运营高速公路隧道衬砌裂损处治对策研究

鲜祖磊
温州市交通工程试验检测有限公司 浙江 温州 325036

摘 要 为提升运营高速公路隧道衬砌裂损处治工作的科学性与针对性，本文从交通工程检测实践角度出发，系统分析了衬砌裂损的类型划分标准、检测技术应用方法、处治对策选择原则等关键技术问题。研究表明，衬砌裂损按成因机理与危害程度可分为结构性裂损与非结构性裂损两大类别，外观病害普查、结构完整性检测、承载能力评估构成了层次递进的检测技术体系，表层裂缝封闭、结构加固补强、衬砌拆除重建、围岩注浆加固、综合处治等五类技术对策各有明确适用范围，方案选择需建立在病害成因精准判定、结构安全科学评估、多维因素综合权衡基础之上，既要满足结构安全需求，又需兼顾经济合理性与施工可行性，研究成果可为运营高速公路隧道衬砌裂损病害处治工程决策提供技术参考依据。

关键词 运营高速公路；隧道；衬砌裂损；处治对策

Research on Treatment Strategies for Lining Cracks in Operational Highway Tunnels

Xian Zu-lei
Wenzhou Transportation Engineering Testing and Inspection Co., Ltd., Wenzhou 325036, Zhejiang Province, China

Abstract To enhance the scientific rigor and targeted approach in treating lining cracks in operational highway tunnels, this paper systematically analyzes key technical issues—such as classification criteria for lining crack types, methods for applying detection technologies, and principles for selecting treatment strategies—from the perspective of transportation engineering inspection practices. Research indicates that lining cracks can be categorized into structural cracks and non-structural cracks based on their formation mechanisms and hazard severity. A progressive technical system for inspection is established, comprising visual defect surveys, structural integrity detection, and load-bearing capacity assessments. Five categories of technical strategies—surface crack sealing, structural reinforcement, lining demolition and reconstruction, surrounding rock grouting reinforcement, and comprehensive treatment—each have clearly defined application scopes. The selection of a treatment scheme must be based on accurate identification of the cause of the defect, scientific assessment of structural safety, and comprehensive consideration of multiple factors. It should not only meet structural safety requirements but also balance economic rationality and construction feasibility. The research findings provide technical reference for decision-making in treating lining crack defects in operational highway tunnels.

Key words Operating Expressway; Tunnel; Lining Cracking; Treatment Strategies

随着我国高速公路建设规模持续扩大，大批隧道陆续进入运营中后期，衬砌裂损作为最常见的病害类型之一，其发生频率与影响范围呈现逐年上升态势。衬砌裂损不仅直接威胁隧道结构安全，导致承载能力下降、使用寿命缩短，还可能引发混凝土剥落、渗漏水侵蚀等次生病害，影响行车安全与隧道正常运营。部分隧道因设计标准偏低、施工质量缺陷、运营环境复杂等因素叠加作用，衬砌裂损问题尤为突出，迫切需要开展科学有效的处治工作。当前工程实践中处治方案选择往往缺乏系统性考量，存在盲目套用固定模式、忽视病害成因差异、未能充分权衡技术经济因素等问题，导致处治效果不佳甚至造成资源浪费。基于此，系统梳理衬砌裂损的分类标准、检测方法、处治对策，以期为运营隧道病害处治决策提供技术参考。

1 运营高速公路隧道衬砌裂损的分类

运营高速公路隧道衬砌裂损可划分为结构性裂损与非结构性裂损两类。

结构性裂损：主要由围岩压力超限、地下水侵蚀或结构承载力不足等深层次原因引发，表现为贯穿性纵向裂缝、环向断裂乃至拱顶塌陷等严重形态，直接威胁结构安全，需紧急加固处治。

非结构性裂损：多因施工工艺缺陷、混凝土收缩或温度应力等表层因素导致，典型特征为表面龟裂、局部剥落或浅层网状裂纹等。此类病害虽不立即影响承载，但处置不当可能逐步

发展为结构性病害。

实践表明，渗水部位的裂损扩展速度可远超干燥区域；拱腰与边墙交界处因应力集中为高发区；南方潮湿环境下的衬砌劣化进程通常快于北方干燥地区[1]。

2 运营高速公路隧道衬砌裂损的检测

2.1 外观病害普查检测技术

隧道衬砌外观病害普查主要通过人工巡检实施，旨在全面、准确地识别表面病害。检测人员沿隧道全断面系统观察，并借助裂缝宽度测量仪等便携设备记录裂缝的宽度、长度、走向等定量数据，重点关注拱顶、拱腰、边墙等应力集中部位。所有发现的裂缝均需标注里程、分布形态（环向、纵向或斜向）及开裂宽度。此外，渗漏水、混凝土剥落等附属病害也纳入普查记录范围。该方法操作简便，能快速掌握隧道整体病害分布，为后续精密检测提供目标区段定位依据，有利于提高检测资源的针对性与经济性。

2.2 衬砌结构完整性检测方法

衬砌结构完整性检测主要用于识别混凝土内部缺陷。地质雷达法是最常用的无损检测手段，通过分析电磁波在不同介质中的反射信号，可实时获取衬砌厚度数据，并精准定位空洞、脱空等隐蔽病害。超声波检测则利用声波传播特性，通过声速降低与波形畸变判断混凝土内部是否存在裂隙或强度劣化区域。钻芯取样作为直观验证方法，可通过观察芯样并辅以实验室强度试验，获取裂缝深度、密实度及材料真实力学性能等关键参数，为结构安全评估提供可靠依据[2]。

2.3 衬砌承载能力评估技术

衬砌承载能力评估技术以结构力学分析为核心，旨在量化裂损衬砌的剩余承载水平。数值模拟方法依托有限元软件构建隧道三维计算模型，将实测的围岩参数、衬砌厚度、混凝土强度等基础数据输入模型后，计算程序可模拟围岩压力作用下衬砌的应力分布状态，获取拱顶、拱腰、拱脚等关键部位的轴力、弯矩、剪力等内力值。评估人员将计算内力代入规范公式进行截面承载力验算，当安全系数低于规范限值时，该段衬砌即被判定为承载能力不足。现场荷载试验法则采用千斤顶在衬砌表面施加分级荷载，位移传感器实时监测加载点的变形响应曲线，荷载-位移关系出现拐点时，对应的极限荷载值直接反映了衬砌的实际承载极限，该方法虽操作复杂但结果可靠性高，常用于关键病害段的承载能力复核验证工作[3]。

3 运营高速公路隧道衬砌裂损的处治对策

3.1 表层裂缝封闭处治技术

表层裂缝封闭处治技术适用于宽度较小、深度未贯穿衬砌厚度的非结构性裂缝，该技术以阻断裂缝内水分侵蚀通道为核心目标，防止微小裂损向深层结构性病害演化。施工人员需首先采用高压风枪清除裂缝内部的浮灰、油污等附着物，确保缝隙表面干燥洁净后方可进行后续封闭作业。对于宽度较窄的微细裂缝，应选用低黏度环氧树脂材料进行表面涂刷封闭，材料在毛细作用下可渗入缝隙内部一定深度，固化后形成致密防水保护层。当裂缝宽度相对较宽时，则需采用压力注浆工艺，施工队伍沿裂缝走向按适当间距布设注浆嘴，注浆泵将改性环氧浆液以合理压力缓慢注入，浆液充填需达到密实标准，注浆过程中压力值以兆帕为单位进行控制，间距以厘米为单位进行布置，确保浆液在裂缝内均匀扩散。该技术对表层裂缝的封闭效果良好，可有效阻止裂缝继续扩展，遏制渗水病害的进一步发展[4]。

3.2 结构加固补强处治技术

结构加固补强处治技术针对衬砌混凝土强度不足、承载能力下降的结构性病害，该技术旨在提升既有衬砌的整体刚度与抗力储备，恢复结构安全系数至规范要求水平。钢架混凝土套拱加固法是最常用的补强方式，施工队伍需在既有衬砌内侧按设计间距架设型钢拱架，拱架规格应根据承载力验算结果选用I10、I14、I16、I18或I20等不同型号，型钢安装就位后采用锚杆将其与原衬砌可靠连接，连接节点需满足协同受力要求。拱架外侧绑扎钢筋网片时，主筋直径、间距配置需依据加固设计图纸严格执行，钢筋网与型钢拱架之间应设置足够保护层厚度，网片绑扎完成后喷射C30或更高强度等级混凝土，喷射厚度以厘米为单位控制，分层喷射时单层厚度不宜过大以防回弹，各层之间需待初凝后再进行下一层施工。套拱混凝土养护期间应保持表面湿润状态，养护时间不少于规范规定天数，确保混凝土强度充分发展，最终形成的叠合结构承载体系可显著提升衬砌安全系数，满足长期运营荷载作用的需求。

3.3 衬砌拆除重建处治技术

衬砌拆除重建处治技术适用于衬砌裂损严重、承载能力严重不足且加固方案难以满足安全要求的极端病害情况，该技术以彻底消除病害隐患为根本目的，但施工风险高、造价昂贵，需经充分论证后方可实施。拆除作业前必须在病害段两端设置临时支撑体系，支撑结构需具备承担全部围岩荷载的能力，确保拆除过程中围岩稳定性不受影响，临时支撑方案如图1所示。施工人员采用液压镐、风镐等小型机具分段分块破碎既有衬砌，单次拆除长度需严格控制在设计范围内，拆除深度应根据病害实际情况确定，当衬砌背后存在空洞或初期支护破损时，

拆除范围需向外延伸至完好区域。拆除完成后，立即清理破碎混凝土块体，检查初期支护完整性，对初支破损部位采用喷射混凝土修补加固，围岩松动破碎区域补打锚杆注浆加固，待围岩稳定后按原设计标准重新浇筑二次衬砌，新旧衬砌搭接段需凿毛处理并设置连接钢筋，确保结构连续性[5]。

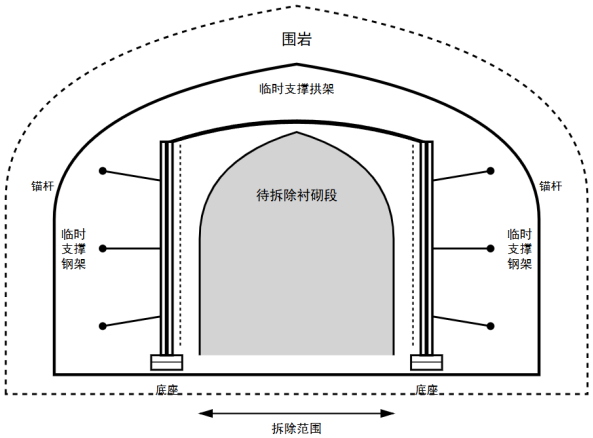

图1 隧道衬砌拆除临时支撑示意图

3.4 围岩注浆加固处治技术

围岩注浆加固处治技术适用于衬砌裂损由围岩松动破碎、承载力不足引发的病害类型，该技术以改善围岩自身力学性能为着力点，从源头上消除导致衬砌开裂的外部荷载因素。注浆施工需首先在衬砌表面按梅花形或环向布置钻孔，钻孔深度应穿透衬砌厚度后继续进入围岩适当距离，合理的孔间距既要保证加固范围的连续性又需避免浆液浪费，钻孔角度宜向围岩深部倾斜以扩大加固影响区域。钻孔完成后安装注浆管并采用速凝材料封堵孔口，注浆材料应根据围岩破碎程度选择水泥浆液或水泥－水玻璃双液浆，松散破碎围岩宜采用水灰比较大的稀浆以增强渗透性，裂隙发育围岩则需使用浓浆提高充填密实效果。注浆压力需根据围岩埋深、破碎程度合理确定，压力过小难以驱动浆液充分扩散，压力过大则可能劈裂围岩造成新的破坏。注浆过程中应密切监测浆液扩散半径，当相邻孔出现串浆或压力骤降时应及时调整注浆参数，确保浆液在围岩裂隙网络中充分渗透，待浆液凝固后围岩整体强度显著提升，形成稳定的加固圈层，有效减小作用于衬砌的围岩压力[6]。

3.5 综合处治方案选择策略

综合处治方案选择策略需建立在病害成因精准分析、结构安全科学评估基础之上，决策过程应统筹考虑技术可行性、经济合理性、施工安全性等多维度因素，避免盲目套用固定模式导致处治效果不佳或资源浪费。工程技术人员应根据检测数据判定病害性质，表层宽度小于限值且未贯穿衬砌的浅层裂缝优先选用封闭处治，既能快速恢复防水功能又可避免大规模施工对交通的影响。当衬砌混凝土强度检测值低于设计要求但结构尚未丧失承载能力时，套拱加固方案既保留了既有结构又实现了承载力提升，相比拆除重建具有施工扰动小、工期短、造价低等显著优势。对于围岩软弱破碎引发的衬砌持续变形开裂，单纯加固衬砌难以从根本上解决问题，必须将围岩注浆纳入处治体系，注浆加固与结构补强组合实施方能取得长效治理效果。

4 结束语

综上所述，运营高速公路隧道衬砌裂损处治工作需建立在病害成因深入剖析、检测数据全面掌握、结构安全准确评估基础之上，处治方案决策应摒弃经验主义思维，注重技术适用性与经济合理性的有机统一。未来随着检测技术智能化水平不断提升，无人机巡检、三维激光扫描、智能图像识别等新型手段将逐步应用于隧道病害检测领域，检测效率与精度有望显著提高。处治材料与工艺创新同样值得关注，高性能修补材料、快速加固技术的研发应用可有效缩短施工工期，降低对交通运营的影响。建议建立运营隧道病害数据库，积累不同地质条件、设计标准、运营年限下的病害发展规律与处治效果数据，为后续类似工程提供更加精准的决策依据，推动隧道养护管理工作向预防性、精细化方向发展。

参考文献

[1]王少瑜,田甜,万忠华,等.重载铁路隧道衬砌裂损分布特征及数据分析方法[J].铁道建筑,2025,65(9):75-80.

[2]易杰,赵乙丁,卞雯,等.拱部脱空单线铁路隧道衬砌裂损机理研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(6):1038-1046.

[3]秦鑫.公路隧道衬砌裂损病害检测与治理对策[J].大众标准化,2023(13):160-162.

[4]张忠.中东铁路交通软岩隧道衬砌裂损机制试验研究[J].建筑技术,2023,54(10):1210-1213.

[5]王富国.公路隧道衬砌裂损病害检测与治理对策[J].新疆有色金属,2022,45(4):55-56.

[6]陈林.公路隧道衬砌裂损病害检测与治理对策[J].西部交通科技,2020(7):94-96.

（本文编辑 吴文博）

