

高清红外及高频雷达技术在建筑外墙

渗漏水无损检测中的应用研究*

王海龙^{1, 2, 3}, 王悦^{1, 2, 3}, 王万金^{1, 2, 3}, 向创^{1, 2, 3}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013; 3. 建研建材有限公司, 北京 100013)

[摘要] 分析高清红外扫描技术和高频雷达技术在建筑外墙中进行渗漏水无损检测中的应用原理, 并将两技术相结合应用于建筑外墙渗漏水无损检测中。利用高清红外技术对建筑外墙进行整体高清晰度扫描, 利用高频雷达对渗漏部位进行切片扫描和可视化分析。研究表明, 红外技术可用于确定建筑外墙发生渗水部位, 高频雷达技术可检测外墙外保温系统黏结状态的同时确定系统内渗漏水的渗流路径和渗流扩散区域。

[关键词] 红外热成像; 高频雷达扫描; 渗漏; 检测; 外墙; 外保温系统

[中图分类号] TU746.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]**

Application of Infrared and Radar Technology in Nondestructive Testing of External Wall Insulation Systems

WANG Hailong^{1, 2, 3}, WANG Yue^{1, 2, 3}, WANG Wanjin^{1, 2, 3}, XIANG Chuang^{1, 2, 3}

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. National Research Center for Building Engineering Technology, Beijing 100013, China; 3. Jianyan Building Materials Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: This paper analyzes the principles of high-definition infrared scanning technology and high-frequency radar technology for non-destructive testing of leakage in building facades, and applying the combination of the two technologies in non-destructive testing of leakage in building facades. The high-definition infrared technology is used to scan the whole building facade in high-definition, and the high-frequency radar is used to scan and visualize the leakage parts in slices. The study shows that the infrared technology can be used to determine the parts of the building wall where water seepage occurs, and the high-frequency radar technology can detect the bonding status of the exterior insulation system while determining the seepage paths and seepage diffusion areas of the water seepage in the system.

Keywords: infrared thermography; high-frequency radar scanning; leakage; detection; exterior walls; exterior insulation systems

0 引言

近年来, 建筑外墙外保温系统脱落事件频发。据统计, 2021 年全国公开报道的外围护结构墙面质量事故 600 多起, 给城市公共

安全 and 人民生命财产安全带来极大威胁, 社会反响强烈。既有建筑外墙安全风险已成为社会高度关注的问题^[1]。建筑外墙出现渗漏导致外墙潮湿、发霉, 是引起建筑外围护结构墙面及幕墙开裂、脱落的关键所在^[2]。准确全面地对建筑外墙缺陷进行有效排查是城市安全的必要预防措施, 是保障人民群众生命安全的重要举措, 同时也符合我国在“十四五”规划中提出的新型城镇化要瞄准高效运维管理的战略要求^[3]。对渗流路径的

* 国家重点研发计划
(2022YFC3801600)

[作者简介] 王海龙, 副研究员, E-mail:
wanghl1983@126.com

[收稿日期] 2024-05-15

准确判断有助于从渗漏源头精准采取治理措施，从根本上解决外墙渗漏隐患。

目前的建筑外墙渗漏检测大多采用单一模态缺陷识别检测。主要检测方法有人工观察法、局部破损法、淋水法、红外成像法等，普遍存在适用范围窄、无法探测渗流路径等问题。

本文利用高清红外热成像仪对建筑进行扫描，对渗水点位进行快速识别定位，配合高频雷达进行纵向探测，利用电磁波的穿透性，检测结构内部渗流路径。分析探究红外结合雷达技术多模态缺陷检测手段的原理和方法，验证检测技术可行性。提高对现有建筑物的自动化、智能化、精准化检测和维护。

1 无损检测技术

1.1 红外热成像检测技术

红外热成像仪是将不可见的红外线由光电转化形成肉眼可见的热像图的系统，主要由光学镜头、红外探测器、探测器读出电路、信号处理器、图象显示器组成，如图1所示。

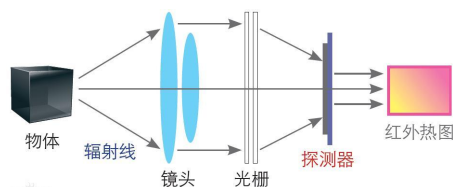


图1 红外热成像仪原理

Fig.1 The principle of infrared thermal imager

红外热成像技术最初在外墙空鼓、水泥混凝土路面脱空等方向开展了大量研究^[4-6]。近些年红外热成像技术逐渐应用于渗漏检测中，毛南平^[7]利用红外成像法对隧道的渗水面积进行检测，准确判断出隧道渗漏部位的具体位置。唐晨浩等^[8]利用红外成像设备对幕墙门窗的渗漏检测进行研究，表明淋水后能较准确地识别渗漏部位的红外热谱图。王玉磊等^[9]和赵亚宇等^[10]先后将无人机和红外仪结合，设计并实现了小型水库坝体早期非稳定渗漏检测系统。段浩然等^[11]对建筑地下工程的渗水进行了检测，结果表

明，红外热成像技术能清晰定位漏水点，并呈现漏水范围。周仁练等^[12]利用红外热成像对水库土石堤坝渗漏进行研究，发现热成像上只能显示结构表层的温度状况，对结构内部的渗流路径尚不能有效进行检测。

本文选择 FLIR Vue Pro 型红外成像仪，传感器分辨率为 336×256 ，可在 $-20 \sim 50^\circ\text{C}$ 进行工作。

1.2 高频雷达检测技术

高频雷达检测技术的原理是通过发射天线发射高频电磁波，当高频电磁波遇到介电常数不同的界面时，会产生反射回波；根据接收天线接收到反射回波的时间和形式，来确定反射界面的距离及判定反射体的可能性质。高频雷达检测如图2所示。

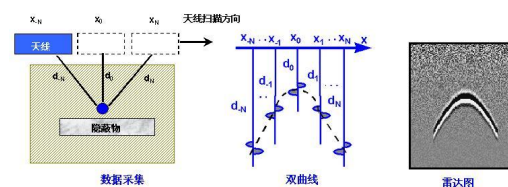


图2 雷达检测示意

Fig.2 Radar detection

雷达检测技术具有检测速度快、分辨率高、操作方便灵活、探测范围广和无损等优点^[13]，在路面破损检测^[14]及地下管线、管道空洞破坏检测^[15]等领域应用广泛。

Guo 等^[14]利用雷达检测技术探究路面裂缝、基层裂缝、基层置换、基层断裂、空洞等路面病害。这表明，900MHz 天线对路面病害具有良好检测能力。Hao^[16]研究道路横截面设计对路面下排水管道高频雷达特征的影响，探索出2种不同模型来模拟管道检测。Tosti 等^[17]分析雷达扫描技术在路面结构破坏和路面不平整度检测的可行性。国内尹光辉^[18]和李世念等^[19]先后利用雷达探测道路空洞试验，总结了空洞在不同大小、形状、深度、充气状态、充水等状态等条件下雷达的识别能力，给出了判断空洞类型的理论判据。

本文选择的雷达天线为球面镜天线，圆极化方式，雷达频率为 1G Hz，雷达主机具有 $30\text{G}\cdot\text{s}^{-1}$ 的采样率，扫描速度为 $30 \sim$

50Hz。

目前国内外利用雷达扫描技术在结构渗漏方面研究较有限,本文利用高频雷达进行纵向探测,通过电磁波的穿透性,检测结构内部渗流路径。并结合红外热成像仪对建筑进行渗水点位快速识别定位,进行外墙外保温结构渗漏部位的多模态缺陷检测研究。

2 试件制作

本试验利用加气混凝土砌块砌筑一长4.8m、宽 1.8m、厚 10cm 外墙,在外墙上用不同黏结方式铺设不同薄抹灰外墙外保温系统。保温层的黏结方式有满粘、条粘、点粘、点框粘、虚粘 5 种。外墙保温层主要采用 EPS, XPS 和岩棉板 3 种保温材料。在试验墙上预设注水点,试验墙设计及注水点位置如图 3 所示。

虚粘 ① -XPS	满粘 -XPS	② 点框粘-30%-EPS	③ 满粘-岩棉板	④ 满粘-XPS
满粘 -EPS	点框粘-EPS	满粘 -EPS	满粘-岩棉条	点框粘-50%-XPS
点粘-50%-EPS	点粘-40%-EPS	点粘-40%-XPS	条粘-30%-XPS	

图 3 试验墙保温层材料种类及铺贴方式设计

Fig.3 Types of test wall insulation layer materials and laying method design

试验墙找平,按设计要求涂抹黏结砂浆,铺贴保温板,效果如图 4 所示。



图 4 试验墙铺贴保温板后效果
Fig.4 The effect of the test wall after laying the insulation board

保温板铺贴完成后利用抹面砂浆进行封层,效果如图 5 所示。

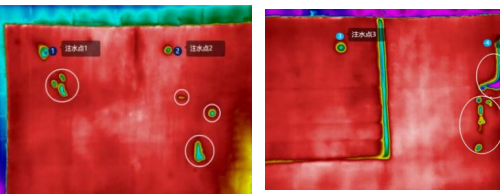


图 5 试验墙最终效果
Fig.5 The final look of the test wall

3 渗漏无损检测分析

3.1 红外技术对渗漏位点检测研究

利用高清红外热成像仪对建筑外墙的渗漏位点进行识别。利用注射器将一定量的水注入预设注水点内模拟建筑外墙发生渗漏过程,利用红外热成像仪进行扫描,得到试验墙各渗漏部位的红外图像。试验结果如图 6 所示。



a 注水点 1、2 红外扫描图像 b 注水点 3、4 红外扫描图像

图 6 注水点处注水后红外扫描图像
Fig.6 Infrared scanning image after water injection at the injection point

由图 6 可看出,在注水点 1,2 下方试验墙出现显著冷斑,表明水从注水口进入后沿着黏结层持续往下渗漏,最终在下方冷斑部位表现出来。通过红外扫描仪可清楚识别出保温材料的破损点位,以及表面发生渗水的大概位置。

在注水点 3 的下面未发现冷斑,而注水点 4 下方的试验墙出现显著冷斑,表明水从注水点 3 进入后并未向下发生渗漏,注水点 4 进入的水则发生了显著向下渗漏,最终在下方冷斑部位表现出来。由于保温材料及黏结方式的不同,渗水病害程度和外在表现也不同。注水点 3 所采用的是岩棉条满粘,故水被岩棉条吸收扩散,注水点 4 使用的是 XPS 满粘,水从黏结层往下渗漏到表面。

通过红外技术对外墙进行扫描可清楚地识别出建筑外墙发生渗漏点位，但由于红外扫描技术仅能通过对表层渗漏冷热斑进行识别扫描，无法对内部的渗漏路径和内部渗漏的具体程度进行有效识别。

3.2 高频雷达扫描技术对渗漏路径的检测研究

采用红外设备大面积扫描建筑外墙，可快速筛查识别外墙渗漏点，但对渗漏点直接进行维修依然治标不治本，所以需利用高频雷达对发生渗漏的部位进行扫描，找到渗漏路径，再通过渗漏路径找到渗水源头，对渗漏源头进行维修才能从根本上解决外墙渗漏问题。

渗漏路径识别的具体操作方法是：将高频雷达置于渗水部位，对渗水部位的上方区域进行扫描，雷达扫描现场操作如图7所示。雷达设备紧贴测试墙体，由下至上进行扫描测试。



图7 雷达扫描的现场操作

Fig.7 Field operation for radar scanning

3.2.1 注水点1、2渗漏部位的渗漏路径识别

在对注水点注水前后分别进行雷达扫描，得到若干波形图，对波形图进行再处理，将波形图在深度为10cm的位置提取合成，最终得到扫描区域的完整可视化切面图，注水点1、2通水前后雷达扫描切面如图8所示。

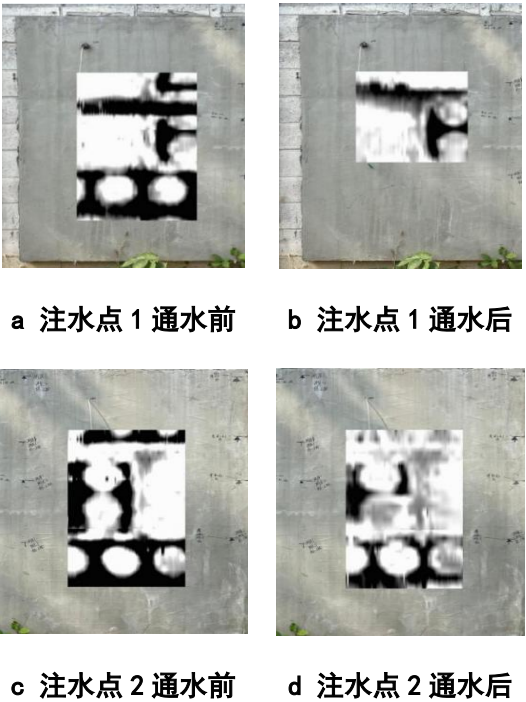


图8 注水点1、2通水前后雷达扫描切片(比例尺 1:30)

Fig.8 Radar scanning sections before and after water injection points 1 and 2 (scale 1:30)

由图8可看出，在注水前，雷达扫描切面图能清晰地看到黏结层空腔位置和黏结密实区域。研究发现，黏结砂浆密实的地方，雷达波的反射信号弱，切面图上呈现白色；黏结砂浆不密实的地方，雷达波反射信号偏强，切面图上呈现浅灰色；在黏结层空洞位置，雷达波反射信号最强，反射界面明显，切面图上呈现黑色。黏结砂浆状态与高频雷达信号及切面图间差异如表3所示。

注水后，水流进入黏结层空腔内，在黏结砂浆内扩散，导致空腔周边的黏结砂浆变得湿润，最后使空腔周边湿润的黏结砂浆和空腔的介电常数差异变小，最终的切面图表现为空腔区域变小，而周围的浅灰色区域则扩大。

表3 黏结砂浆状态与高频雷达信号及切面图间差异

Table 3 Difference between bonded mortar condition and high-frequency radar signals and cross-section plots

黏结砂浆状态	雷达反射信号	切面图颜色
--------	--------	-------

密实	弱	白色
不密实	偏强	浅灰色
空洞	强	黑色

根据设计图可得出注水点 1, 2 的理论渗漏路径, 如图 9 所示。

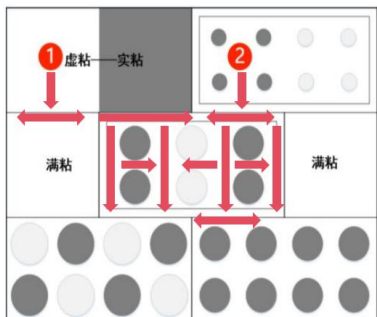


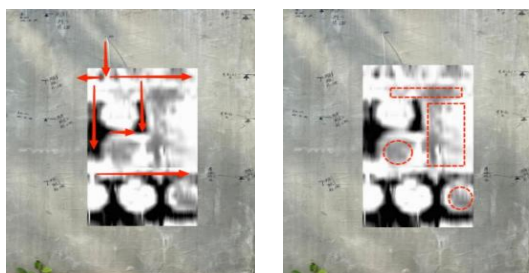
图 9 注水点 1, 2 的理论渗漏路径

Fig.9 Theoretical seepage paths at injection points 1, 2

试验所得注水点 1, 2 的实际渗漏路径如图 10 所示, 渗漏扩散区域和理论路径相吻合。



a 注水点 1 渗流路径 b 注水点 1 渗流扩散区域



c 注水点 2 渗流路径 d 注水点 2 渗流扩散区域

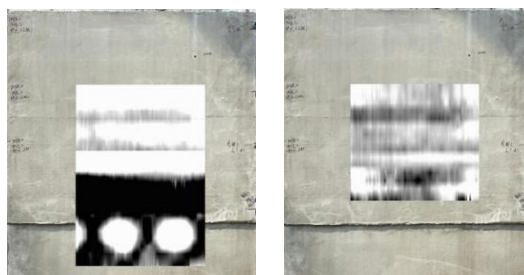
图 10 注水点 1, 2 的渗漏路径和渗漏扩散区域 (比例尺 1:30)

Fig.10 Seepage paths and seepage spreading areas at injection points 1, 2 (scale 1:30)

3.2.2 注水点 3, 4 渗漏部位的渗漏路径识别

以同样方法对注水点 3, 4 进行雷达扫描。注水点 3, 4 渗水前后的高频雷达扫描结果如图 11 所示。试验所得注水点 3, 4 的渗漏路径如图 13 所示。

根据设计图可得出注水点 3, 4 的渗漏路径在理论上应如图 12 所示。



a 注水点 3 通水前 b 注水点 3 通水后



c 注水点 4 通水前 d 注水点 4 通水后

图 11 注水点 1, 2 通水前后雷达扫描切片 (比例尺 1:30)

Fig.11 Radar scanning slices before and after water injection points 1 and 2 (scale 1:30)

由于注水点 3 附近采用岩棉板及岩棉条满粘方式。所以由图 11a, 11b 可看出, 在渗水前的切面图中, 岩棉板内并无空腔显示, 切面图呈现大面积白色; 在渗水后的切面图中, 由于满粘的黏结方式, 注入黏结层的水未向下进入黏结层空腔内, 均被岩棉板吸收, 最终导致扫描水在岩棉板内扩散。故注水点 3 无渗漏路径, 其渗漏扩散区域为整个注水点附近的岩棉, 与理论相吻合。

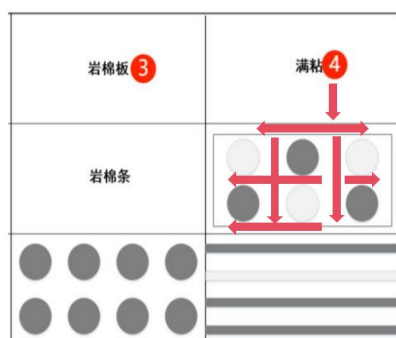


图 12 注水点 3, 4 的理论渗漏路径

Fig.12 Theoretical seepage paths at injection points 3, 4

注水点 4 在渗水前后切片图的形貌变化与注水点 1, 2 情况相近。注水点 4 的渗漏路径和具体渗漏扩散区域在理论上具有合理性。



a 注水点 4 渗流路径 b 注水点 4 渗流扩散区域

图 13 注水点 4 的渗漏路径和渗漏扩散区域 (比例尺 1:30)

Fig.13 Seepage path and seepage spreading area at injection point 4 (scale 1:30)

4 结语

红外扫描技术仅能通过冷斑识别表层渗漏部位,无法识别内部渗漏情况,高频雷达在定位表层渗漏部位的基础上,可通过检测内部基层表面潮湿状态定位外墙内部渗漏水流的路径。基于此,本文利用红外成像扫描技术对渗漏外墙进行表层扫描,并通过高频雷达技术对外墙进行内部检测,由表及里地对外墙渗漏位点及渗漏路径进行全面定位。检测结果表明,红外扫描技术可清楚识别建筑外墙各部位具体温度值,并判断出保温材料的破损点位及渗水部位。再利用高

频雷达对渗漏部位进行可视化切片扫描,在扫描的同时能检测出外保温系统黏结状态:黏结砂浆密实处,雷达波反射信号弱,切面图呈白色;黏结砂浆不密实处,雷达波反射信号较弱,切面图呈浅灰色;黏结层空洞处,雷达波反射信号强,切面图呈黑色。同时,高频雷达技术能检测出建筑外墙渗水的渗漏路径和渗漏扩散区域。

本研究初步证明在渗漏检测方面红外设备和高频雷达的结合使用具有较大潜力,同时在预设渗漏路径时未考虑墙体内部缺陷、钢筋布置对检测的影响,后续还需进行深入研究提升 2 种检测方式结合使用的检测精度,并通过工程实际应用进一步调整优化设备参数和检测方法。

参考文献:

[1] 马福栋,张东波,王卓琳,等.既有建筑外墙外保温系统应用现状与脱落风险研究进展[J].结构工程师,2023,39(4):200-213.

MA F D,ZHANG D B,WANG Z L,et al. Progress in the application of exterior insulation system for existing buildings and the risk of falling off[J]. Structural engineers, 2023, 39(4):200-213.

[2] 汪国元.建筑工程外墙保温技术难点及解决措施[J].散装水泥,2023(5):104-106.

WANG G Y. Technical difficulties and solution measures of external wall insulation in construction engineering[J]. Bulk cement, 2023(5):104-106.

[3] 王玮,米庆仁,肖云,等.基于可见光和红外图像融合的建筑外墙空鼓与脱落识别方法研究[J].工业建筑,2024,54(5):51-59.

WANG W, MI Q R, XIAO Y, et al. Research on the recognition method of building facade cavity drum and peeling based on visible and infrared image fusion[J]. Industrial construction,2024,54(5):51-59.

[4] 王玉洁.用红外成像仪检测建筑外墙空鼓[J].城市勘测,2018(S1):144-148.

WANG Y J. Detection of building facade cavity drums with infrared imager[J]. Urban geotechnical investigation & surveying, 2018(S1): 144-148.

[5] 马廷婕.基于红外成像的水泥混凝土路面脱空定量检测方法研究[D].重庆:重庆交

通大学, 2019.

MA T J. Research on quantitative detection method of cement concrete pavement hollowing based on infrared imaging [D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2019.

[6] 高翔. 混凝土路面脱空红外成像检测及有限元数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.

GAO X. Infrared imaging detection and finite element numerical simulation of concrete pavement hollowing [D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2005.

[7] 毛南平. 基于红外热成像法的隧道渗漏水检测技术[J]. 山西建筑, 2016, 42(31): 181-183.

MAO N P. Tunnel water leakage detection technology based on infrared thermal imaging method[J]. Shanxi architecture, 2016, 42(31): 181-183.

[8] 唐晨浩, 郑弢, 杨国权. 红外热成像检测技术在幕墙门窗渗漏检测中的应用[J]. 工程质量, 2017, 35(2): 17-19.

TANG C H, ZHENG T, YANG G Q. Application of infrared thermal imaging detection technology in leakage detection of curtain wall doors and windows[J]. Construction quality, 2017, 35(2): 17-19.

[9] 王玉磊, 汤雷, 钱思蓉. 基于无人机和红外热成像技术的小型水库坝体早期非稳定渗漏检测系统[J]. 无损检测, 2020, 42(12): 61-65.

WANG Y L, TANG L, QIAN S R. Early unstable leakage detection system for small reservoir dams based on UAV and infrared thermography[J]. Nondestructive testing, 2020, 42(12): 61-65.

[10] 赵亚宇, 杨军, 卞德存, 等. 双光热成像技术在大型水池结构渗漏检测中的应用[J]. 广州建筑, 2020, 48(1): 10-14.

ZHAO Y Y, YANG J, BIAN D C, et al. Application of dual-optical thermal imaging technology in leakage detection of large pool structures[J]. Guangzhou architecture, 2020, 48(1): 10-14.

[11] 段浩然, 赵鹏, 秦磊, 等. 建筑地下工程漏水的红外热成像检测[J]. 无损检测, 2021, 43(8): 72-76.

DUAN H R, ZHAO P, QIN L, et al. Infrared thermography for water leakage detection in underground construction[J]. Nondestructive testing, 2021, 43(8): 72-76.

[12] 周仁练, 苏怀智, 刘明凯, 等. 基于被动红外热成像的土石堤坝渗漏探测试验研究[J]. 水利学报, 2022, 53(1): 54-67.

ZHOU R L, SU H Z, LIU M K, et al.. Experimental study on leakage detection of earth and rock embankment based on passive infrared thermography[J]. Journal of hydraulic engineering, 2022, 53(1): 54-67.

[13] LEE J S, NGUYEN C, SCULLION T. A novel, compact, lowcost, impulse ground-penetrating radar for nondestructive evaluation of pavements[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2004, 53(6): 1502-1509.

[14] GUO X J, WANG M, ZHANG X W, et al. Numerical analysis and automatic identification of GPR responses to highway surface & subgrade diseases[C]//

Proceedings of International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2011.

[15] 张迪, 莫其妙. 基于 GprMax 的地下管线探地雷达图像正演模拟[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(2): 168-182.

ZHANG D, MO Q M. Orthorectification simulation of ground-penetrating radar images of underground pipelines based on GprMax[J]. Chinese journal of engineering geophysics, 2022, 19(2): 168-182.

[16] Hao B, Sinfield J. Simulation analysis for under pavement drainage detection by ground penetrating radar (GPR)[C]// USA: Unconventional Resources Conference, 2014.

[17] TOSTI F, UMILIACO A. FDTD simulation of the GPR signal for preventing the risk of accidents due to pavement damages[M]. International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking, 2016, 6(1): 1-9.

[18] 尹光辉. 基于 GprMax 的道路空洞探地雷达图像正演模拟[D]. 西安: 长安大学, 2015.

YIN G H. Orthorectified simulation of road cavity ground-penetrating radar images based on GprMax [D]. Xi'

an: Chang' an University, 2015.

[19]李世念,王秀荣,林恬,等.基于 GprMax 的道路空洞三维探地雷达正演数值模拟[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(3):132-138.

LI S N, WANG X R, LIN T, et al. Numerical simulation of three-dimensional ground-penetrating radar orthorectification of road cavities based on GprMax[J]. The Chinese journal of geological hazard and control, 2020, 31(3): 132-138.