

既有铁路隧道衬砌裂缝病害整治技术

邢 虎

中国铁路兰州局集团有限公司兰州工程建设指挥部 甘肃 兰州 730000

摘 要：衬砌裂缝是既有铁路隧道运营阶段最为常见的结构性病害，会持续削弱隧道结构稳定性与服役性能。本文结合隧道长期运营的实际工况，从结构受力、围岩形变、环境侵蚀及施工缺陷四个维度梳理裂缝形成机理，系统总结裂缝空间分布、形态延展、部位发育及动荷载演化的差异化特征，细化表层封闭、注浆充填、结构补强、围岩改良等主流整治工艺，结合病害差异明确技术选型逻辑与组合施工模式，搭建适配运营场景的病害防控与长效维护体系，可为隧道衬砌裂缝科学整治提供技术参考。

关键词：铁路隧道；衬砌裂缝；病害机理；整治技术；防控体系

引言：铁路隧道作为轨道交通网络的核心地下构筑物，长期处于复杂地质与恶劣环境中，持续承受围岩压力、列车动荷载及各类环境介质的共同作用。长期服役过程中，衬砌结构极易产生不同程度的裂缝病害，病害持续发育会破坏混凝土结构完整性，降低结构抗渗性与承载能力，影响隧道运营安全。依托裂缝病害的形成规律与发育特征，匹配科学合理的整治工艺，构建常态化防控与维护机制，是保障既有铁路隧道长期稳定服役的关键所在。

1 既有铁路隧道衬砌裂缝形成机理

1.1 衬砌结构受力诱发的裂缝产生机理

铁路隧道衬砌结构长期承受复杂荷载作用，内部应力会随运营时长持续发生改变。结构断面受力处于不平衡状态时，局部区域会集中产生压应力与拉应力。混凝土材料抗拉性能较弱，拉应力突破材料固有承受极限后，结构表层会率先出现细微裂隙。衬砌整体刚度分布不均匀，截面突变、结构厚薄差异等状态，都会改变应力传递路径^[1]。应力集中区域会持续产生微小形变，形变不断累积，就会催生结构性裂缝，逐步破坏衬砌结构的完整性。

1.2 围岩形变作用引发的裂缝发育机理

隧道围岩并非恒定稳定状态，地质体自身会随时间产生缓慢形变。围岩岩体出现挤压、松弛与位移变化时，会向衬砌结构传递外部作用力。坚硬围岩局部挤压会对衬砌形成集中荷载，软弱围岩会产生持续流变形变，对衬砌形成均匀挤压约束。围岩形变产生的外力持续作用于衬砌表面，会迫使衬砌结构产生被动变形。结构变形受限的位置会产生应力增量，慢慢催生裂缝并推

动裂缝持续延展。

1.3 环境介质作用下裂缝扩展机理

隧道内部封闭潮湿的空间，会长期存在水汽、温度波动与各类侵蚀介质。水汽持续渗入混凝土内部，会改变材料内部孔隙结构，弱化骨料与胶凝材料的粘结强度。环境温度反复升降，会让衬砌结构产生周期性的膨胀与收缩。材料内部会产生反复的微观损伤，原有细微孔隙逐步贯通，形成可视裂缝。侵蚀介质会持续腐蚀混凝土内部组分，降低结构整体强度与稳定性，让既有裂缝持续拓宽、加深。

1.4 施工残留缺陷导致的裂缝衍生机理

隧道衬砌施工阶段留存的各类隐性缺陷，会在长期运营过程中逐步转化为结构性病害。混凝土浇筑振捣不充分，会让结构内部留存空洞、蜂窝与孔隙。养护时长不足、养护环境不当，会造成混凝土成型强度不足，内部产生原生微观裂隙。施工阶段的模板偏差、钢筋布设偏移，会让衬砌结构受力状态偏离设计标准。原生缺陷会在后期荷载与环境影响下持续发展，微观裂隙不断发育扩张，最终演变为成型的隧道衬砌裂缝。

2 既有铁路隧道衬砌裂缝病害基本特征

2.1 衬砌裂缝空间分布特征

既有铁路隧道衬砌裂缝的空间排布具备鲜明的区段规律，整体呈现不均匀分布状态。隧道洞口段落长期暴露在外界环境影响下，围岩稳定性较弱，结构受力状态复杂多变，裂缝病害出现更为集中。洞身常规深埋段落地质环境相对稳定，围岩应力释放趋于平缓，衬砌裂缝出现频次更低，分布状态更为零散。地质破碎带、岩层

交界面、隧道断面变化位置属于病害高发区域^[2]。这类位置的围岩结构完整性差,应力传递状态紊乱,容易诱发集中式结构损伤。衬砌施工接缝、结构转折位置也会频繁滋生裂缝,形成局部集聚的病害分布特点。

2.2 衬砌裂缝形态延展特征

不同成因催生的衬砌裂缝,会展现出差异化的外观形态与延展规律。浅层细微裂缝纹路细碎、走向无序,仅停留在混凝土表层,不会对结构整体造成实质性损伤。中度裂缝具备连续的延展轨迹,纹路走势更加规整,能够穿透表层混凝土,形成具有一定深度的结构性裂隙。重度裂缝延展连贯性极强,能够沿固定走势贯穿衬砌结构层。裂缝发育进程中会不断吸纳周边零散微裂隙,逐步连通成片,形成条状或网状损伤形态。结构受力变化会改变裂缝延展趋势,让纹路产生弧度或走向偏移,形成形态不规则的病害结构。

2.3 不同结构部位裂缝发育差异特征

隧道衬砌各结构部位的受力条件、约束方式存在明显区别,裂缝发育模式表现出显著的部位差异性。拱顶区域长期承受上部围岩竖向压力,张拉作用更为突出,容易生成纵向延伸的长裂缝。拱腰位置属于结构应力过渡区域,受力状态复杂多变,剪切作用更为明显,斜向裂缝成为主要病害形式。边墙衬砌承受竖向压力与侧向围岩挤压作用,竖向裂缝发育更为普遍,裂缝深度增长更为显著。仰拱结构直接承接基底形变压力与上部传递荷载,横向裂缝发育更为频繁,结构整体损伤累积速度更快。

2.4 运营动荷载下裂缝演化特征

铁路长期运营产生的动荷载会持续作用于隧道衬砌结构,持续改变裂缝的发育状态。往复的力学冲击会打破衬砌内部稳定的应力平衡,激活原本趋于稳定的静态微裂隙。浅层裂隙会逐步深化拓宽,从表层损伤转变为深层结构性裂缝。零散分布的独立裂缝会不断延伸拓展,逐步相互连通,形成规模化的损伤区域。反复的荷载扰动会持续消耗混凝土材料性能,弱化内部骨料粘结强度。结构刚度与承载性能持续衰减,裂缝发育速度会稳步提升。长期循环作用下,衬砌结构损伤不断叠加,病害发育程度持续加重,结构整体稳定性逐步下降。

3 既有铁路隧道衬砌裂缝主流整治技术

3.1 衬砌裂缝表面封闭处理技术

表面封闭处理是针对隧道衬砌浅层细微裂缝的常用整治工艺,适配宽度 0.2 毫米以内、未深入结构内部的表层裂隙。施工前期会对裂缝表层浮浆、粉尘、水渍进行彻

底清理,保持衬砌基面干燥洁净。常用封闭材料以环氧树脂类、聚合物水泥基涂料为主,具备良好的粘结性与抗渗性。涂料分多遍涂刷于裂缝表层,单次涂刷厚度控制在 0.3 至 0.5 毫米,整体成膜厚度维持在 1 至 2 毫米。固化成型后的涂层可以阻断水汽、有害介质侵入混凝土内部,阻隔外界环境对裂隙的持续侵蚀^[3]。该工艺流程简便,施工扰动范围小,适用于大面积浅层裂缝的规整处理,能够有效延缓表层细微裂缝的发育扩张。

3.2 衬砌裂缝内部注浆充填技术

内部注浆充填技术多用于宽度 0.2 至 2 毫米的中型裂缝,可实现裂缝内部空腔的密实填充。施工阶段会根据裂缝深度布设注浆嘴,注浆嘴间距设置为 20 至 30 厘米,保障浆液全方位渗透。注浆材料选用超细水泥浆液或改性环氧树脂浆液,流动性强、固化收缩率低,适配衬砌结构内部狭小空隙。注浆压力稳定控制在 0.2 至 0.4 兆帕,低速低压完成注浆作业,避免高压冲击造成衬砌二次损伤。浆液会沿裂缝裂隙充分扩散、填充内部空洞,待浆液完全固化后,可衔接衬砌开裂的混凝土结构体。有效填补结构内部空隙,恢复衬砌混凝土的整体性与密实度,提升结构抗渗能力与基础承载能力。

3.3 衬砌结构补强加固整治技术

结构补强加固技术针对宽度超 2 毫米的宽大裂缝、贯通性裂缝,解决衬砌结构强度衰减、整体性破损问题。常见工艺包含粘贴碳纤维布、增设表层砂浆加固层、植筋补强等方式。碳纤维布加固施工中,会在规整打磨后的衬砌表层粘贴 300 至 600 克每平方米的高强碳纤维布,搭配专用粘胶胶固化成型。砂浆加固层整体厚度设置在 3 至 5 厘米,通过高强度聚合物砂浆分层抹筑,提升衬砌表层整体刚度。植筋加固会采用直径 12 至 16 毫米的螺纹钢筋,合理布设植筋间距,重塑衬砌结构受力体系。各类补强工艺可弥补衬砌结构的力学缺陷,提升结构抗弯、抗拉性能,抑制裂缝再次发育。

3.4 围岩协同改良与卸荷缓释技术

围岩状态失衡是隧道衬砌裂缝反复发育的核心诱因之一,围岩协同改良与卸荷技术可从源头管控裂缝病害发展。卸荷处理会通过小型钻孔泄压方式,在衬砌外侧围岩布设深度 1 至 2 米的泄压孔,释放围岩内部积聚的高应力,降低围岩形变对衬砌的挤压作用。围岩改良则采用低压渗透注浆方式,对松散破碎围岩进行固结处理,填充围岩内部孔隙,提升围岩整体完整性与稳定性。改良后的围岩整体性显著提升,应力释放更为平缓,能够弱化围岩形变对衬砌结构的持续作用力。该技术改变单

一修复衬砌的整治模式,通过优化外部受力环境,实现衬砌裂缝病害的长效治理^[4]。

4 既有铁路隧道衬砌裂缝整治优化与防控体系

4.1 裂缝病害适配性整治技术选型逻辑

既有铁路隧道衬砌裂缝整治工作需要摒弃单一化的处理思路,依据病害实际状态匹配对应的施工技术。技术选型的核心依托裂缝自身发育状态,涵盖裂隙宽度、开展深度、破损范围以及结构受损程度等关键条件。细微表层裂缝仅存在表层材料损伤,未影响衬砌整体受力性能,可选用简易封闭类工艺完成防护处理,阻断外界环境带来的持续侵蚀。中度深度裂缝存在内部空隙,会削弱混凝土结构密实度,需要采用注浆填充方式完成内部修复,恢复结构完整状态。贯通性裂缝会破坏衬砌受力体系,造成结构强度衰减,必须搭配结构补强工艺提升整体刚度。现场地质环境、隧道运营状态以及结构服役年限,都是技术选型的重要参考依据。科学的选型逻辑能够规避过度施工或整治不到位的问题,让整治方案贴合现场实际工况,提升病害治理的针对性与实效性。

4.2 多工艺组合整治的施工适配模式

隧道现场多数裂缝病害存在复合型特征,单一施工工艺无法彻底解决多层、多类型的结构损伤。多工艺组合整治模式可以针对复合型病害的不同损伤层级开展分层处理,弥补单一技术的治理短板。面对表层裂隙发育、内部空腔破损的复合病害,可采用表层封闭搭配深层注浆的施工方式,完成表层防护与内部密实修复。针对裂缝发育伴随结构刚度不足病害,可在注浆加固的基础上,增设表层补强结构,恢复衬砌力学性能。组合施工需要遵循循序渐进的施工顺序,优先完成基面清理、裂缝规整等前置工序,再开展内部修复与结构补强作业。各施工工序预留充足的固化周期,保障每层施工材料稳定成型。合理的工艺搭配可以逐层消除结构损伤,完善衬砌整体结构性能,提升复杂病害的整治质量。

4.3 隧道运营期裂缝病害常态化防控机制

铁路隧道长期服役过程中,裂缝病害会随环境变化和荷载作用持续发育,被动整治无法从根本上控制病害滋生。常态化防控机制以主动干预为核心,聚焦日常管控与早期处置,从源头降低病害发育概率。针对隧道围岩薄弱区段、结构过渡区段、环境侵蚀严重区段,建立常态化巡查机制,把控结构状态变化规律。及时识别初期萌生的微观裂隙与细小裂缝,通过简易预处理手段遏

制病害持续扩张。做好隧道内部环境管控,调节洞内温湿度条件,减少干湿交替、温度变化对混凝土结构的损伤影响。规范隧道日常运维流程,排查各类可能诱发裂缝发育的外部隐患。早期干预模式可以大幅减少重度裂缝病害的产生,降低后期大规模整治的施工成本与运维压力^[5]。

4.4 衬砌结构长期稳定的维护管控体系

衬砌结构的长效稳定需要依托系统化、标准化的维护管控体系,单次整治施工无法保障隧道终身服役安全。管控体系围绕状态监测、标准落实、动态运维三个层面搭建,覆盖隧道全运营周期。对隧道各衬砌结构部位建立专属运维档案,记录病害发育位置、整治工艺、施工时间等关键信息,积累长期运维数据。根据隧道服役时长、运营荷载强度、地质条件差异,划分差异化运维等级,落实分级管控措施。统一后期维护的施工标准、材料选用标准与质量管控要求,规范各类修复作业流程。针对运维过程中发现的新生病害与结构隐患,及时开展针对性处置,持续维持衬砌结构的完整性与承载稳定性,保障铁路隧道长期安全平稳运行。

结束语

衬砌裂缝病害的治理核心在于精准溯源、对症施策与长效管控。通过厘清多因素耦合作用下的裂缝发育机理,区分不同类型、不同部位裂缝的病害特征,能够精准匹配适配的整治技术。多工艺组合施工模式可有效解决复合型裂缝病害问题,标准化的技术选型体系与常态化的运维防控机制,可持续抑制裂缝滋生与扩张,有效提升隧道衬砌结构整体性与耐久性,为既有铁路隧道安全平稳运营筑牢结构基础。

参考文献

- [1] 杨赞. 铁路隧道衬砌裂缝病害整治措施研究 [J]. 江西建材, 2024(3): 247-248, 257.
- [2] 张同保, 王志刚. 京原铁路隧道衬砌渗漏水病害整治施工技术 [J]. 铁路技术创新, 2022(2): 63-69.
- [3] 郝晓杰. 运营期铁路隧道病害整治技术研究 [J]. 建材与装饰, 2022, 18(4): 143-144.
- [4] 刘鑫. 高速铁路隧道结构裂缝成因及治理措施浅析 [J]. 建筑施工, 2024, 46(3): 423-425.
- [5] 王革新. 高速铁路隧道隧底结构病害防治优化设计研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(8): 2133-2142.