

中文引用格式:蒋宇静,潘竹田,张学朋,等.隧道病害健康诊断及维修加固技术研究综述[J].中国安全科学学报,2025,35(11):139-148.

英文引用格式:JIANG Yujing, PAN Zhutian, ZHANG Xuepeng, et al. Review on diseased tunnel health diagnosis and reinforcement technologies[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 139-148.

隧道病害健康诊断及维修加固技术研究综述*

蒋宇静^{1,2,3}教授,潘竹田²,张学朋^{**1,2}副研究员,李宁博⁴高级工程师

(1 山东科技大学 露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室,山东 青岛 266590;

2 山东科技大学 安全与环境工程学院,山东 青岛 266590; 3 长崎大学 工学研究科,

日本 长崎 852-8521; 4 水利部 水利水电规划设计总院,北京 100120)

中图分类号:X924.4; U45

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.0116

基金项目:国家自然科学基金资助(52109132);山东省高等学校青年创新团队发展计划(2024KJH065)。

【摘要】为减少隧道衬砌病害,延长隧道的安全使用年限,从隧道病害诊断和维修加固角度出发,构建隧道衬砌病害诊断框架,探索病害隧道维修加固手段。通过综述分析隧道病害健康诊断及维修加固技术的应用现状,系统梳理各类检测技术的优缺点,总结病害诊断方法与补强措施。研究表明:无损检测技术已从单一化、半自动化向集成化、智能化发展,声波法、地质雷达法、激光扫描等技术在效率与精度上各有特性,摄影测量与多传感器融合的自动检测系统逐步应用但存在多病害同步检测瓶颈;维修加固技术中,传统方法难以满足低成本、高安全性需求,纤维增强复合材料(FRP)等新型技术虽具优势但存在成本高、环境适应性不足等问题。

【关键词】病害隧道; 衬砌病害; 无损检测; 健康诊断; 维修加固技术

Review on diseased tunnel health diagnosis and reinforcement technologies

JIANG Yujing^{1,2,3}, PAN Zhutian², ZHANG Xuepeng^{1,2}, LI Ningbo⁴

(1 State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China;

2 College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and

Technology, Qingdao Shandong 266590, China; 3 School of Engineering, Nagasaki

University, Nagasaki 852-8521, Japan; 4 General Institute of Water Resources and

Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China)

Abstract: In order to reduce tunnel lining diseases and extend the safe service life, a diagnostic framework for tunnel lining diseases was constructed, and maintenance and reinforcement methods for diseased tunnels were explored from the perspectives of diagnosis and reinforcement. The application status of technologies for diagnosing tunnel diseases and maintaining/reinforcing tunnels was reviewed. The

* 文章编号:1003-3033(2025)11-0139-10; 收稿日期:2025-06-14; 修稿日期:2025-08-18

** 通信作者:张学朋(1989—),男,山东滨州人,博士,副研究员,主要从事隧道及地下工程灾害防控理论与技术方面的研究。E-mail: zhangxuepeng0722@126.com。

advantages and disadvantages of various detection technologies were systematically identified, and disease diagnosis methods and reinforcement measures were summarized. The results show that non-destructive testing technologies have evolved from single/semi-automatic to integrated/intelligent systems. Acoustic wave, ground-penetrating radar, and laser scanning technologies have different efficiency and accuracy characteristics. Although automatic detection systems integrating photogrammetry and multi-sensor fusion have gradually been applied, they face challenges in the synchronous detection of multiple diseases. Traditional maintenance and reinforcement technologies are difficult to meet the requirements of low cost and high safety. Although new technologies such as Fiber Reinforced Polymer (FRP) are advantageous, they have issues such as high cost and insufficient environmental adaptability.

Keywords: disease tunnels; lining diseases; non-destructive testing; health diagnosis; maintenance and reinforcement technology

0 引言

在公路、铁路、地铁等轨道交通工程建设中,隧道开凿作为重要途径,能够有效缩短行车距离、节约各类资源,并改善交通运输状况^[1-2]。截止到2024年底,我国建成并投入运营的公路隧道总里程为32 597 km,铁路隧道总里程为24 246 km,城市地铁交通隧道总里程为9 604 km^[3]。与此同时,由于复杂的地质水文条件以及隧道建设施工技术^[4]和运营管理水平^[5-6]的影响,我国的隧道病害问题日益突出^[7]。不完全统计^[8]显示,30%~40%的公路隧道呈现出亚健康甚至病害状态,这对智能化病害健康诊断和维修加固技术提出了巨大的挑战。

传统检测方法对人工作业表现出极强的依赖,无论是检测人员的目视检测,还是使用手持裂缝检测仪、探地雷达等仪器的半人工检测模式,当大量隧道出现病害时,难以高效、快速且高质量地完成隧道衬砌的检测任务^[4,9-10]。因此,研发综合性、智能化、集成化和自动化的隧道衬砌病害检测技术已成为重要的发展方向^[11-13]。此外,还需要精确识别和科学客观地评估病害,并对受损隧道进行养护和补强,以延长隧道的使用寿命^[13]。《公路隧道加固技术规范》(JTGT5540—2018)汇总了我国现有维修加固技术,而该规范所采用的方法多沿用20世纪60、70年代的传统技术。综上,现有方法虽然在一定程度上解决了不少实际问题,但与低成本、高安全性、强稳定性和小破坏性的需求并不匹配。

鉴于此,笔者拟结合国内外病害隧道健康诊断及维修加固技术应用情况进行综述分析,系统梳理检测技术的优缺点,并分析总结健康诊断和补强措施,以期对隧道衬砌病害的处治研究提供借鉴。

1 运营隧道工程病害现状

隧道病害是指由于自然灾害、结构腐蚀老化等原因造成隧道使用功能受到影响或导致隧道无法满足承载功能^[14]。随着隧道运营时间的不断延长,各类病害日益增多,且其类型因地区、运营时长及运维情况不同而呈现多样性。随着隧道运营年限增长常出现衬砌裂损^[15]、拱顶空洞^[16]、渗漏水^[17]、围岩大变形^[18]、衬砌厚度不足^[19]及混凝土强度降低^[20]等问题。

我国运营铁路隧道因建设年代、技术标准及养护维修水平存在差异,部分隧道在建成时便存在质量缺陷^[21],导致总体健康状态欠佳。据1997年对隧道技术状态的不完全统计,我国正式运营的5 800座铁路隧道中,病害隧道达3 671座,占比为63.3%^[21]。据2014年中国铁路总公司运输局统计资料,全路共有隧道11 516座,其中,病害隧道5 990座,病害率高达52.4%。武广客运专线全线共有226座隧道,验收阶段发现隧道病害1 732处,在正式运营后1年内,21.24%的隧道开始受不同程度裂损病害影响^[22]。邹育麟等^[23]调研分析了重庆187座高速公路隧道渗漏水情况,发现有66座隧道发生渗漏,占比为33%,其中,浸渗、渗漏、渗水分别占渗漏水总数的42%、25%、33%,且渗漏水部位多发生在边墙。重庆市渝州隧道、李家花园隧道、鹅岭隧道、朝天门隧道、龙家湾隧道、黄沙溪隧道6座城市隧道均存在衬砌局部厚度不足、衬砌背后不密实等病害,同时,衬砌开裂和渗漏水也普遍存在^[23-25]。从病害统计情况可以看出,裂缝是隧道病害中最常见的表现形式,经常作为渗漏水、衬砌变形、剥落发育的前期表现,然而隧道病害类型复杂,4类隧道病害各自特征见表1。

表 1 基于结构健康状态的隧道病害与缺陷分类

Table 1 Classification of tunnel diseases and defects based on structural health status

衬砌病害类型	病害子类	描述
表面损伤	裂缝	衬砌的横向、纵向和环向裂缝,是其他病害的外在表现
	剥落	衬砌表面出现小面积剥落(表面砂浆或浅层混凝土剥落)、片状剥落(粗骨料外露、钢筋外露)及层状剥落(内部层状破坏导致大面积坍塌)
	渗漏水	隧道渗漏水(渗流、滴水、流水、涌水)、隧道衬砌周围积水及地下水流侵蚀
内部损伤	空洞	衬砌与围岩之间未进行回填且存在空洞,危险性与位置及规模相关
	钢筋锈蚀	混凝土碳化、氯离子侵蚀及潮湿环境将直接(暴露)或间接加速钢筋的化学反应,导致铁元素氧化
结构异化	衬砌变形	整体变形(垂直压扁、横向压扁);局部变形(拱顶下弯、仰拱上鼓、边墙内鼓、拱顶上翘、仰拱下弯、边墙外鼓)
	管片错位	在衬砌施工缝或变形缝处,相邻衬砌管片在环向(圆周方向)或纵向(隧道轴线方向)出现错台与不平整
材质劣化	混凝土老化退化	老化:随着时间推移,受水泥水化反应长期作用及环境因素影响,材料的物理力学性能逐渐出现不可逆的劣化 劣化:指材料性能因物理、化学、生物等因素单独或共同作用而发生的退化,具体表现为混凝土碳化及强度降低

2 运营隧道健康诊断研究进展

隧道病害直接削弱隧道使用性能,致使部分隧道偏离设计运行标准,亟待维修,这不仅耗费大量资金,同时缩短维护周期与使用寿命。对于存在病害的运营隧道,若不及时开展有效检测维修,将加剧衬砌结构损坏,甚至引发隧道坍塌、交通线中断等不良社会影响。

2.1 单一化、半自动化的病害识别技术

隧道结构复杂,检测难度大。传统隧道病害检测手段不仅效率低下、代表性不足、偶然性强,钻孔取心与压水测试等手段还会破坏衬砌整体性^[26]。随着科技发展,无损检测技术的应用有效改善了检测效能。这类检测技术除具备不损伤工程结构的特性外,还具有检测高效全面、结果定量可靠性强、数据图形直观等显著优势。目前,国内外主流的无损检测技术包括声波法、地质雷达法、激光扫描技术、摄影测量法、光学分析法及多种无损技术的综合应用等^[27-28]。

声波检测技术通过观测声波在衬砌内部传递时的速度、频率及振幅等声学参数,声波检测技术能够完成对衬砌混凝土内部缺陷、厚度及衬砌与围岩结合状况的检测工作。不过,其检测精度受介质特性波动影响显著,这在一定程度上限制了该技术在隧道衬砌无损检测领域的推广价值^[29]。地质雷达依托先进的连续扫描无损探伤技术,探测精度远超传统方法,不仅能提供连续的隧道探测数据,还可对衬

砌实际状况展开全方位检测^[30-31]。此后,伴随地质雷达数据采集与处理软件的持续迭代及硬件设备的更新换代,国内外专家学者通过室内试验模拟与工程实践相结合的方式,将探地雷达技术逐步推广应用于隧道衬砌病害检测领域。在隧道衬砌厚度检测、衬砌缺陷诊断,以及初期支护背后、初支与二衬间空洞的位置、深度、填充状态等方面,该技术已取得一系列显著成果^[25,32]。基于激光测距原理完成三维数据测量的激光扫描技术^[33],展现出扫描速度快、测量精度高(可达 0.2~0.3 mm)的突出优势,能在获取三维空间数据的同时同步生成三维图像^[34-35]。该技术的检测精度水平受点云密度、检测移动速度、地面基站布设等因素共同影响,借助该技术能够快速完成隧道三维变形、支护侵限及二衬厚度评估等工作^[33]。该检测技术不受外界光源限制,但采集过程需要不断移动设备,采集信息数据量大,后期处理任务重。光学分析法主要分为多光谱分析法与红外线温度记录法 2 类,其检测速度快,对空洞及局部潮湿的探查能力较强,能够识别细微的干燥裂缝。

目前,上述隧道衬砌病害检测技术虽已趋于成熟,但多以单一化、半自动化模式为主,普遍存在检测效率偏低、劳动强度大、安全风险较高等问题,且对从业人员的专业技能有一定要求。随着我国公路交通事业的快速发展,这类技术已愈发难以适配检测需求。因此,构建高效、自动化、智能化、集成化的隧道衬砌健康检测系统,成为解决这一问题的关键路径与必然方向。

2.2 隧道衬砌病害自动检测新技术

伴随无损检测技术的成熟落地,国内外已推动相关科研成果实现产业化,多款隧道衬砌病害自动检测系统已得到成功应用。针对隧道衬砌的内外部病害问题,这类自动检测系统多依托“摄影测量+地质雷达+三维激光”的集成化自动检测技术,实现对隧道结构病害的快速排查。

自动检测技术发展的初期,更多侧重于衬砌表面病害的检测,以构建摄影测量或三维激光检测系统为主。日本、韩国、西班牙等国家基于摄影测量的自动检测技术开展了大量研发工作^[36-37]。UKAI^[38]采用电荷耦合器件相机 (Charge-Coupled Device Camera, CCD) 的摄影测量成功检测到隧道墙体变形,此后并研制出相应的检测设备,检测速度为 10~30 km/h,检测精度约为 0.8 mm。日本检查测量株式会社研发的隧道裂缝检测系统^[39]采用线阵 CCD 可见光成像技术,可检测隧道表面平整度、龟裂、渗漏水等衬砌表面病害,该系统检测速度为 5~50 km/h,能够实时存储数据并转化为静止图像,但该设备需要安装隧道照明工具,数据处理简单,病害需要人工识读标注。LEE 等^[40]采用线阵 CCD,开发出针对混凝土裂缝移动式检测系统,系统采集部分包括视觉系统、机械系统和数字存储系统 3 部分,检测速度为 5 km/h,可检测出 0.3 mm 以上的衬砌裂缝。黄宏伟等^[9]研制出地铁隧道结构病害检测设备,时速 3~5 km/h,利用 6 台 CCD 可实现衬砌裂缝、渗漏水、掉块等病害信息的识别与位置记录。基于三维激光扫描检测技术方面,隧道扫描检测系统通常集成隧道扫描仪、红外热成像和线阵相机可检

测衬砌表面开裂及结构变形。TunnelScan 隧道表面检测系统基于三维激光扫描仪实现隧道表面高密度扫描,集成了数据采集、处理与分析功能。作为定站式扫描设备,可识别 0.2 mm 宽度的裂缝,但检测效率偏低,单站耗时 3~8 min,同时,受限于定站设计,该设备无法进行移动和连续测量。

地质雷达、激光测振等内部结构病害检测系统,其构成一般包含硬件与软件 2 大系统。硬件层面涵盖检测设备的搭载平台、图像采集系统、存储系统及各类辅助设备,软件层面包含数据处理系统、病害信息分析系统等核心模块,图 1 为几种综合性的隧道病害检测车^[33]。混凝土衬砌检测车 (Concrete Lining Inspection Car, CLIC) 已更新到第 4 代,通过搭载电磁雷达可实现衬砌内部空洞的检测。MIMM-R 系统通过搭载的高精度激光扫描仪、20 台相机和非接触式雷达,检测衬砌变形、表面病害和内部病害 (如衬砌厚度不足、空洞),并通过 3D 可视化直观表示病害^[41]。ZOYON-隧道快速检测系统 (Tunnel Fast Detection System, TFS) 可以 80 km/h 的速度快速检测表面病害,其核心模块是由高分辨率 CCD、移动式激光扫描仪和照明阵列组成,同时,新型的轻量级卷积神经网络裂缝分割网络可高效地检测裂缝^[42]。王百泉等^[13]研发的隧道结构智能综合检测装备可实现衬砌厚度、背后空洞、钢拱架分布、裂缝破损、渗漏水、隧道断面、管片错台等信息非接触式高效检测,综合作业效率可达 10~40 km/h,配备的多通道空气耦合探地雷达非接触距离可达 0.5~4.5 m。

综合现有研究来看,在隧道衬砌病害健康诊断

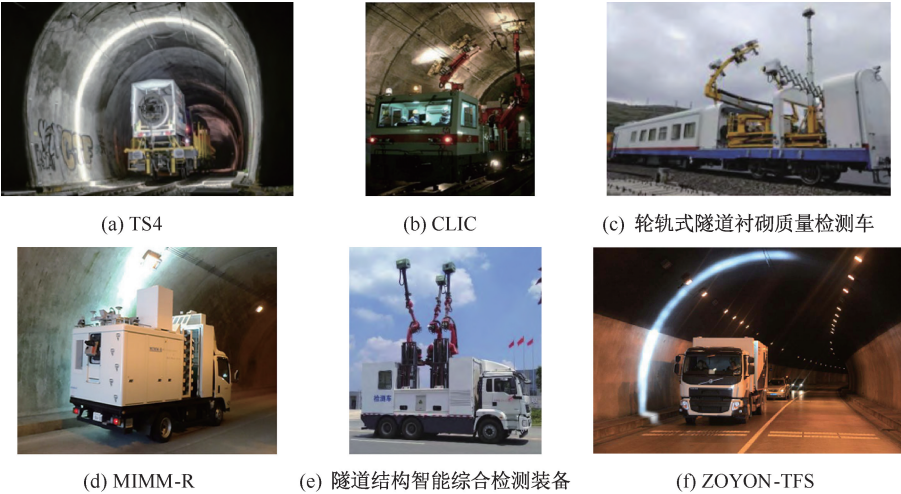


图 1 自动化隧道检测装备^[4,33,42-43]

Fig. 1 Automated tunnel inspection equipment

领域,国内外虽已开发出多种集成化检测系统,但受技术瓶颈制约仍存在明显不足。其中,突出问题在于,多数检测车仅能针对特定病害开展检测,检测指标较为单一。基于此,能够实现多种病害同步检测的综合性集成式检测车,在实际应用中便显现出独特的优势。然而,集成式病害检测车涉及高精度的检测装备、传感器、元器件种类复杂,结构设计、参数校对、空间及时域信息对齐等问题繁琐,会影响到设备整体的智能化控制。

2.3 病害信息量化提取

人工进行病害信息测量时往往存在不可避免的人工测量误差。数字图像处理通常与深度学习结合使用,进行病害信息的量化提取,规避人工测量造成的误差,检测结果更加客观^[43]。这一过程是后处理检测结果,包括病害特征的优化和量化。病害检测算法中一直存在误检和漏检问题,导致将非病害区域识别为病害区域。通过优化特征恢复实际结构,目的是定量提取实际疾病信息。CHEN Wang 等^[30]通过形态学封闭操作还原断口形态和真实裂纹信息的过程。

2.4 病害隧道评估方法

目前,病害评估方法可概括为综合性评估模型和单一性病害评估方法 2 类。

隧道综合评价方法一般以数学模型作为根基,选取隧道现场病害作为评价指标,以此评估隧道整体病害程度。由于病害种类繁杂,描述病害的参数众多,基于模糊数学的多层次模糊综合评价模型成为当前研究的主流方向。然而,这种模式存在 2 个关键问题:①所选指标能否客观、科学地描述病害严重程度,这是一个较为复杂的问题。因为不仅要考虑指标之间的相关性与独立性,如裂缝的长度、宽度和面积之间的关系,还要考虑指标的可测性与方便性,像渗漏水的酸碱度、钢筋的锈蚀断面等。而且,测量不合适的指标往往会耗费大量精力。②指标权重与部分指标评价中掺杂了大量主观因素。这类评价往往依赖观察者的经验,从而夹杂了诸多主观判断。为解决这些问题,研究人员引入聚类分析法、熵权法、主成分分析法、变异系数法等,以此确定客观权重。神经网络的兴起在一定程度上契合了解决这一问题的需求,然而原始数据中的主观因素仍难以避免。值得一提的是,上述关于无损检测的设备方法,能直接由机器输出检测结果,在一定程度上逐步解决了此类问题。

在单一病种的评价中,更注重裂纹病等级的研究。裂缝是各种病害的外在表现和内在联系,因此,对裂缝的评价具有代表性。SHIGETA 等^[44]提出的隧道衬砌裂缝指数(Tunnel Crack Index, TCI)是一种具有代表性的评价方法,它涵盖裂缝的长度、宽度、面积、空间分布和发展方向,能全面描述裂缝对衬砌的影响。TCI 是一种不依赖工程经验的客观评价方法,在日本隧道健康检测中得到广泛应用。不过,应该指出的是,TCI 方法并非没有自身的局限性。该方法没有考虑裂纹深度的影响,它不适合评估多分支结构、网络结构和交叉裂缝。因此,裂缝的复杂性是以拓扑分形维度为特征。蒋宇静等^[8]通过对比 TCI 和分形维数 D 的数据,发现二者之间存在一定的相关性,并给出二者之间的经验计算公式,TCI 和分形维数 D 之间呈现非线性的正相关关系。日本高速公路株式会社制定的《隧道保全点检要领》中关于裂缝病害量化计算是基于 TCI 开展的,并在隧道定期检查中广泛使用。

3 运维隧道维修加固技术现状

我国隧道建设进程虽然迅猛推进,但运营阶段的病害问题也愈发凸显,如衬砌裂损、结构变形、渗漏水及仰拱变形等问题,对于劣化严重区间需进行维修加固方可保障其正常运营。合理的维修补强既能增强既有结构稳定性,又能延缓其稳定性衰减进程,进而延长使用寿命。基于功能差异,这类工作主要划分为修补工程与结构补强 2 大类别。针对当前隧道各类病害,工程中采用的维修加固手段具体包括:衬砌结构加固、衬砌裂缝处治与表面缺陷修补、注浆加固、换拱加固、隧底加固、洞口加固,以及特殊地段隧道加固等。粘贴钢板属于衬砌结构加固,是较为传统的加固方式,粘结钢板进行加固是防止隧道管片裂缝进一步扩大和整体变形的有效措施,通常是在开裂的管环使用环氧树脂进行临时性加固,再使用钢板加固变形区域作为永久加固措施,根据管环损伤情况又分为整环加固和半环加固^[45],如图 2 所示。除此之外,使用钢拱架、套拱、锚杆、喷射混凝土等都属于结构加固方式。此外,对于衬砌内部空洞与围岩相互作用形成的衬砌损伤,常采用水泥砂浆灌注到损伤区域对病害修补。

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)展现出质量轻且强度高,耐腐蚀性强,抗老化性能优异,耐久性良好,同时物理性能稳定可靠等一系列突出特性。伴随技术的持续演进,该技术的应

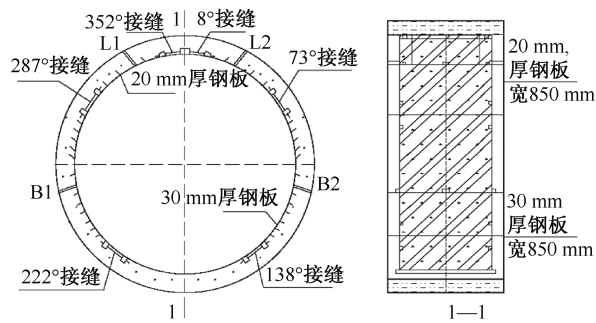


图2 环形钢板加固方式^[45]

Fig. 2 Ring steel plate reinforcement method

用场景已从最初以工业及民用建筑加固修复为主,逐步拓展至桥梁、隧道、水利工程乃至其他特种结构的加固修复领域^[7-8]。在我国,20世纪90年代末才开始涉足FRP网格加固修复土木结构领域,图3为基于FRP进行隧道加固的施工过程^[46]。实际工程应用表明:FRP修复补强技术相较于传统加固方案展现出诸多显著优势,施工简便高效,不会额外增加结构荷载,适应范围广,支持多层粘贴施工,补强成效显著,对结构外观无显著影响,且耐久性优异。近年来在服役隧道工程中也开展了一定的研究,蒋宇静等^[47]通过有限差分原理建立的含隧道衬砌背后空洞缺陷的模型,探究FRP网格设计类型与衬砌健全度等3项设计参数的相关性影响,分析了FRP网格补强方法对运营隧道衬砌的加固效果;韩伟等^[48]基于M-N性能曲线对FRP网格补强方法,量化评估了隧道衬砌加固的效果,开展了纤维编织网增强混凝土加固隧道相似模拟试验,并开展了加固参数优化分析,揭示了纤维编织网价;刘德军等^[49]通过有限元分析方法和相似模型试验增强了混凝土控制隧道衬砌变形机制。

德国在1986年杜塞尔多夫建立的Ulenberg Strass大桥是第1座采用玻璃纤维筋建造的预应力混凝土公路桥,并且在1991年的路德希维港使用碳FRP(Carbon FRP, CFRP)筋束建立长80 m的预应力混凝土桥梁。在实际加固过程中,FRP材料价格相较于传统加固方法更贵,不适合大规模使用,可用于局部小规模损伤的维修加固^[50]。FRP加固对粘结剂要求较高,FRP网格与衬砌混凝土粘结界面已发生剥离,通常增设机械锚固辅助粘结。此外,FRP网格材料在高温火灾场景下会导致加固结构失效。

4 研究不足与展望

目前,隧道基础设施健康诊断与维修加固技术



图3 FRP网格结构隧道加固过程^[47]

Fig. 3 Reinforcement process of FRP grid structure tunnels

已经在检测装备、评估模型、维修技术等方面取得了一定的研究成果,研究中仍然存在以下几点不足:

1) 检测技术局限性显著。现有单一化、半自动化检测技术效率低、劳动强度大,对人员专业技能依赖强;集成化自动检测系统多针对特定病害,检测指标单一,且因涉及高精度装备、多传感器,存在结构设计复杂、参数校对困难、时空信息对齐繁琐等问题,影响智能化控制水平。

2) 病害识别与量化精度不足。病害检测算法存在误检、漏检问题,易将非病害区域误判;数字图像处理与深度学习结合时,特征优化和量化仍需提升,难以精准还原复杂病害的真实信息。

3) 评估方法存在缺陷。综合性评估模型的指标选择科学性不足,指标权重与评价值掺杂主观因素;单一病害评估未考虑裂缝深度,无法适配多分支、网络状及交叉裂缝等复杂场景。

4) 维修加固技术适配性差。沿用的传统加固技术与低成本、高安全性、强稳定性需求不匹配;FRP材料成本高,不适合大规模应用,且对粘结剂要求高、易剥离,高温下易失效。

综上所述,未来研究可朝着更智能、系统、长效的方向推进。在检测层面,推动多技术融合的智能装备发展,强化复杂环境下的综合感知与深层病害识别能力,突破表层检测局限;在评估层面,构建动态多元的评价体系,结合新兴技术实现对多病害耦合效应的系统解析,从单一病害评判升级为全面风险预警;在技术应用层面,深化病害与结构性能关联的机制研究,整合监测与智能分析技术,形成从病害识别到寿命预测的全流程支撑体系,助力预防性养护;在加固领域,聚焦材料与环境的适配性研究,

推动加固技术向低成本、高耐久、智能化转型,以更好地应对隧道运维中的复杂挑战。

5 结 论

- 1) 开发多传感器融合的智能检测装备,集成光学、声学与电磁传感技术,有助于提升复杂环境下的数据采集稳定性;结合人工智能驱动的信号解析算法,增强对深层隐蔽病害的识别精度,可实现病害检测从“表层识别”向“立体诊断”的跨越。
- 2) 建立融合多源指标的动态量化评价体系,动态分配病害权重,结合 BIM-数字孪生技术构建多病害耦合效应仿真平台,可实现从单一病害评级到系统风险预警的升级,为养护决策提供科学依据。
- 3) 基于损伤力学建立病害几何参数与衬砌力

学性能的映射模型;开发结构安全性能退化预测算法,集成监测数据与机器学习,能够实现病害量化-安全评估-寿命预测的全链条分析,支撑预防性养护策略制定。

- 4) 开展 FRP-混凝土界面在湿热、冻融循环下的耐久性试验,建立环境适应性设计规范,有助于降低复杂病害修复难度与成本,推动加固技术向智能化、长效化发展。
- 5) 未来研究需以技术协同创新为核心,通过智能化检测装备研发突破深层病害识别局限,借助动态量化评价体系提升评估科学性,依托新材料与机制研究增强加固技术长效性,最终构建从精准健康诊断到高效修复的全链条技术体系,为隧道安全运维提供更系统的理论与技术支撑。

参 考 文 献

[1] YANG Rui, KONG Qian, REN Meng, et al. Statistical and numerical analysis on characteristics and influence factors of construction cracks of large-diameter underwater shield tunnel: a case study[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: DOI:10.3389/feart.2023.1235674.

[2] LIU Dejun, SHANG Qi, LI Meng, et al. Cracking behaviour of tunnel lining under bias pressure strengthened using FRP Grid-PCM method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 123: DOI:10.1016/j.tust.2022.104436.

[3] 2024 年 11 月份城市轨道交通运营数据速报[OL]. (2024-12-09). <http://www.rail-metro.com/index.php?a=show&c=content&id=26572>.

[4] JTG D70—2010,公路隧道设计规范[S].
JTG D70-2010,Specifications for design of highway tunnels[S].

[5] 丁浩,邓实强,刘帅,等. 公路隧道运营韧性研究进展[J]. *隧道建设:中英文*, 2024, 44(9): 1 723-1 735.
DING Hao, DENG Shiqiang, LIU Shuai, et al. Advances in operation resilience of highway tunnels[J]. *Tunnel Construction*, 2024, 44(9): 1 723-1 735.

[6] 谢全敏,马伟,杨文东. 公路隧道结构健康自监测系统设计与实施[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(7): 56-62.
XIE Quanmin, MA Wei, YANG Wendong. Design and implementation of SHM system for highway tunnels[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(7): 56-62.

[7] 许学良,马伟斌,蔡德钧,等. 铁路隧道检测与监测技术的现状及发展趋势[J]. *铁道建筑*, 2018, 58(1): 14-19.
XU Xueliang, MA Weibin, CAI Degou, et al. Current state and development trend of detection and monitoring techniques for railway tunnel[J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(1): 14-19.

[8] 蒋宇静,张学朋. 隧道衬砌自动化检测及健康评价技术研究[J]. *隧道建设:中英文*, 2021, 41(3): 341-348.
JIANG Yujing, ZHANG Xuepeng. Research on automatic detection and health assessment of tunnel lining[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(3): 341-348.

[9] HUANG Hongwei, SUN Yan, XUE Yadong, et al. Inspection equipment study for subway tunnel defects by grey-scale image processing[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2017, 32: 188-201.

[10] HUANG Hongwei, LI Qingtong, ZHANG Dongming. Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 77: 166-176.

[11] YU Seungnam, JANG Jaeho, HAN Changsoo. Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel[J]. *Automation in Construction*, 2007, 16(3): 255-261.

- [12] JIANG Yandan, WANG Lai, ZHANG Bo, et al. Tunnel lining detection and retrofitting[J]. Automation in Construction, 2023, 152: DOI:10.1016/j.autcon.2023.104881.
- [13] 王百泉, 陈海军, 郭璐, 等. 隧道结构智能综合检测装备研制与应用[J]. 隧道建设:中英文, 2024, 44(增1): 467-477.
WANG Baiquan, CHEN Haijun, GUO Lu, et al. Development and application of tunnel structure intelligent comprehensive inspection equipment[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(S1): 467-477.
- [14] 李利平, 成帅, 张延欢, 等. 地下工程安全建设面临的机遇与挑战[J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2020, 39(4): 1-13.
LI Liping, CHENG Shuai, ZHANG Yanhuan, et al. Opportunities and challenges of construction safety in underground engineering projects[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2020, 39(4): 1-13.
- [15] 董飞, 房倩, 张顶立, 等. 北京地铁运营隧道病害状态分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 104-113.
DONG Fei, FANG Qian, ZHANG Dingli, et al. Analysis on defects of operational metro tunnels in Beijing[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 104-113.
- [16] 聂子云, 张春雷, 李凤翔. 衬砌背后空洞对隧道抗震性能影响分析[J]. 地震工程学报, 2015, 37(1): 138-143.
NIE Ziyun, ZHANG Chunlei, LI Fengxiang. Effect of void behind lining on seismic performance of tunnel[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 138-143.
- [17] DING Wenqi, GONG Chenjie, MOSALAM K M, et al. Development and application of the integrated sealant test apparatus for sealing gaskets in tunnel segmental joints[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 54-68.
- [18] KAVVADAS M J. Monitoring ground deformation in tunnelling: current practice in transportation tunnels[J]. Engineering Geology, 2005, 79(1/2): 93-113.
- [19] ZHANG Xu, SU Jie, XU Youjun, et al. Experimental and numerical investigation the effects of insufficient concrete thickness on the damage behaviour of multi-arch tunnels[J]. Structures, 2021, 33: 2 628-2 638.
- [20] YANG Fanjie, ZHANG Chuanqing, ZHOU Hui, et al. The long-term safety of a deeply buried soft rock tunnel lining under inside-to-outside seepage conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 67: 132-146.
- [21] 刘鹏, 赵程. 咸水环境下泥水盾构泥浆配比试验研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2021, 40(3): 50-57.
LIU Peng, ZHAO Cheng. Experimental study on slurry mixing proportion in salt water by slurry shield[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2021, 40(3): 50-57.
- [22] 王正安, 肖洪天, 闫强刚. 地面列车动荷载对下穿隧道影响的动力学响应分析[J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2016, 35(3): 67-72.
WANG Zheng'an, XIAO Hongtian, YAN Qianggang. Analysis of dynamic response of undercrossing tunnels to vibration loads of ground trains[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2016, 35(3): 67-72.
- [23] 邹育麟, 何川, 周艺, 等. 重庆高速公路现役营运隧道渗漏水病害统计及成因分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(1): 86-93.
ZOU Yulin, HE Chuan, ZHOU Yi, et al. Statistics and cause analysis of leakage diseases in operating expressway tunnels in Chongqing[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(1): 86-93.
- [24] 陈洪凯, 李明. 公路隧道健康研究现状与趋势[J]. 公路, 2005, 50(12): 203-208.
- [25] LALAGUE A, LEBENS M A, HOFF I, et al. Detection of rockfall on a tunnel concrete lining with ground-penetrating radar (GPR)[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(7): 2 811-2 823.
- [26] 刘海京, 夏才初, 朱合华, 等. 隧道病害研究现状与进展[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 47-953.
LIU Haijing, XIA Caichu, ZHU Hehua, et al. Studies on tunnel damage[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 947-953.
- [27] WANG You, LI Guowei, ZHOU Lu, et al. Optimization of tunnel grouting detection technology based on ultrasonic phased array[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(8): DOI:10.1088/1361-6501/ad3f37.
- [28] ZHANG Xuepeng, LI Bo, JIANG Yujing, et al. Ambient vibration-based quantitative assessment on tunnel lining defect

- using laser Doppler vibrometer[J]. Measurement, 2025, 235: DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115481.
- [29] WU Hangbin, AO Xingran, CHEN Zhuo, et al. Concrete spalling detection for metro tunnel from point cloud based on roughness descriptor[J]. Journal of Sensors, 2019, 2019(1): DOI:10.1155/2019/8574750.
- [30] WANG Jinchao, WANG Chanying, HAN Zengqiang, et al. Study of hidden structure detection for tunnel surrounding rock with pulse reflection method[J]. Measurement, 2020, 159: DOI:10.1016/j.measurement.2020.107791.
- [31] CHEN Wang, HE Zhili, ZHANG Jian. Online monitoring of crack dynamic development using attention-based deep networks[J]. Automation in Construction, 2023, 154: DOI:10.1016/j.autcon.2023.105022.
- [32] 朱兆荣, 赵守全, 秦欣, 等. 探地雷达隧道衬砌空洞探测效果模型和现场实体试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增 1): 132–137.
- ZHU Zhaorong, ZHAO Shouquan, QIN Xin, et al. Model and field tests on detection effects of tunnel lining cavity by GPR[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S1): 132–137.
- [33] 王勇, 安哲立, 马伟斌, 等. 中日韩运营铁路隧道检测技术现状及发展趋势[J]. 隧道建设:中英文, 2022, 42(7): 1 135–1 145.
- WANG Yong, AN Zheli, MA Weibin, et al. State-of-art and development trend of tunnel inspection technology in China, Japan, and South Korea[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(7): 1 135–1 145.
- [34] LIU Chi, LIU Yuhang, CHEN Yuhua, et al. A state-of-the-practice review of three-dimensional laser scanning technology for tunnel distress monitoring[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2023, 37(2): DOI: 10.1061/JPCFEV.CFENG-4205.
- [35] 李宗平, 张永涛, 杨钊, 等. 三维激光扫描技术在隧道变形与断面检测中的应用研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 336–341.
- LI Zongping, ZHANG Yongtao, YANG Zhao, et al. Application of 3D laser scanning technology to tunnel deformation monitoring and cross-section detection[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(3): 336–341.
- [36] AFSHANI A, KAWAKAMI K, KONISHI S, et al. Study of infrared thermal application for detecting defects within tunnel lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 186–197.
- [37] HUANG Zhen, FU Helin, FAN Xiaodong, et al. Rapid surface damage detection equipment for subway tunnels based on machine vision system[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2021, 27(1): DOI:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000591.
- [38] UKAI M. Advanced inspection system of tunnel wall deformation using image processing[J]. Quarterly Report of RTRI, 2007, 48(2): 94–98.
- [39] 王广琦, 毛庆洲, 徐浩轩, 等. 基于时空同步信息的隧道点云与高清图像配准方法[J]. 测绘通报, 2021(增 2): 52–58.
- WANG Guangqi, MAO Qingzhou, XU Haoxuan, et al. A tunnel point cloud and high-definition image registration method based on spatio-temporal synchronization information[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(S2): 52–58.
- [40] LEE S Y, LEE S H, SHIN D I, et al. Development of an inspection system for cracks in a concrete tunnel lining[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34(8): 966–975.
- [41] YASUDA T, YAMAMOTO H, ENOMOTO M, et al. Smart tunnel inspection and assessment using mobile inspection vehicle, non-contact radar and AI[C]. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. IAARC Publications, 2020: 1 373–1 379.
- [42] LIAO Jianghai, YUE Yuanhao, ZHANG Dejin, et al. Automatic tunnel crack inspection using an efficient mobile imaging module and a lightweight CNN[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 15 190–15 203.
- [43] SHIGETA Y, TOBNITA T, KAMEMURA K, et al. Propose of tunnel crack index (TCI) as an evaluation method for lining concrete[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu, 2006, 62(4): 628–632.
- [44] PAN Zhutian, ZHANG Xuepeng, JIANG Yujing, et al. High-precision segmentation and quantification of tunnel lining crack using an improved DeepLabV3+[J]. Underground Space, 2025, 22: 96–109.
- [45] 周明文, 李文俊, 孙翰卿. 运营地铁隧道的内钢圈加固技术研究[J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(11): 62–65, 109.
- ZHOU Mingwen, LI Wenjun, SUN Hanqing. Steel rings reinforcement technology in operating subway tunnels[J].

- Guangdong Architecture Civil Engineering, 2024, 31(11): 62-65, 109.
- [46] HAN Wei, JIANG Yujing, LI Ningbo, et al. Failure behavior and reinforcing design of degraded tunnel linings based on the three-dimensional numerical evaluation[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129: DOI:10.1016/j.engfailanal.2021.105677.
- [47] 蒋宇静, 张学朋. 纤维增强聚合物水泥砂浆基复合材料在运营隧道衬砌中加固效果评价[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(1): 11-19.
- JIANG Yujing, ZHANG Xuepeng. Evaluation of reinforcement effect of FRP-PCM method in tunnel lining[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(1): 11-19.
- [48] HAN Wei, JIANG Yujing, ZHANG Xuepeng, et al. Quantitative assessment on the reinforcing behavior of the CFRP-PCM method on tunnel linings[J]. Geomechanics and Engineering, 2021, 25(2): 123-134.
- [49] 刘德军, 黄宏伟, 左建平, 等. 盾构隧道管片横向大变形 TRC 控制方法及作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1 889-1 898.
- LIU Dejun, HUANG Hongwei, ZUO Jianping, et al. Control method and mechanism of large transverse deformation of shield segment using TRC[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1 889-1 898.
- [50] 高可为, 陈小兵, 丁一, 等. 纤维增强复合材料在新建结构中的发展及应用[J]. 工业建筑, 2016, 46(4): 98-103, 113.
- GAO Kewei, CHEN Xiaobing, DING Yi, et al. The development and application of FRP in new structures[J]. Industrial Construction, 2016, 46(4): 98-103, 113.



作者简介： 蒋宇静（1962—）,男,江苏靖江人,博士,教授,日本工程院外籍院士,主要从事矿山及地下工程灾害防控理论与技术方面的研究。E-mail: jiang@nagasaki-u.ac.jp。