

水电站引水隧道湿喷混凝土工艺推广研究

李海生 范超

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610000

[摘要] 本文通过对混凝土潮喷与湿喷工艺、质量、成本等全方位对比, 论证了混凝土湿喷工艺的技术优势及在引水隧道工程中推广的必要性。湿喷工艺在混凝土匀质性、强度保障等方面优势显著, 虽然与潮喷工艺相比成本更高, 但是能有效提升混凝土强度, 具有较高的性价比。因此在引水隧道工程施工中, 湿喷工艺的应用可以实现安全、高效、耐久的建设目标, 值得在行业内推广与应用。希望通过本文分析, 能让人们了解与熟悉湿喷工艺, 并能推动行业内对湿喷工艺的引进与应用, 保证水电站引水隧道的质量与效率, 推动行业的可持续发展。

[关键词] 水电站; 耐久性能; 抗渗性能; 湿喷工艺; 成本分析

DOI: 10.64635/ja.2026.1077

中图分类号: TV732

文献标识码: A

Research on the Promotion of Wet-Mix Shotcrete Technology in Water Diversion Tunnels of Hydropower Stations

Li Haisheng, Fan Chao

PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610000, Sichuan, China

Abstract: Through a comprehensive comparison of dry-mix and wet-mix shotcrete in terms of construction process, quality, and cost, this paper demonstrates the technical advantages of wet-mix shotcrete and the necessity of promoting its application in water diversion tunnel projects. Wet-mix shotcrete exhibits significant advantages in concrete homogeneity, strength assurance, and related performance aspects. Although its cost is higher than that of dry-mix shotcrete, it can effectively improve concrete strength and offers a relatively high cost-performance ratio. Therefore, in the construction of water diversion tunnels, the application of wetmix shotcrete can help achieve the goals of safety, efficiency, and durability, and thus deserves wider promotion and application within the industry. It is hoped that this study will enhance understanding and familiarity with wet-mix shotcrete technology, promote its adoption and application in the industry, ensure the quality and efficiency of hydropower station water diversion tunnels, and contribute to the sustainable development of the sector.

Keywords: hydropower station; durability; impermeability; wet-mix shotcrete; cost analysis

引言

引水隧道作为水利工程中的关键构筑物, 其混凝土支护结构的施工质量直接关系到工程的整体安全性与长期耐久性。传统潮喷工艺虽因设备结构简单、初期投资成本较低而曾获得广泛应用, 但在质量控制、作业环境及机械化适配性等方面存在明显局限性。本文通过系统对比潮喷与湿喷工艺的关键技术指标, 论证湿喷工艺在引水隧道工

程中应用的综合技术优势, 并进一步提出相应的推广应用策略。

1 潮喷与湿喷工艺的核心差异对比分析

1.1 喷射混凝土潮喷、湿喷工艺对比

从工艺特征、作业环境、性能指标等多个维度, 对比潮喷工艺与湿喷工艺, 了解二者的差异。其核心差异对比如表 1 所示。

表 1 喷射混凝土潮喷、湿喷工艺对比表

项目		潮喷工艺	湿喷工艺	
速凝剂		碱性粉剂	碱性液体速凝剂	无碱液体速凝剂
工艺特征	速凝剂添加形式	粉剂, 只能在喷射机旁添加	液体, 计量泵控制, 喷嘴添加	
	砂石料	砂石料处于饱和含水率状态	含水率不限制, 计算用水量时扣除含水量	

项目		潮喷工艺		湿喷工艺		
作业环境		搅拌机旁、运输过程、喷射机旁（特别严重）、喷嘴均产生粉尘		只有喷嘴处有水雾和少量粉尘，喷射机旁完全无粉尘		
		粉尘污染严重		粉尘少，若防护不当，速凝剂对皮肤有刺激	粉尘少，无任何刺激	
性能指标	控制质量	水胶比	由喷射手根据经验通过阀门控制，控制困难		根据配合比由拌和站自动控制	
		匀质性	匀质性差		匀质性较好	
	密实性	毛细孔	毛细孔孔隙率随水胶比变化，不可控	密实性差，由于喷层内部浆体充填不饱满，存在大量蜂窝孔，密实度系数只有 0.9 左右	水胶比可控，毛细孔孔隙率可控	密实性好，浆体充填饱满，蜂窝孔体积分率减小并且结构优化，密实度系数达到 0.95 左右
		蜂窝孔	水泥在喷射管内以粉体形态存在，砂石料空隙浆体充填不饱满		水泥以浆体形态存在并包裹在砂石料表面，砂石料空隙浆体充填饱满	
		容重	2200kg/m ³ 左右		≥2350kg/m ³	
	强度	早期强度	据现场调查，很难达到 1 天强度指标 10MPa 要求		可满足 1 天强度大于 10MPa，根据需要可实施超高强喷射混凝土	
		28 天强度	根据现场调查，28 天强度一般在 15~25MPa（多在 15~20MPa），很难达到 C25 技术标准，技术标准一般为 C15		可在 C15~C40 之间满足设计要求	高于碱性速凝剂 5~20MPa 可以达到 C50~C60
	耐久性能	抗渗性能			喷射混凝土材料抗渗性能达到 P40	
		耐久性能			可满足各种电通量指标要求	
		抗冻性能			可满足 F300 或 DF≥0.8	
碱集料风险		有		有	无	
混凝土新技术新材料应用	减水剂	无法应用减水剂		通过减水剂，使拌和物在低至 0.35 水胶比条件下仍具有良好工作性，是高强高性能喷射混凝土必备条件		
	引气剂	引气效果不明显		引气效果明显（提高抗冻性能）		
	其他外加剂	混凝土外加剂应用受到限制		所有混凝土外加剂都可应用		
	外掺料	很少使用混凝土外掺料		混凝土外掺料都可应用，效果显著，高性能喷射混凝土必备条件		
	钢纤维	钢纤维对设备和管道磨损很大，回弹大，钢纤维喷射困难		浆体对设备和管道有润滑作用，回弹小，钢纤维喷射顺利		
	合成纤维	纤维在喷嘴处易发生漂移，实施困难		浆体包裹纤维，可顺利实施		
施工技术	输送距离	输送距离大		输送距离较短，但完全满足水电站引水隧道施工需要		
	劳动强度	只能人工上料，劳动强度大		可以通过罐车实现机械化上料，降低劳动强度，喷嘴后坐力稍大		
	操作技术要求	设备操作和维护保养简单，但对喷射手技能和责任心要求很高		设备操作和维护保养稍复杂，但对喷射手技能要求低		

1.2 对比分析

1.2.1 潮喷工艺

潮喷工艺所需设备较为简易，且粉状速凝剂材料成本较低，适合缺乏专业技术背景的施工人员操作（注：此处“操作”指具备基本作业能力，而非达到规范要求的操作水平），因而深受分包商青睐。

尽管潮喷工艺在设备操作方面较为简单，但其对喷射手的操作技能与责任意识要求较高；若未能满足上述要求，则难以保证喷射质量。在当前工程承包体系下，同时具备高水平技能和高度责任心的喷射手较为稀缺，加之施工人员流动性大、整体技术水平有限，导致潮喷混凝土喷层质

量普遍低于设计标准。

从理论而言，潮喷工艺可将水胶比控制在 0.4 左右；然而在实际施工中，水胶比往往偏高。其原因在于，过低的水胶比会导致水泥水化不完全、喷嘴处粉尘量增大及回弹率增高，因而喷射手通常倾向于采用较大水胶比，致使混凝土强度无法满足设计要求。作为承包商，须满足设计规定的 C25 或 C30 强度等级，以及 1d 龄期强度大于 10MPa 的要求，其中早期强度对隧道工程安全，具有关键意义，尤其在软岩地质条件下，更能凸显其优势与价值。

事实上，在当前工艺水平下，潮喷工艺无法达到上述强度要求，这亦是隧道施工安全事故频发的重要诱因之一。

潮喷工艺难以实现机械化施工，而湿喷工艺则为机械化作业提供了基础条件。在沿用潮喷工艺的情况下，隧道工程机械化施工的目标将难以落实。潮喷工艺具有设备门槛低、材料成本敏感、输送距离长与操作入门容易得优势，但是也存在一定局限，具体表现为质量波动大，难以确保质量达标，早期强度不足，存在安全隐患，对人的依赖度过高，作业环境恶劣，机械化水平有待提升。

1.2.2 湿喷工艺

湿喷工艺中，水泥以浆体形态存在并充分包裹骨料表面，从而使浆体充分填充骨料间隙，喷射混凝土密实度显著提高，其直观反映为表观密度增大。密实度作为混凝土

强度及耐久性的关键基础，对材料性能具有决定性影响。目前在湿喷工艺实施过程中，部分施工单位未严格按工艺要求组织施工，导致湿喷技术的优势未能充分发挥。

湿喷工艺的质量可以控制，强度有保障，密实度高，具有良好的耐久性，同时作业环境友好与机械化水平高是其优势。但是也存在一定不足，具体表现为初期投入较大与精细化管理要求较高。

2 潮喷、湿喷成本差异与性价比分析

2.1 潮喷、湿喷成本差异对比

从机械台班费用、材料费用、人工费用等几个维度，对比分析潮喷、湿喷成本差异，具体如表 2 所示。

表 2 潮喷、湿喷成本差异对比表

序号	项目		潮喷	湿喷	湿喷产生的差异	
1	机械台班费用	搅拌设备	搅拌机	自动拌和站	台班费用增加	
2		运输设备	自卸车、小型运输车	搅拌运输罐车	台班费用增加	
3		喷射设备	潮喷机	湿喷机	设备折旧与配件费用增加约 15 元	
4				湿喷机组（机械手）		
5	材料费用	砂石料			无差异	
6		水泥	约 450kg/m ³		可节约水泥 50kg/m ³ 左右，无碱速凝剂节约水泥 100kg/m ³ 以上	
7		速凝剂	碱性	市场价 1000 元/吨左右	市场价 2000 元/吨左右	湿喷增加成本约 20 元
8			无碱		市场价 4500 元/吨左右	无碱湿喷增加成本约 90 元
9		减水剂			2~5kg	减水剂增加成本约 10~2 元
10		回弹材料损耗			降低 5%~20%	降低材料损耗费用 30~120 元
11		密实性材料消耗			增加材料消耗约 5%	减水剂增加成本约 10~25 元
12	人工费用				差异不大	
13	动力费用				差异不大	
14	作业循环		准备和退场时间短	准备时间较长	优化施工组织提高作业率至 65% 以上，作业循环时间差异不大	

2.2 性价比分析

2.2.1 成本与性能的性价比分析

湿喷工艺的综合

成本相较于潮喷工艺增加约 40~90 元。成本的增加，来自于设备折旧、高性能外加剂的投入，在多投入 40~90 元的成本同时，也会让混凝土性能得到显著提升。潮喷混凝土的强度约为 C15~C20，而湿喷混凝土能达到设计强度等级 C25。以 40~90 元的额外成本实现强度等级提升两个级别，其性价比更为显著。潮喷工艺的强度无法实现可控，但是湿喷工艺的强度是有保障的，对于工程施工而言后者更加可靠。

2.2.2 全生命周期成本视角下的性价比分析。

潮喷工艺存在较多质量问题，其根源是强度不足、密

实性差等，所以需要大范围的返工与补强加固，不仅影响工期，还会增加成本费用。湿喷混凝土具有良好的抗渗性能与抗冻性，可以保障引水隧道的安全与稳定，确保运营七局爱你，减少维护与维修费用的支出。

2.2.3 安全效益的量化分析

1 天龄期强度大于 10MPa 的要求可以由湿喷工艺稳定实现，对于不良体质条件的工程尤为重要，同时也是支护安全与稳定的关键所在，通过支护抗力的保障，可以对围岩变形进行控制，并能降低坍塌风险。潮喷工艺早期强度不足，无法为支护提供支持，但是湿喷工艺的初期支护质量有保障，可以在源头上控制安全事故的发生。

在湿喷工艺条件下，C30 和 C35 强度等级的混凝土与 C25 相比，成本差异较小，仅材料成本存在约 20~50 元

的差异,其他费用完全相同。因此,建议将喷射混凝土强度等级提高至C35,以获得更高的性价比(欧洲普遍采用C40喷射混凝土),从而进一步发挥湿喷技术的优势。

3 湿喷工艺在引水隧道中的推广优势

3.1 质量可控性

水胶比与匀质性通过拌和站实现自动控制,早期强度(1天 \geq 10MPa)及长期耐久性(如抗渗性与抗冻性)均符合设计要求,有效解决了潮喷工艺因强度不足可能引发的隧道安全隐患这一核心问题。湿喷工艺具有质量可控性的优势,可以在项目建成后,确保项目的安全稳定运行。

3.2 环境与安全风险提升

基本消除作业过程中的粉尘污染,显著降低施工人员的职业健康风险;机械化施工减少对人工作业的依赖,从而降低人为失误率。湿喷工艺的环境与安全优势,可以在项目施工中的应用,实现文明施工,全面提升项目的综合效益。

3.3 技术扩展性

具备引入减水剂、引气剂及钢纤维等新型材料的能力,可制备高强高性能喷射混凝土(C50~C60),适用于软岩隧道等复杂地质条件。对于复杂地质条件而言,湿喷工艺的应用,可以起到良好的安全与质量作用,提升施工质量。

3.4 长期经济性

尽管初期设备投资规模较大,但由于其返工率低、隧道使用寿命延长,全生命周期成本显著低于潮喷工艺,因此站在长远的视角,湿喷工艺的经济效益更加,而潮喷因质量问题所产生的高额维修成本,会让其长期成本费用增加。

4 推广策略建议

4.1 政策引导与标准制定

将湿喷工艺纳入引水隧道工程施工的强制性技术标准,强制项目单位使用湿喷工艺。明确规定喷射混凝土强度等级(C25/C30)及早期强度要求,对其技术应用标准进行明确,保证工艺应用的规范性。同时,要逐步淘汰潮喷工艺,并鼓励使用湿喷工艺,逐步向文明施工、低碳施工的方向发展。

4.2 技术培训与能力建设

组织开展湿喷设备操作、维护保养及配合比设计专项技术培训,提升施工人员专业水平,降低对高技术等级喷

射操作人员的依赖。在培训过程中,要分层次、分阶段进行,保证培训的整体效果,提升操作人员的操作技能与综合能力。在培训过程中要详细讲解施工工艺、设备技术的操作要点,规范操作人员的技术应用过程与行为,播种施工全过程的质量与效率。

4.3 设备升级与财政激励

对引进湿喷机械化作业线的施工单位提供设备购置补贴,推动全行业施工工艺与装备水平的全面提升。通过财政激励可以降低施工单位的综合成本,并能真正激励单位使用湿喷工艺。

4.4 示范工程与实证研究

在重点引水隧道工程中设立湿喷工艺示范段,通过实测数据系统验证其在混凝土密实性、强度发展及施工工期等方面的综合优势。在示范工程打造下,要让行业内的更多人了解湿喷工艺,并能认识到湿喷工艺的价值。通过实证研究,可以全面展示湿喷工艺的优势,帮助施工单位更全面的了解湿喷工艺的性能与优势,并能为引进湿喷工艺提供支持。

5 结论

相较于传统潮喷工艺,湿喷混凝土技术在质量控制、环境友好性、机械化适配性及长期耐久性方面展现出全面优势,因此成为实现引水隧道工程“安全、高效、耐久”建设目标的更优选择。通过政策引导与推动、技术支撑以及工程示范,可促进湿喷工艺的广泛应用,为提升水利工程建设质量与可持续发展水平提供重要技术保障。

[参考文献]

- [1]马魁山. 高铁隧道施工中湿喷混凝土施工技术的应用[J]. 高铁速递,2025(2).
 - [2]李存智. 高铁隧道施工中的湿喷混凝土施工技术分析[J]. 中国地名,2025(6):0166-0168.
 - [3]陈睿. 湿喷法喷射混凝土在地下工程支护中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(003):1.
 - [4]王立伟. 湿喷混凝土技术在高速公路隧道初期支护中的应用[J]. 工程技术研究,2023,8(18):102-104.
 - [5]李平宾. 高速公路隧道施工中湿喷混凝土技术的应用分析[J]. 华东科技(综合),2021(8):191-191.
- 作者简介:李海生(1967.07—),男,汉族,工程师,研究方向:喷射混凝土工艺与设备研究。