

隧道工程中喷射混凝土施工质量控制要点

周瑞男

新疆生产建设兵团交通建设有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】喷射混凝土施工是隧道工程支护系统的关键环节，其质量直接决定隧道结构的稳定性、耐久性和运营安全。本文从喷射混凝土施工全过程出发，结合材料特性、工艺参数、施工运行维护管理等关键维度，对施工质量管理要点进行深入分析。我们通过分析材料配比优化、机械设备选型与调试、注射工艺参数控制、前期支持配合、售后维护等关键环节的技术要求和常见问题，提出有针对性的质量控制措施。目的是为提高隧道工程喷射混凝土施工质量提供实用指南，防止因质量缺陷引起的隧道结构裂缝、漏水等安全隐患，确保隧道长期稳定运行。

【关键词】隧道工程；喷射混凝土；施工质量控制；配合比；喷射工艺

DOI:10.12417/2811-0528.26.02.080

喷射混凝土作为隧道工程施工中初期支护的关键组成部分，发挥着及时封闭围岩、控制围岩变形、传递承载荷载的重要作用。施工质量直接关系到隧道施工过程中的安全性和运营过程中结构的可靠性。随着隧道工程向大跨度、深埋方向发展，围岩地质条件越来越复杂，对喷射混凝土的强度、密实度、抗渗等性能要求不断提高^[1]。但在实际施工中，由于材料质量波动、工艺变量不合理、操作标准不够、维护不当等因素，喷射混凝土经常出现强度不够、表面裂纹、空洞、漏水等质量问题，不仅增加了工程修复成本，还可能造成隧道塌方等严重安全事故。

1 喷射混凝土原材料质量控制

1.1 水泥的选用与控制

在喷射混凝土施工中，水泥必须同时满足强度发展要求和快速凝结要求。通常优选波特兰水泥或普通波特兰水泥。该类水泥的初凝时间不宜过长，以保证与速凝剂混合后迅速凝结，减少回弹损失。终凝时间应控制在合理范围内，避免因凝结过快而导致混凝土内部结构密实。同时，水泥强度等级应根据隧道围岩等级和支护设计要求确定。一般为42.5级以上，必须保证水泥的稳定性，防止混凝土因游离氧化钙、氧化镁含量过多而产生后期开裂^[2]。储存过程中，水泥应储存在防水、防潮的密闭仓库内。保存期限不能超过3个月。超过贮存期的水泥必须重新进行强度试验，试验合格后方可使用。严禁使用湿的、结块的水泥。

1.2 骨料的质量控制

骨料是喷射混凝土的骨架，其粒度、粒度、含泥量、有害物质含量等对混凝土的施工性和强度影响很大。细骨料采用中砂，细度系数调整在2.33.0之间。砂太细会增加水泥消耗和水消耗，导致混凝土收缩。沙子太粗会降低混凝土的流动性，并

增加喷涂过程中管道堵塞的风险。粗骨料宜采用连续级配的砾石或卵石。最大粒径应根据注射设备的输送管直径确定。一般不宜超过15mm。如果粒度太大，输送管道容易堵塞，跳出率增加。

1.3 速凝剂的选型与适配性控制

速凝剂是喷射混凝土施工的关键外加剂，其作用是缩短混凝土的凝结时间，提高早期强度，减少喷射后混凝土的脱落与回弹。速凝剂的选型需结合水泥品种、施工环境温度及支护要求综合确定，目前常用的速凝剂主要有碱性速凝剂与无碱速凝剂。碱性速凝剂虽速凝效果显著，但碱含量较高，易导致混凝土后期强度损失，且对施工人员皮肤有腐蚀性；无碱速凝剂则具有碱含量低、后期强度损失小、环保性好等优势，更适用于对耐久性要求较高的隧道工程^[3]。在使用前，需进行速凝剂与水泥的适配性试验，检测混凝土的初凝时间、终凝时间及1d、28d强度，确保初凝时间不大于5min，终凝时间不大于10min，且28d强度损失不超过15%。同时，速凝剂的掺量需严格按照试验确定的比例控制，掺量过高会导致混凝土后期强度大幅下降，掺量过低则无法达到预期的速凝效果。

1.4 拌合水的质量要求

拌合水的质量直接影响水泥的水化反应与混凝土的性能，需选用清洁、无杂质的饮用水或符合要求的非饮用水。若使用非饮用水，需检测水中的pH值、氯离子含量、硫酸盐含量等指标，pH值应在6-8之间，氯离子含量不大于350mg/L，硫酸盐含量不大于2700mg/L，避免因水中有害物质影响水泥水化或引发钢筋锈蚀（若喷射混凝土中掺加钢筋网）。严禁使用含有油污、有机物、酸碱物质的水作为拌合水，此类水会破坏水泥浆的结构，导致混凝土强度降低、凝结异常。

2 喷射混凝土配合比设计与优化

2.1 配合比设计的核心参数控制

喷射混凝土的配合比设计需重点控制水灰比、胶凝材料用量、砂率及骨料级配等参数。水灰比是影响混凝土强度与耐久性的关键指标,过大的水灰比会导致水泥水化产物结构疏松,混凝土强度降低,且易产生泌水与收缩开裂;过小的水灰比则会使混凝土流动性差,喷射困难,回弹率高。通常情况下,喷射混凝土的水灰比控制在0.4-0.5之间,需根据水泥品种与速凝剂类型适当调整。胶凝材料用量需保证混凝土具有足够的粘结力与强度,一般不宜低于380kg/m³,若用量过低,会导致混凝土密实度不足,抗渗性与抗裂性下降;但用量过高会增加混凝土的收缩量,易引发表面开裂^[4]。砂率的选择需兼顾混凝土的流动性与抗离析性,一般控制在45%-55%之间,砂率过高会增加混凝土的粘稠度,降低喷射速度;砂率过低则会导致骨料离析,增加堵管风险。

2.2 配合比的试验验证与调整

配合比设计完成后,需通过试验室试验与现场试喷相结合的方式进行验证与调整,确保其满足实际施工需求。试验室试验需检测混凝土的坍落度、凝结时间、抗压强度、抗渗性等指标,坍落度一般控制在8-12cm,以保证混凝土具有良好的流动性与可喷射性;抗压强度需符合设计要求,且早期强度(1d、3d)需满足支护承载需求。现场试喷是配合比优化的关键环节,需在隧道掌子面附近选择代表性区域进行试喷,观察混凝土的喷射效果,包括喷射过程中的流动性、堵管情况、回弹率,以及喷射后混凝土的表面平整度、密实度等。若试喷过程中出现堵管频繁、回弹率过高等问题,需调整配合比参数,如适当增加砂率、调整水灰比或胶凝材料用量;若混凝土表面出现空鼓、开裂等缺陷,需检查速凝剂掺量或骨料级配,确保配合比与现场施工条件适配。

3 喷射混凝土施工工艺质量控制

3.1 施工前的准备工作

施工前的准备工作需围绕设备调试、围岩处理与施工环境控制展开,为喷射施工创造良好条件。首先,需对喷射设备进行全面检查与调试,包括喷射机、空压机、输送管道、喷头等设备。喷射机需检查进料口、出料口是否通畅,搅拌装置是否正常运转;空压机需确保压力稳定,工作压力一般控制在0.6-0.8MPa,风量需满足喷射机的需求,避免因压力不足导致喷射速度过低或混凝土密实度不足;输送管道需检查是否有破损、堵塞现象,管道长度不宜过长(一般不超过50m),且转弯处需采用大曲率半径弯头,减少骨料在管道内的摩擦与堆积;喷头需检查喷嘴是否通畅,水环(湿喷时)是否正常供水,

确保水与混凝土混合均匀^[5]。其次,需对隧道围岩表面进行处理,清除围岩表面的浮石、松动岩块及杂物,若围岩表面存在渗漏水,需先进行堵水或排水处理,可采用埋设排水管、注射止水剂等方式,避免水渗入喷射混凝土内部,影响混凝土与围岩的粘结力及强度。最后,需控制施工环境温度与湿度,喷射施工环境温度宜在5-30℃之间,若温度低于5℃,需采取保温措施,如对原材料加热、对喷射区域覆盖保温被,防止混凝土受冻;若温度高于30℃,需采取降温措施,如对骨料洒水降温、缩短混凝土运输时间,避免混凝土坍落度损失过快。

3.2 喷射操作过程的质量控制

喷射操作过程需严格遵循规范要求,控制喷射顺序、喷射距离、喷射角度及喷射厚度,确保混凝土密实度均匀、表面平整。喷射顺序应遵循“先帮后顶、分区段喷射”的原则,即先喷射隧道两侧边墙,再喷射拱部,每个区段的喷射长度不宜超过6m,避免因喷射面积过大导致混凝土未凝结前发生脱落。喷射距离需控制在0.8-1.2m之间,距离过近会导致混凝土回弹率增加,且易使混凝土表面出现蜂窝、麻面;距离过远则会降低混凝土的密实度,影响粘结力。喷射角度(喷头与围岩表面的夹角)宜保持垂直,若围岩表面存在较大凹陷,需调整角度,确保混凝土能填满凹陷区域,避免形成空洞。喷射厚度需根据设计要求分层控制,每层喷射厚度不宜过大,边墙每层厚度一般为5-10cm,拱部每层厚度一般为3-5cm,待前一层混凝土凝结后再进行下一层喷射,避免因单层厚度过大导致混凝土自重过大而脱落。在喷射过程中,喷头需做均匀的螺旋式移动,移动速度需保持一致,一般为0.5-1m/min,确保混凝土厚度均匀,无漏喷、少喷区域。

3.3 喷射过程中的异常问题处理

喷射过程中需密切观察混凝土的状态,及时处理堵管、回弹过大、表面缺陷等异常问题,避免影响施工质量。若发生堵管现象,需立即停止喷射,关闭空压机与喷射机,检查堵管位置,若堵管位置靠近喷头,可拆开喷头清理;若堵管位置在管道中部,可采用敲击管道或反向吹风的方式疏通,严禁在高压状态下强行拆卸管道,防止发生安全事故。若回弹率过大,需分析原因并采取针对性措施,如调整配合比(增加砂率、降低水灰比)、优化喷射参数(调整喷射距离、角度)、改善骨料级配等,同时需及时清理回弹料,回弹料不得重新用于喷射混凝土施工,避免影响混凝土强度。若喷射后混凝土表面出现蜂窝、麻面、空鼓等缺陷,需及时处理,对于蜂窝、麻面,可采用同配合比的水泥砂浆修补;对于空鼓,需先凿除空鼓区域的混凝土,再重新喷射混凝土,确保缺陷处理彻底,不留下质量隐患。

4 喷射混凝土后期养护质量控制

售后服务是保证喷射混凝土强度、减少收缩和开裂的关键环节。如果养护不及时，混凝土内部的水分蒸发过快，会影响水泥水化反应，降低混凝土的强度和耐久性。必须制定科学的维护计划并严格执行。

4.1 养护时间与养护方式的确定

喷射混凝土的养护时间应根据水泥种类、环境温度、湿度确定。通常，当喷射混凝土中使用波特兰水泥或普通波特兰水泥时，固化时间至少为 7 天。若采用矿渣硅酸盐水泥或火山灰硅酸盐水泥，养护时间至少为 14 天。在高温、干燥或大风环境下，必须适当延长养护时间，以充分发挥混凝土强度。必须根据隧道施工情况选择养护方法。常用的保养方法有喷水保养、遮盖保湿保养、喷雾保养等。喷水固化适用于隧道侧壁等易于操作的区域。混凝土浇筑完毕后 24 小时内开始浇水。需要经常浇水，保持混凝土表面湿润，防止表面干燥。覆盖保湿固化适用于拱门或喷水困难的区域。土工布和麻袋等保湿材料可用于覆盖混凝土表面。覆盖时间应至少占总养护时间的 80%，并定期浇水保持覆盖物湿润。喷雾养护适用于隧道整体养护。如果隧道内安装喷淋装置，喷淋可以增加环境湿度，减少混凝土水分的蒸发。喷射养护要求喷射均匀并覆盖整个喷射混凝土表面。

4.2 养护过程中的质量监控

养护过程中必须加强质量监控，定期检查混凝土表面的湿度、强度发展、裂缝等情况，以确认养护效果。必须指派专人进行养护工作，每天检查养护情况，记录养护时间、养护方法、混凝土表面状况等。如发现混凝土表面干燥，应随时间增加喷水或喷洒的频率。如果发现混凝土表面出现收缩裂缝，必须分析裂缝产生的原因。如果是由于维护不及时造成的，必须加强维护，并立即处理裂缝。对于宽度小于 0.2 毫米的裂缝，可用环氧树脂浆料密封。对于宽度大于 0.2mm 的裂缝，应采用压力灌浆，防止裂缝扩展。同时，必须定期检测混凝土的强度。混凝土的抗压强度可以使用回弹法或岩心钻探法进行测试。测试频率必须符合规范要求。如果判断强度不足，必须分析原因，采取延长养护时间、增加养护湿度等改进措施，确保混凝土强度满足设计要求。

5 结论

喷射混凝土施工的质量控制是一个系统过程，需要贯穿从原材料选择、配合比设计、施工工艺以及后续管理的全过程。缺少链接可能会导致质量问题。严格控制原材料质量是保证混凝土性能的基础。通过科学的配合比设计和优化，可以兼顾混凝土的和易性和强度。标准化的喷涂工艺操作保证了混凝土的密实度和均匀性。通过及时有效的后续管理，可以促进混凝土的强度发展，减少收缩裂缝。

参考文献：

- [1] 牛瑞强.引调水工程敞开式 TBM 施工中喷射混凝土质量标准化管控[J].大众标准化,2025,(09):13-15.
- [2] 李蕙.公路隧道施工中喷射混凝土的质量控制分析[J].工程建设与设计,2024,(09):221-223.
- [3] 李臣森.隧道工程喷射混凝土施工质量控制[J].砖瓦,2020,(12):151-152.
- [4] 冯木均.隧道工程混凝土喷射施工技术及质量控制[J].交通世界,2020,(10):80-81.
- [5] 卿尚辰.隧道工程混凝土喷射施工技术及质量控制措施[J].四川建材,2020,46(03):80-81.