

湿喷混凝土配合比优化及回弹率控制技术

李相琨

(中交一航局城市交通工程有限公司)

摘要: 针对浦清高速公路岭顶隧道、贵岭隧道、仙垌隧道 V 级围岩支护难度大的特点, 隧道初期支护采用机械化施工。为有效降低喷射混凝土回弹率, 采用正交试验设计对 C25 喷射混凝土配合比参数进行优化, 研究了水泥用量、水胶比、砂率对坍落度、扩展度和抗压强度的影响。结果表明: 提高水胶比可以显著提高湿喷混凝土的坍落度, 抗压强度随着水泥用量的增加而增大, 但随着砂率的增加而减小。最后通过极差结果分析, 得出了影响混凝土强度的显著因素和最优配合比, 该配合比已成功应用于 3 座隧道施工, 可为喷射混凝土回弹率控制技术提供参考。

关键词: 湿喷混凝土; 回弹率; 正交试验; 最优配合比

0 引言

湿喷技术是 20 世纪 70 年代发展起的一种新型喷射施工工艺, 相比于干喷混凝土的粉尘大、混凝土匀质性差等问题, 湿喷混凝土是将拌合均匀的混合料通过压力泵喷射到相应支护作业面, 施工机械化程度高、作业方式灵活, 1 d 抗压强度高, 改善了隧道施工环境, 近年来主要用于公路隧道、铁路隧道和基坑支护。何文敏等^[1]在研究湿喷混凝土工作性的基础上, 提出可以从喷射技术和组成材料两方面采取措施改善湿喷混凝土硬化后性能和一些湿喷混凝土在发展成高性能混凝土过程中存在的技术方面的问题。袁定辉等^[2]结合工程实例, 通过湿喷试验确定基准配合比和采用标准化流程施工工艺, 研究出湿喷混凝土应用于大断面公路隧道施工的关键技术, 发现回弹率明显降低, 显著提高施工效率。严少洋等^[3]通过优化配合比, 发现影响湿喷混凝土泵送性和强度的主要因素, 并将聚丙烯纤维加入湿喷混凝土中, 有效改善了不良岩体脱落和地下水对支护结果的腐蚀情况。因此, 在高速公路隧道施工中, 湿喷混凝土作为永久衬砌的一部分, 其性能和施工工艺的改进已成为必然趋势。然而, 湿喷混凝土的高回弹率不仅增加了隧道施工成本、造成原材料浪费、甚至污染了周围环境, 还增加了作业时间、制约施工进度。本文采用正交试验方法研究了水泥用量、水胶比及砂率对湿喷混凝土坍落度、扩展度和抗压强度的影响, 并结合极差分析得出混凝土的最优配合比, 确定控制回弹率的因素, 通过湿

喷工艺控制喷射混凝土配合比参数降低湿喷混凝土回弹率, 减少粉尘污染, 为隧道初期支护湿喷混凝土施工回弹率控制提供参考。

1 试验

1.1 原材料

1) 水泥: 华润水泥(陆川)有限公司生产的 P.O 42.5(散装)水泥, 比表面积为 $338 \text{ m}^2/\text{kg}$, 初凝时间 160 min, 终凝时间 275 min, 3 d 抗折强度 5.0 MPa, 3 d 抗压强度 26.3 MPa, 28 d 抗折强度 7.5 MPa, 28 d 抗压强度 53.6 MPa。通过与无碱速凝剂的相容性试验分析, 速凝效果良好, 后期强度损失也较小。喷射混凝土的质量与所用水泥的强度等级和品种密切相关。

2) 机制砂: 陆川长坑采石场生产的中砂, 细度模数 2.83, 石粉含量 7.8%, 泥块含量 0.8%, 压碎指标值 21%, 亚甲蓝值 0.8 g/kg 。用于喷射混凝土的机制砂与普通混凝土的相同, 应使用坚硬耐久的中粗砂, 在一定范围内, 含泥量越小, 颗粒分布越均匀, 混凝土强度越高, 回弹量越小。

3) 碎石: 陆川长坑采石场生产的石灰岩碎石, 公称粒径 5~10 mm, 含泥量 0.8%, 泥块含量 0.2%, 针片状颗粒含量 8.6%, 吸水率 1.6%, 碎石最大粒径不应大于 13.2 mm, 喷射混凝土一般使用坚硬、耐久的卵石或砾石, 含泥量应小于 1.0%。碎石的粒径应小于管内径的 1/3。

4) 减水剂: 山西黄腾化工有限公司, HT-HPC 聚羧酸高性能减水剂能更好的保证喷射混凝土的最终强度和工作性能要求, 该减水剂的推荐

掺量为 1%，其性能指标为 PH 值 4.9，含固量 18.93%，碱含量 0.77%，氯离子含量 0.04%，减水率 28%，含气量 2.8%。

5) 速凝剂：山西奥瑞特建材科技有限公司的 ART-FSA-L 液体速凝剂，密度 1.026 g/cm^3 ，含固量 53.21%，净浆初凝时间 4 min 8 s，终凝时间 10 min 24 s。不同速凝剂对不同水泥品种有不同的影响，使用前应进行与水泥的相容性试验。速凝剂的用量应通过试验确定，一般为水泥质量的 2%~4%。喷射混凝土加入速凝剂后，早期强度可显著提高，但存在强度倒缩，且混凝土收缩明显^[4]。为满足施工要求，应严格控制速凝剂掺量，控制拌合时间。

1.2 试验设计方案

喷射混凝土配合比参数应根据具体的施工工艺确定。本工程采用湿喷法施工，喷射混凝土由隧道外自动计量拌和站拌制，粗集料在加入混合物前应再次筛分，防止超粒径骨料混合，造成管路堵塞。细集料堆放在防雨料仓，以控制含水量。湿喷混凝土具有原材料计量精确、水胶比控制准确的优点，保证了混凝土的稳定性和均匀性。一般工程中，为了降低喷射混凝土回弹率，适当提高砂率，但砂率的增加意味着骨料表面水泥用量也要增加，才能满足混凝土强度的要求。当水泥用量过大时，喷射混凝土更容易干缩开裂，成本也会增加。由此可见，配合比参数的确定应基于多种因素共同影响、制约和作用，因此，合理的配合比参数对于有效降低混凝土的回弹率、保证混凝土强度至关重要。

当存在许多可变因素时，需要进行大量测试。为了有效减少试验次数，提高试验效率和准确度，试验中确定了 3 个因素，即水泥掺量 A、水胶比 B 和砂率 C，不考虑各因素之间的相互影响，采用正交试验法建立了 $L_9(3^4)$ 的正交试验方案。具体方案见表 1。

表 1 正交试验因素-水平表

水平	因素		
	水泥掺量 A/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水胶比 B	砂率 C/%
1	400	0.34	50
2	425	0.39	52
3	450	0.44	54

1.3 试验方法

将拌制的混凝土分 3 层放入坍落度筒内，每

层用振捣棒均匀插捣 25 次，然后垂直提起坍落度筒，测量混凝土的坍落度和扩展度。通过正交试验，对 9 组数据分别进行抗压强度试验，并成型相应的试件，标准养护 7 d。

2 试验结果

湿喷混凝土混合料的坍落度、扩展度和 7 d 抗压强度试验结果见表 2。

表 2 混凝土坍落度、扩展度和抗压强度试验结果

试验编号	水泥掺量 A/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水胶比 B	砂率 C/%	坍落度/ mm	扩展度/ mm	7 d 抗压 强度/MPa
S1	400	0.34	50	95	38.8	32.9
S2	400	0.39	52	140	30.4	31.8
S3	400	0.44	54	135	30.6	18.2
S4	425	0.39	54	130	32.7	19.6
S5	425	0.44	50	175	33.7	34.3
S6	425	0.34	52	85	22.4	33.1
S7	450	0.44	52	190	33.4	34.5
S8	450	0.34	54	95	31.2	23.0
S9	450	0.39	50	145	31.8	37.3

3 试验结果分析

3.1 影响因素的极差分析

对坍落度、扩展度试验结果进行了极差分析，试验结果如表 3~表 4 所示。结果表明：1) 对混凝土坍落度影响因素最大的是水胶比，其次是砂率，水泥用量对混凝土坍落度的影响较小，但是随着水泥用量的增加，混凝土坍落度增大而扩展度先减小后增大；当水泥用量为 400 kg/m^3 时，湿喷混凝土的坍落度最小，扩展度最大。2) 随着砂率的增加，混凝土的扩展度先降低后增加，砂率 50% 时，扩展度最大。3) 提高水胶比可以显著提高湿喷混凝土的坍落度，单位用水量增大，混凝土浆液变稀，流动性增加。

表 3 各因素对坍落度的影响结果

影响因素	水泥掺量 A/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水胶比 B	砂率 C/%
均值 K_1	123	92	138
均值 K_2	130	138	138
均值 K_3	143	167	120
极差 R	20	75	18.0

表 4 各因素对扩展度的影响结果

影响因素	水泥掺量 A/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水胶比 B	砂率 C/%
均值 K_1	33.3	30.8	34.8
均值 K_2	29.6	31.6	28.7
均值 K_3	32.1	32.6	31.5
极差 R	3.7	1.8	6.0

3.2 7 d 抗压强度的影响

湿喷混凝土抗压强度的极差分析结果见表5。

表5 混凝土抗压强度的均值和极差结果

影响因素	水泥掺量 A/ (kg·m ⁻³)	水胶比 B	砂率 C/%
均值 K_1	27.6	29.7	34.8
均值 K_2	29.0	29.8	33.1
均值 K_3	31.6	29.0	20.3
极差 R	4.0	0.7	14.6

由表5可见：

1) 水泥用量 A 的平均值 $K_1 < K_2 < K_3$ ，得出混凝土抗压强度随着水泥用量的增加而增大，当水泥用量为 450 kg/m³ 时，强度最大。

2) 水胶比 B 的平均值 $K_3 < K_1 < K_2$ ，随着水胶比的增大，混凝土抗压强度先增大后减小，当水胶比为 0.39 时，强度最大。

3) 砂率 C 的均值 $K_3 < K_2 < K_1$ ，砂率的极差 R 在 3 个因素中为主要因素，抗压强度随着砂率的增加而减小。

4 确定最佳配合比及回弹率控制措施

通过分析各影响因素对坍落度、扩展度和抗压强度的极差结果，确定湿喷混凝土的最佳配合比组合为 $A_3B_2C_2$ ，即水泥 450 kg/m³、水胶比 0.39、砂率 52%。根据《浦北至北流高速公路(K56+807—K67+150)隧道专项施工方案》的要求，将该配合比应用于岭顶隧道出口，根据现场实际施工过程控制及相关理论，参考 JTG/T 3660—2020《公路隧道施工技术规范》^[9]，基本试验参数为：喷嘴与岩石表面距离为 0.6~1.2 m，喷射料束与喷射面垂直线的夹角为 10°~15°，喷射料束呈螺旋形移动，湿喷机的工作压力控制在 0.1~0.15 MPa。初次喷射厚度应在 40~60 mm，复喷时，喷射厚度拱顶不大于 100 mm，边墙不大于 150 mm。

喷射第一层混凝土时，应重点填充和整平凹凸坑。采用锚杆吊模模喷混凝土处理岩面的严重坑洼处。第一层混凝土终凝后，喷射第二层混凝土，如果间隔时间超过 1 h 且初喷面已被粉尘覆盖，则使用高压风和水对受喷面进行清洗。为了提高工作效率、确保质量，喷射作业需分块进行。为防止回弹材料黏附在未喷涂岩石表面影响喷层与岩石表面之间的黏结力，可将其从下至上垂直移动至“S”形。喷射前，应先将喷涂表面的凹面部分找平，然后缓慢均匀地移动喷嘴，使其

呈 3~4 m 的螺旋状。喷嘴离开前应缓慢移动，使混凝土具有一定厚度，并扩大喷射范围。有钢筋网时，喷射距离可小于 0.6 m，喷射角度可稍有偏差。喷射混凝土时，钢筋网应覆盖 2 cm 以上，以确保混凝土层光滑平整。

喷射混凝土应紧随开挖面进行。当围岩破碎、稳定性差时，一般采用小药量松动爆破。初喷（厚度大于 4 cm）、锚杆、钢筋网、钢架、复喷等作业可连续进行，直至满足设计要求。钢架搭设完毕后，应迅速用喷射混凝土封闭，以充分发挥其支撑能力。当围岩相对完整且长期稳定时，可在初喷、锚杆、钢筋网施工后进行开挖作业。复喷可在下一个循环的初始支撑时间后进行。湿喷层厚度达到设计厚度可分 2~3 次完成。由于每层的间隔是一个循环时间，每层爆破产生的裂缝将填充到下一层喷射混凝土中，新的喷射层距离隧道开挖面越远，爆破震动越小，喷射混凝土层的支护能力越强。

为了降低喷射混凝土的回弹率，应严格按照试验室确定的配合比参数进行混合料拌制，并根据喷嘴至喷射表面的距离确定风压，同时区分拱顶和边墙，选择不同的初喷厚度和喷射角度。喷射混凝土容易受到各种条件的影响，施工人员应根据材料状况、力学性能、工作环境、工作面情况等及时调整，科学施工。

5 结语

通过正交试验研究和岭顶隧道出口试喷实践，确定湿喷混凝土的最佳配合比参数，提出降低回弹率的控制技术要点。

1) 通过对正交试验设计结果分析，发现影响湿喷混凝土坍落度的显著因素是水胶比，影响抗压强度的显著因素是水泥用量和砂率，影响扩展度的显著因素是水泥用量。

2) 综合考虑坍落度、扩展度和抗压强度的结果，分析了影响湿喷混凝土强度的各种因素，根据强度特性提出了最佳配合比，即水泥 450 kg/m³，水胶比 0.39，砂率 52%，减水剂掺量 1.2%，速凝剂掺量 4%。

3) 湿喷混凝土回弹率的影响因素主要是混凝土的性能，包括坍落度、水胶比和砂率，速凝剂的掺量需根据现场实际情况随时调整。到达现场的混凝土实测坍落度控制在 100~130 mm；水胶比应控制在 0.4 左右，宜小不宜大；砂率应控制在

52%左右。

4) 初喷厚度宜为 40~60 mm, 复喷厚度边墙不大于 150 mm, 拱顶不大于 100 mm。

参考文献:

[1] 何文敏, 陈华鑫, 王闯, 等. 湿喷混凝土性能研究进展[J]. 混凝土, 2015(7):118-120, 127.

- [2] 袁定辉, 林春, 叶水标, 等. 大断面公路隧道湿喷混凝土施工关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2):232-235.
- [3] 严少洋, 闫松, 刘永胜. 湿喷混凝土配合比优化的研究及应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(9):16-19.
- [4] 张鹏. 基于正交试验混凝土湿喷回弹率的控制研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(9):281-284.
- [5] JTG 3660—2020, 公路隧道施工技术规范[S].

(上接第 62 页)

格控制施工工艺参数是确保管道具有良好修复效果的关键。该修复工程主要利用夜间施工, 作业过程中未占道开挖, 基本对交通不产生影响, 具有施工工期短、施工作业面小、噪声低等优点, 管道修复取得了良好效果, 实现了较好的经济效益和社会效益。

本文仅对 $D_0 = 1\ 600$ 管径的雨水管道紫外光固化技术修复工艺参数进行了研究, 今后还需对更大管径的排水管道施工参数进行研究。总体而言, 紫外光固化技术在排水管道非开挖修复中具有独特优势, 具有很大的推广价值。

参考文献:

[1] 肖倩, 项立新, 杨明轩, 等. 非开挖技术在深圳市排水管道修

复中的选择与应用[J]. 给水排水, 2019, 55(1): 116-120.

- [2] 向维刚, 马保松, 赵雅宏. 给排水管道非开挖 CIPP 修复技术研究综述[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 1-9.
- [3] 冯海霞. CIPP 紫外线固化修复技术用于污水管道的修复[J]. 中国给水排水, 2014, 30(16): 136-138.
- [4] 郭函君. 大口径供水管道紫外光固化修复工艺的工程应用[J]. 净水技术, 2021, 40(S1): 211-214.
- [5] 张洪彬, 安关峰, 刘添俊, 等. 紫外线光固化 CIPP 技术在排水管道修复中的应用[J]. 给水排水, 2015, 51(2): 103-106.
- [6] T/CECS 717—2020, 城镇排水管道非开挖修复工程施工及验收规程[S].
- [7] GB/T 8806—2008, 塑料管道系统塑料部件尺寸的测定[S].
- [8] GB/T 1449—2005, 纤维增强塑料弯曲性能试验方法[S].
- [9] GB/T 1040.4—2006, 塑料拉伸性能的测定第 4 部分: 各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料的试验条件[S].