

高速公路隧道衬砌裂缝成因分析及注浆修复效果评估

李章韬

云南交投公建工程养护有限公司 云南 昆明 650000

摘要：随着我国高速公路网络的不断延伸，穿越复杂地质条件区域的隧道工程日益增多。隧道衬砌作为保障结构安全与运营稳定的关键组成部分，其裂缝问题已成为影响隧道耐久性、安全性及使用寿命的重要隐患。本文系统梳理了高速公路隧道衬砌裂缝的主要类型与特征，深入剖析了裂缝产生的多源成因，包括设计缺陷、施工质量、地质环境变化及运营荷载等。在此基础上，重点探讨了注浆修复技术的原理、材料选择、工艺流程及关键控制参数。对注浆修复效果进行多维度评估方法，涵盖裂缝闭合度、结构整体性恢复、防水性能提升及长期稳定性等方面。研究结果表明，科学合理的注浆方案能有效控制裂缝发展、恢复衬砌承载能力并显著改善防水性能。最后，本文提出了裂缝预防与修复的优化建议，为高速公路隧道的安全运维提供理论支撑与实践指导。

关键词：高速公路隧道；衬砌裂缝；成因分析；注浆修复；效果评估

引言

隧道工程作为现代交通基础设施的关键节点，其结构安全直接关系到高速公路网络的畅通与人民生命财产安全。衬砌结构作为隧道的“皮肤”与“骨骼”，不仅承担着围岩压力，还起到防水、防火及美化内轮廓的作用。然而，在复杂多变的地质环境、施工扰动及长期运营荷载作用下，衬砌结构极易出现各类裂缝。这些裂缝不仅影响隧道美观，更会加速混凝土碳化、钢筋锈蚀，削弱结构承载力，严重时甚至可能引发衬砌剥落、掉块乃至结构失稳等安全事故。近年来，国内多条高速公路隧道在运营期间均暴露出不同程度的衬砌开裂问题，如秦岭终南山隧道、二郎山隧道等，引起了工程界与学术界的广泛关注。裂缝的成因复杂多样，涉及设计、施工、材料、地质及运维等多个环节，单一因素往往难以解释其发生机理。因此，系统性地开展裂缝成因分析，是制定有效修复策略的前提。注浆修复作为一种广泛应用的裂缝治理技术，具有施工便捷、对交通干扰小、加固与防水双重功效等优点。然而，注浆效果受浆液性能、注浆参数、裂缝形态及围岩条件等多重因素影响，其修复效果的量化评估一直是工程实践中的难点。传统的评估方法多依赖于经验判断或短期观测，缺乏系统性与长期性。

1 隧道衬砌裂缝类型与特征

隧道衬砌裂缝根据其形态、走向、成因及危害程度，可划分为以下几类：

1.1 纵向裂缝

项目信息：云南交投集团公路建设有限公司科技创新项目（GLJS-ZZLX-2025-07）

纵向裂缝沿隧道轴线方向延伸，多出现在拱腰或边墙部位。此类裂缝通常由不均匀沉降、偏压荷载或衬砌环向刚度不足引起。其特点是长度较长、宽度变化不大，对结构整体稳定性影响较大。

1.2 环向裂缝

环向裂缝垂直于隧道轴线，常见于拱顶、仰拱或施工缝位置。主要成因包括混凝土收缩、温度应力、围岩收敛受阻或施工缝处理不当。环向裂缝易导致衬砌环向承载力下降，且常伴随渗漏水现象。

1.3 斜向裂缝

斜向裂缝呈一定角度分布，多由剪切应力或局部应力集中引起，常见于洞口段、断层破碎带或结构突变处。此类裂缝往往预示着局部结构的不稳定。

1.4 网状裂缝（龟裂）

网状裂缝表现为密集的细小裂纹，形似龟背，主要由混凝土早期塑性收缩、干缩或冻融循环引起。虽然单条裂缝危害较小，但大面积龟裂会显著降低混凝土的耐久性。

1.5 施工缝与变形缝开裂

施工缝是混凝土分段浇筑形成的接缝，变形缝则是为适应结构变形而设置的构造缝。若处理不当，这些接缝极易成为薄弱环节，在内外应力作用下产生开裂或错台。

2 衬砌裂缝成因机理分析

衬砌裂缝的产生是多种因素耦合作用的结果，可归纳为以下四大类：

2.1 设计因素

在设计阶段，若干衬砌厚度不足、配筋率偏低，或未充分考虑偏压、高地应力等特殊地质条件，将导致结

构在服役初期即处于高应力状态，难以抵抗外部荷载变化。同时，排水系统设计缺陷也是常见诱因，如盲管布置不合理、排水路径不畅或未设置足够的检查井，均可能导致衬砌背后水压积聚，形成附加水压力，进而诱发开裂^[1]。此外，变形缝的设置若未依据规范要求合理确定间距或构造细节，将无法有效释放由温度变化、混凝土收缩及围岩变形引起的内应力，最终在结构中积累并导致开裂。

2.2 施工因素

混凝土配合比设计不当，如水灰比过大、骨料级配不良或外加剂使用不规范，会导致混凝土强度不足、收缩增大或泌水严重，从而在硬化过程中产生大量微裂缝。浇筑过程中若振捣不密实，易在衬砌内部形成空洞或蜂窝，削弱结构整体性；而养护不及时或时间不足，则会加剧早期塑性收缩与干缩，诱发表面龟裂。此外，爆破开挖、机械作业等施工扰动若未有效控制，可能对初凝或早期强度阶段的混凝土造成损伤。防水层在铺设过程中若被钢筋刺穿、焊接烧损或搭接不牢，将失去其隔离地下水的功能，使衬砌直接暴露于水侵蚀环境中。

2.3 地质与水文环境因素

地质与水文环境是裂缝产生的外部驱动力。在软弱围岩区，围岩流变或蠕变变形会持续作用于衬砌，导致其长期受压或受剪；膨胀性岩层在吸水后体积膨胀，对衬砌施加额外的膨胀压力；而穿越断层破碎带时，围岩的不均匀变形或错动更易引发结构性裂缝。地下水不仅通过静水压力对衬砌产生推力，其化学成分（如硫酸盐、氯离子）还会对混凝土产生侵蚀作用，降低其强度与耐久性。在寒冷地区，冻融循环反复作用会使混凝土内部孔隙水结冰膨胀，导致表层剥落与裂缝扩展。

2.4 运营与维护因素

进入运营阶段后，交通荷载的长期反复作用会引发疲劳损伤，尤其在重载车辆频繁通行的路段，动荷载效应不可忽视。季节性温差变化或隧道内火灾等极端事件产生的温度应力，若超过混凝土的抗拉强度，亦会诱发裂缝。更为关键的是，若日常维护不到位，如排水系统淤堵未及时清理、已有裂缝未及时封堵，将导致病害持续发展，最终演变为严重结构问题。

3 注浆修复技术原理与实施

注浆修复是通过压力将特定浆液注入衬砌裂缝及背后空隙，以达到充填、粘结、加固和防水的目的。

3.1 注浆材料选择

在注浆材料的选择上，需根据裂缝的宽度、渗水状况及修复目标进行综合判断。对于宽度大于0.3mm的裂

缝或衬砌背后的较大空洞，通常采用水泥基浆液，如普通硅酸盐水泥或超细水泥浆。这类材料成本较低、强度高、耐久性好，适用于结构性加固。而对于宽度小于0.1mm的细微裂缝，或存在渗漏但需快速止水的情况，则更宜选用化学浆液，如聚氨酯、环氧树脂或丙烯酸盐^[2]。其中，环氧树脂具有极高的粘结强度和良好的耐久性，特别适用于需要恢复结构整体性的结构性裂缝修复；聚氨酯则遇水膨胀，适用于动水或涌水条件下的快速堵漏。近年来，复合浆液的应用也日益广泛，如水泥-水玻璃双液浆，其凝胶时间可通过配比灵活调节，适用于复杂工况下的应急处理。

3.2 注浆工艺流程

注浆施工需遵循科学严谨的工艺流程。首先，应通过地质雷达、超声波检测或内窥镜等无损检测手段，全面掌握裂缝的空间分布、宽度、深度及衬砌背后是否存在空洞或脱空。在此基础上，沿裂缝走向合理布设注浆孔，孔距通常根据裂缝宽度及浆液扩散半径确定，一般控制在0.3至1.0米之间，孔深需穿透裂缝并进入围岩一定深度以确保锚固效果。随后，在钻孔口埋设注浆嘴，并使用快硬水泥或环氧胶进行密封固定。为防止浆液从裂缝表面溢出，还需对裂缝进行表面封缝处理^[3]。注浆过程中，应根据浆液类型和裂缝状况选择合适的注浆压力与流量，通常采用“由下至上、由稀到浓”的原则，先注入低浓度浆液以润湿裂缝通道，再逐步提高浓度以确保充填密实。注浆结束后，应及时封堵注浆孔并对衬砌表面进行修复处理，恢复其外观与功能。

3.3 关键控制参数

在整个注浆过程中，注浆压力、浆液配比与注浆量是三个关键控制参数。注浆压力过高可能导致衬砌被劈裂或围岩扰动加剧，过低则无法使浆液有效扩散至裂缝远端；浆液的水灰比、添加剂种类及凝胶时间需根据现场渗水情况动态调整；而注浆量则应结合理论计算与现场返浆、压力变化等反馈信息综合判断，确保裂缝及空洞被充分充填而不造成浪费或结构损伤。

4 注浆修复效果评估方法

为科学评价注浆修复效果，需构建多维度评估体系：

4.1 裂缝闭合度评估

裂缝闭合度是评估修复效果最直观的指标。可通过高精度裂缝宽度仪对修复前后同一位置的裂缝进行测量，对比其宽度变化。对于内部充填情况，则可采用超声波法，通过声波在混凝土中传播速度的变化来判断裂缝是否被密实填充——声速显著提高通常意味着裂缝已被有效粘结。

4.2 结构整体性恢复评估

结构整体性的恢复程度则需借助数值模拟与现场测试相结合的方法进行评估。利用FLAC3D、MIDASGTSNX等岩土工程软件，可建立修复前后的衬砌-围岩耦合三维模型，将注浆体视为具有一定弹性模量的填充材料，模拟其对衬砌刚度与承载力的贡献。通过对比修复前后衬砌的应力场、位移场变化，可定量评估结构性能的恢复水平。此外，有条件时还可开展现场荷载试验，通过千斤顶对修复区域施加模拟荷载，测量其挠度变化，从而直接验证承载力的提升效果。

4.3 防水性能评估

防水性能的改善是注浆修复的重要目标之一。修复后应通过长期渗漏观测，特别是在雨季或高水位期，检查原渗漏点是否消失、有无新增渗水点。更严谨的方法是进行水压测试，即在修复区域外侧施加一定水压，观察内侧是否出现渗漏，以此评估其抗渗能力的提升程度^[4]。

4.4 长期稳定性监测

修复效果的真正检验在于其长期稳定性。因此，应在修复区域布设裂缝计、应变计、多点位移计等自动化监测设备，并结合定期人工巡检，开展为期1年、3年至5年的跟踪监测。通过分析裂缝宽度、衬砌应变及位移的时序变化，可判断修复效果是否持久，是否存在二次开裂风险，从而为隧道全生命周期管理提供数据支撑。

5 工程案例分析

某地区高速公路隧道全长3.2公里，穿越强风化砂岩地层，设计为复合式衬砌结构。运营5年后，在K12+350至K12+400段发现拱顶及边墙出现多条环向与纵向裂缝，最大宽度达2.5毫米，并伴有严重渗漏水，已影响正常通行安全。

经综合勘察，地质雷达探测显示衬砌背后存在0.2至0.5米的空洞，超声波检测证实裂缝贯穿衬砌厚度。水质分析表明地下水具有弱硫酸盐侵蚀性，而现场检查发现原设计的环向排水盲管因施工回填碎石堵塞而失效。结合施工记录与结构受力分析，判定裂缝主要由排水系统失效导致水压积聚、围岩松动变形及混凝土收缩三者耦合作用所致。

针对上述病害特征，制定了以注浆为核心的综合治理方案。对于宽度大于0.3mm的主裂缝及背后空洞，采用超细水泥浆（水灰比0.8）进行充填加固；对于细微裂缝及渗漏点，则辅以低粘度环氧树脂浆进行渗透粘结。注

浆孔按梅花形布置，间距0.5米，孔深1.2米，确保浆液能有效覆盖裂缝网络。注浆压力严格控制在0.3至0.6兆帕之间，避免对已有结构造成二次损伤。

修复完成后，通过多手段进行效果评估。裂缝宽度测量显示，90%以上的裂缝闭合至0.1毫米以下；超声波检测声速提升约25%，表明内部粘结良好。数值模拟结果表明，修复后衬砌最大主应力降低35%，最大位移减少42%，结构整体性显著恢复。防水方面，原渗漏点完全消失，经历两个雨季后未见新增渗水。更为重要的是，为期三年的长期监测数据显示，修复区域无新裂缝产生，各项监测指标稳定，验证了注浆修复的长期有效性。

6 结语

本文通过对高速公路隧道衬砌裂缝的系统研究，得出以下结论：衬砌裂缝的成因具有显著的多源性与耦合性，必须从设计、施工、地质环境及运营维护的全生命周期视角进行综合诊断；注浆修复技术在科学选材、精细施工与参数优化的前提下，能够有效控制裂缝发展、恢复结构承载能力并显著提升防水性能；构建涵盖裂缝闭合、结构恢复、防水提升与长期稳定的多维度评估体系，是科学量化修复成效的关键。基于上述结论，提出以下建议：在设计阶段，应强化地质勘察精度，优化衬砌结构形式与排水系统布局，合理设置变形缝间距与构造；在施工阶段，须严格控制混凝土原材料质量与配合比，规范浇筑与养护工艺，确保防水层完整性，并对初期支护变形进行及时支护；在运维阶段，应建立基于物联网的隧道健康监测系统，实现裂缝的早期识别与预警，定期清理排水设施，防止水害累积；在修复阶段，应推行“精准诊断—方案设计—精细施工—效果评估”的闭环管理模式，并积极推广智能注浆设备与数字化监测技术。

参考文献

- [1] 孟纪英.高速公路隧道衬砌裂缝成因分析及防治措施探讨[J].交通世界,2023,(Z1):282-285.
- [2] 杨朝帅,郑若泓,李达强.既有高速公路隧道衬砌裂缝处治技术研究[J].低温建筑技术,2024,46(02):153-158.
- [3] 姬彬波.运营中的高速公路隧道衬砌裂缝病害处治技术探索[J].价值工程,2023,42(09):125-127.
- [4] 李亚利,曲晓东,冯卫星,等.高速公路隧道衬砌裂缝调查分析与处治研究[J].山西建筑,2020,46(02):117-119.