

隧道初期支护机械手臂施工工艺

Discussion on the Construction Technology of Mechanical Arm for Initial Tunnel Support

王锐

Rui Wang

中交三公路国际公司 中国·北京 101300

CCCC Third Highway Engineering Co., Ltd., Beijing, 101300, China

摘要: 论文旨在探讨隧道初期支护机械手臂施工工艺,以提高隧道喷射混凝土施工效率和质量。通过引入大型喷射混凝土机械手,采用湿喷工艺,相较于传统手持喷枪施工,取得了显著效果。该机械手以高效的喷射速度、广泛的作业范围、较少的操作人员和低劳动强度为特点,为隧道工程初期支护带来了新的解决方案。

Abstract: This paper aims to explore the construction technology of mechanical arm for tunnel initial support, aiming to enhance the efficiency and quality of tunnel shotcrete construction. By introducing a large-scale shotcrete manipulator and adopting the wet spray process, significant improvements have been achieved compared to traditional manual spray gun construction. The mechanical arm, characterized by fast spraying speed, extensive operating range, reduced labor intensity, and fewer operators, presents a novel solution for the initial support of tunnel projects.

关键词: 隧道; 喷射混凝土; 机械手; 施工

Keywords: tunnel; shotcrete; manipulator; construction

DOI: 10.12346/etr.v5i11.8773

1 引言

黑山南北高速公路项目第三标段共有4座隧道,均为双向四车道分离式隧道,总计5751m(以左线计);隧道左右幅间距30m,最大纵坡为1.95%。隧道初期支护采用喷锚支护,喷射混凝土采用MB30(相当于国内的C32)混凝土,厚度为10~30cm不等。

由于喷射混凝土设计强度高,传统的干喷法很难达到其强度要求,项目部采用湿喷工艺进行施工,同时为了提高喷射效率,确保混凝土质量,采用大型喷射混凝土机械手进行施工,并取得了显著效果。经总结施工经验形成该工法。

2 工法特点

2.1 高效施工速度

机械手湿喷混凝土工法以其出色的施工速度脱颖而出,每小时可实现喷射混凝土量达12~20m³。

2.2 优越混凝土质量

喷射混凝土机械手在确保混凝土均匀性的同时,提供了卓越的附着力和密实度。相比传统的干喷混凝土,其强度更高,约高出20%左右,且表面平滑度更为出色。

2.3 高度机械化程度

采用机械手湿喷工艺,大幅减少了操作人员的数量,降低了劳动强度,使施工过程更为高效和安全。

2.4 广泛作业范围

机械手湿喷工法适用于不同隧道施工场景,最大喷射宽度可达30m,最大喷射高度可达14m。

2.5 极低喷射回弹率

相对于传统方法,机械手湿喷工法的回弹率可控制在10%以内,从而减少了混凝土浪费,提高了喷射效果。

2.6 良好作业环境

机械手湿喷施工创造了相对较好的作业环境,不仅提高了工作效率,还增强了作业安全性。

3 适用范围

机械手湿喷混凝土工法适用于各类公路和铁路隧道的喷射混凝土施工，其灵活性和高效性使其成为不同类型隧道工程的理想选择。

4 工艺原理

机械手湿喷混凝土工法采用强制式搅拌机将水泥、骨料、水和外加剂按设计配比充分搅拌后，通过混凝土运输罐车运送至喷射地点。在喷射机的泵送下，稠密流料被输送至喷头位置，并与通过电脑全自动控制的液体速凝剂混合，最终通过高压空气进行喷射。这一工艺旨在确保混凝土的均匀性、密实性，提供高质量的喷射效果^[1]。

5 操作要点

5.1 机械手湿喷 MMB30 混凝土推荐配合比

5.1.1 配合比设计技术规范

根据欧标 TECHNICALSPECIFICATIONS-QCP 规定，喷射混凝土水胶比不大于 0.50，胶凝材料用量不小于 400kg/m³，粗骨料最大粒径不大于 16mm，细骨料细度模数应大于 2.5。

5.1.2 原材料的选用

- ①水泥：PO42.5 普通硅酸盐水泥。
- ②细骨料：机制砂、细度模数 2.9。
- ③粗骨料：4~8mm 碎石。
- ④速凝剂：T-BA 型液体速凝剂，掺量为凝胶材料的 7%。
- ⑤减水剂：HIPERPLAST185 型减水剂，掺量为凝胶材料的 0.7%。

- ⑥水：饮用水。

5.1.3 试拌调整，确定理论配合比

关于试拌调整，确定理论配合比，表 1 为喷射混凝土基准配合比。

表 1 喷射混凝土基准配合比

项目	水泥 (kg)	粗骨料 (kg)	细骨料 (kg)	速凝剂 (kg)	减水剂 (kg)	水 (L)
用量	480	325	1299	33.6	3.36	223

如表 1 所示配合比进行拌制，混凝土坍落度为 150mm，混凝土粘聚性良好，混凝土拌和物性能符合施工要求。对试拌确定的配合比进行三个不同水胶比的 28d 强度试验验证，所选配合比能满足设计及施工要求，且经济性合理，确定为理论配合比^[2]。

5.2 喷射混凝土机械手湿喷工艺操作要点

在机械手湿喷混凝土的操作中，多个因素都会对混凝土质量和回弹性产生影响，包括但不限于骨料最大粒径、混凝土流动性、风压强度、岩面清洁度、速凝剂用量、单次喷射厚度、作业人员经验、喷射距离、角度、喷射顺序和喷头移动。

喷射顺序的优化：施工建议按照先墙后拱的顺序进行，从隧道两侧边墙的底部开始喷射，采用 S 曲线移动方式，直至拱顶中心线位置。

喷射角度的调整：保持喷头与受喷面垂直。适当的喷射角度可减少混凝土回弹，提高喷射密实度。垂直于岩面的喷射有助于减小混凝土回弹率，增加单次喷射厚度。

喷射距离的合理设置：由于湿喷需要较大的风压，建议将喷头距离受喷面保持在 1~1.3m 范围内，以避免高压风将混凝土吹掉，增加回弹量。

喷射混凝土的循环作业：喷射时，首先伸展机械手大臂，调整喷头在边墙底部的施喷位置，然后使用机械手小臂的自动平行功能，调整小臂与地面水平，与隧道边墙平行。完成这些步骤后，开始喷射，尽量避免再次调整喷头距离、角度和机械手大臂，仅需使用自动伸缩功能来完成一遍喷射。

堵管处理的及时性：在喷射施工中可能发生堵管情况，一旦发生，应立即关闭机械手和计量泵，拍打软管并清除管内的混凝土。处理完成后，先进行加水喷射以洗净管路，确保通畅后方可继续喷射施工。

6 材料与设备

本工法主要机具设备如表 2 所示。

表 2 主要机具设备表

序号	设备名称	单位	数量	备注
1	强制式搅拌机	台(套)	1	负责供应所需湿喷混凝土
2	罐车	台	3	运送混凝土
3	混凝土喷射机	台	1	挪曼尔特 8110VC 混凝土喷射机
4	供水设备	套	6	用以清洗机械手混凝土输送管及软管
5	坍落度筒	个	1	用以测试喷射混凝土坍落度

7 质量措施

7.1 质量控制标准

为确保湿喷混凝土厚度、均匀性、平顺性、强度达到设计要求，必须严格按照设计图纸施工，执行欧标 TECHNICAL SPECIFICATIONS-QCP 中喷射混凝土规范及其他相关规定。

7.2 质量控制措施

7.2.1 实时监测与调整

在施工过程中，通过实时监测混凝土的坍落度、喷射厚度和风压等关键参数，及时调整操作参数，以确保施工过程中的稳定性和一致性。

7.2.2 定期质量检验

对混凝土的配合比、28 天强度等关键性能进行定期检验。通过实验验证配合比的合理性和混凝土的强度是否符合

设计要求，及时调整工艺参数。

7.2.3 操作培训与评估

对操作人员进行系统的培训，确保其熟练掌握湿喷混凝土操作技能。定期进行操作评估，发现问题及时进行调整和改进。

7.2.4 岩面预处理

针对不同岩面情况采取预处理措施，包括清洗、修复和加固，以提高混凝土与岩面的附着力和整体结构的稳定性。

7.2.5 喷射参数优化

通过不断调整喷射顺序、角度、距离和速度等参数，优化混凝土在岩面的附着性和密实度，以保证施工过程中的一致性和高效性。

7.2.6 材料检测与管理

定期检测喷射混凝土的原材料，确保骨料和速凝剂等材料的质量符合标准，采用严格的管理制度确保施工过程中材料的可追溯性和一致性。

7.2.7 回弹控制

通过调整混凝土的坍落度、速凝剂的掺量等手段，有效控制喷射混凝土的回弹率，减少浪费和提高工程质量。

7.2.8 工艺调整与优化

根据施工实际情况，随时进行工艺调整与优化，确保施工过程中的灵活性和适应性，提高整体施工效率。

7.2.9 安全防护

为保障操作人员的安全，采取必要的安全防护措施，包括个人防护装备的配备、施工现场的标识和警示以及定期的安全培训。

7.2.10 定期维护

对施工设备进行定期维护，包括清洁、润滑和零部件更换，确保机械手等设备在最佳状态下运行，减少故障和停工时间。

通过综合应用上述质量控制措施，可以有效降低施工过程中的风险，提高湿喷混凝土工程的质量和施工效率^[3]。

8 安全措施

为确保湿喷混凝土工程的施工安全，采取以下综合的安全控制措施。

8.1 操作人员培训

对所有参与湿喷混凝土作业的操作人员进行全面培训，包括设备操作技能、安全操作规程以及紧急情况处理等，确保操作人员熟知工艺流程和安全标准。

8.2 施工现场标识

在施工现场设置清晰可见的标识，包括作业区域、安全出口、紧急设备位置等，提高施工现场的可识别性和应急响应效率。

8.3 个人防护装备

确保操作人员配备完整的个人防护装备，包括头盔、护

目镜、防护服、手套等，降低施工现场可能存在的伤害风险。

8.4 设备安全检查

在每次施工前进行设备的全面安全检查，包括机械手、泵浦、输送管道等，确保设备运行正常，减少由设备故障引起的事故风险。

8.5 应急预案

制定完善的应急预案，包括火灾、设备故障、人员伤害等紧急情况的处理步骤和沟通流程，提高施工现场的应急处理能力。

8.6 作业区域隔离

将施工作业区域与非作业区域进行有效隔离，确保未经授权的人员不擅自进入作业区域，减少意外伤害的可能性。

8.7 定期安全培训

定期进行安全培训，包括操作人员的安全技能培养、新的安全标准和规程的学习以及事故案例的分享，增强整体安全意识。

8.8 作业过程监测

利用先进的监测技术，对施工过程中的关键参数进行实时监测，及时发现异常情况并采取措施，降低事故发生的概率。

8.9 定期安全检查

定期组织安全检查，包括设备、施工现场和操作人员的状况，发现问题及时整改，提高整体施工过程的安全性。

通过全面采取上述安全控制措施，可有效降低湿喷混凝土工程施工中的安全风险，保障操作人员和施工现场的整体安全。

9 环保节能措施

为确保湿喷混凝土工程的环保节能目标，采取以下综合的控制措施。

9.1 原材料选择

优先选择对环境影响较小的原材料，如使用可回收的骨料和环保型混凝土外加剂，以减少资源消耗和环境负担。

9.2 废弃物处理

制定科学的废弃物处理方案，对产生的废旧材料和混凝土残渣进行分类、回收和处理，最大限度减少对环境的不良影响。

9.3 能源管理

采用高效的能源管理技术，优化设备运行参数，减少能源浪费，降低施工过程中的碳排放，实现节能环保。

9.4 水资源利用

合理利用水资源，通过循环利用和废水处理设施，减少施工中对水资源的过度消耗，确保水资源的可持续利用。

9.5 降尘控制

采用湿式作业方法，通过水雾等方式降低施工现场的粉尘排放，保护周边环境空气质量。

9.6 低噪音技术

选择低噪音设备，合理安排作业时间，采取隔音措施，减少施工过程中产生的噪音对周围环境和居民的影响。

9.7 环保监测

配备环保监测设备，定期检测施工现场的环境指标，确保施工过程中各项环保措施的有效性。

9.8 生态保护

对施工区域内的植被和野生动植物进行科学保护，减少对当地生态环境的破坏。

9.9 科技创新

鼓励科技创新，推动湿喷混凝土施工技术的进步，以更环保、高效的方式满足工程需求。

通过全面采取上述环保节能控制措施，可在湿喷混凝土工程实施过程中最大限度地降低对环境的负面影响，推动可

持续发展的目标。

10 结语

引入开工挪曼尔特（Normen）Spraymec8110VC喷射机后，黑山项目通过实践掌握了湿喷混凝土机械手工艺技术，显著提升了混凝土喷射质量、降低了回弹量，提高了经济效益。湿喷混凝土作为先进工艺对混凝土质量要求高，对配合比进行严格控制至关重要。随着中国隧道施工的不断发

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部.公路隧道设计规范[S].2018.
- [2] 中华人民共和国交通运输部.公路隧道设计细则[S].2010.
- [3] 中华人民共和国交通运输部.公路隧道施工技术规范[S].2020.