

降低喷射混凝土回弹率的施工技术研究

费东宇

(中交一航局第五工程有限公司)

摘要:为解决隧道施工中喷射混凝土回弹率过高的问题,采用了综合分析和优化的方法。对蕲太高速项目卢家湾隧道喷射混凝土施工进行实地考察,逐一分析了影响回弹率的多种因素。在此基础上采取了包括高精度地质勘探技术、个性化混凝土配方开发、智能施工监控系统应用、原材料质量严格控制、配合比动态调整、高性能材料应用等一系列措施,显著降低了喷射混凝土回弹率,节约了施工成本,可为类似工程施工提供参考。

关键词:隧道;喷射混凝土;回弹率;隧道施工

1 研究背景

蕲春至太湖高速公路蕲春东段与蕲太高速公路蕲春西段、安徽段共同组成蕲太高速公路,并与棋盘洲长江公路大桥及其连接线共同构建一条新的鄂皖省际快速通道。本目标段有 2 座单洞隧道,共计 1 628 m,初期支护 C25 喷射混凝土用量共计 10 815.6 m³,如果喷射混凝土回弹率较大,会造成材料及机械的浪费,增加施工成本。因此减小喷射混凝土的回弹率是一项重要的成本管理举措。

2 湿喷射混凝土的施工工艺和原理

2.1 施工工艺

湿喷射混凝土的施工工艺主要包括:

1) 准备工作

对喷射设备进行检查和调试,确保其处于良好的工作状态。

2) 混凝土配制

根据设计要求选择合适的原材料,包括水泥、骨料、掺合料和外加剂等,并按照一定比例进行混合。

3) 混凝土拌和

将配好的原材料加入拌合机中进行充分搅拌,直至混凝土达到均匀一致的和易性。

4) 混凝土喷射

混凝土通过输送设备送至喷射机,喷射机将混凝土以湿态形式在高压空气的推动下喷射到施工面上。

整个湿喷射混凝土施工工艺是一个系统工程,需要各个环节的紧密配合和精细操作。采用湿喷

射混凝土施工技术,可以显著提高施工速度,减少施工噪音和粉尘,同时获得良好的支护效果。

2.2 施工原理

湿喷射混凝土的施工原理基于混凝土材料在喷射过程中的力学行为和材料科学,该技术利用高压空气将预拌混凝土加速至高速,并在喷嘴处形成雾化状态,以确保混凝土粒子间有良好的密实度和结合力。在施工面上,这些高速混凝土粒子相互撞击并迅速沉积,形成一层均匀且具有一定强度的混凝土层。湿喷射混凝土的施工原理有以下优点:

1) 湿喷射混凝土能够迅速形成支护结构,在隧道工程和地下工程中尤为重要,可以及时为不稳定的岩土提供支护,防止坍塌和滑坡。

2) 湿喷射混凝土在施工面上的黏附力强,能够与岩土或其他材料形成良好的结合,这得益于湿喷射混凝土的高流动性和良好的和易性。

3) 湿喷射混凝土施工过程中,由于高速喷射和粒子间的相互撞击,可以有效地减少混凝土内部气泡,提高混凝土的密实度,从而增强其耐久性和承载力。

此外,湿喷射混凝土的施工原理还包括了对施工环境的适应性,由于湿喷射混凝土可以在湿润或干燥的环境下施工,因此在多变的施工现场条件下依然能够保证施工质量和效率。

3 影响喷射混凝土回弹率的主要因素

回弹率是指在喷射混凝土施工过程中各种原因(如喷射角度、混凝土配比、施工操作等)导致部分混凝土不能有效黏附在受喷面上而反弹

回来的比例,根据 JGJ/T 372—2016《喷射混凝土应用技术规程》,回弹率是衡量喷射混凝土施工效率和质量的一个重要指标,直接影响到工程的成本和施工安全^[1]。以下是对回弹率的主要影响因素的分析:

1) 施工地质

地质条件对喷射混凝土的回弹率有显著影响。在破碎或多孔的岩层中施工时,喷射混凝土更容易与岩面结合,回弹率较低;相反在坚硬或光滑的岩层中,混凝土与岩面的黏结力下降,导致回弹率升高。因此,了解并适应地质条件对控制回弹率至关重要。

2) 原材料质量控制

原材料的质量直接影响混凝土的性能,高质量的水泥、骨料和添加剂能够提高混凝土的黏结力和耐久性,从而降低回弹率。对原材料进行严格的质量控制,确保其符合施工标准,是降低回弹率的关键。

3) 施工配合比

施工配合比是决定混凝土性能的另一个关键因素,合适的水胶比能够确保混凝土具有良好的流动性和黏结性,减少回弹,通过精确计算和调整配合比,可以优化混凝土的性能,有效降低回弹率。

4) 施工工艺控制

施工工艺的控制要点包括喷射压力、喷射距离、喷射角度和喷射速度等,这些因素都会影响混凝土的分布和密实度,合理的工艺控制能够确保混凝土均匀喷射,减少因工艺不当造成的回弹。

5) 操作人员的技术水平

操作人员的技术水平对回弹率有着不可忽视的影响,经验丰富的操作人员能够准确控制喷射过程,避免因操作不当导致的回弹,对操作人员进行定期培训和技能提升,可以显著提高施工质量,降低回弹率。

4 因素分析

4.1 施工地质条件

施工地质条件对喷射混凝土的回弹率有着显著影响。地质条件直接关系到喷射混凝土与受喷面的黏结效果和固化质量,《喷射混凝土应用技术规程》中指出,对施工地质条件的考量是制定喷射混凝土施工方案的重要依据。施工前必须进行详细的地质勘察,包括岩土的类型、结构、稳定性

以及是否存在渗水等。例如,当岩面粗糙或存在裂隙时,喷射混凝土更容易与岩面黏结,而平整或风化的岩面则可能导致回弹率增加,此外岩体中的水分会降低混凝土与岩面的黏结力,增加回弹的可能性。

通过采用高精度地质勘探技术,如地质雷达和三维激光扫描,可以对施工区域的地质结构进行更为精确的分析,从而为喷射混凝土的施工提供更详尽的地质信息,这些技术能够帮助施工单位准确识别潜在的不稳定因素和渗水区域,进而制定更为科学的施工方案。针对不同地质条件开发个性化的混凝土配方,如早强、高黏结性混凝土以及高流动性混凝土,可以显著提高喷射混凝土的适应性和黏结效果,这些特殊配方的混凝土能够更好地适应潮湿或富水地质条件,加速凝结时间,减少因水冲刷导致的回弹。

4.2 原材料质量控制

在《喷射混凝土应用技术规程》中,对原材料的选择和质量提出了明确要求,以保证喷射混凝土的工作性能和耐久性,其中水泥是喷射混凝土中的主要胶凝材料,其质量和品种直接影响混凝土的硬化速度和强度发展,水泥应具有良好的保水性能,以减少混凝土在喷射过程中的离析和泌水,从而降低回弹率;此外骨料的质量和级配也至关重要,骨料应具有良好的级配和适当的最大粒径,以确保喷射混凝土的流动性和可喷射性;速凝剂的选择和用量是另一个关键因素,速凝剂可以显著缩短混凝土的凝结时间,提高早期强度,但用量不当可能导致混凝土过早硬化或回弹率增加,因此,速凝剂的选择和掺量应根据混凝土的具体性能要求和施工条件进行优化。

此外,混凝土的配合比设计也应考虑到原材料的特性,可以通过试验确定最佳配合比,以达到混凝土的预期施工性能和减少回弹。例如,水胶比的确定对混凝土的工作性能和强度有重要影响,适当的水胶比可以减少混凝土在喷射过程中的回弹。

在现有规范的基础上,施工单位应进一步加强对原材料的质量控制,确保所有原材料均符合技术要求,通过严格的质量控制和合理的材料选择,可以显著提高喷射混凝土的施工质量,减少回弹,提高工程的经济效益和社会效益;同时施工单位还可以通过技术创新,如采用高性能的外

加剂或开发新的混凝土配方, 进一步提高喷射混凝土的性能, 减少回弹率。

4.3 施工配合比

施工配合比是影响喷射混凝土回弹率的重要因素之一, 直接关系到混凝土的工作性能和喷射效果, 《喷射混凝土应用技术规程》中对喷射混凝土的配合比有明确的要求, 以确保混凝土具备良好的喷射性能和后期的力学性能。在施工过程中, 可以通过多种方式优化配合比。例如, 调整水泥用量、骨料粒径和级配、以及掺合料和外加剂的种类和用量来改善混凝土的和易性, 减少回弹并提高混凝土的喷射效率。使用现代混凝土技术, 如高性能减水剂和矿物掺合料, 可以进一步改善混凝土的可喷射性, 同时提高其硬化后的强度和耐久性。在规范要求的基础上, 本文主要从配合比的动态调整和配合比与施工工艺的协同优化的角度进行研究, 以达到降低喷射混凝土回弹率的目的。

1) 配合比的动态调整

根据施工现场的实时反馈, 如喷射距离、受喷面状况等, 动态调整配合比, 以适应不同施工条件。

2) 配合比与施工工艺的协同优化

配合比的优化不仅应考虑材料本身, 还应与施工工艺相结合, 如喷射压力、喷射距离等, 形成综合的施工技术方案。通过对这些创新点的探索和应用, 可以显著提高喷射混凝土的施工质量, 降低回弹率, 同时响应绿色环保的施工理念, 推动喷射混凝土施工技术向更高效、更环保的方向发展^[2]。

4.4 施工工艺控制要点

喷射混凝土的工艺流程已较为完善, 施工前应检查受喷面的基本情况, 杜绝超欠挖, 喷射前利用喷射管的高压风或水冲洗受喷面, 并调整机械的工艺参数, 达到工作要求。喷射过程中需要注意以下要点:

1) 按初喷混凝土和复喷混凝土分别进行喷射, 复喷混凝土可分层多次施作。初喷混凝土将全部新暴露的围岩表面覆盖完全, 待达到终凝后再进行复喷。

2) 按分段、分层由下而上的顺序喷射作业, 隧道拱部对称喷射作业。下部喷射混凝土层对上部喷射混凝土层起到有效支撑作用, 减少或防止

喷射混凝土层脱落。

3) 严格控制复喷混凝土厚度, 厚度不足时粗集料不易黏结, 增加回弹量; 厚度过大会使混凝土因自重过大而脱落, 严重影响喷射混凝土与开挖面的黏结力, 使喷射混凝土层密实程度难以保障。每一层喷射混凝土应在上一层喷射混凝土终凝后进行施工。

4) 喷嘴垂直岩面时, 喷射效果最佳; 斜喷时, 容易产生骨料分离, 增大回弹。

4.5 操作人员的技术水平

操作人员的操作技能对隧道中喷射混凝土回弹率的影响很大, 因此从原材料的选择到混凝土的拌制都要由专业的技术人员进行操作。企业要培养专门的技术人才, 建设一支专业的技术团队, 同时还可以在隧道中进行实地勘察, 对减少隧道喷射混凝土回弹率提出合理的改进措施, 根据企业的实际情况制定合理的改进方案, 在实践的过程中发现并解决问题, 使喷射混凝土回弹率得到有效控制。

5 施工过程中的控制措施

以蕲太高速项目卢家湾隧道为例, 对隧道初支作业班组进行技术交底和岗前作业培训, 对主控操作人员进行现场考核, 考核合格后进入施工准备阶段。

C25 喷射混凝土原材料采用 P·O42.5 水泥, 天然砂粒径 0~5 mm, 碎石粒径 5~10 mm(片麻岩), F 类 II 级粉煤灰, GK-3000 型减水剂, CC-10 速凝剂(无碱)。初步设计配合比为水泥:粉煤灰:细集料:粗集料:水:减水剂:速凝剂=405 kg:45 kg:913 kg:843 kg:164 kg:4.5 kg:27 kg。试件 1 d 抗压强度为 11.1 MPa, 7 d 抗压强度为 27.9 MPa, 28 d 抗压强度达到 33.2 MPa。

工地试验室加大原材料检测频率, 严格监控进场原材料质量, 检测结果见表 1。

表 1 原材料检测结果

原材料种类	检测批次/批次	检测结果
水泥	3	各类检测结果均满足 GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》规范要求
粉煤灰	2	各项指标符合 F 类 II 级
细集料	5	各项指标符合 II 类, 平均细度模数为 3.2
粗集料	4	各项指标符合 II 类
速凝剂	2	初凝时间≤5 min; 终凝时间≤12 min

在卢家湾隧道的初支施工中，为了提高施工质量和经济效益，对工艺参数和配合比进行了一系列的优化调整，以下是详细的施工优化过程及效果分析。

1) 初始施工阶段

在 YK61+480—YK61+481.2 段的施工中，选定的工艺参数包括风压 0.4 MPa、喷射距离 0.9 m、初喷厚度 20 mm 和复喷厚度 60 mm，然而施工后的检测结果并不理想，喷射混凝土的回弹率高达 52%，且出现了混凝土成块掉落的情况。这不仅影响了施工质量，也增加了施工成本。

2) 工艺参数调整

针对初期施工中出现的問題，施工团队对工艺参数进行了调整，在 YK61+481.2—YK61+482.4 段施工中，将风压提升至 0.6 MPa，喷射距离增加到 1.1 m，尽管初喷厚度和复喷厚度保持不变，但回弹率仍然较高，为 39%，混凝土成块掉落的问题依然存在。

3) 配合比优化

由于回弹率未达到隧道喷射混凝土施工的平均水平，试验室进一步对配合比进行了优化。考虑到粉煤灰可能影响混凝土的早期强度，因此采用了全水泥设计，并将速凝剂的掺量增加了总重的 0.37%。优化后的配合比为水泥:细集料:粗集料:水:减水剂:速凝剂=450 kg:913 kg:843 kg:164 kg:4.5 kg:36 kg。采用优化后的工艺参数和配合比，在 YK61+482.4—YK61+483.6 段的施工中，回弹率降低至 20%，效果显著。

4) 经济效益分析

尽管优化后的混凝土单价有所上升，但由于回弹率的降低，减少了废料处理的成本，使得总体施工成本实际上是降低的。通过对比优化前后的数据可以看出，优化后的配合比虽然使得混凝土单价从 451 元/m³ 增加到 489 元/m³，但由于回弹率的大幅降低，喷射混凝土的总量从 22 532.5 m³ 减少到 14 231.1 m³，总价也从 1 016 万元降低到 696 万元。

施工过程中还对喷射混凝土其他环节进行把控，确保隧道施工的质量和安

全。1) 隧道开挖爆破后，迅速进行混凝土初喷作业，封闭岩面，有效控制围岩松动变形。初喷作业应在立钢架和挂钢筋网之前完成，通常在开挖后 4 h 内完成，若围岩条件较好，一般在 6 h 内

完成^[3]。

2) 喷射混凝土作业需直接喷在围岩面上，确保与围岩密贴，避免在受喷面上填塞杂物，防止混凝土脱落和造成坠落风险。喷射作业分为初喷和复喷 2 个阶段，初喷混凝土应覆盖所有新暴露的围岩表面，终凝后进行复喷。复喷混凝土可以分层多次施作，这样不仅能使断面平整，还能确保混凝土黏结牢固，为后续的二衬施工创造良好条件。

3) 喷射混凝土遵循分段、分片、分层的原则，并按由下而上的顺序进行，喷射路线呈“S”形，拱部喷射混凝土对称作业。由下而上的喷射顺序可以避免上部喷射混凝土回弹物污染下部喷射的岩面，混入喷层内，下部喷射混凝土层对上部喷射混凝土层起支托作用，减少或防止喷射混凝土层松脱，进一步提高施工质量。通过这些细致的控制措施，可以显著提高喷射混凝土的施工效果，确保隧道工程的稳定性和耐久性^[4]。

通过不断调整施工参数及优化配合比，严格把控各道施工工序，喷射混凝土的回弹率得到了大幅降低，喷射混凝土回弹率优化过程见表 2。

表 2 喷射混凝土回弹率优化过程

回弹率降低过程	回弹率实测值
初步施工	52%
优化喷射参数后	39%
优化配合比及参数后	20%
严格把控其他施工细节	18%

在施工过程中，对喷射混凝土拌合物进行了严格的质量控制，检验结果显示，混凝土拌合物的坍落度、含气量等指标均符合设计要求，确保了混凝土的可喷射性和密实度，达到了最优的施工性能。通过调整施工参数和优化配合比，有效控制了喷射厚度，防止了厚度不均或过厚导致的混凝土回弹和掉落问题。通过优化后的配合比和施工工艺，黏结强度达到了设计要求，有效防止了喷射混凝土的脱落和回弹。喷射混凝土的回弹率降低至 18%，这一结果显著低于初始施工阶段的回弹率，并通过实际的成本计算，节约了施工成本 320 万元。综上所述，通过对喷射混凝土施工过程中的各个环节进行严格的质量控制和工艺优化，可以显著提高施工质量，降低回弹率。

6 结语

通过对蕲太高速项目卢家湾隧道喷射混凝土

施工的实地考察和深入分析,系统地探讨了降低喷射混凝土回弹率的有效途径。本文从施工地质情况的精确评估展开,优化了原材料选择与质量控制流程,并通过动态调整施工配合比和施工工艺的协同优化,实现了对喷射混凝土施工质量的全面提升。不仅显著降低了喷射混凝土的回弹率,减少了材料浪费,节约了施工成本,而且提高了施工安全性,保障了施工人员的安全,为类似隧道工程施工提供了宝贵的经验。

尽管本研究在降低喷射混凝土回弹率方面取得了一定成果,但仍存在一些不足之处,例如在地质条件更为复杂的隧道工程中,如何进一步优化混凝土配方以适应多变的地质环境,仍是值得深入研究的问题。

此外,对于喷射混凝土施工是否可应用智能

施工监控系统,还需进一步研究及开发。展望未来,将继续从项目管理的角度出发,深入研究喷射混凝土施工的各个环节,力求在成本控制、质量提升、安全生产等方面取得新的突破。同时,也将持续关注新材料、新技术的发展动态,积极探索更为高效、环保的喷射混凝土施工技术,为隧道及地下工程的施工提供更加有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 赵璐芳,张玉苇,孙林,等.降低隧道喷射混凝土回弹率的措施研究[J].城市建筑空间,2023,30(S1):365-366.
- [2] 娄鑫.降低喷射混凝土回弹率的研究[J].四川水力发电,2022,41(6):48-51,63.
- [3] 谢艺辉,斯尚若,胡和平,等.隧道喷射混凝土回弹率控制措施研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022(7):77-80.
- [4] 陶卓.隧道初支喷射混凝土回弹率控制研究[J].黑龙江科技信息,2022(18):94-97.