

文章编号:1674-2869(2017)01-0096-07

隧道衬砌渗漏水红外特征模拟试验及图像处理

顾天雄¹,朱福龙^{2*},程国开¹,汪从敏¹,周立波¹,施浪²

1. 国网宁波供电公司,浙江 宁波 315000;

2. 华中科技大学机械科学与工程学院,湖北 武汉 430074

摘要:为探究地下电缆混凝土隧道渗漏水红外辐射特征,采用定制的带有点状、线状、空鼓状缺陷的水泥试块进行模拟电缆隧道衬砌渗漏水的正交试验,通过改变缺陷形式、缺陷尺寸以及渗漏水流量等研究在不同影响因素下水泥试块渗漏处的红外辐射规律.经过后期的图像处理和面积提取,得到了三种不同缺陷形式下的渗漏水红外图像特征及其随流量和缺陷尺寸的变化规律.试验结果表明:不同渗漏水形式的试块在渗漏水过程中呈现的渗漏水形状特征也有所区别;在其他条件一定的情况下,渗漏水区域的面积随渗漏水流量的增大呈一定的线性增大;在线状缺陷的试验工况下,缺陷尺寸的大小对渗漏水的面积影响不大.研究成果可为实际隧道检测渗漏水快速检测提供依据.

关键词:水泥试块;电缆隧道;衬砌渗漏水;红外辐射;图像处理;面积提取

中图分类号:U45 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2017.01.017

Simulation Experiment on Infrared Radiation Feature of Tunnel Lining Seepage and Image Processing

GU Tianxiong¹, ZHU Fulong^{2*}, CHENG Guokai¹, WANG Congmin¹, ZHOU Libo¹, SHI Lang²

1. State Grid Corporation of China in Ningbo, Ningbo 315000, China

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: To explore the characteristics of seepage defects in underground cable concrete tunnels, we simulated water seepage on custom-made cement blocks with point-like, linear and hollow-like defects. This orthogonal test is aimed to explore the infrared radiation law of cement block leakage with the change of defect form, defect size and leakage flow rate. The features of infrared image and the variation rule influenced by flow rate and defect size were obtained through the later image processing and area extraction. The experimental results show that the seepage characteristics of the test specimens with different seepage patterns are different, and the leakage area increases linearly with the increase of the leakage water flow under certain other conditions, however, the size of the defect has little effect on the area of the leaking water in the case of linear defects. The study provides the basis for the rapid detection of leaking water in practical tunnel.

Keywords: cement test blocks; cable tunnel; seepage water on custom-made cement blocks; infrared radiation; image processing; area extraction

收稿日期:2016-12-06

基金项目:中央直属高校科研基金(HUST:2013TS023)

作者简介:顾天雄,高级工程师. E-mail: gtx1116@126.com

*通讯作者:朱福龙,博士,副教授. E-mail: zhufulong@hust.edu.cn

引文格式:顾天雄,朱福龙,程国开,等.隧道衬砌渗漏水红外特征模拟试验及图像处理[J].武汉工程大学学报,2017,39(1):96-102.

GU T X, ZHU F L, CHENG G K, et al. Simulation experiment on infrared radiation feature of tunnel lining seepage and image processing[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(1): 96-102.

目前,电缆隧道作为供电的主要途径之一,其存在的众多问题也是显而易见的,其中隧道渗漏水就是最严重的问题之一.它不仅会影响地下电缆隧道工作的安全系数,还会影响电量运输过程的效率等问题,甚至可能会危及隧道功能的实现^[1].《地下工程防水技术规范》中规定电缆隧道防水等级不得小于二级,即不允许漏水,结构表面可有少量湿渍,但总湿渍面积不应大于总防水面积的 $\frac{6}{1000}$,任意100 m²防水面积上的湿渍不超过4处,单个湿渍的面积不大于0.15 m².目前国内外用于隧道渗漏水的研究主要体现在渗漏形式及处理方式以及渗漏水检测的研究上.

邹育麟^[2]等人总结了公路隧道渗漏水病害的几个主要原因;方梁正^[3]从隧道防水层失效、接缝防水失效以及衬砌混凝土结构自防水失效三个方面分析了公路隧道渗漏的原因,并提出了隧道渗漏的若干预防措施;郭英波,马春波等人^[4-5]研究了火电工程中电缆隧道结构裂缝变形的原因,并提出了可行性控制方法;李国华,罗勇等人^[6-7]研究了隧道衬砌裂缝的成因,并提出了综合预防病害的措施.

隧道渗漏水检测技术主要有传统的方法及地质雷达法等,其中传统的检测方法通过人工肉眼检测,检测效率低,精度低且劳动量大,而地质雷达检测法不适用于远距离的渗漏检测且工作量大^[8].红外成像法凭借其灵敏度高、响应速度快、测量范围宽、非接触测量及测量结果直观形象,并且在光线暗淡等恶劣条件下仍然可以正常工作特点受到广泛的关注.

赵为民^[9]和杨晓虹^[10]等人通过实际检测工程,证明了红外热像检测技术在建筑渗漏检测过程中的实用性与可见性.邓焜^[11]等人探究了红外热像法在地下工程防水和渗漏检测的应用,表明了这项检测技术具有精度高、操作简便、对场地要求低的优点.程姝菲^[12]等人提出了电导率法和温度梯度法检测渗漏水,并设计了相关实验来验证其可行性.李晶哲等人^[13]经过理论分析工程实例提出红外辐射特征修正规律和热图像识别方法.豆海涛等^[14-15]通过实验研究了不同渗漏状态对应的红外热图像规律及其影响因素.

综上所述,目前对于电缆隧道渗漏水的研究主要集中在如何检测以及如何修复上,而对于判断隧道渗漏水处是否需要修复这一问题至今还没

有人进行相应的研究.修复不及时以及过度修复都会对电缆隧道带来危害,影响其使用寿命,所以,合理的判断隧道渗漏水处是否需要修复是必须的.针对缺乏红外技术实际用于隧道渗漏水检测的依据,本研究组提出了利用定制的不同缺陷形式的水泥试块模拟电缆隧道衬砌,用红外热像仪记录数据,并经过后期图像处理,对渗漏水处的红外热像图进行处理得出渗漏水面积,同时通过将渗漏水面积与电缆隧道防水要求做对比,并用试验所得的渗漏形状等特征作为辅助参考,进而判断出该隧道是否需要修复以及采用何种形式的修复.

1 试验

1.1 隧道实测

为探究隧道中影响渗漏水的主要因素,对实际隧道进行考察,拍摄并记录下了隧道中不同形式及不同程度的渗漏水点,其实测图如图1~图3所示.

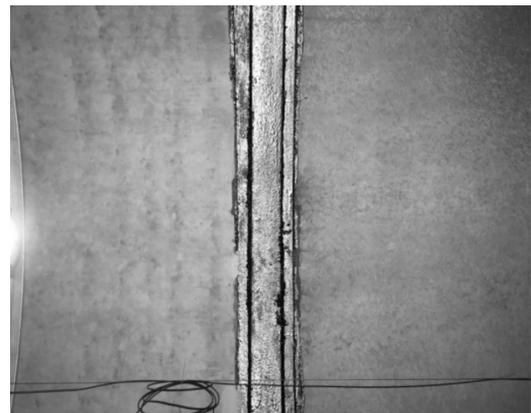


图1 隧道无渗水基准点

Fig. 1 Non-seepage reference point of the tunnel

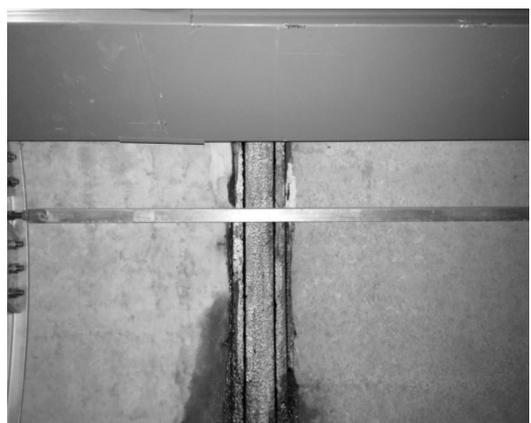


图2 隧道渗水点(1)

Fig. 2 Seepage point of the tunnel(1)

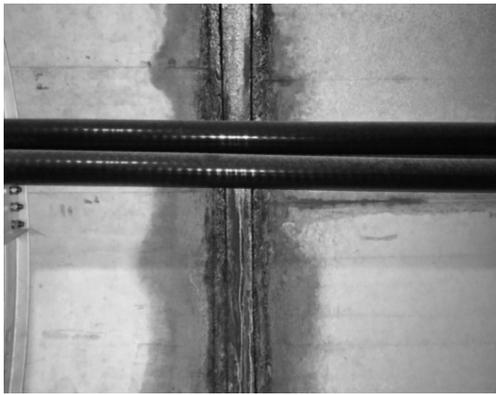


图3 隧道渗水点(2)

Fig. 3 Seepage point of the tunnel(2)

1.2 试验方案

通过对隧道实际的考察,分析其渗漏形式及渗漏程度,总结出隧道渗漏水的主要影响因素,并设计了以下3种因素为主的正交试验方案:渗漏形式、缺陷尺寸、渗漏水流量,如表1所示。

表1 试验方案

Tab. 1 Experimental program

影响因素 influencing factor	区间划分 interval division		
	点状	线状	空鼓状
渗漏形式	点状	线状	空鼓状
缺陷尺寸/mm	4~10	20~30	4~10
尺寸间隔/mm	2	5	2
渗漏水流量/(L/min)	0.1~0.4	0.1~0.4	0

1.3 试验设备

1.3.1 红外热像仪 本次试验采用的红外热像仪及其图像采集软件的工作界面如图4所示,红外热像仪的具体设备参数如表2所示。



图4 红外热像仪及图像采集软件

Fig. 4 Infrared camera and analysis software

表2 红外热像仪参数

Tab. 2 Infrared camera parameters

设备参数 device parameter	参数数据 parameter data
像素	384×288
波长范围 $\lambda / \mu\text{m}$	7.5~14
焦距 f / mm	10
视场角 $\alpha \times \beta / (^\circ)$	37.4×28
空间分辨率 / mrad	1.7
热灵敏度 / $^\circ\text{C}$	0.06
测温精度 / %	2

1.3.2 水泥试块 实验采用的对象是模拟电缆隧道中常见的渗漏形式而制作的3种如图5所示的水泥试块:点状缺陷、线状缺陷、空鼓缺陷。水泥试块混凝土强度等级为C25,三维尺寸长、宽、高为150 mm×150 mm×150 mm,渗漏位置位于其正面几何中心,上开有直径为20 mm的注水口。点状缺陷水泥石块孔径缺陷尺寸分别为4 mm、6 mm、8 mm、10 mm;线状缺陷水泥试块的线缺陷尺寸分别为20 mm、25 mm、30 mm;空鼓缺陷隔层缺陷尺寸分别为4 mm、6 mm、8 mm、10 mm。

1.3.3 红外检测平台 本次检测平台主体框架材料选用铝型材,根据水泥试块的尺寸、三脚架的伸缩高度、红外热像仪对焦后的测量距离、流量控制计以及注水装置和回流装置的固定位置等因素来设计其结构和尺寸。该框架质量较轻,装配方便,抗压强度突出,满足试验要求。该框架还可同时放置多个水泥试块同时进行试验,很大程度上能够节省试验时间,其实物图如图6(a)所示。此外本次试验采用转子流量计进行流量控制,其型号为LZB-6WB,其实物图如图6(b)所示,该流量计在一根由下向上扩大的垂直管中,圆形横截面的金属浮子的重力是由液体动力承受的,金属浮子可以在管内自由地上升和下降。在流速和浮力作用下上下运动,与浮子重量平衡后,通过磁耦合传到刻度盘以指示流量。该流量计可控制的流量范围为0 L/min~0.4 L/min,具有较高精度。

1.4 试验过程

试验前先通过温、湿度传感器采集试验环境温度 and 湿度,以及水温等数据,然后进行分组试验:

1) 分别将3种缺陷形式的水泥试块放置在试验平台上进行注水试验,模拟电缆隧道不同的渗漏形式。

2) 分别将不同缺陷尺寸的水泥试块放置在试

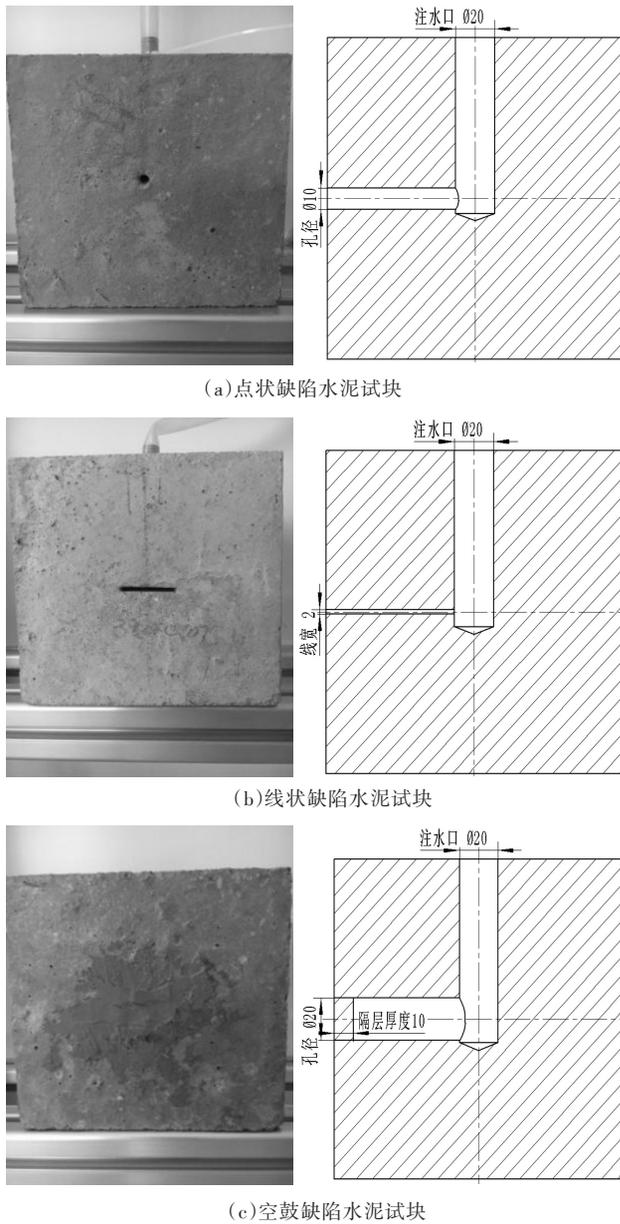


图5 试块实体及二维图(单位:mm)

Fig. 5 Test block entities and two-dimensional drawings (unit:mm)

(a) Cement block with point defect; (b) Cement block with linear defect; (c) Cement block with hollow defect



图6 实验框架平台

Fig. 6 Experimental framework platform

(a) Experimental framework; (b) Rotor flowmeter

验平台上进行注水试验,模拟电缆隧道不同渗漏尺寸的渗漏情况.

3)通过转子流量控制计控制渗漏水流量为0.1 L/min,0.2 L/min,0.3 L/min,0.4 L/min,模拟电缆隧道不同渗漏流量的渗漏情况.

4)将红外热像仪放置在距水泥试块220 mm处,使试块占据摄像仪的整个画面,调焦至画面清晰,每组试验30 min,每5 min采集一次试验红外图像数据,共6次.

2 红外图像处理

2.1 阈值分割

为了减少图像处理过程中的数据量以及简化处理算法,首先将红外热像图转为灰度图.

数字图像用于后期应用,其噪声是最大的问题,因此需要对图像进行降噪处理.采用高斯滤波法对图像进行处理.高斯滤波是一种线性平滑滤波,是对整幅图像进行加权平均的过程.

图像二值化是图像处理中的一项基本技术,图像二值化时阈值的选择是非常关键的,采用最大类间方差法进行阈值的计算.试验图像处理样例(线状缺陷)如图7所示.

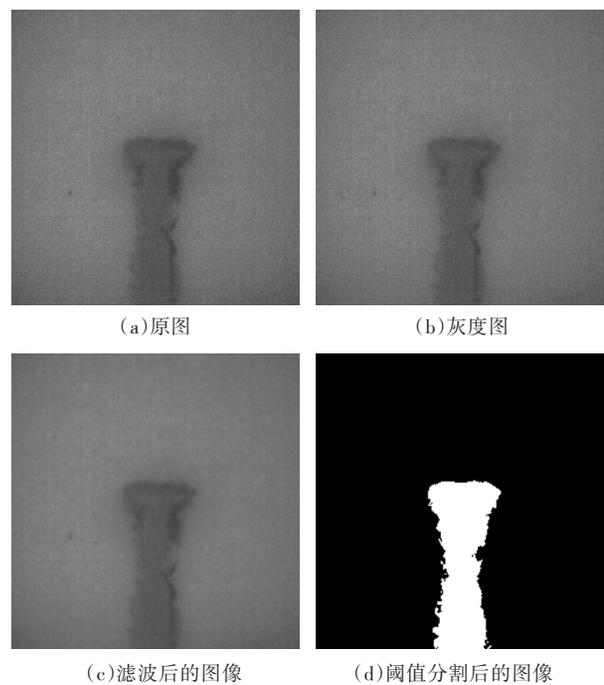


图7 图像处理样例

Fig. 7 Image processing examples

(a) Original image; (b) Gray image; (c) Filtered image; (d) Image after thresholding

2.2 不同渗漏形式下的红外图像

针对电缆隧道中常见的3种渗漏形式(点状,

线状,空鼓状)设计了3种缺陷形式的水泥试块来进行模拟试验,探究在不同渗漏形式下的红外图像形状特征.其试验结果图如图8所示.

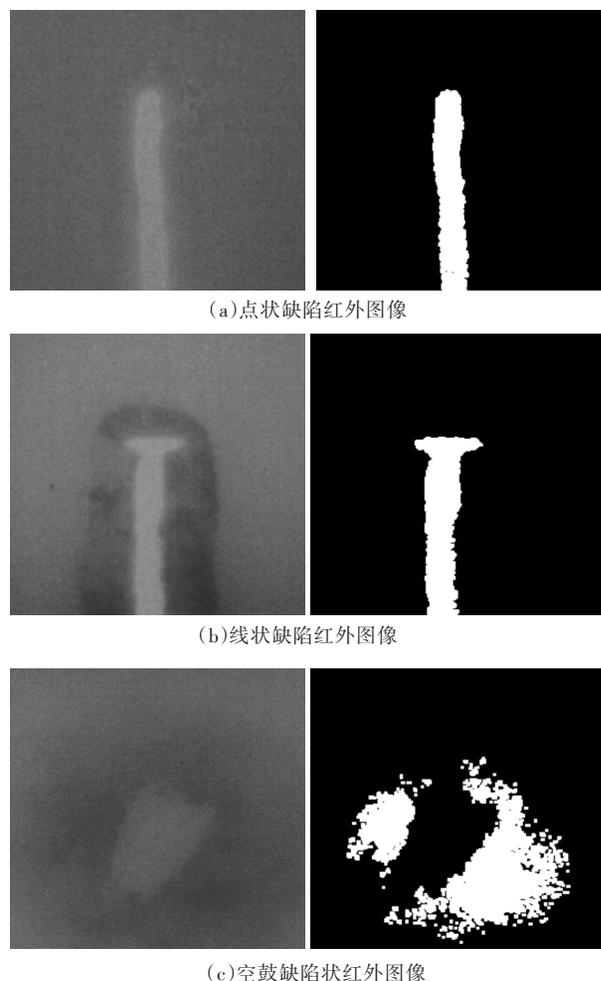


图8 不同渗漏形式下的红外图像

Fig. 8 Infrared images in different leakage forms
(a) Infrared image of point defect; (b) Infrared image of linear defect; (c) Infrared image of hollow defect

3 渗漏区域面积提取

3.1 面积提取原理

对于渗漏水面积的求法,首先提取出红外图像中低温区域所占的像素数,然后计算出低温区所占像素数与整张图片的像素数的比值,该比值即为渗水区域面积占所测量面积的比例,进而根据实际测量面积求出渗水区域的面积值.根据红外热像仪检测范围分析图(见图9),得出红外热像仪所测实际面积可表示为:

$$A_1 = W_1 \times H_1 \quad (1)$$

其中

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{W_1/2}{d} \quad (2)$$

$$\tan \frac{\beta}{2} = \frac{H_1/2}{d} \quad (3)$$

式(1)~(3)中 α 为热像仪宽度方向视场角, β 为热像仪高度方向视场角, d 为镜头到被测物体的距离, W_1 为测量范围宽度方向的尺寸, H_1 为测量范围高度方向的尺寸.则渗漏水的面积可表示为:

$$A_{\text{渗}} = A_1 \times \mu \quad (4)$$

式(4)中 μ 为低温区所占像素数与整张图片的像素数的比值, A_1 为红外热像仪所测实际面积.

由热像仪设备参数视场角 $\alpha = 37.4^\circ$, $\beta = 28^\circ$ 以及放置的观测距离 $d = 220 \text{ mm}$,算得 $W_1 = 148.93 \text{ mm}$, $H_1 = 109.70 \text{ mm}$,由此得 $A_1 = 148.93 \times 109.70 = 16\,337.62 \text{ mm}^2$.

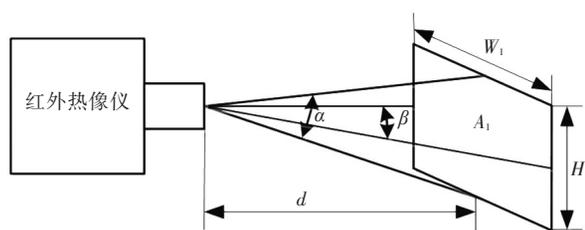


图9 红外热像仪检测范围分析图

Fig. 9 Analysis chart of detection range of infrared thermal imaging

3.2 不同因素下的渗漏区域面积

通过控制变量法,分别来分析在同种渗漏形式下不同因素对渗漏面积的影响.通过C语言编写的面积提取软件,记录并统计数据.以下主要分析研究水流量因素和缺陷尺寸因素对渗漏面积的影响.

图10所示的是点状缺陷水泥试块在不同流量下的面积提取图,由计算机提取像素数算得: $\mu_1 = 0.026\,05$, $\mu_2 = 0.059\,02$, $\mu_3 = 0.103\,96$,由此得:

$$A_{\text{渗}1} = A_1 \times \mu_1 = 16\,337.62 \times 0.026\,05 = 425.60 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{渗}2} = A_1 \times \mu_2 = 16\,337.62 \times 0.059\,02 = 964.25 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{渗}3} = A_1 \times \mu_3 = 16\,337.62 \times 0.103\,96 = 1\,698.46 \text{ mm}^2$$

由以上数据可以看出,在该试验工况下,渗漏水面积随着流量的增大而增大,且 $A_{\text{渗}3} = 1.76 A_{\text{渗}2} = 3.99 A_{\text{渗}1}$,呈一定的线性关系,梯度约为 $4\,256.0 \text{ mm}^2/(\text{L}/\text{min})$.

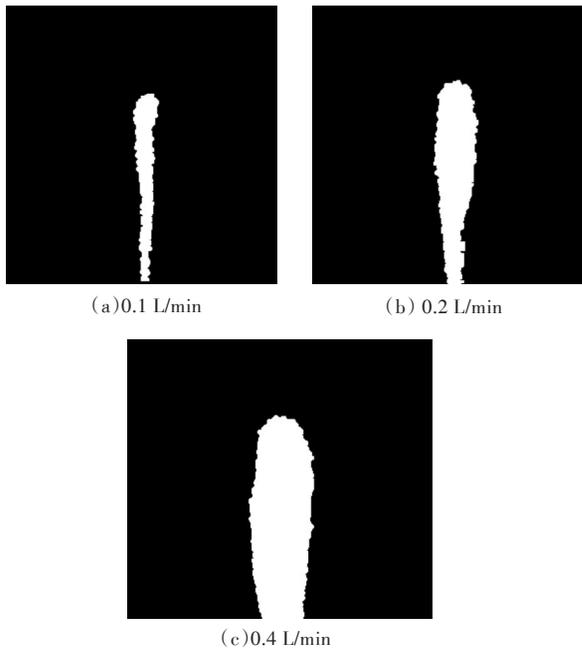


图10 不同水流量下的面积提取
Fig. 10 Extraction of area at different water flows

图11所示的是线状缺陷水泥试块在不同缺陷尺寸下的面积提取图,由计算机提取像素得:

$\mu_4 = 0.044\ 07$, $\mu_5 = 0.041\ 85$, $\mu_6 = 0.045\ 00$ 由此得:

$$A_{\text{渗}4} = A_1 \times \mu_4 = 16\ 337.62 \times 0.044\ 07 = 720.00\ \text{mm}^2$$

$$A_{\text{渗}5} = A_1 \times \mu_5 = 16\ 337.62 \times 0.041\ 85 = 683.73\ \text{mm}^2$$

$$A_{\text{渗}6} = A_1 \times \mu_6 = 16\ 337.62 \times 0.045\ 00 = 735.19\ \text{mm}^2$$

由以上数据可以看出,在该试验工况下,渗漏水面积随缺陷尺寸的增大而基本保持不变。

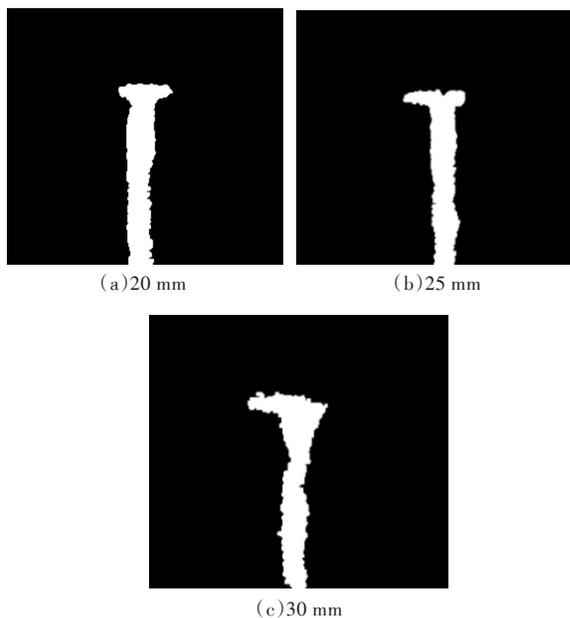


图11 不同缺陷尺寸下的面积提取
Fig. 11 Extraction of area at different defect sizes

4 结 语

针对电缆隧道红外辐射特征的影响因素,设计制作了点状、线状、空鼓状缺陷水泥试块模拟隧道衬砌.其次,采用红外热像仪记录红外图像数据,另外通过图像处理软件进行处理,随后通过编写的C语言程序提取渗漏水面积等信息,得到了如下结论:

1)不同渗漏水形式的试块在渗漏水过程中呈现的渗漏水形状特征也有所区别.点状缺陷试块呈现出宽度与缺陷尺寸大小相近的条柱状;线状缺陷呈现出略小于缺陷尺寸的条柱状,且四周有明显的温度梯度;空鼓缺陷试块呈现出以渗漏水点为中心的圆,且四周有明显的温度梯度.

2)在其他条件一定的情况下,渗漏水流量越大,其渗漏水区域的面积呈一定的线性增大.在线状缺陷尺寸的试验工况下,缺陷尺寸的大小对渗漏水面积影响不大.

3)综合分析渗漏水区域的形状和面积的影响因素,结合《地下工程防水技术规范》进一步判断渗漏水情况,为电缆隧道是否需要修复以及采用何种方式修复提供了指导意见.

参考文献:

- [1] 陈孝湘,李广福,吴勤斌. 电力电缆隧道结构常见病害分类及防治[J]. 电力勘测设计,2015(2):10-14.
CHEN X X, LI G F, WU Q B. Classification and prevention of common diseases of power cable tunnel structure [J]. Power Survey and Design, 2015 (2) : 10-14.
- [2] 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(1):86-93.
ZOU Y L, HE C, ZHOU Y, et al. Analysis of leakage water diseases in existing operating tunnels of Chongqing expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013 (1) : 86-93.
- [3] 方梁正. 公路隧道渗漏水与冻害防治研究[D]. 西安: 长安大学,2001.
- [4] 郭英波,靳波. 火电工程中电缆隧道裂缝原因分析及控制[J]. 河北电力技术,2004(5):36-38.
GUO Y B, JIN B. Analysis and control of cracks in cable tunnels in thermal power engineering [J]. Hebei Electric Power Technology, 2004(5): 36-38.
- [5] 马春波,王国权. 浅析电缆隧道裂缝分析及控制[J]. 中国新技术新产品,2011(2):72.

- MA C B, WANG G Q. Analysis of cable tunnel crack analysis and control [J]. China New Technology and Products, 2011(2): 72.
- [6] 李国华, 郭建国. 隧道衬砌裂缝和渗漏的成因、预防及治理[J]. 铁道建筑, 2003(1): 23-25.
- LI G H, GUO J G. The causes, prevention and treatment of tunnel lining cracks and leakage [J]. Railway Construction, 2003(1): 23-25.
- [7] 罗勇. 隧道衬砌开裂机理及控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [8] 陆晓华. 隧道渗漏及表观损伤检测方法对比分析[J]. 科技信息, 2013(18): 381.
- LU X H. Tunnel leakage and apparent damage detection method of comparative analysis [J]. Science and Technology Information, 2013(18): 381.
- [9] 赵为民, 赵鸿, 赵鸣. 红外热像技术在检测建筑物渗漏中的应用[J]. 住宅科技, 2004(5): 38-40.
- ZHAO W M, ZHAO H, ZHAO M. Application of infrared thermography in the detection of building leakage [J]. Residential Science and Technology, 2004(5): 38-40.
- [10] 杨晓虹, 许国东, 李天艳, 等. 红外热像技术在建筑渗漏检测中的应用[J]. 工程质量, 2010, 28(5): 24-26.
- YANG X H, XU G D, LI T Y, et al. Application of infrared thermography in building leakage detection [J]. Engineering Quality, 2010, 28(5): 24-26.
- [11] 邓焯, 关洪军, 秦雷, 等. 红外热像法在地下工程防水质量和渗漏检测中的应用[J]. 中国建筑防水, 2014(5): 33-36, 48.
- DENG Y, GUAN H J, QIN L, et al. Application of infrared thermal image method in waterproof quality and leakage detection of underground engineering [J]. China Building Waterproofing, 2014(5): 33-36, 48.
- [12] 程姝菲, 黄宏伟. 盾构隧道长期渗漏水检测新方法[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 733-738.
- CHENG S F, HUANG H W. A new method for long-term leakage detection in shield tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 733-738.
- [13] 李晶哲, 黄宏伟, 马赞, 等. 基于红外热成像技术的隧道衬砌渗漏水检测方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014(8): 223-225.
- LI J Z, HUANG H W, MA Y, et al. Research on detection method of tunnel lining leakage water based on infrared thermal imaging technology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (applied technology), 2014(8): 223-225.
- [14] 豆海涛, 黄宏伟, 薛亚东. 隧道衬砌渗漏水红外辐射特征影响因素试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2426-2434.
- DOU H T, HUANG H W, XUE Y D. Experimental study on influencing factors of infrared radiation characteristics of tunnel lining leakage water [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2426-2434.
- [15] 豆海涛, 黄宏伟, 薛亚东. 隧道渗漏水红外辐射特征模型试验及图像处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊2): 3386-3391.
- DOU H T, HUANG H W, XUE Y D. Study on infrared radiation characteristic model test and image processing of tunnel leaking water [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Suppl. 2): 3386-3391.

本文编辑: 陈小平