

DOI: 10.11779/CJGE2022S1024

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

朱兆荣¹, 赵守全¹, 秦欣², 吴红刚¹, 赵常要¹, 武小鹏^{*3}

(1. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2 兰州交通大学, 甘肃 兰州 730000; 3. 嘉兴学院, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 隧道衬砌空洞是常见的一种隧道工程病害, 对隧道的运营安全具有较大危害。采用模型试验和现场实体试验相结合的方法, 对探地雷达在铁路隧道衬砌空洞探测中应用效果进行了系统研究。采用探地雷达分别对 27 个无钢筋倾斜空洞模型、无钢筋水平空洞模型、有钢筋水平空洞模型的空洞边缘、上界面及空洞范围进行了检测, 并与模型中空洞的实际尺寸进行了对比分析。结果表明, 无钢筋倾斜空洞模型雷达检测图像可辨识度高, 空洞形态完整, 空洞边缘、上界面结构边界较清晰, 空洞范围准确, 误差为 $-0.4\sim 0.5$ cm; 无钢筋水平空洞模型空洞的起始点位置清晰准确可见, 空洞上表面雷达图像界面清晰, 误差为 $-0.4\sim 1.3$ cm, 但空洞下表面只能定性说明空洞的大致深度范围; 有钢筋水平空洞界面形态完整, 结构边界较清晰。研究结果可为以后采用探地雷达开展隧道衬砌质量检测工作提供参考和借鉴。

关键词: 探地雷达; 隧道; 衬砌空洞; 无损检测; 模型试验

中图分类号: U25

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S1-0132-06

作者简介: 朱兆荣(1983—), 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事岩土工程科学研究、勘察、试验、检测和技术咨询等工作。E-mail: zhuzhaorong@foxmail.com。

Model and field tests on detection effects of tunnel lining cavity by GPR

ZHU Zhao-rong¹, ZHAO Shou-quan¹, QIN-Xin², WU Hong-gang¹, ZHAO Chang-yao¹, WU Xiao-peng³

(1. Northwest Research Institute Co., Ltd of CREC, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China;

3. Jiaxing University, Jiaxing 314000, China)

Abstract: The tunnel lining cavity is a common defect in tunnel engineering, which is harmful to the operation safety of the tunnel. The application effects of GPR in detection of railway tunnel lining cavity are studied through the combining model tests and field solid tests. The edges, upper interfaces and ranges of 27 unreinforced inclined cavity models, unreinforced horizontal cavity models and reinforced horizontal cavity models are detected by GPR, and compared with the actual sizes of the cavity in the model. The results show that the radar detection images of the unreinforced inclined cavity model have high discrimination, complete cavity shape, clear cavity edge and upper interface structure boundary, accurate cavity range and error of $-0.4\sim 0.5$ cm. The starting point of the unreinforced horizontal cavity model is clearly and accurately visible, the radar image interface on the upper surface of the cavity is clear, and the error is $-0.4\sim 1.3$ cm, but the lower surface of the cavity can only qualitatively explain the approximate depth range of the cavity. The horizontal cavity with reinforcement has complete interface shape and clear structural boundary. The research results may provide reference for the quality inspection of tunnel linings by GPR in the future.

Key words: ground penetrating radar; tunnel; lining void; nondestructive testing; model test

0 引言

随着中国铁路、公路隧道工程的发展, 每年都有大量的隧道建成, 隧道在这些基础工程建设中发挥着越来越重要的作用^[1-2]。如何对建成的隧道工程质量作出客观评价, 是现阶段隧道工程界亟待解决的问题之一。探地雷达法是隧道衬砌质量无损检测的主要方法,

但探地雷达在隧道无损检测中可遵循的规范较少, 仅原铁道部发布了专门针对铁路隧道衬砌质量无损检测的规程, 交通部、水利部等仅在施工规范或验收规范

基金项目: 中铁西北科(2014)XBK4

收稿日期: 2022-09-29

*通信作者(E-mail: gslzwxp@126.com)

中略有提及^[3-7], 缺少可操作性, 探地雷达在隧道质量检测中的工作很难用统一的标准进行衡量, 多数仅靠检测人员的实践经验来判定, 同时检测人员技术水平参差不齐, 使用的设备良莠不分, 隧道无损检测中出现误判、漏判等问题在所难免。探地雷达图像本身存在着有效异常和干扰异常, 如何准确区分图像中的有效异常与干扰异常是雷达检测工作的重点所在^[8-11]。相关规范中仅对密实、不密实、空洞、钢架、钢筋等目标体的探测多停留在检测工作的如何实施和状态评定阶段, 主要是对判定特征进行了描述^[12-15]。对如何准确分析雷达图像, 得到空洞的确切位置, 定量分析空洞的界面大小和形状研究较少。因此, 开展探地雷达在铁路隧道衬砌空洞无损检测模型试验研究, 对准确判定隧道衬砌背后空洞意义重大。

1 工作原理

探地雷达工作的基本原理: 通过发射天线向地下发射高频电磁波, 通过接收天线接收反射回地面的电磁波, 电磁波在地下介质中传播时遇到存在电性差异的分界面时发生反射, 根据接收到的电磁波的波形、振幅强度和试件等的变化特征推断地下介质的空间位置、结构、形态和埋藏深度^[16]。在隧道衬砌探测中, 由于空洞内的空气和其周围混凝土存在很大的电性差异, 这为采用地质雷达进行衬砌空洞探测提供了良好的物理前提条件。探地雷达在隧道衬砌空洞探测中的工作原理如图 1 所示。

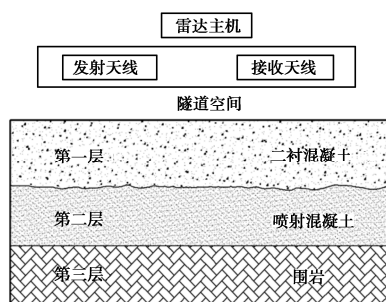


图 1 雷达工作原理图

Fig. 1 Working principle of radar

2 模型设计和制作

(1) 模型设计

开展探地雷达在铁路隧道衬砌空洞无损检测模型试验, 首先要针对检测环境进行模型尺寸设计, 模型设计在满足检测要求的情况下, 尽可能使模型的尺寸尽量小, 以节省相关材料、人工费用。隧道衬砌厚度一般为 30~50 cm, 为准确取得完整 100 cm 测线长度的雷达图, 设计出如图 2 所示的原始模型, 然后在原

始模型的基础上设计相关的缺陷。

图 2 所示为素混凝土模型, 形状为长方体, 长 150 cm、宽 50 cm、高 50 cm。上表面为检测面, 下表面接地面。

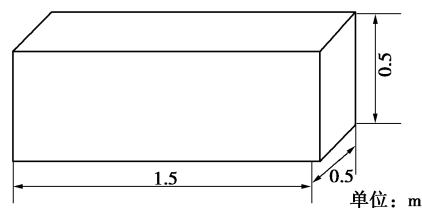


图 2 原始模型

Fig. 2 Original model

在图 2 素混凝土原始模型的基础上设计不同形态的空洞缺陷, 如图 3 所示, 通过改变空洞大小及距混凝土表面的距离, 分析各因素之间的影响关系。另外, 在部分模型的空洞和模型上表面间布设钢筋, 研究钢筋对背后空洞的影响程度。

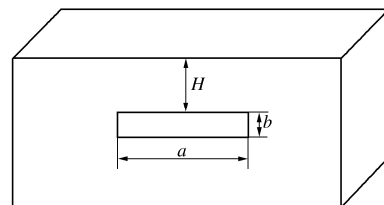


图 3 空洞模型

Fig. 3 Cavity model

(2) 模型制作

a) 混凝土强度等级表示为 C30, 水泥为 P.O42.5 (低碱), 粉煤灰为 F 类 II 级, 细骨料为中砂, 粗骨料为 5~10 mm、10~20 mm、16~31.5 mm 三级配, 减水剂为 VK-CS 缓凝型, 拌和用水为地下水。

b) 试件施工配合比为水泥: 粉煤灰: 细骨料: 粗骨料 (5~10): 粗骨料 (10~20): 粗骨料 (16~31.5): 减小剂: 水=1.00: 0.34: 2.87: 0.79: 1.99: 1.19: 0.013: 0.54。

c) 钢筋型号为 $\Phi 20$ 螺纹钢筋。

d) 振捣方式为插入式振捣。带模养护期间, 应采取带模包裹、浇水、喷淋洒水等措施进行保湿、潮湿养护, 拆模后继续浇水养护到龄期 14 d。

e) 按图纸制作 27 个 1.5 m×0.5 m×0.5 m 混凝土对比实体模型 (图 4), 在模型不同位置制作不同类型的空洞。

3 雷达参数选取及数据采集

探地雷达主要技术参数有介电常数、探测深度、分辨率、中心频率、采样率和采样时窗等^[17]。

本次试验选用美国产 SIR-3000 探地雷达, 空洞模

型试验介电常数采用现场标定的方法获取,对于龄期 120 d 的干混凝土实体模型采用时域传输法^[18]准确测量介电常数,实测 9 组 C30 干混凝土介电常数平均值为 7.4,空洞介电常为 1;根据介电常数和探测深度综合选择采样时窗,时窗选择略有富裕,本次试验采样时窗为 35 ns;本次试验采用 400 MHz 屏蔽天线。



图 4 混凝土实体模型

Fig. 4 Concrete solid model

垂向高通频率选为天线频率的 1/4,低通频率选为天线频率的 2 倍,水平平滑取 3 道平滑,数据采集时不做背景去除,数据后处理使用背景去除。

试验测线布置在模型顶面,方向为长边方向,位置为短边中点处。

4 雷达探测结果及分析

通过对实体模型空洞检测,雷达波形图与实体模型对比,可判定雷达检测数据准确性,从而准确检测出质量缺陷上界面、大致范围等。

按照选取的雷达参数和测线布置方法,对 27 个无钢筋倾斜空洞模型、无钢筋水平空洞模型、有钢筋水平脱空实体模型分别进行空洞边缘、上界面及空洞范围进行现场实测,下面分别对 3 种实体空洞模型检测结果进行对比分析。

4.1 无钢筋倾斜空洞模型检测数据对比分析

图 5 为无钢筋倾斜空洞实体模型图,空洞实体倾斜 45° 设置,9 个实体试模统一从空洞距离表面大处往距离表面小的方向进行检测,根据实测介电常数确定出 9 个空洞边界检测数据,详见表 1。



图 5 无钢筋倾斜空洞实体模型图

Fig. 5 Solid model for unreinforced inclined cavity

图 6 所示为#1 试件无钢筋倾斜空洞模型衬砌雷达检测图,可以看出,检测图形倾斜空洞形态完整,结构边界较清晰,图像可辨识度高,离表面最薄处 $f=15.9$ cm,离表面最厚处 $e=21.4$ cm。

表 1 无钢筋倾斜空洞模型检测数据汇总

Table 1 Test data of unreinforced inclined cavity model

试样	(cm)					
	e			f		
	实际值	检测值	误差	实际值	检测值	误差
#1	21.0	21.4	-0.4	16.0	15.9	0.1
#2	21.0	21.3	-0.3	16.0	16.0	0.0
#3	21.0	20.9	0.1	16.0	16.1	-0.1
#4	21.0	20.8	0.2	16.0	16.2	-0.2
#5	21.0	21.0	0.0	16.0	16.1	-0.1
#6	21.0	21.3	-0.3	16.0	16.3	-0.3
#7	21.0	21.2	-0.2	16.0	15.8	0.2
#8	21.0	20.9	0.1	16.0	15.9	0.1
#9	21.0	20.0	0.0	16.0	16.2	-0.2

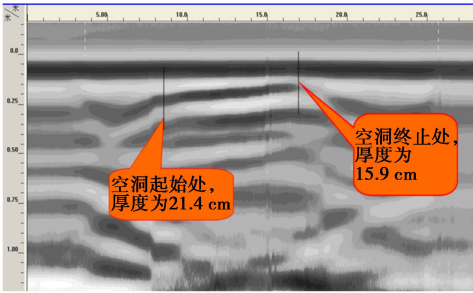


图 6 #1 试件无钢筋倾斜空洞模型衬砌雷达检测图

Fig. 6 #1 Radar detection diagram of unreinforced inclined cavity model for linings of specimen No. 1

分别对#1~#9 试件雷达检测图进行解译, e 检测值偏大试件 3 个,误差为 0.1~0.5 cm, e 检测值和实际值相同试件 2 个, e 检测值偏小试件 4 个,误差为 -0.2~-0.4 cm; f 检测值偏大试件 3 个,误差为 0.1~0.2 cm, f 检测值和实际值相同试件 1 个, f 检测值偏小试件 5 个,误差为 -0.1~-0.3 cm。

通过对 9 个试件雷达图形检测值和实际值对比分析,可以得出,雷达图像分析结果和实体模型一致,雷达检测结果较准确,对于无钢筋倾斜空洞的误差为 -0.4~0.5 cm。

4.2 无钢筋水平空洞模型检测数据对比分析

图 7 为无钢筋水平空洞实体模型图,空洞实体水平设置,平行于测试面,按照选取的雷达参数和测线布置方法分别对 9 个实体模型按照同一方向进行检测,根据实测介电常数确定出 9 个空洞边界检测数据,详见表 2。

图 8 所示为#16 试件无钢筋水平空洞模型衬砌雷达检测图,可以看出,距顶面 $c=28.4$ cm,空洞厚度 $d=15.3$ cm,空洞的起始点位置清晰准确可见,空洞上

表面的形成的雷达图像界面清晰, 空洞距离检测点下深度清晰准确, 而空洞下表面由于雷达波的多次反射, 波形层状结构受到干扰, 只能定性说明空洞的深度大致范围。

表 2 无钢筋水平空洞模型检测数据汇总
Table 2 Test data of unreinforced horizontal cavity model

试样	<i>c</i>			<i>d</i>		
	实际值	检测值	误差	实际值	检测值	误差
#10	28.0	28.3	-0.3	15.0	15.4	-0.4
#11	28.0	28.3	-0.3	15.0	15.6	-0.6
#12	28.0	28.1	-0.1	15.0	15.7	-0.7
#13	28.0	27.8	0.2	15.0	14.9	0.1
#14	28.0	27.9	0.1	15.0	15.0	0.0
#15	28.0	28.0	0.0	15.0	16.3	-1.3
#16	28.0	28.4	-0.4	15.0	15.3	-0.3
#17	28.0	28.0	0.0	15.0	14.9	0.1
#18	28.0	27.0	1.0	15.0	14.2	0.8



图 7 无钢筋水平空洞实体模型图

Fig. 7 Solid model for unreinforced horizontal cavity

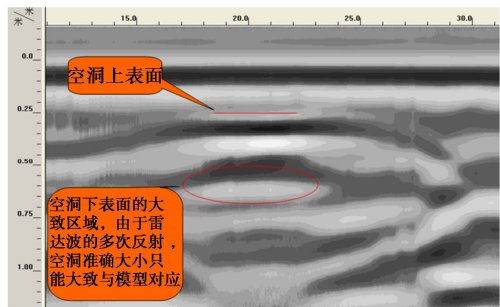


图 8 #16 试件无钢筋水平空洞模型衬砌雷达检测图

Fig. 8 Radar detection diagram of unreinforced horizontal cavity model for lining of specimen No. 16

分别对#10~#18 试件雷达检测图进行解译, *c* 检测值偏大试件 3 个, 误差为 0.1~1.0 cm, *c* 检测值和实际值相同试件 2 个, *c* 检测值偏小试件 4 个, 误差为-0.1~-0.4 cm; *d* 检测值偏大试件 3 个, 误差为 0.1~0.8 cm, *d* 检测值和实际值相同试件 1 个, *d* 检测值偏小试件 5 个, 误差为-0.3~-1.3 cm。

通过对 9 个试件雷达图形检测值和实际值对比分析, 可以得出, 雷达图像分析结果和实体模型基本一致, 对于无钢筋水平空洞的误差为-0.4~1.3 cm。

4.3 有钢筋模型检测数据对比分析

有钢筋水平空洞实体模型, 空洞实体水平设置,

水平于测试面, 按照选取的雷达参数和测线布置方法分别对 9 个实体模型按照同一方向进行检测。

分别对#19~#27 试件雷达检测图进行解译, 选取具有代表性的#26 模型对比分析, 见图 9。可以看出, 检测图形水平空洞形态完整, 结构边界较清晰, 头层钢筋图形清晰可辨, 钢筋背后空洞的起始位置清晰, 因空洞的多次反射无法准确定位空洞的下界面。

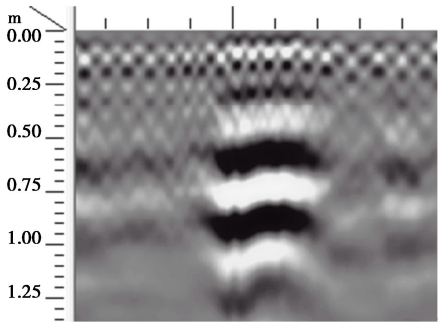


图 9 #26 试件模型衬砌雷达检测图

Fig. 9 Radar detection diagram of model linings for specimen No. 26

5 现场实体试验研究

在隧道衬砌质量无损检测工作中, 还可以对初期支护钢拱架、二次衬砌混凝土中钢筋是否存在进行判定, 图 10 为某隧道雷达检测图像, 从图像中可清晰看出钢筋和钢拱架分布情况, 钢筋在雷达图像形态完整, 钢拱架在雷达图像上呈现为分散的月牙形强反射信号, 通过对现场隧道检测结果与设计文件对比分析, 个别特殊点钻芯取样, 可以判定钢筋和钢架的数量符合设计、间距均符合设计要求, 钢筋间距误差均在±20 mm, 钢架的间距误差均在±100 mm, 满足《铁路隧道工程施工质量验收标准》的要求。

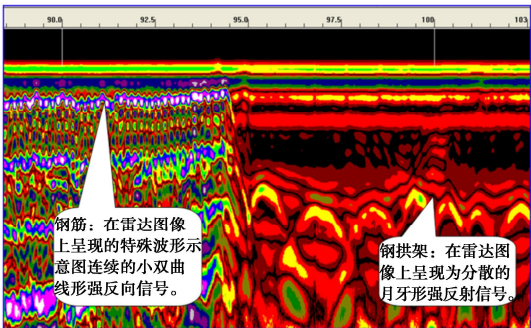


图 10 实测钢筋、钢拱架雷达图像

Fig. 10 Radar image of measured reinforcement and steel arch

某 B 隧道衬砌拱顶检测实测雷达图像 (图 11), 在空洞所在区域, 拱架判定特征易见, 而拱架背后形成反射很强的同相轴界面, 拱架判定特征下部分波形受空洞特征波形影响, 空洞成多次波反射, 无法判定

空洞的下界面,与模型结论一致。

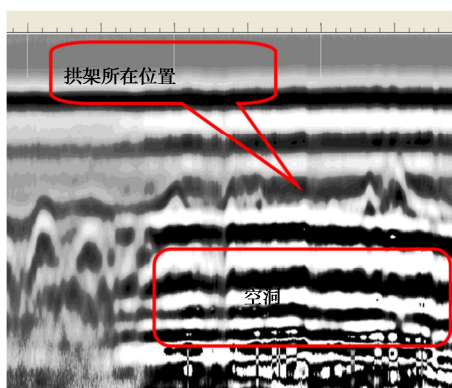


图 11 某 B 隧道衬砌拱顶检测实测雷达图像

Fig. 11 Measured radar image of lining vault detection of tunnel B

某 E 隧道衬砌检测实测雷达图像 (图 12), 钢筋背后存在明显的同相轴反射, 而且从强反射的起始位置可以判定脱空在二衬背后, 由于其后波形成多次反射形态, 造成空洞背后的初期支护反射信息被屏蔽, 无法检测到有效的初期支护信息, 也无法准确判定空洞的大小范围, 与模型结论一致。

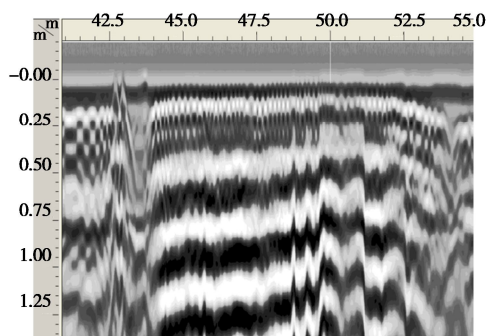


图 12 某 E 隧道衬砌检测实测雷达图像

Fig. 12 Measured radar image of lining detection of tunnel E

图 13 中, 某 F 隧道实测雷达图像, 双层钢筋特征波形清晰可见, 二层钢筋下面出现 M 型强反射波, 同相位相连, 与模型试验图 9 中类似, 可以判定该处为钢筋背后存在空洞, 但强反射有小幅倾斜, 说明该空洞接近水平状, 但非水平状。

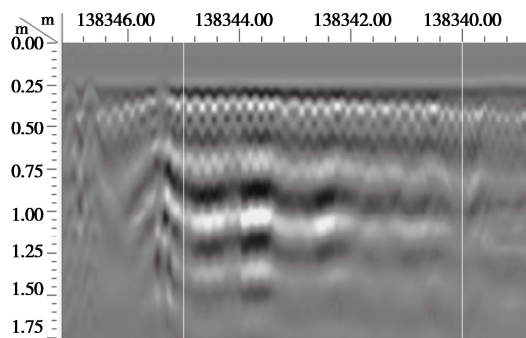


图 13 某 F 隧道实测雷达图像

Fig. 13 Measured radar image of tunnel F

6 结 论

通过对实体空洞模型及隧道现场二次衬砌混凝土的探地雷达检测, 可得出 4 点结论。

(1) 对于隧道衬砌无钢筋倾斜空洞工况, 雷达检测图像可辨识度高, 检测图形空洞形态完整, 空洞边缘、上界面结构边界较清晰, 空洞范围准确, 误差为 $-0.4 \sim 0.5$ cm。

(2) 对于隧道衬砌无钢筋水平空洞工况, 空洞的起始点位置清晰准确可见, 空洞上表面形成的雷达图像界面清晰, 空洞距离检测点深度清晰准确, 误差为 $-0.4 \sim 1.3$ cm, 而空洞下表面由于雷达波的多次反射, 只能定性说明空洞的深度大致范围。

(3) 对于隧道衬砌有钢筋水平空洞工况, 检测图形水平空洞形态完整, 结构边界较清晰, 头层钢筋图形清晰可辨, 无钢筋和有钢筋辨识度高, 可准确判别钢筋结构形态。

(4) 隧道现场检测中遇到的隧道衬砌病害形态较模型试验给出的形态更为复杂, 需要多钻孔验证并确定性缺陷性质和特点, 提高检测水平。

参考文献:

- [1] 赵常要, 邓新生. 隧道质量无损检测中雷达波形分析与探讨[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(12): 109 - 112. (ZHAO Chang-yao, DENG Xin-sheng. Analysis and approach to the image of the GPR in nondestructive detection of tunnel lining[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(12): 109 - 112. (in Chinese))
- [2] 李登科, 赵常要. 探地雷达厚度曲线绘制技术研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(8): 125 - 128. (LI Deng-ke, ZHAO Chang-yao. Technical research on thickness curve drawing in ground penetrating radar testing[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(8): 125 - 128. (in Chinese))
- [3] 铁路运营隧道衬砌安全等级评定暂行规定: 铁运函[2004]174 号[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004. (Interim Provisions on Lining Safety Rating of Railway Operating Tunnels: TYH [2004] No. 174 [S]. Beijing: China Railway Press, 2004.)
- [4] 董新平, 关凤良. 探地雷达在隧道衬砌施工质量控制中的应用研究[J]. 铁道建筑, 2009, 49(5): 56 - 60. (DONG Xin-ping, GUAN Feng-liang. Application of ground penetrating radar in tunnel lining construction quality control[J]. Railway Engineering, 2009, 49(5): 56 - 60. (in Chinese))
- [5] 杜 胜, 周 斌. 地质雷达应用于铁路隧道仰拱检测的可

- 靠性研究[J]. 铁道建筑, 2017, **57**(5): 83 - 86. (DU Sheng, ZHOU Bin. Reliability of ground penetrating radar to detect railway tunnel invert[J]. Railway Engineering, 2017, **57**(5): 83 - 86. (in Chinese))
- [6] 李青燕, 曾召田, 张锦锦. 地质雷达在广西铁路隧道衬砌质量检测中的应用[J]. 铁道建筑, 2011, **51**(1): 33 - 35. (LI Qing-yan, ZENG Zhao-tian, ZHANG Jin-jin. Application of ground penetrating radar in Guangxi railway tunnel lining quality inspection[J]. Railway Engineering, 2011, **51**(1): 33 - 35. (in Chinese))
- [7] 马为功, 石玉霞, 窦 顺. 隧道衬砌检测判识标准及缺陷处理措施研究[J]. 铁道标准设计, 2019, **63**(1): 98 - 102. (MA Wei-gong, SHI Yu-xia, DOU Shun. Study on detection standard of tunnel lining and defects treatment measures[J]. Railway Standard Design, 2019, **63**(1): 98 - 102. (in Chinese))
- [8] 熊昌盛, 李晋平, 陈 辉, 等. 地质雷达检测铁路隧道衬砌质量的效果验证[J]. 铁道建筑, 2011, **51**(11): 32 - 34. (XIONG Chang-sheng, LI Jin-ping, CHEN Hui, et al. Verification of the effect of detecting railway tunnel lining quality by geological radar[J]. Railway Engineering, 2011, **51**(11): 32 - 34. (in Chinese))
- [9] 朱兆荣, 赵守全, 秦 欣, 等. 探地雷达在铁路隧道衬砌质量无损检测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2021, **18**(5): 703 - 708. (ZHU Zhao-rong, ZHAO Shou-quan, QIN Xin, et al. Application of ground penetrating radar in nondestructive testing of railway tunnel lining quality[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, **18**(5): 703 - 708. (in Chinese))
- [10] 马凌宇. 京包线旗下营隧道基底结构病害整治对策探讨[J]. 铁道建筑, 2015, **55**(2): 76 - 78. (MA Ling-yu. Discussion on treatment countermeasures of basement structure diseases in Xiaying tunnel of Beijing-Baotou Railway[J]. Railway Engineering, 2015, **55**(2): 76 - 78. (in Chinese))
- [11] 贾华强. 探地质雷方法在铁路隧道衬砌质量检测中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2002. (JIA Hua-qiang. Application of Geological Mine Detection Method in Railway Tunnel Lining Quality Detection[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002. (in Chinese))
- [12] 王定举. 钢带支护系统在重载铁路隧道衬砌开裂整治中的应用[J]. 铁道建筑, 2015, **55**(5): 58 - 61. (WANG Ding-ju. Application of steel band bolting system to treatment of primary liner cracking in existing heavy haul tunnel[J]. Railway Engineering, 2015, **55**(5): 58 - 61. (in Chinese))
- [13] 冯慧民. 地质雷达在隧道检测中的应用[J]. 现代隧道技术, 2004, **41**(4): 67 - 71. (FENG Hui-min. Application of geo-radar to tunnel inspection[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, **41**(4): 67 - 71. (in Chinese))
- [14] 胡世权. 综合地质超前预报在策马村隧道斜井探测中的应用[J]. 铁道建筑, 2012, **52**(3): 39 - 41. (HU Shi-quan. Application of comprehensive geological advance forecast in detection of inclined shaft of Cemacun tunnel[J]. Railway Engineering, 2012, **52**(3): 39 - 41. (in Chinese))
- [15] 赵常要, 侯殿英, 窦 顺, 等. 探地雷达在隧道检测中里程偏差修正方法探讨[J]. 现代隧道技术, 2011, **48**(6): 79 - 81. (ZHAO Chang-yao, HOU Dian-ying, DOU Shun, et al. Correction method of mileage deviation in tunnel concrete lining detection by ground penetrating radar[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, **48**(6): 79 - 81. (in Chinese))
- [16] 赵常要, 窦 顺, 赵守全. 探地雷达层厚度值提取技术研究[J]. 地球物理学进展, 2018, **33**(1): 441-444. (ZHAO Chang-yao, DOU Shun, ZHAO Shou-quan. Research about one-key technology of achieving ground-penetrating radar lay data processing[J]. Progress in Geophysics, 2018, **33**(1): 441-444. (in Chinese))
- [17] 赵守全, 朱兆荣. 超前地质预报技术在断层破碎带中的综合应用[J]. 山西建筑, 2016, **42**(11): 180 - 183. (ZHAO Shou-quan, ZHU Zhao-rong. Comprehensive application of advance geology prediction technology in fault fracture zone[J]. Shanxi Architecture, 2016, **42**(11): 180 - 183. (in Chinese))
- [18] 邵伟伟, 窦 顺. 地质雷达检测隧道二衬钢筋对初支型钢拱架分辨率的影响研究[J]. 路基工程, 2017(4): 171 - 174. (SHAO Wei-wei, DOU Shun. Study on the influence of the tunnel second lining on resolution of initially supported structural steel arch by geological radar detection method[J]. Subgrade Engineering, 2017(4): 171 - 174. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)