Water-Sealed Rock Cavern, Shotcrete, Rebound Rate, Accelerator, Spraying Process, Rock Face Treatment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国能源战略储备体系的深化建设与地下空间开发的飞速发展,大型地下水封石油洞库、抽水蓄能电站地下厂房、深埋交通隧道等工程日益增多[1][2]。此类工程规模宏大、地质条件复杂,其永久支护与初期支护大量依赖于喷射混凝土技术。相较于干喷工艺,湿喷混凝土因其拌合均匀、强度发展稳定、粉尘浓度低等显著优势,已成为当前主流施工工法[3][4]。然而,湿喷混凝土施工中普遍存在回弹物料过多的问题,即部分混凝土颗粒未能有效附着于岩面,而从受喷面反弹溅落。较高的回弹率不仅直接导致原材料(水泥、骨料、外加剂)的严重浪费,推高工程成本,更会引发一系列连锁问题:回弹料堆积需清理,占用作业空间,影响其他工序;反弹过程中产生的二次扬尘恶化洞内空气质量,危害作业人员健康;回弹料混杂降低喷射层整体均匀性与密实度,可能影响支护结构的耐久性与长期性能[5][6]。因此,有效控

制并降低湿喷混凝土回弹率,是提升地下工程施工技术水平、实现降本增效与绿色安全建造亟待解决的核心课题之一。

回弹现象本质上是混凝土颗粒与岩面碰撞过程中动量传递的结果,其比率受多重因素交织影响。国内外学者与研究机构已从材料科学、流体力学及施工工艺等角度开展了不少研究工作,普遍认为回弹率与混凝土的配合比设计(特别是骨料级配、胶凝材料体系与外加剂性能)、喷射设备的工作参数(风压、流量)、操作手的技能水平(喷射距离、角度、移动轨迹)以及围岩表面状态(平整度、湿度、洁净度)密切相关[7][8]。然而,现有研究多侧重于单一因素的实验室分析或特定工况的经验总结,针对如地下水封洞库这类大断面、长洞线、多作业面且对水密性有极高要求的特殊工程,缺乏一套系统性的、可复制推广的现场综合控制技术体系。

本研究立足于大型地下水封洞库工程实践,旨在超越个案经验总结,从理论分析与现场验证相结合的角度,系统地识别影响湿喷混凝土回弹率的关键要因,并构建一套涵盖材料优化、工艺精准控制与作业面适应性处理的全流程技术解决方案。通过对回弹形成机理的深入探讨及各影响因素的量化关联分析,提出具有普遍指导意义的工艺参数窗口与控制标准,以期为显著降低喷射混凝土回弹损失、提升地下工程喷射混凝土施工质量与经济效益提供理论依据与实践指导。

## 2. 湿喷混凝土回弹形成机理与主要影响因素分析

湿喷混凝土的回弹是一个复杂的动态过程,其根本原因在于喷射流中混凝土颗粒所携带的动能未能完全转化为与岩面结合所需的变形能与表面能。当颗粒冲击岩面时,部分动能用于克服颗粒自身惯性、与岩面之间的摩擦以及产生塑性变形以实现附着;剩余动能则导致颗粒反弹。回弹率即是反弹颗粒所携带的能量占总冲击能量的比例直观体现。基于动量与能量守恒原理,可将影响因素归结为以下三个层面:

### 2.1. 材料体系性能的内在影响

材料本身的特性是决定其附着能力的物质基础。

**混凝土工作性与粘聚性:** 坍落度过大( $>200\text{ mm}$ )的混凝土,其浆体粘度偏低,骨料易在高速气流中分离,且冲击岩面时浆体包裹层易被“撞散”,导致骨料直接反弹。反之,坍落度过小( $<120\text{ mm}$ )则流动性差,在喷管内易堵塞,喷射时成束性差,同样增加回弹。最优的坍落度范围通常在  $160\text{ mm} \pm 20\text{ mm}$ ,此时浆体具有适宜的粘稠度,既能良好包裹骨料,又能在冲击后迅速铺展附着[9]。此外,掺入适量的优质粉煤灰或硅灰,可改善浆体流变性能,增加粘聚力,有助于降低回弹。

**速凝剂性能与掺量:** 速凝剂的作用是使混凝土在极短时间内凝结硬化,这是减少回弹的核心材料手段。性能优异的液体无碱速凝剂能使混凝土在数分钟内初凝,迅速形成强度,将冲击的颗粒“锁定”在岩面上。若速凝剂与水泥适应性差、掺量不足或掺加不均匀,会导致混凝土凝结过慢,在重力或后续料流冲击下发生脱落或流淌,显著增加回弹[10]。掺量需根据现场温度、水泥品种经试验精确确定。

**纤维增强材料的应用:** 在混凝土中掺入钢纤维或合成纤维,能在混合料中形成三维网络支撑,极大提高混凝土的塑性阶段抗裂性与整体性。喷射时,纤维能有效“抓握”骨料,防止冲击过程中的材料离散,从而显著减少回弹,尤其对于厚层喷射和拱顶部位效果更为明显。

### 2.2. 喷射工艺参数的直接影响

工艺参数决定了混凝土颗粒冲击岩面时的状态和能量。

**喷射距离:** 距离过近( $<0.6\text{ m}$ ),高压气流会在岩面产生强烈“吹扫”效应,使已附着的未完全凝固的混凝土被吹落;距离过远( $>1.5\text{ m}$ ),料束速度衰减,颗粒动能不足,冲击力减弱,同时料束发散严重,附

着率下降。实践证明,将喷射距离稳定控制在 0.8~1.2 m 范围,能使料束集中,动能适宜,回弹最小。

**喷射角度:**喷嘴轴线与受喷面法线方向的夹角至关重要。理想角度应为垂直(90°),此时料流垂直冲击,动能传递效率最高,混凝土颗粒嵌入效应最好。当夹角过小(如小于 70°),料流呈“掠射”状态,大量混凝土颗粒会沿岩面滑动、滚落,造成“铲射”效应,回弹剧增。对于边墙,应尽量保持喷嘴自上而下、略微内倾;对于拱顶,则应尽量使喷嘴垂直于曲面切线方向。

**工作风压:**风压是驱动混凝土料束并获得初始速度的能源。风压过低,料束速度慢,冲量小,附着无力,且易导致管道堵塞;风压过高,则料流速度过快,对岩面的冲击力过大,同样会增加弹性回弹,并加剧粉尘。适宜的风压范围通常为 0.4~0.6 MPa,需根据输送距离、管径及混凝土性能动态微调,以料束集中、密实、回弹物少量均匀喷出为宜。

**喷射顺序与分层厚度:**不合理的喷射顺序会导致后续料流冲击破坏前一层。应遵循“自下而上、先墙后拱、分段分片、分层施作”的原则。一次喷射厚度过大,下层混凝土无法提供足够支撑,在自重作用下会发生“鼓包”脱落。边墙一次喷层厚度宜控制在 80~100 mm,拱顶宜控制在 50~70 mm。分层喷射时,间隔时间应在前一层终凝之后。

### 2.3. 作业面(受喷面)状态的边界影响

受喷面的条件是混凝土附着的基础界面。

**岩面平整度(超欠挖控制):**爆破后的岩面若存在大面积超挖形成的凹坑,喷射混凝土未填满凹坑会形成局部过厚堆积。在无有效支撑的情况下,过厚的湿混凝土在自重和速凝剂产生的热量共同作用下,易产生收缩裂缝甚至整体脱落。凸出的岩块(欠挖)则会造成遮蔽效应,其背后形成空洞,料流无法直接冲击附着。因此,良好的光面爆破效果,控制超欠挖,是保障湿喷效果的前提。

**岩面洁净度与湿度:**岩面残留的爆破粉尘、泥污会在混凝土与岩石之间形成软弱夹层,严重影响粘结力,导致混凝土成片剥离。喷射前必须用高压风-水联合彻底清洗岩面。另一方面,岩面存在线状涌水或大面积渗水时,水流会冲刷混凝土浆体,并在界面形成水膜,阻隔水泥浆与岩石的微观结合。对于渗涌水,必须先进行治水处理(如埋设导管引流、集中引排或进行预注浆封堵),创造干燥或仅有潮湿度(无明显水)的喷射基底。

## 3. 降低回弹率的综合性控制关键技术

基于上述机理分析,降低回弹率需采取系统性综合治理策略,而非单一技术手段。关键技术体系如下:

### 3.1. 材料体系优化技术

**精细化配合比设计:**根据工程地质条件和支护要求,进行专项喷射混凝土配合比设计与试验。重点优化骨料级配,采用连续级配,适当提高砂率(通常为 50%~60%),增加 0.3 mm 以下细颗粒含量,以改善和易性与粘聚性。胶凝材料中可掺入占水泥重量 10%~15%的优质矿物掺合料。

**高性能速凝剂精准应用:**优先选用与工程水泥适应性好、掺量低、早期强度高、后期强度损失小的液体无碱速凝剂。通过现场试验确定最佳掺量(通常为胶凝材料质量的 4%~8%),并确保在喷头处通过计量装置与压缩空气雾化后与混凝土料流均匀、瞬间混合。

**推广纤维混凝土应用:**在需要较高韧性或防止开裂的部位,采用钢纤维或合成纤维混凝土。纤维长度与直径需与骨料粒径匹配,掺量通过试验确定。纤维的加入可显著改善喷射料的整体性,减少回弹 10%~25%。

### 3.2. 喷射工艺精准控制技术

**操作标准化与人员培训:** 对湿喷机械手操作员进行系统化、标准化的实操培训与考核。培训重点为掌握并稳定保持最优的喷射参数组合: 距离(0.8~1.2 m)、角度(近垂直)、风压(0.4~0.6 MPa)以及平稳、匀速的扇形摆动轨迹。

**过程参数实时监控:** 在湿喷机及空压机出口安装压力、流量传感器, 对工作风压和速凝剂掺量进行实时监测与反馈, 确保工艺参数稳定在设定范围, 避免人为操作的波动。

**严格遵循喷射作业规程:** 强制执行“先送风、后送料; 先关料、后关风”的开停机程序。按规范要求分层、分片、有序喷射, 严格控制单层厚度和层间间隔时间。

### 3.3. 作业面适应性预处理技术

**岩面修整与找平:** 对爆破后存在的明显超挖凹槽(深度大于 15cm), 不宜完全用喷射混凝土填平。应在喷射前, 在凹槽处预先挂设一层钢筋网片, 或安装可连接的钢拱架, 先对其进行局部补喷找平, 再进行大面积覆盖喷射, 避免厚层堆积。

**系统性治水与岩面处理:** 将喷射前的岩面水处理纳入工序管理。对于小股涌水, 采用钻孔埋设塑料导管引出至排水沟; 对于面状渗水, 可开凿 V 型槽引流或喷涂快凝防水材料临时封闭; 对于较大范围渗水, 则应采用超前小导管注浆或局部围岩注浆进行封堵。喷射前, 必须使用高压风-水枪对岩面进行彻底冲洗, 清除松动石块和粉尘。

## 4. 工程应用与效果验证

将上述综合技术体系应用于 QZGC 地下水封洞库工程主洞室支护施工中。在技术应用前, 对多个作业面进行回弹率实测, 其边墙与拱部综合回弹率平均值为 25.6%, 最高达 31%, 与文献[6][8]中提及的早期工程问题相符。

全面实施控制技术后, 通过对混凝土配合比的优化(掺入硅灰、采用高性能无碱速凝剂), 对操作手进行专项培训与考核, 并严格执行喷射参数与岩面预处理流程, 回弹率得到显著且稳定地降低。后续对长达数月的施工进行持续性取样统计, 结果显示, 边墙部位平均回弹率降至 9.2%, 拱顶部位平均回弹率降至 12.5%, 综合回弹率稳定控制在 10.5%左右, 远低于原设定的 15%的控制目标, 更显著低于初始水平。

效益分析表明: (1) **经济效益显著:** 混凝土材料节约率达 15%以上, 同时减少了清理回弹料的人工与机械成本, 综合施工成本降低约 8%~12%。(2) **质量与安全效益提升:** 回弹率降低意味着喷射层更密实、均匀, 支护结构整体性更好。作业环境粉尘浓度同步下降, 改善了劳动条件, 保障了职业健康。(3) **工效提高:** 因清理工作量减少和工序衔接更顺畅, 平均每个喷射作业循环时间缩短约 15%。

## 5. 技术体系适用边界与局限性

任何技术体系均存在其适用边界, 本文所述控制技术在极端工况下亦面临挑战与局限。在围岩极度破碎、呈粉细砂状或土夹石结构的 V 级及以上围岩中, 受喷面本身稳定性极差, 即便进行了严格的岩面清理与预处理, 高压喷射流仍可能引发岩面剥落或滑塌, 导致混凝土“挂不住”而整体垮落, 此时单纯依靠工艺优化难以奏效, 需转换为“先加固后支护”的思路, 即必须先施作超前小导管注浆或管棚, 待地层自稳能力恢复后方可进行喷射作业。面对特大涌水或承压水(水压 > 0.5 MPa)环境, 即便采取了引排措施, 持续的高压动水仍会冲刷新喷混凝土的水泥浆体, 破坏水化环境, 导致回弹率激增甚至完全无法附着, 此时应暂停湿喷作业, 转为注浆止水作业或采用特种抗分散(不分散)混凝土。此外, 对于需掺入高掺量钢纤维(>60 kg/m<sup>3</sup>)或特殊外加剂的混凝土, 其粘度剧增, 极易造成管道堵塞且对设备磨损极大, 现有

常规湿喷机的泵送能力可能无法满足,需评估设备升级的可行性。因此,在工程应用中,应将本技术体系视为一个动态的、需根据现场极端条件进行适配调整的基准框架,而非僵化的标准,当遭遇上述极限工况时,必须及时启动应急预案与技术变更。

## 6. 结论与展望

降低湿喷混凝土回弹率是一个涉及材料、工艺、装备、人员及管理等多方面的系统工程。本文通过机理分析与工程实践,得出以下主要结论:

湿喷混凝土回弹率受材料性能、工艺参数和岩面条件三大类因素协同控制。其中,混凝土的粘聚性与凝结速度、喷射距离与角度、以及岩面的平整度与干燥度是需要重点控制的关键环节。

通过采用优化配合比、高性能速凝剂及纤维增强技术,可以从本质上提升混凝土的抗离散与快速附着能力,是降低回弹的内因控制。

通过标准化培训与过程监控,将喷射距离、角度、风压等关键参数稳定在最优窗口内(0.8~1.2 m, 近垂直, 0.4~0.6 MPa),是降低回弹的直接工艺保障。

对作业面进行严格的超前处理,包括控制爆破轮廓以减少超欠挖、对凹槽进行挂网预喷、以及对渗涌水进行有效引排或封堵,是为喷射混凝土提供良好附着基础的先决条件。

集成应用材料优化、工艺精准控制与岩面预处理技术,可在地下水封洞库等大型地下工程中,将湿喷混凝土综合回弹率系统性降低至15%以下,实现显著的经济、质量与安全效益。

未来,该领域的研究与实践可进一步向智能化、精细化方向发展:开发集成传感器与自动控制系统的智能湿喷机,实时感知喷射距离、角度并自动调节风压与料流,实现工艺参数的自适应最优控制。通过技术融合,持续推动地下空间工程喷射混凝土技术低回弹、高品质、高效益的目标迈进。

## 参考文献

- [1] 张顶立, 台启民, 房倩. 复杂隧道围岩安全性及其评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 270-296.
- [2] 王者超, 张彬, 乔丽苹, 等. 中国地下水封存理论与关键技术研究进展[J]. 油气储运, 2022, 41(9): 995-1003.
- [3] 康红普, 王国法, 姜鹏飞, 王家臣, 张农, 靖洪文, 等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1789-1800.
- [4] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004.
- [5] 任伟. 隧道喷射混凝土回弹率控制措施[J]. 交通世界(中旬刊), 2021(8): 167-168.
- [6] 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(6): 87-91.
- [7] ACI Committee 506 (2016) Guide to Shotcrete (ACI 506R-16). American Concrete Institute.
- [8] 朱永全, 宋玉香. 隧道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
- [9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 35159-2017 喷射混凝土用速凝剂[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50086-2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.