

隧道初期支护喷射混凝土强度影响因素研究

何 勇

云南交投公建隧道工程有限公司 云南 昆明 650032

【摘 要】：隧道开挖作业中，初期支护是维系围岩原生稳定、规避洞体变形失稳的核心工序。喷射混凝土作为支护体系的核心用材，自身力学强度直接关乎工程整体安全及长期使用稳定性。现场施工环节里，骨料品质、配比方案、作业喷涂方式以及洞内地质环境等多重条件，都会造成混凝土成型强度出现明显差异。基于此，本文将简要分析隧道初期支护喷射混凝土强度质量控制的意义，并深入探究各要素对喷混强度的影响，提出隧道初期支护喷射混凝土强度质量控制的有效策略，以期为工艺改良与支护品质提升提供切实参考。

【关键词】：隧道初期支护；喷射混凝土；强度；影响因素

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.029

引言

隧道初期支护主要采用喷射混凝土支护。喷射混凝土具有快速施作、早期强度高、与围岩粘结紧密等优点。隧道开挖后能及时施做喷射混凝土支护，起到封闭岩面、防止围岩风化松动、填充坑洼、提高围岩的整体性发挥自身结构的能力。因此，针对隧道初期支护喷射混凝土强度影响因素进行深入研究极为重要。

1 隧道初期支护喷射混凝土强度质量控制的意义

1.1 保障隧道施工安全

在隧道施工全过程中，初期支护需及时承接围岩释放的压力，喷射混凝土的强度高低，直接决定了支护体系的承载效能与整体稳定性。加强强度质量管控，可以确保喷射混凝土（如图1所示）快速形成可靠的支护刚度，有效抵御围岩变形，防范坍塌隐患发生，为施工人员及作业设备构建安全的作业空间。一旦强度未达到设计标准，支护结构极易出现开裂、脱落等问题，进而引发围岩失稳，直接威胁施工安全，因此，强度质量控制是守护隧道施工安全的首要防线。



图1 喷射型混凝土

1.2 延长隧道使用寿命

隧道运营阶段需长期承受围岩压力、地下水侵蚀等复杂外

界作用，喷射混凝土强度达标，是保障支护体系长期稳定运行的核心基础。严格落实强度质量控制措施，可有效减少混凝土内部的孔隙与裂缝，增强其抗渗、抗侵蚀能力，避免因强度不足造成支护结构过早破损，从而降低后期维修养护的投入，切实延长隧道运营寿命，保障工程长期发挥应有使用价值。

1.3 控制工程总成本

做好喷射混凝土强度质量控制，可以有效避免因强度不达标引发的返工、加固等额外费用，减少材料浪费与工期延误问题。合理把控强度标准，既可以防止过度追求高强度而造成的材料损耗，也能规避因强度不足带来的工程隐患，实现材料、人力、工期的科学配置，有效降低工程总体成本，进一步提升项目投资的综合效益。

1.4 推动隧道工程标准化建设

对喷射混凝土强度进行严格控制，是隧道工程施工规范中的明确规定，严格落实各项质量控制措施，是践行工程建设标准、规范施工流程的具体实践。通过构建完善的强度质量管控体系，规范施工操作流程与检测标准，能够推动隧道工程施工向标准化、精细化方向迈进，提升行业整体施工质量水准，为同类隧道工程提供可参考、可借鉴的管控思路。

2 隧道初期支护喷射混凝土强度的影响因素

2.1 水胶比

水胶比作为喷射混凝土强度调控的核心参数，直接左右着水泥水化反应的充分程度，以及混凝土内部的孔隙分布状态。结合现场施工经验与试验数据可知，当水胶比控制在0.40至0.45之间时，喷射混凝土的综合性能最优，其28天抗压强度可稳定在25至30MPa范围内。水胶比超过0.45，混合料中多余的水分在蒸发后会形成大量毛细孔隙，导致混凝土内部结构松散，28天抗压强度较最优值下降15%至20%。反之，当水胶比低于0.40时，混合料会呈现干涩状态，不仅容易造成喷射管道堵塞，还会使回弹率攀升至20%至30%，混凝土密实度不足，最终导致强度降低。通过正交试验验证，水胶比对喷射混

凝土 8 小时早期强度的影响权重达到 35%，明显高于其他配比参数。

2.2 原材料品质

原材料的品质优劣，是决定喷射混凝土强度的基础条件，其中水泥、骨料、拌合水的质量直接影响最终强度表现。水泥作为核心胶凝材料，工程中优先选用 P·O42.5 级及以上等级的普通硅酸盐水泥，其 3 天抗压强度需不低于 17MPa，若使用受潮结块的水泥，会导致喷射混凝土强度直接降低 20% 至 40%。骨料的品质则影响混凝土的密实度，其中砂的含泥量若超过 3%，会大幅降低骨料与水泥浆的粘结力，使 28 天抗压强度下降 10% 至 15%；粗骨料的粒径不宜超过 10mm，粒径过大易导致喷层出现开裂、离析等问题。另外，拌合水需符合 JGJ63 标准要求，若水中含有氯离子、硫酸根等有害杂质，不仅会腐蚀支护钢筋，还会引发混凝土内部膨胀裂缝，间接影响强度稳定性。

2.3 速凝剂掺量

速凝剂的核心作用是缩短喷射混凝土的凝结时间，快速提升早期强度，以满足隧道初期支护的及时性要求，但掺量必须严格把控，常规掺量为水泥重量的 2.5% 至 4%。掺量过低，混凝土初凝时间会超过 10 分钟，喷层易出现下坠、脱落现象，1 天早期强度不足 5MPa，无法及时发挥支护作用。掺量过高（超过 5%），会导致混凝土脆性增大，后期强度损失明显，试验数据显示，速凝剂掺量每增加 1%，28 天抗压强度会下降 5% 至 8%。通过多次试验验证，当速凝剂掺量控制在 4.6% 时，早期强度表现最佳，1 天抗压强度可达 12MPa，28 天强度可稳定在 28MPa 左右，兼顾早期支护需求与后期强度稳定性。

2.4 骨料级配

骨料级配的合理性，直接影响喷射混凝土的密实度，而密实度是决定强度的重要因素，工程中砂率宜控制在 45% 至 55% 之间。砂率低于 45%，混合料中砂浆含量不足，无法充分包裹骨料颗粒，会导致回弹率超过 15%，混凝土内部空隙增多，强度随之降低。砂率高于 55%，骨料用量相对减少，会使混凝土弹性模量下降，易产生干缩裂缝，影响强度稳定性。粗骨料采用连续级配时，5 至 10mm 粒径的骨料占比控制在 60% 至 70%，可使混凝土密实度达到 95% 以上，较单一级配的喷射混凝土强度提升 8% 至 12%，有效优化内部结构。

2.5 养护条件

隧道内的温湿度条件，直接影响水泥水化反应的进程，进而决定喷射混凝土强度的持续发展，标准养护条件为温度 20 ± 2℃、相对湿度 ≥ 95%。当环境温度低于 10℃ 时，水泥水化速率会明显放缓，7 天强度仅为标准养护条件下的 60% 至 70%；温度低于 5℃，水化反应基本停滞，混凝土易受冻产生裂缝，强度大幅下降。养护时间不足 7 天，混凝土内部水分会快速流

失，导致水化反应不充分，28 天抗压强度降低 15% 至 25%；当隧道内相对湿度低于 80% 时，需采取喷雾养护措施，否则混凝土表面易产生干缩裂缝，破坏内部结构完整性，影响强度表现。

2.6 施工工艺

施工工艺的规范程度，是喷射混凝土强度能否达到设计要求的直接影响因素，目前工程中主要采用干喷与湿喷两种工艺，其中湿喷工艺因密实度高、回弹率低（控制在 10% 至 15%），其混凝土强度较干喷工艺提升 10% 至 15%，更适用于隧道初期支护施工。喷射压力需严格控制在 0.4 至 0.6MPa，压力不足时，混合料喷射密实度差，内部空隙增多，强度降低；压力过大会导致骨料反弹，回弹率升至 20% 以上，不仅浪费材料，还会降低喷层密实度。此外，喷层厚度需保持均匀，控制在 50 至 150mm 之间，厚度不足（低于 50mm）易被围岩压力穿透开裂，厚度过大（超过 200mm）则易出现离析现象，导致强度降低 5% 至 10%。

3 隧道初期支护喷射混凝土强度质量控制的有效策略

隧道初期支护喷射混凝土是维系围岩稳定的关键支撑，其强度达标与否，直接关系到隧道施工期间的作业安全以及长期运营的耐久性。当前隧道施工环节中，喷射混凝土强度未达设计标准、强度离散性偏大等问题仍有出现，极大削弱了初期支护的承载效能。基于此，结合现场施工管控经验，从原材料管控、配合比优化、施工工艺规范、养护管理强化及质量检测完善五个核心维度，梳理切实可行的强度控制路径。

3.1 严控原材料准入，夯实强度控制根基

原材料的品质直接决定喷射混凝土强度的底线，需构建从进场到使用的全流程管控机制，从源头规避不合格材料投入使用。水泥选型优先考虑硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，其强度等级需满足不低于 42.5 级的要求，进场时需逐一核查产品合格证证明及性能检测报告，同时按照规范标准进行抽样复检，确保水泥的强度、凝结时间等核心指标符合施工要求。

表 1 隧道喷射混凝土原材料关键指标控制标准及实测数据

原材料类型	控制指标	规范允许值	工程实测合格值	不合格影响后果
P·O42.5 水泥	3d 抗压强度	≥17.0MPa	21.3MPa	强度不达标、支护开裂
粗骨料	含泥量	≤1%	0.6%	密实度下降、强度衰减
Ⅱ区中砂	细度模数	2.6~3.0	2.8	和易性差、回弹率增大
低碱速凝剂	强度保留率	≥70%	76%	后期强度大幅降低

骨料选取需遵循连续级配原则,严格控制粗骨料的最大公称粒径,重点管控含泥量、针片状颗粒占比等关键指标;细骨料优先选用Ⅱ区砂,合理控制其细度模数,避免因骨料品质不达标导致混凝土强度衰减。外加剂应选用与水泥适配性佳的无碱或低碱速凝剂,其掺量需通过试验精准确定,进场后需检验凝结时间、强度影响系数等指标;拌合用水需严格管控,杜绝含有害杂质的水源用于混凝土拌合,全方位保障原材料品质符合施工标准。

3.2 优化配合比设计,精准适配强度需求

配合比作为喷射混凝土强度形成的核心要素,需结合隧道施工实际工况,进行科学设计并严格执行。设计过程中,需依据相关施工规范,结合隧道围岩等级、喷射施工工艺等具体条件,合理确定水胶比、胶凝材料用量、砂率等关键参数,针对湿法喷射与干法喷射的工艺差异,设计差异化配合比,确保混凝土既具备良好的可喷性,又能满足设计强度要求。胶凝材料用量需不低于规范规定的最低限值,水泥用量需满足施工强度基础要求,矿物掺合料的掺量控制在合理区间,纤维掺量通过试配与试喷试验确定,实现强度与抗裂性能的双重保障。配合比确定后,需强化计量管控,明确水泥、骨料、外加剂等各类材料的称量允许偏差,采用精准度达标的计量设备并定期校验,搅拌过程中严格控制搅拌时间与投料顺序,保障混合料搅拌均匀,避免因配合比偏差造成混凝土强度不足。

3.3 规范施工工艺,降低强度损耗

施工工艺的规范程度直接影响喷射混凝土的密实度,进而影响其强度表现,需严格把控施工全流程的操作标准。喷射作业前,需对受喷岩面进行全面清理,妥善处理欠挖部位、浮渣及岩面渗漏水,确保岩面洁净平整。针对岩面渗漏水问题,必要时采取引排或注浆堵水措施,避免水分对混凝土强度形成造成不利影响。喷射作业优先采用湿喷机械手施工,精准控制喷射压力、喷嘴与受喷面的距离及角度,采用分层分段喷射方式,严格控制每层喷射厚度,杜绝漏喷、重喷及喷射过厚导致的强度不均问题。混合料运输过程中需做好防潮措施,严格控制存放时间,尤其是掺入速凝剂的混合料,需缩短存放时长,确保

喷射时的工作性能达标。喷射完成后,及时清理回弹料,严禁将回弹料重新掺入混合料中循环使用,最大限度降低因施工操作不当造成的强度损耗。

3.4 强化养护管理与质量检测,保障强度达标

养护管理是喷射混凝土强度稳步增长的关键环节,需建立完善的养护管控体系,确保混凝土强度有序提升。喷射混凝土终凝2小时后,需及时采取喷雾湿润养护方式,保持混凝土表面持续湿润状态,养护时长需严格遵循规范要求。高温天气需增加洒水频次,防止混凝土表面开裂。低温天气严禁采用喷水养护,需采取保温防冻措施,规避冻害对强度发展的影响。养护期间需加强现场巡查,严禁碰撞、扰动喷射混凝土层,避免外力作用导致结构破损,影响强度形成。同时,还需合理调配养护人员,明确岗位职责,建立养护台账,详细记录养护时间、方式及效果,确保养护工作落地见效,保障混凝土强度达到设计标准。

3.5 完善检测监测,强化全流程管控

质量检测是及时排查强度隐患、保障工程质量的重要手段,需构建事前、事中、事后全流程检测机制。事前检测重点核查原材料品质及配合比合理性,对进场材料进行抽样复检,对配合比进行试配验证,确保施工基础达标。事中检测聚焦施工过程中的混合料质量、喷射工艺参数,定期检测混合料的坍落度、可喷性等指标,根据检测结果及时调整施工参数。事后检测重点针对喷射混凝土实体强度,按规范要求制作试件并开展抗压强度试验,同时采用钻芯法、回弹法等现场检测方式,核实体强度达标情况,对检测不合格部位,及时采取补喷、加固等整改措施。另外,还需严格落实首件验收制度,每类分项工程首件验收合格后,方可开展规模化施工,强化监理旁站与第三方检测力度,确保质量检测数据真实可靠,实现喷射混凝土强度的全过程可控。

总而言之,隧道初期支护喷射混凝土强度质量控制是一项系统性、技术性较强的工作。后续隧道工程,还需构建完善的全过程质量管控机制,不断优化管控模式,从而切实增强初支结构整体稳固性与长期运营安全。

参考文献:

- [1] 刘国涛.隧道喷射混凝土与围岩黏结强度检测方法研究[J].建筑机械化,2026,47(03):84-87.
- [2] 常春辉,陈强,田万良,等.地下水浸泡作用下喷射混凝土力学退化机理研究[J].公路,2025,70(06):473-479.
- [3] 田四明.铁路隧道高性能主动支护体系力学机理与设计方法研究[D].山东大学,2025.
- [4] 吴亚辉.隧道围岩-喷射混凝土层间界面力学特性研究[D].重庆交通大学,2023.
- [5] 张德华,刘士海,任少强.隧道喷射混凝土强度增长规律及硬化速度对初期支护性能影响试验研究[J].岩土力学,2015,36(06):1707-1713.