

混凝土板裂缝的超声红外热像检测机理

蒋雅君¹, 任 荣¹, 冯辅周², 赵菊梅¹

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031; 2. 陆军装甲兵学院车辆工程系, 北京 100072)

摘要: 为探讨超声红外热像对混凝土裂缝检测的机理, 设计带有预制裂缝的混凝土板试件, 采用超声红外热像检测系统开展超声激励下混凝土板裂缝生热试验. 通过分析裂缝生热的红外热像图和试验后裂缝表面的显微成像, 归纳超声激励下混凝土板裂缝的生热机理; 基于裂缝的生热机理, 分析预紧力、激励时间和激励强度对裂缝生热的影响. 试验结果表明: 裂缝生热来源于裂缝面的接触、碰撞和滑移作用, 裂缝面中下部为主要生热区域且裂缝面平整无填充物. 增大预紧力、激励时间和激励强度都能使得更多的超声能注入至混凝土板试件, 从而促进裂缝生热量的增多; 当预紧力为 110 ~ 120 N 且激励强度为 21% ~ 24% 时, 裂缝具有良好的热响应, 利于检测识别.

关键词: 超声红外热像; 混凝土板裂缝; 激励参数; 接触与生热效应; 试验研究; 数值模拟

中图分类号: TU 375. 2

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2022)10 - 1028 - 08

doi: 10. 11936/bjtxb2021100017

Mechanism of Ultrasonic Infrared Thermography Detection of Concrete Slab Cracks

JIANG Yajun¹, REN Rong¹, FENG Fuzhou², ZHAO Jumei¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Department of Vehicle Engineering, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: To identify the mechanism of ultrasonic infrared thermal image detection of concrete crack detection, the concrete slab specimens with prefabricated cracks were designed, and the thermal test of concrete slab cracks under ultrasonic excitation was carried out by using the ultrasonic infrared thermal image detection system. By analyzing the infrared thermal image of the crack heating and the microscopic image of the crack surface after the test, the heating mechanism of the concrete slab crack under ultrasonic excitation was summarized. Based on the heat generation mechanism of cracks, the effects of pre-tightening force, excitation time and excitation intensity on the crack heating were analyzed. The test results indicate that the crack heating originates from the contact, collision and slippage of the crack surface. The middle and lower parts of the crack surface are the main heat generation areas, and the crack surface is flat and without filler. Increasing pre-tightening force, excitation time and excitation intensity can input more ultrasonic energy into concrete slab specimens, thus promoting the increase of crack heating. When the pre-tightening force is 110 - 120 N and the excitation intensity is 21% - 24%, the cracks have good thermal response, which is conducive to detection and identification.

Key words: ultrasonic infrared thermography; cracks in concrete slab; excitation parameters; contact and heating effects; experimental research; numeral simulation

收稿日期: 2021-10-18; 修回日期: 2021-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875576)

作者简介: 蒋雅君(1980—), 副教授, 主要从事隧道及地下工程检测与维护技术方面的研究, E-mail: yajunjiang@swjtu.edu.cn

开裂是混凝土结构服役期内最常见的病害形式,所产生的裂缝不但削弱了结构的承载能力及整体性能,而且也会使得渗漏水 and 钢筋锈蚀的可能性增加,降低混凝土的耐久性. 因此,目前混凝土结构病害的检测中,裂缝是重点检查内容. 除了目测以外,常见混凝土裂缝检测方法主要包括波动法、红外法、线性相机法和激光扫描法,但是以上方法用于裂缝缺陷检测都有其局限性^[1-5]:波动法的检测效率低,红外法难以实现稳定热源,线性相机法和激光扫描法的检测精度还有待提高. 因此,急需探索新的检测方法及技术,以提高混凝土裂缝检测的效率和精度.

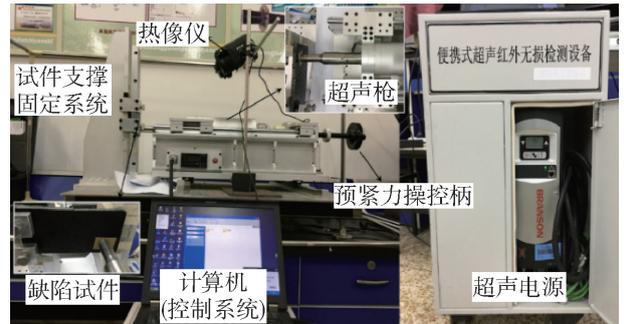
超声红外热像检测方法是一种新型无损检测技术,该方法已经在金属、碳纤维、陶瓷等材料缺陷检测上得到一定应用,被证明具有热源稳定、损伤小、精度高、速度快等优点^[6]. Favro 等^[7]、Han 等^[8-9]和 Song^[10]基于数值仿真和试验,研究了超声红外热像检测方法的理论原理、影响因素和检测效果. Renshaw 等^[11]研究发现摩擦滑移作用、塑性变形和材料黏弹性共同促成试件缺陷生热. Roberto 等^[12]研究了无表面接触的缺陷生热方式,证明无接触面的缺陷生热源于阻尼和黏弹性效应,并且无接触面缺陷振动生热与构件振型及自振频率有关. 米小兵等^[13]、陈赵江等^[14]基于三维弹性动力学方程,引入罚函数及界面本构摩擦模型,推导出裂缝生热的计算理论,并研究了超声激励下试件的非线性振动. 张超省等^[15-16]、闵庆旭等^[17]通过设计超声红外热像检测系统,对装甲装备裂缝缺陷展开生热特性、检测条件优化等研究,进一步拓展了超声红外热像检测方法的应用领域. 但以上研究仅针对金属、碳纤维、陶瓷等类材料缺陷,其研究成果对于混凝土材料的适用性不强. 胡振华等^[18]和贾宇等^[19]结合数值仿真和试验,研究了超声红外热像检测技术对混凝土缺陷的适用性,发现该技术可快速高效地检测出混凝土裂缝和疏松缺陷,但对于影响裂缝生热的相关因素,该研究并未给出试验分析与验证. 因此,超声红外热像检测方法虽然已经初步引入到混凝土结构裂缝的检测中,但是相关的机理、主要影响因素及规律尚未得到深入的研究和探讨.

基于此,本文通过开展超声激励下混凝土板裂缝生热室内试验,对超声激励下混凝土板裂缝生热的机理及主要影响因素进行验证和探索,希望为该方法的进一步应用提供指导和依据.

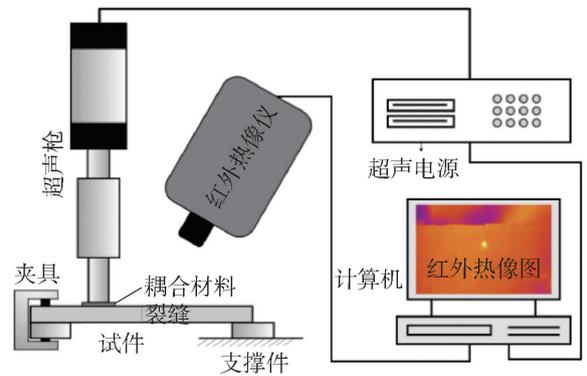
1 试验概况

1.1 超声红外热像检测系统

本研究中采用的超声红外热像检测系统的试验装置如图 1 所示,主要由超声发射系统、计算机控制系统、红外热像仪和试件 4 个部分组成.



(a) 超声红外热像检测系统



(b) 超声红外热像检测原理示意图

图 1 超声红外热像检测系统及其示意图

Fig. 1 Ultrasonic infrared thermal imaging detection system and its device schematic

超声发射系统由超声聚能杆、预紧力调控装置及超声电源组成,超声聚能杆由换能器、调幅器和工具杆组成. 超声电源为 BRANSON DCX S,输出电流频率为 20 kHz,输出功率为 1.25 kW,采用必能信 CJ20 超声波换能器,工作频率为 20 kHz,工具杆杆头端面振动激励的最大幅值为 60 μm . 热像仪为 FLIR T640 红外热像仪,性能参数如表 1 所示.

表 1 FLIR T640 红外热像仪性能参数

Table 1 Performance parameters of the FLIR T640 thermal imaging camera

参数类型	参数值
红外分辨率/像素	640 × 480
热灵敏度/°C	< 0.03
测温范围/°C	-40 ~ 150
图像帧频/Hz	30

1.2 试件制备

参照相关规范^[20]进行混凝土板试件的制备,混凝土设计强度等级为 C35. 采用如图 2 所示的模具制备试件,试件尺寸为 200 mm × 100 mm × 10 mm. 通过在模具预留缝隙处插入 0.04 mm 厚的塞尺(试件脱模时取出),实现在混凝土试件的中上部预制深度为 10 mm、宽 0.04 mm 的裂缝.

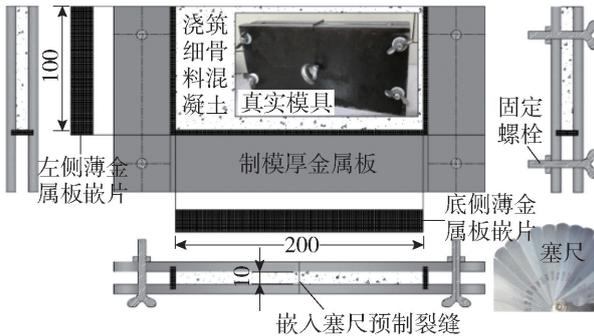


图2 混凝土板试件制备钢模具设计图(单位:mm)

Fig.2 Design drawing of steel mold for concrete plate test piece (unit: mm)

在标准条件下养护 28 d 后,在带裂缝的混凝土试件表面涂刷哑光漆(见图 3),准备进行超声激励试验. 试验结束后,采用硬化混凝土气孔结构分析仪(CABR-457)对裂缝面成像,该仪器的显微镜分辨率小于 2 μm ,显微镜最大放大倍数为 200,见图 4.

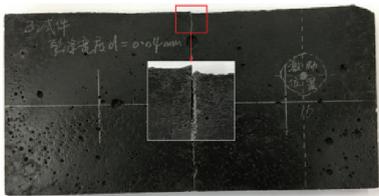


图3 带裂缝的混凝土板试件

Fig.3 Concrete slab specimens with cracks

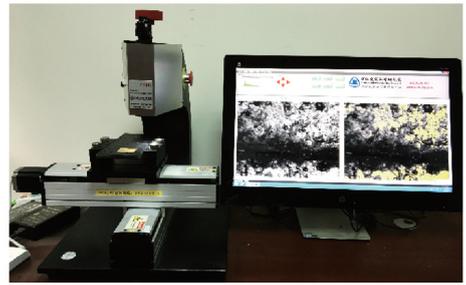


图4 混凝土气孔结构分析仪

Fig.4 Concrete pore structure analyzer

1.3 试验步骤

首先在试件上标记激励位置,再将耦合材料粘贴于激励位置;然后固定试件,连接超声电源、热像仪、计算机,启动计算机、热像仪和超声电源,打开超声热像控制及采集程序,调试仪器及软件至正常工作状态;最后按照试验方案开展试验. 试验后,将混凝土板件固定在气孔结构分析仪的托架上,控制托架位置使裂缝处于显微镜镜头下,调焦后可得到裂缝显微镜成像.

1.4 试验方案

1) 单因素激励参数变化对裂缝生热的影响试验

试验初始条件为预紧力 120 N,激励时间 1.00 s,激励强度为 20% (空载下激励头的振幅为 20 μm),激励位置为试件右上侧. 本项试验分为 3 组,每组 10 次(试验 A 至试验 J),共计需 3 × 10 = 30 次试验,每组试验具体方案参见表 2,每次试验后应等待 3 min 使试件冷却至室温. 其中,控制变量为激励时间时,预紧力为 100 N,激励强度为 20%;控制变量为预紧力时,激励时间为 1.00 s,激励强度为 20%;控制变量为激励强度时,激励时间为 1.00 s,预紧力为 100 N.

表 2 单因素激励参数变化对裂缝生热的影响试验方案

Table 2 Test scheme for the influence of single factor excitation parameter changes on crack heating

激励参数	试验号									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
激励时间/s	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00
预紧力/N	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
激励强度/%	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

2) 多因素激励参数变化对裂缝生热的影响试验

取激励时间为 1.00 s,预紧力分别为 40、60、80、100、120 N,激励强度分别为 16%、18%、20%、22%、

24%,为保证 2 种因素下的各种组合均被考虑,设计交叉试验方案,具体方案参见表 3.

表 3 多因素激励参数变化对裂缝生热的影响试验方案

Table 3 Test scheme for the influence of multi-factor excitation parameter changes on crack heating

激励强度/%	预紧力/N				
	40	60	80	100	120
16	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5
18	试验 6	试验 7	试验 8	试验 9	试验 10
20	试验 11	试验 12	试验 13	试验 14	试验 15
22	试验 16	试验 17	试验 18	试验 19	试验 20
24	试验 21	试验 22	试验 23	试验 24	试验 25

2 试验结果与分析

2.1 单因素激励参数变化对裂缝生热的影响试验结果

2.1.1 不同激励时间下裂缝生热结果

提取试件热像图最高升温像素点的数据, 绘制其温度随时间的变化曲线(曲线经平滑处理), 见图 5(a). 同时提取超声激励停止时刻、激励时间为 0.20 ~ 2.00 s 试件裂缝区域红外热像图, 见图 6.

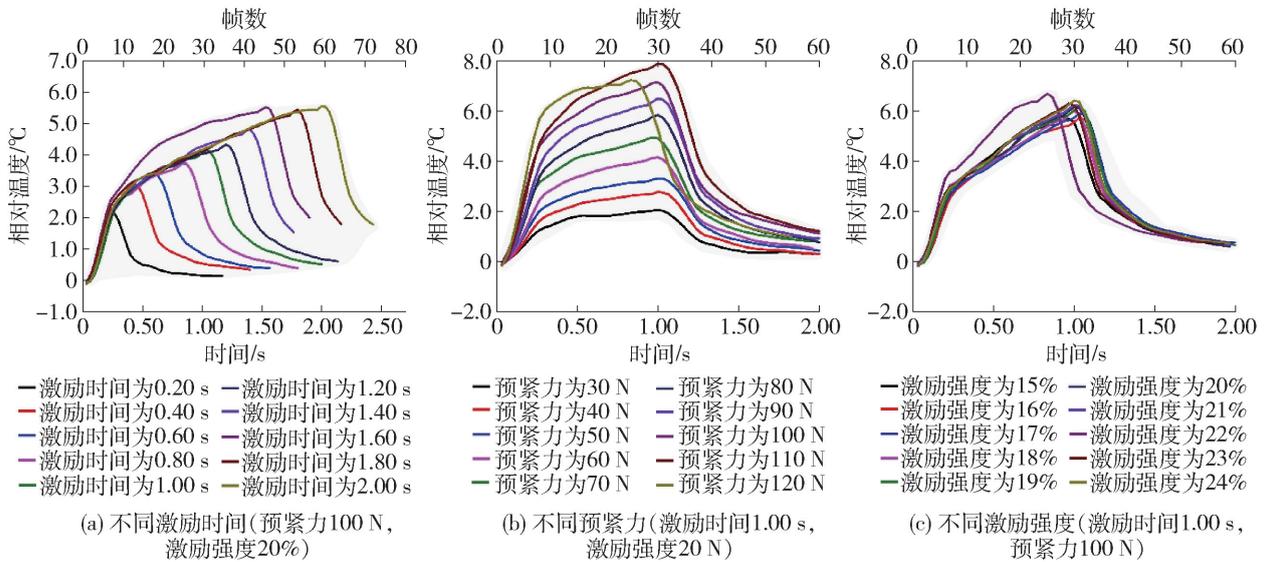


图 5 试件在不同激励参数下像素点的升温曲线

Fig. 5 Temperature rise curve of sample under different excitation parameters

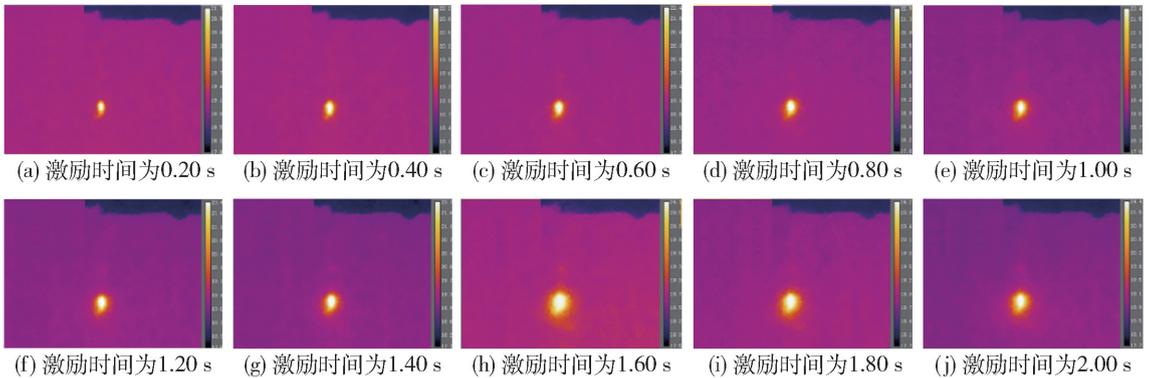


图 6 试件在激励时间为 0.20 ~ 2.00 s 且超声激励停止时刻的裂缝区域热像图

Fig. 6 Thermal image of crack area of specimen at the time of stopping of ultrasonic excitation and excitation time of 0.20 - 2.00 s

由图 5(a) 可知, 激励启动后, 像素点温度持续上升, 温度迅速上升的实际区间是 0 ~ 0.25 s, 当时间大于 0.25 s 时, 温度上升趋势变缓. 激励停止后, 像素点温度持续下降, 迅速下降的时间段为激励停

止后的 0.20 s 内, 缓慢下降的时间段为激励停止后的 0.20 s 到记录最终时刻, 激励时间越长, 温度上升也越大. 由图 6 可知, 随着激励时间的增加, 激励停止时裂缝区域圆形热斑逐渐变大, 色彩也更加饱和,

裂缝周围区域热像图由紫变黄,即随着激励时间的增加,热扩散作用增强.图5(a)中的曲线总体上符合上述规律,激励时间为1.60 s的曲线的规律与同系列其他曲线的结果相比,略有一定偏差,可能是试验时夹具有一定松动,导致部分预紧力变化所造成.

2.1.2 不同预紧力下裂缝生热结果

提取试件热像图最高升温像素点的数据,绘制其温度随时间的变化曲线(曲线经平滑处理),见图5(b).

由图5(b)可知,激励启动后,像素点在0~0.25 s内温度迅速上升,在0.25~1.00 s内温度缓慢上升.激励停止后,像素点在1.00~1.25 s内温度迅速下降,在1.25~2.00 s内温度缓慢下降,预紧力越大,温度上升也越大.由图5(b)可推知,随着预紧力的增加,激励停止时裂缝区域圆形热斑逐渐变大,色彩也更加饱和.

2.1.3 不同激励强度下裂缝生热结果

提取试件热像图最高升温像素点的数据,绘制其温度随时间的变化曲线(曲线经平滑处理),见图5(c).

由图5(c)可知,激励启动后,像素点在0~0.25 s内温度迅速上升,在0.25~1.00 s内温度缓慢上升.激励停止后,像素点在1.00~1.25 s内温度迅速下降,在1.25~2.00 s内温度缓慢下降,激励强度越大,温度上升也越大,但相比预紧力和激励时间,激励强度每提高1%对温度上升的贡献较小.此外,由图6可知,随着激励时间的增加,激励停止时刻裂缝区域圆形热斑稍微扩大.

2.2 多因素激励参数变化对裂缝生热的影响试验结果

提取多因素激励参数试验条件下的试件热像图最高升温像素点在记录时间内的最高温度,绘制得到最高温度三维柱状图,见图7.

由图7可知,当预紧力小于120 N时,增大激励强度(每增加2%)后,裂缝区域像素点的最高温度变化不大;增大预紧力(每增加20 N)后,裂缝区域像素点的最高温度变化较大,特别是预紧力由100 N变为120 N后,像素点最高温度变化达到2.5℃以上.

3 试验结果讨论

3.1 超声激励下混凝土板裂缝生热机理

采用硬化混凝土气孔结构分析仪对试验后的试件裂缝面成像见图8,据图8可知试验后裂缝面中

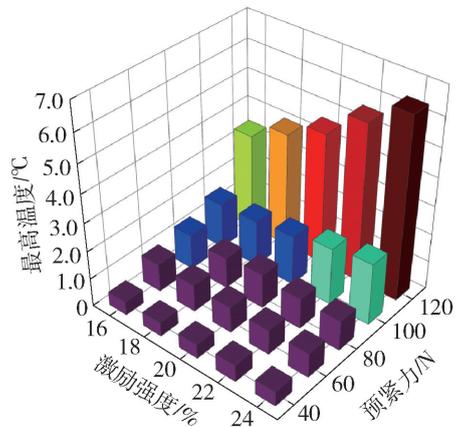


图7 试件在不同预紧力和激励强度下像素点最高温度三维柱状图

Fig. 7 Three-dimensional histogram of the highest temperature of the pixels in specimen B under different pre-tightening forces and excitation intensities

下部较为光滑平整,而裂缝面中上部不光滑且有毛刺.结合试验结果,图6显示裂缝主要生热部位为裂缝中下部,推测其为生热区,而裂缝生热机理为裂缝面的接触、碰撞和滑移,故可得出如下解释:裂缝面中下部发生强烈的接触、碰撞和滑移,并通过此作用磨损了混凝土裂缝内的填充物,导致裂缝中下部位的表面更平整光滑,中下部因摩擦滑移作用成为主生热区;裂缝上部宽度更大,裂缝两侧质点相距远,则发生接触的概率较小,难以发生接触、碰撞和滑移,故生热不明显或无生热,裂缝面粗糙并仍充满填充物和毛刺.

3.2 单因素激励参数变化对裂缝生热的影响分析

为分析单因素激励参数对裂缝生热的影响,提取试件在不同预紧力、激励时间和激励强度下的像素点最高温度,拟合绘制像素点最高温度与激励参数的关系图,见图9.

由图9可知,增大预紧力、延长激励时间和增加激励强度,均使得像素点最高温度增大,而根据热像图,像素点最高温度越大,裂缝热斑面积越大,饱和度也越高.即3种激励参数的增大均促进裂缝生热,利于裂缝检测识别.此外,提高1%激励强度相比增大10 N预紧力或延长0.20 s激励时间,其生热的促进作用更小,激励时间越长,每提高0.20 s的激励时间所促进的生热越小.

预紧力越小,试件与超声枪的接触越不稳定,能量传递效率越低,则试件输入能量不足,接触碰撞和滑移作用受限,故生热不强烈.

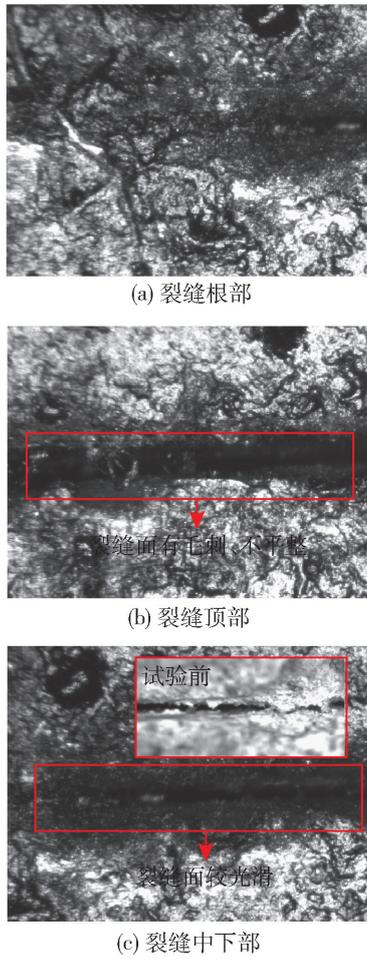


图 8 试件试验后裂缝底部、中下部和顶部显微镜成像图
Fig. 8 Microscopic imaging of bottom, middle and lower parts and top of cracks after specimen

延长激励时间, 质点保持振动状态, 裂缝面质点将持续发生接触、碰撞和滑移作用, 热量保持积累, 温度不断上升, 然而, 相对超声启动初期 0.25 s, 热量积累改变的温度较小。这一方面是启动时试件振动的混沌效应致使裂缝面质点运动无序, 两侧相对滑移量更大, 生热也就更多; 另一方面, 超声激励稳定后, 裂缝周围的热扩散作用不可忽略, 裂缝的最终生热为抵消热扩散后的相对生热量。

对于谐振动系统, 其系统总能量 E 计算公式^[21]为

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = m \pi f^2 A^2 \quad (1)$$

式中: ω 为振动圆频率; A 为振幅; f 为振动频率。谐振动系统输入总能量与振动幅值的平方成正比, 故超声激励幅值越大, 试件振动能量越高。增大激励强度即为增加激励幅值, 更高的激励幅值下试件的振动幅值也更大, 裂缝面质点在更大的振动幅值下

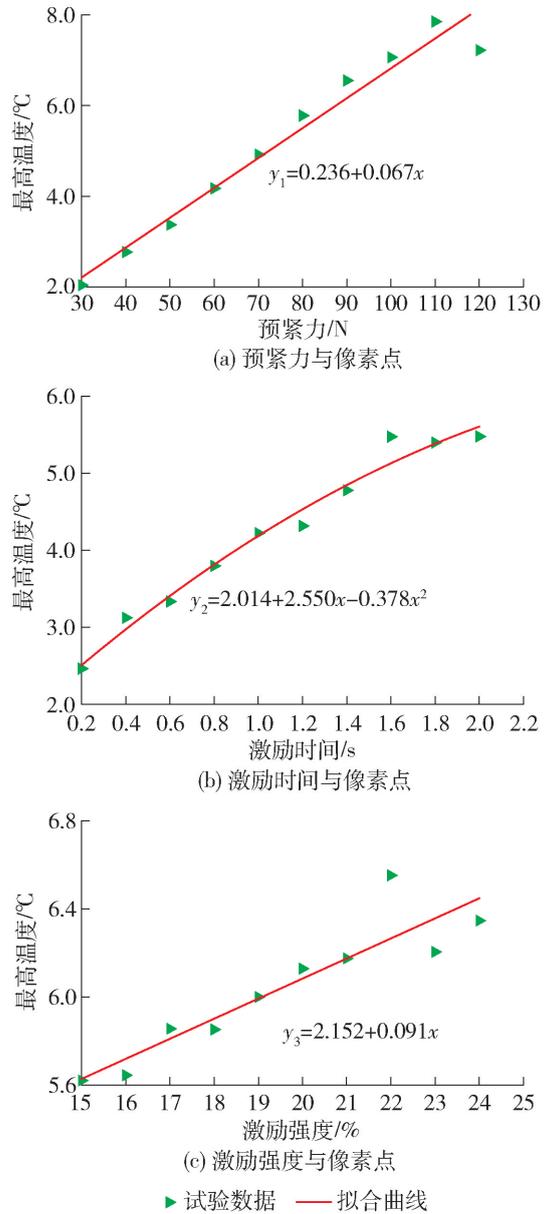


图 9 试件像素点最高温度与激励参数的关系图
Fig. 9 Relationship between the maximum temperature of the pixels of specimen and the excitation parameters

更容易发生接触、碰撞和滑移作用, 进而利于生热, 故增大激励幅值利于裂缝生热。

综上, 影响裂缝生热的主因是裂缝面质点的接触、碰撞和滑移状态。

3.3 多因素激励参数变化下的试验推荐激励参数

为给出多因素激励参数变化下的试验推荐激励参数, 选取试件热像图最高升温像素点在记录时间内的最高温度值, 绘制得到生热分布云图, 见图 10。

由图 10 可知, 单位时间内像素点温度升高越多, 裂缝区域热斑越显著, 检测出缺陷的概率越大, 反之概率越小。当预紧力小于等于 80 N 时, 不论激

励强度值为多大,裂缝区域温升变化热成像都不明显,不利于裂缝识别,当预紧力为110~120 N且激励强度为21%~24%时,裂缝区域温升热成像显著,有利于裂缝识别,故其为试验条件下的推荐最优激励参数。

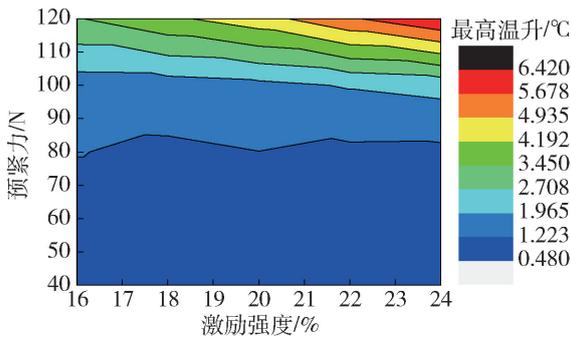


图10 试件在不同预紧力和激励强度下裂缝区域生热分布云图

Fig. 10 Nephogram of heating distribution in crack area of specimen under different pre-tightening forces and excitation intensities

4 结论

本文采用试验分析方法,对混凝土板裂缝的超声红外热像检测机理及其影响因素展开研究,得到如下结论:

1) 混凝土板裂缝生热机理是裂缝面质点发生接触、碰撞和滑移,质点做功生热,机械能转化为内能;试验验证发现,中下部裂缝宽度小,更容易发生接触、碰撞和滑移,进而产生热量,故裂缝面保持平整无充填物。

2) 激励参数影响裂缝生热,增大预紧力、延长激励时间、提高激励强度都有利于裂缝生热,合适的预紧力保证振动能量稳定输入试件,延长激励时间使得热量持续积累,增大激励强度使得输入试件能量增加。增大预紧力和延长激励时间相比提高激励强度具有更好的生热促进作用,相应的热像图热斑更显著、色彩更饱和、对比度更强。

3) 根据多因素超声激励下混凝土板裂缝生热规律,发现存在裂缝检测识别的最优激励参数区间,激励参数落在最优区间内,检测识别出裂缝缺陷的概率最大。

限于研究条件,本文所开展的工作也有不足,如未开展不同裂缝宽度的超声激励试验,裂缝红外图不能识别裂缝深宽等参数等,下一步将结合红外热像图像处理技术,进一步研究声红外热像检测方法

用于识别裂缝深、宽级别的可行性,以便定量评定裂缝状态。

致谢

本文所开展的相关研究工作得到了陆军装甲兵学院车辆工程系闵庆旭、孙吉伟、姬龙鑫,西南交通大学李福海、胡丁涵、刘世军、潘基先、何雨帝、林明才、杜坤、陶磊等人的支持和协助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 任荣. 超声激励下混凝土板裂缝生热的机理以及影响因素研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019: 7-14.
REN R. Research on the mechanism and influencing factors of crack heating of concrete slab under ultrasonic excitation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019: 7-14. (in Chinese)
- [2] 徐维超. 超声红外热波无损检测技术应用于裂纹检测的研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2008: 10-17.
XU W C. Ultrasonic infrared thermal wave nondestructive evaluation for crack detection [D]. Beijing: Capital Normal University, 2008: 10-17. (in Chinese)
- [3] 尹恒, 封全宏, 廖紫骅, 等. 基于三维激光扫描技术的病害隧道检测 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10 (4): 895-901.
YIN H, FENG Q H, LIAO Z H, et al. Disease tunnel monitoring based on 3D laser scanning technology [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10 (4): 895-901. (in Chinese)
- [4] 陈赵江, 张淑仪, 郑凯, 等. 利用有限元方法模拟微裂纹在强超声作用下的摩擦生热现象 [J]. 无损检测, 2010, 32 (11): 838-841.
CHEN Z J, ZHANG S Y, ZHENG K, et al. Using the finite element method to simulate the friction and heat generation of micro-cracks under strong ultrasound [J]. Nondestructive Testing, 2010, 32 (11): 838-841. (in Chinese)
- [5] 雷坚强, 赵其林, 梁政. 车载式公路隧道快速检测设备应用探讨 [J]. 隧道建设 (中英文), 2017, 37 (增刊2): 47-53.
LEI J Q, ZHAO Q L, LIANG Z. Discussion on application of vehicle carried rapid inspection equipment to highway tunnel [J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (Suppl 2): 47-53. (in Chinese)
- [6] 张淑仪. 超声红外热像技术及其在无损评价中的应用 [J]. 应用声学, 2004, 23 (4): 1-6.
ZHANG S Y. Ultrasonic infrared thermography and its application in nondestructive evaluation [J]. Applied Acoustics, 2004, 23 (4): 1-6. (in Chinese)

- [7] FAVRO L D, HAN X, OUYANG Z, et al. Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(6): 2418-2421.
- [8] HAN X, ZENG Z, LI W, et al. Acoustic chaos for enhanced detectability of cracks by sonic infrared imaging [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(7): 3792-3797.
- [9] HAN X, LOGGINS V, ZENG Z, et al. Mechanical model for the generation of acoustic chaos in sonic infrared imaging [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(8): 1332-1334.
- [10] SONG Y. A Comprehensive study of non-linear effects of coupling materials in sonicir imaging [D]. Detroit, Michigan: Wayne State University, 2014: 12-18.
- [11] RENSHAW J, CHEN J, HOLLAND S, et al. The sources of heat generation in vibrothermography [J]. NDT&E International, 2011, 44: 736-739.
- [12] ROBERTO M, FABRIZIO F. Correlation between vibrational mode shapes and viscoelastic heat generation in vibrothermography [J]. NDT&E International, 2013, 58: 43-48.
- [13] 米小兵, 张淑仪. 超声波引起固体微裂纹局部生热的理论计算[J]. 自然科学进展, 2004, 14(6): 628-634.
MI X B, ZHANG S Y. Theoretical calculation of local heat generation of solid microcrack induced by ultrasonic wave[J]. Progress In Natural Science, 2004, 14(6): 628-634. (in Chinese)
- [14] 陈赵江, 张淑仪, 郑凯. 高功率超声脉冲激励下金属板的非线性振动现象研究[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 4071-4083.
CHEN Z J, ZHANG S Y, ZHENG K. Nonlinear vibration of metal plate excited by high power ultrasonic pulse[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6): 4071-4083. (in Chinese)
- [15] 张超省, 冯辅周, 闵庆旭, 等. 超声红外热像技术中预紧力对金属平板振动特性的影响[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 154-161.
ZHANG C S, FENG F Z, MIN Q X, et al. Effect of engagement force on vibration characteristics of metal plate in sonic infrared imaging[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 154-161. (in Chinese)
- [16] 张超省, 宋爱斌, 冯辅周, 等. 超声红外热像检测条件的优化方法研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 1-8.
ZHANG C S, SONG A B, FENG F Z, et al. Research on optimization method of test conditions in sonic infrared imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(2): 1-8. (in Chinese)
- [17] 闵庆旭, 张超省, 朱俊臻, 等. 超声红外热像中激励源位置对裂纹生热的影响[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 1-7.
MIN Q X, ZHANG C S, ZHU J Z, et al. Effect of excitation position on crack heating characteristics in sonic IR imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 1-7. (in Chinese)
- [18] 胡振华, 汤雷, 高明涛. 超声波激励下混凝土裂纹发热过程的试验研究及有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 58-75.
HU Z H, TANG L, GAO M T. Experimental study and fem analysis for heating process of concrete cracks under ultrasonic excitation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(2): 58-75. (in Chinese)
- [19] 贾宇, 梁永梅, 汤雷. 水工混凝土构件裂缝检测方法和发展趋势[J]. 无损检测, 2016, 38(7): 75-81.
JIA Y, LIANG Y M, TANG L. The crack detection method for hydraulic concrete structure and its development trend [J]. Non-destructive Testing, 2016, 38(7): 75-81. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ55—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [21] 赵远, 王晓鸥, 张宇, 等. 大学物理(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 21-45.

(责任编辑 郑筱梅)