

文章编号: 1674—8247(2020)06—0074—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.06.014

铁路隧道衬砌致灾病害的综合检测方法探讨

李 星 王树栋 牟元存

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:铁路隧道检测是铁路隧道病害治理不可缺失的环节,能否高效、准确地检测出隧道各构件的病害决定了隧道整治的完成率和有效性,同时也决定了隧道的运营风险。本文从已有检测手段的优缺点及适用性出发,提出了一套适用隧道不同病害类型的综合检测方法,能够有针对性地对不同情况的隧道进行高效经济的病害检测,为隧道病害整治提供有力依据。

关键词:铁路;隧道;病害;衬砌;综合检测;整治

中图分类号:U457

文献标志码:A

Discussion on Comprehensive Detection Method of Disaster-causing Diseases of Railway Tunnel Lining

LI Xing WANG Shudong MU Yuancun

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Railway tunnel inspection is an indispensable link in the treatment of railway tunnel diseases. Whether the diseases of tunnel components can be detected efficiently and accurately will determine the completion rate and effectiveness of tunnel treatment, and also determine the operational risks of the tunnel. Based on the advantages, disadvantages and applicability of existing detection methods, this paper puts forward a set of comprehensive detection methods applicable to different types of tunnel diseases, which can effectively and economically

Key words: railway; tunnel; diseases; lining; comprehensive detection; treatment

近年来,我国每年建成的铁路隧道数量呈快速增长趋势。据统计,至2018年底,我国已建成运营的铁路隧道有15 117座,其中高速铁路隧道3 000余座^[1-2]。随着大量铁路隧道的开通运营,铁路隧道灾害的发生数量也不可避免地逐渐增多,铁路隧道的运营防灾问题越来越受到社会各界的高度关注和重视。隧道灾害发生后,若不能及时准确地对灾后隧道进行病害调查,则极有可能在恢复运营后产生更加严重的二次灾害。因此,对铁路隧道进行病害调查、检测及整治是灾后恢复运营前必不可少的工作。

1 铁路隧道运营期病害统计

由于在环境及结构上的特殊性,铁路隧道一旦发生事故,后果可能相当严重。文献[3]收集了80余起国内外铁路隧道运营期的事故案例。其中发生灾害较多的国家及地区有中国(24例)、英国(15例)、日本(10例)、法国(5例)、英法海峡隧道(7例)等。发生灾害的主要类型有火灾(43例)、列车脱轨(15例)、列车碰撞(9例)、列车停车(7例)、隧道衬砌混凝土剥落(6例)、炸弹爆炸(2例)、设施脱落(1例)等。这些

收稿日期:2020-02-01

作者简介:李星(1988-),男,工程师。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0802207-2)

引文格式:李星,王树栋,牟元存.铁路隧道衬砌致灾病害的综合检测方法探讨[J].高速铁路技术,2020,11(6):74-79.

LI Xing, WANG Shudong, MU Yuancun. Discussion on Comprehensive Detection Method of Disaster-causing Diseases of Railway Tunnel Lining [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6):74-79.

灾害事故共造成 1 086人死亡、2 357人受伤,导致行车中断 14 396 h,造成的经济损失更是无法估量。

隧道火灾、列车脱轨、列车碰撞、衬砌剥落及设施脱落为目前铁路隧道运营过程中需防范的重点^[4]。同时,隧道灾害会对铁路隧道衬砌、道床、轨道及其他附属设施造成损坏,包括衬砌脱落、衬砌强度下降、衬砌裂缝、道床及轨道损坏、附属设施损坏等。

隧道内既有隐伏病害是造成铁路隧道灾害发生的重要因素。分析我国近年来运营隧道发生的衬砌剥落事件可知,隧道衬砌剥落处往往存在衬砌厚度不足、衬砌背后脱空等衬砌施工质量缺陷。随着时间的推移,这些施工时遗留下的隐伏病害最终可能导致隧道衬砌结构失稳破坏,造成运营期的隧道灾害。

2 铁路隧道的病害检测与评估

地震、水害、火灾等常见灾害造成的隧道结构表观损伤主要有净空侵限、开裂、渗漏水、掉块等,内在损伤主要有结构混凝土强度降低、背后脱空、钢架扭曲变形等。针对灾后隧道结构出现的损伤,必须建立表观与物探相结合的快速检测方法和健康状态的检测快速评估体系,才能及时、合理地确定灾后隧道结构的修复和整治措施。铁路隧道的灾害检测方法,按检测原理的不同可分为物探检测方法和非物探检测方法,按对检测对象损害与否可分为无损检测方法和破损性检测方法。不同的检测方法有各自不同的优缺点与适用性,在灾害检测中利用多种检测方法进行综合检测,才能彻底调查清楚铁路隧道内的灾害分布,为隧道整治提供有效依据。

2.1 物探法检测

2.1.1 地质雷达法

地质雷达法是通过发射高频电磁波,检测反射回来的信号来判断隧道衬砌质量的一种普遍使用的隧道衬砌缺陷检测方法。经过多年的发展,已成为了成熟、便捷的衬砌检测方法。地质雷达法检测设备一般由主机、连接线及天线组成,检测时仅需将天线紧贴衬砌表面沿检测测线方向移动即可。利用地质雷达对隧道衬砌进行检测,可调查隧道衬砌及仰拱的密实情况、空洞分布、厚度及钢筋分布等参数^[5]。

(1) 地质雷达对隧道混凝土密实度的检测

浇筑隧道混凝土构件时,必须对混凝土进行振捣,消除混凝土中的气泡,提高其密实度。若混凝土振捣不到位或混凝土中掺杂了其他杂质、异物,则会导致隧道混凝土不密实,此时雷达剖面上会出现不规则的强

反射,如图 1 所示。

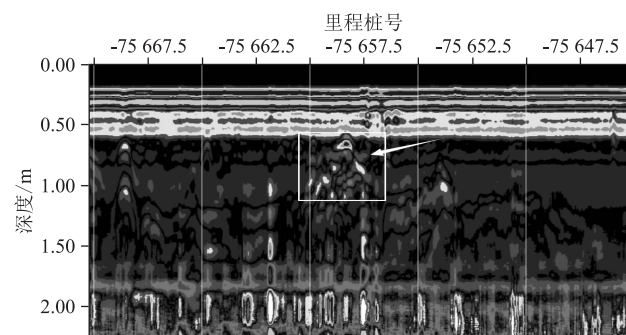


图 1 混凝土内不密实缺陷的雷达剖面图

(2) 地质雷达对隧道衬砌空洞的检测

隧道施工过程中,若拱顶混凝土浇筑未灌满或衬砌背后回填注浆不到位,则极易造成隧道衬砌混凝土出现脱空或空洞。此时雷达剖面会出现明显的强反射信号,三振相(瞬时相位\频率\振幅)明显发生变化,如图 2 所示。

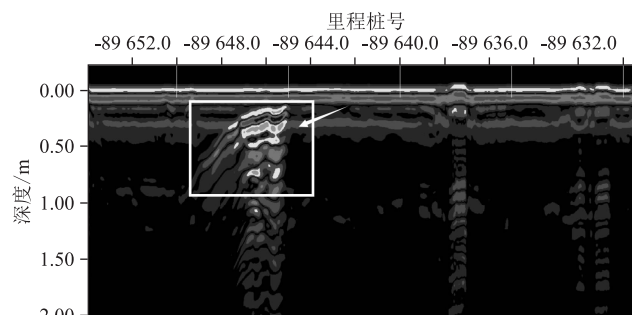


图 2 混凝土中脱空的典型雷达剖面图

需要注意的是,当衬砌内部的钢筋背后存在脱空时,脱空在雷达剖面中的反射会被钢筋层的反射严重干扰(如图 3 所示)。此时仅能从振幅强度与微弱的反射界面来辨识脱空的存在,且很难定量判定。

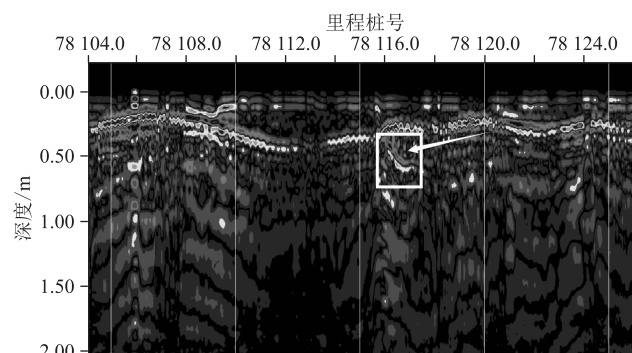


图 3 钢筋混凝土背后脱空的雷达剖面图

(3) 地质雷达对隧道钢筋、钢架分布的检测

衬砌内部钢筋的雷达响应判定特征为连续的小双曲线形反射信号。钢架的雷达响应判定特征为分散的月牙型强反射信号。根据以上的响应特征,可通过雷达检测剖面(如图4、图5所示)来判识钢筋与钢架的位置分布,有效检查施工中是否按照设计要求布设钢筋与钢架。

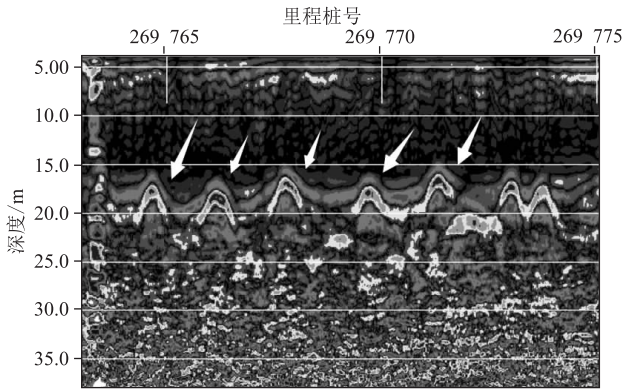


图4 钢拱架在雷达剖面中的响应图像

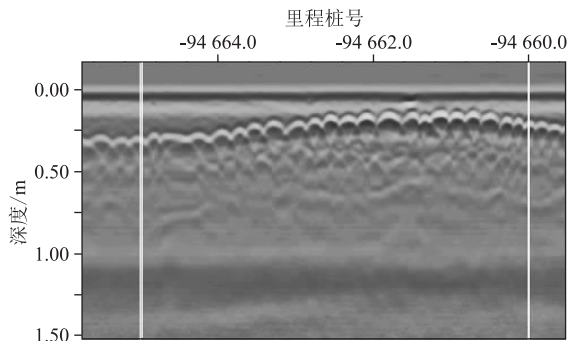


图5 钢筋在雷达剖面中的响应图像

(4)地质雷达对隧道衬砌厚度的检测

若隧道开挖过程中存在欠挖或未严格要求复测隧道初支净空侵限等情况,则会导致隧道衬砌厚度不满足设计厚度要求。此时,地质雷达检测剖面中的衬砌厚度会出现明显的减小(如图6所示)。

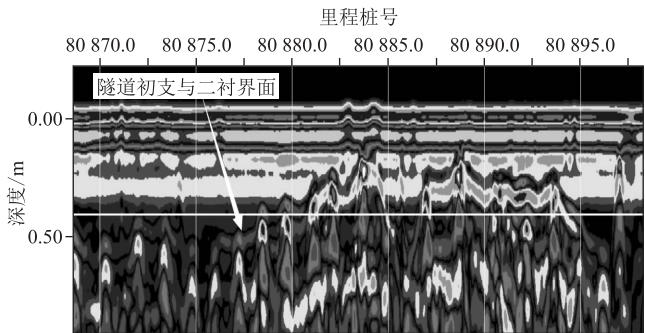


图6 隧道衬砌厚度不足的雷达剖面图

综上所述,利用地质雷达可检测隧道衬砌背后的

脱空、密实度、钢筋分布及衬砌厚度等参数,且该方法具有检测效率高、图像直观等优点,在隧道衬砌质量检测中被广泛应用,并有大量的成功案例。但由于地质雷达是一种使用电磁波探测的方法,因此钢筋屏蔽对雷达检测的结果影响较大,在钢筋混凝土衬砌中,雷达检测的分辨率会大幅下降,甚至基本无法精确定量解释判识。

2.1.2 回弹法

回弹法作为一种非破损简单便捷的测定混凝土强度的检测方法,被普遍应用于评价混凝土的抗压强度。该方法将设备内的重锤垂直弹向测试混凝土表面,通过测定重锤回弹距离来判定混凝土的强度。

回弹法仅能检测构件表面的抗压强度,并需有相同环境、相同条件下的对照数据库,当受试件表面碳化影响较大时,还需进行碳化深度修正。因此,回弹法检测混凝土抗压强度的精度较低,准确判定混凝土的抗压强度还需进行取芯试验。

2.1.3 冲击回波法

冲击回波法是在测试构件表面以冲击方式产生瞬态冲击弹性波,接收冲击弹性波型号,通过分析接收信号波速、波形和主频等参数的变化来判断混凝土构件的厚度或内部缺陷的方法。其检测原理如图7所示。

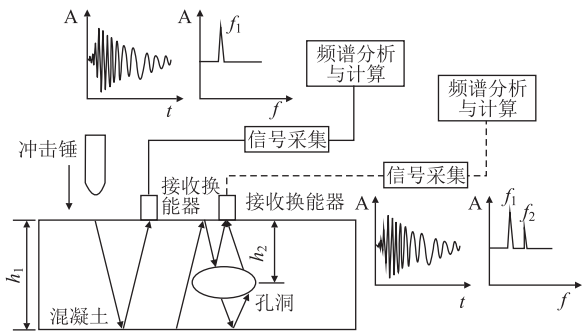


图7 冲击回波检测原理图

冲击回波在介质中传播,当遇到界面或缺陷时,弹性波的频率会发生改变,通过分析这种变化即可判定混凝土的厚度及内部缺陷情况。利用冲击回波法检测混凝土厚度与内部缺陷时,可分别根据实测频域曲线主频和主频漂移情况来判定。

(1)冲击回波法对混凝土厚度的检测

当测得的冲击回波频率峰值出现明显连续的低频漂移,并低于无缺陷构件的频率峰值时,可判定混凝土出现了欠厚现象(如图8所示),具体测试厚度可按式(1)计算。

$$T = \frac{v_p}{2f} \quad (1)$$

式中: T ——结构构件的厚度值(m);

v_p ——混凝土的表观波速(m/s);

F ——检测结果的频率波峰值(Hz)。

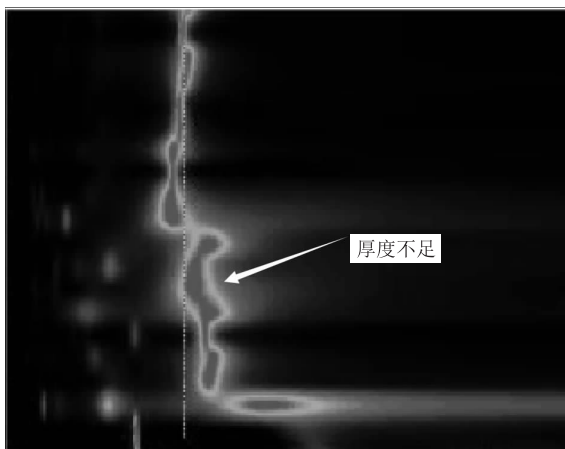


图8 混凝土厚度不足的冲击回拨检测结果图

(2) 冲击回波法对混凝土内部缺陷的检测

当测得的冲击回波频率峰值出现突然的低频突变或同时出现另一个高频峰值 f 时,可判定混凝土内部存在不密实、空洞等缺陷(如图9所示),具体缺陷情况可根据主频漂移的幅度进行判定。

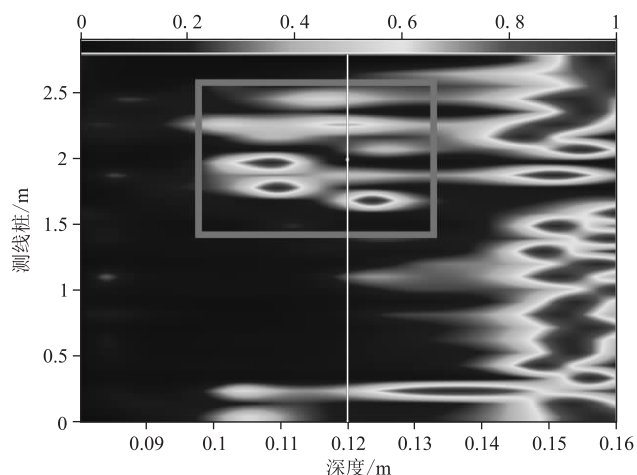


图9 混凝土内部缺陷的冲击回拨检测结果图

冲击回波法作为一种利用弹性波的无损检测方法,不受混凝土内部钢结构的影响,可有效弥补地质雷达法受钢筋屏蔽作用影响的缺陷。但由于其为频率域检测方法,分辨率和准确程度都不是很高,对于混凝土内部缺陷往往也只能定性判断,无法定量识识。

2.1.4 超声探测法

超声探测法是通过接收发射的超声脉冲,并接收

分析信号的声速、频率、波幅来判断混凝土内部缺陷的一种无损检测方法。超声法可检测混凝土内部的空洞、离析以及混凝土裂缝的深度。由于超声波频率较高,因此相较于其他无损检测方法,超声探测法的分辨率也较高,当接收波形、走时、振幅、频率出现明显的衰减时,即可判断缺陷的存在。

2.1.5 电磁感应钢筋探测法

电磁感应钢筋探测法是通过向混凝土内部发射电磁波,通过设备接收钢筋产生的二次感应磁场,分析感应磁场的脉冲强度来判断混凝土中钢筋位置及保护层厚度的一种检测方法。通过钢筋检测仪在构件表面扫描,可直接读取构件内部的钢筋位置、直径和钢筋保护层厚度。

电磁感应钢筋探测法的分辨率较高,误差一般为2~5 mm,可较为准确地判断钢筋的位置和保护层厚度,同时不受钢筋周围介质性质的影响。但其受周边钢筋及网格状钢筋的影响较大,且该方法仅能检测10 cm埋深内的钢筋,在铁路隧道检测中仅适用于道床板钢筋的检测。隧道衬砌的钢筋埋深较大,无法使用电磁感应钢筋检测仪进行检测。

2.2 非物探法检测

2.2.1 表观检测^[6-7]

隧道表面裂缝、渗漏水、缺角掉块等病害直接用肉眼观察即可进行直观判定。传统的表观检测方法为通过目视、敲击与拍照,对病害主要指标进行检测(如裂缝长度、宽度)并做好记录。随着光学、工业技术和人工智能技术的发展,如今可利用车载高清摄像头对隧道进行表观连续拍摄,再通过工业计算机进行图像病害识别提取和病害信息分析,并自动形成检测结果。引入高清摄像和自动识别技术,可大幅提高表观检测效率与检测准确性。

2.2.2 钻芯法

(1) 利用钻芯法进行混凝土抗压强度检测

钻芯法是确定混凝土抗压强度最直观、最准确的方法,通过钻芯取样和实验,可直接获得芯样的抗压强度。但钻芯法获得的抗压强度仅代表所取样本的抗压强度,若要通过钻芯法查明整座隧道的混凝土强度,不仅工作量巨大,还会对隧道结构造成破坏。因此,钻芯取样一般布置于已发现病害区域范围内,用以对病害进行确认。

(2) 利用钻芯法进行脱空注浆效果检测

对于隧道衬砌脱空,工程上一般采用注浆处理,若注浆体与原衬砌混凝土结合不佳,则注浆体会像一块

巨大的孤石压在原衬砌之上,成为隧道更大的安全隐患。由于注浆所用砂浆与原始混凝土的成份始终存在差异,无论是其密度还是其介电常数均有所不同,因此,地质雷达法或弹性波法的检测剖面均会存在反射现象,无法判断注浆体与原始衬砌是否存在不密贴的情况。此时,钻芯法便是判断注浆体与原始衬砌是否密贴的唯一有效方法。小孔钻芯后,可通过所取芯样对注浆是否密实进行判断,同时还可利用内窥镜通过钻芯孔对注浆效果进行复查。

2.2.3 激光断面扫描法^[8-11]

三维激光扫描是近年来在工程中广泛应用的高新技术,较传统的测量手段,作业效率更高,人工工作量更少,测量精度更可靠,信息化程度更高,是进行隧道断面净空检测和沉降检测的一大利器。

三维激光扫描可分为移动式车载测量和地面架站式三维激光扫描,其中车载式三维激光扫描非常适合运营隧道的检测工作。相较于架设全站仪断面测量,三维激光扫描可快速、便捷地获取隧道表面掉块、裂缝及渗漏水等病害状态,同时还可快速获得检测段落连续的隧道净空和横断面图,为隧道后续加固、整治工作提供精确的数据支撑。

2.3 灾后病害的综合检测系统

目前,国外已有厂家研发出了集成多种检测设备

的综合检测系统,如日本 WALNUT 株式会社研发的隧道综合检测车载系统。该系统可搭载在普通平板列车上,不需特殊的交通管制,可一边行驶一边测量。通过其搭载的非接触式空气耦合雷达检测系统(MRS)、高清隧道表面摄像系统(MIS)和三维移动式激光扫描系统(MMS)3套检测系统,可快速地对隧道衬砌表面进行高清摄影,对隧道断面进行三维激光扫描,对隧道衬砌背后的空洞和不密实情况进行检测。其中,非接触式空气耦合雷达检测系统可有效避免铁路隧道接触网及通风系统的对普通接触式雷达检测的影响,以70 km/h的速度连续检测。

综上,隧道车载综合检测系统可作为一种有效的隧道病害普查工具,与铁路隧道的定期检查一起实施,大幅提高检查精度,降低检测成本。

如今,国内亦有企业及科研院校对隧道综合检测系统进行开发,如西南交通大学研发的铁路隧道衬砌全断面车载检测方法与装置等,但尚无可大面积商用的综合检测车载产品问世。

3 隧道衬砌病害的综合检测

不同的隧道衬砌病害类型应采用不同的检测方法,不同的检测方法对不同的病害类型又有不同的检测效果,各类隧道病害检测方法如表1所示。

表1 各类隧道病害检测方法表

方法	隧道表面掉块、裂缝、渗漏水	裂缝深度	隧道背后脱空、不密实	隧道衬砌混凝土厚度	隧道混凝土强度	隧道钢筋分布	隧道断面、净空检测	破损\非破损方法	方法特点
地质雷达	◇	◇	●	●	◇	○	◇	非破损	便捷,高效
回弹法	◇	◇	◇	◇	△	◇	◇	非破损	便捷,高效,准确率较低
冲击回波	◇	◇	○	○	△	◇	◇	非破损	不受钢筋影响,
超声探测	◇	○	○	○	△	◇	◇	非破损	分辨率高
电磁感应钢筋探测	◇	◇	◇	◇	◇	●	◇	非破损	不受钢筋周围介质影响,仅能探测10 cm深度内的钢筋
表观检测-目视检测	△	◇◇	◇	◇	◇	◇	◇	非破损	效率较低,容易遗漏
表观检测(高清图像识别技术)	●	◇	◇	◇	◇	◇	◇	非破损	高效,不易遗漏
钻芯法	◇	○	○	○	●	◇	◇	破损	可对隧道衬砌空洞注浆效果进行检测
全站仪断面测量	◇	◇	◇	◇	◇	◇	○	非破损	效率较低
激光断面扫描	●	◇	◇	◇	◇	◇	●	非破损	高效,分辨率高

注:●表示效果极好,○表示效果好,△表示效果一般,◇表示不适用

在隧道检测中,合理选择检测方法是提高检测效率的重要手段。使用综合检测手段,针对隧道的具体情况选取合适的方法进行检测,能够高效解决现场实际问题。检测可分为以下4个阶段。

(1)第一阶段

进行隧道勘察设计资料及建设期施工资料的调查

分析。通过该阶段可了解隧道的水文地质条件和建设、设计、施工与竣工资料,初步判断可能出现缺陷的原因、段落等。

(2)第二阶段

进行隧道病害的普查工作。利用三维激光扫描和表观检测手段,调查隧道中的衬砌裂缝、仰拱沉降起

伏、道床开裂、隧道渗漏水等情况。利用地质雷达法、回弹法、电磁感应钢筋探测法等检测手段,调查隧道混凝土强度、衬砌背后的脱空及密实度、隧道及道床内钢筋的分布情况等。

(3) 第三阶段

针对第二阶段发现的缺陷,选用其他无损方法进行检测确认,如用冲击回拨法对地质雷达法发现的衬砌后缺陷进行确认,架设全站仪对激光断面扫描法发现的断面净空异常进行断面测量确认等。

(4) 第四阶段

梳理发现的缺陷,筛选出需要进一步调查的严重缺陷,采用钻芯法或超声探测法进行详细检测,为缺陷治理提供详细的依据。

4 结束语

在隧道检测中,合理选择检测方法是提高检测效率的重要手段。铁路隧道的病害检测有不同的分类方法。按检测原理不同可分为图像识别检测技术、物探检测技术和钻芯法检测技术,按对检测对象损害与否可分为无损检测方法和破损性检测方法,不同的检测方法有各自不同的优缺点与适用性。通过在勘察设计期、建设期及运营期等不同阶段,使用综合检测手段,针对性地选择合适的检测手段对隧道病害进行检测,可为隧道的病害治理提供有力依据。

参考文献:

- [1] 赵勇,田四明. 中国铁路隧道数据统计[J]. 隧道建设, 2017, 37(5): 641-642.
ZHAO Yong, TIAN Siming. Data Statistics of Railway Tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(5): 641-642.
- [2] 赵勇,田四明. 截至2018年底中国铁路隧道情况统计[J]. 隧道建设, 2019, 39(2): 324-335.
ZHAO Yong, TIAN Siming. Statistics of China's Railway Tunnels as of the End of 2018[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 324-335.
- [3] 李奎,王志强. 基于统计原理的铁路隧道运营期灾害类型及防灾对策研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 150-159.
LI Kui, WANG Zhiqiang. Study of Disaster Types and Prevention

Methods of Railway Tunnel during Operation Period Based on Statistical Theory[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 150-159.

- [4] 翟正平. 浅谈公路隧道火灾后病害处治技术[J]. 山西交通科技, 2016(5): 49-52.
ZHAI Zhengping. The Discussion on the Technology of the Highway Tunnel Disease Treatment after the Fire[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2016(5): 49-52.
- [5] 牟元存. 偏移及反褶积处理技术在地质雷达法中的应用研究[J]. 铁道建筑技术, 2015(10): 118-121.
MU Yuancun. Deflection and Deconvolution Treatment Techniques Applied in Ground Penetrating Radar[J]. Railway Construction Technology, 2015(10): 118-121.
- [6] 杨勇. 公路隧道表观损伤检测方法研究[J]. 山西建筑, 2010, 36(20): 322.
YANG Yong. Research on Apparent Damage Test Methods of Road Tunnels[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(20): 322.
- [7] 陈功奇. 延安东路隧道衬砌结构表观病害的检测技术与应用[J]. 中国市政工程, 2016(1): 53-56.
CHEN Gongqi. Detection Technology and Application of Apparent Diseases in Lining Structure of Yan'an East Road Tunnel[J]. China Municipal Engineering, 2016(1): 53-56.
- [8] 孟斌,吴廷,张天. 三维激光扫描技术在公路隧道检测中的应用[J]. 矿山测量, 2019, 47(4): 108-112.
MENG Bin, WU Ting, ZHANG Tian. Application of 3 D Laser Scanning Technology in Highway Tunnel Detection[J]. Mine Surveying, 2019, 47(4): 108-112.
- [9] 冯英会,龚伦,俞景文. 三维激光扫描技术在既有交通隧道快速检测中的应用[J]. 工程建设与设计, 2019(10): 257-261.
FENG Yinghui, GONG Lun, YU Jingwen. The Application of 3D Laser Scanning Technology in Rapid Detection of Existing Traffic Tunnel[J]. Construction & Design for Project, 2019(10): 257-261.
- [10] 张华. 移动式三维激光扫描系统在盾构隧道管片椭圆度检测中的应用[J]. 城市勘测, 2015(4): 103-106.
ZHANG Hua. Mobile 3 D Laser Scanning System in Shield Tunnel Segment Ovality Detection[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2015(4): 103-106.
- [11] 周中财. 铁路运营隧道隐伏病害无损检测方法研究[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(1): 145-148.
ZHOU Zhongcai. Study on Nondestructive Testing Method of Hidden Diseases in Railway Operation Tunnel[J]. Building Technique Development, 2019, 46(1): 145-148.