



碳纤维混凝土复合材料缺陷的红外热像检测

Inspections on Carbon Fiber-reinforced Concrete Compound Materials for Defects with the Method of Infrared Thermograph

金永君/JIN Yong-jun¹,任常愚/REN Chang-yu^{1,2},张晓兰/ZHANG Xiao-lan¹

1. 黑龙江科技学院数力系,哈尔滨 150027
2. 哈尔滨工业大学物理系,哈尔滨 150001

1. Department of Mathematics and Mechanics, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China
2. Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

[摘要] 利用碳纤维混凝土的良好导电性,首先通过对存在缺陷的复合材料——碳纤维混凝土试件施加较低的电压,使其产生焦耳热效应,在表面产生温差,再利用红外热像方法对其缺陷进行了无损检测,并根据数据进行了理论分析。实验结果表明:对电阻不同、裂纹缺陷深度相同的材料,小电阻材料所得的红外热像明显,温差大于大电阻材料且变化趋势比大电阻的明显;对电阻相同的大电阻材料,裂纹深度对温差有影响,但变化趋势不如电阻对温差的影响明显。实验结果为进一步研究红外检测复合材料缺陷提供了理论与实验依据。

[关键词] 红外热像;无损检测;复合材料;碳纤维混凝土;裂纹

[中图分类号] TN219

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)12-0034-03

Abstract: First, add a lower voltage to the sample of carbon fiber-reinforced concrete(CFRC) to create a Joule effect on this sample, which is a composite with some defects, by making use of this CFRC material's good electric conductivity. As the Joule effect caused some temperature differences on the surface of this sample, the second step it to inspect this sample with the method of infrared thermograph, which won't cause any damage to the testing sample. Finally, make a theoretical analysis on the tested data. The result shows: when the materials have some flaws of the same depth, we found the difference of temperature of the material with a smaller resistance is bigger compared with that of the material with a bigger resistance; when the materials share the same resistance, we found the depth flaws also have an effect on the difference of temperature on the surfaces. This result provides some theoretical and experimental proofs for further studies on methods of inspecting composite material for defects.

Key Words: infrared thermograph; harmless testing; compound material; carbon fiber-reinforced concrete; crack.

CLC Number: TN219

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)12-0034-03

1 引言

红外热像无损检测是一种建立在温度场基础上的检测物体温度、质量、内部状态、结构及缺陷的一种方法。与常规检测方法相比,它具有非接触测量、灵敏度高、反应速度快、使用安全、信号处理速度快、可建立自动检测系统等优点。目前我国广泛开展的红外热像无损检测技术的研究主要用于各种不同环境条件下的温度检测、固体火箭发动机整机及外壳、复合材料及其制品的力学特性研究,以及输变电线路绝缘材料、高压瓷瓶等的检测方面。此外,在红外测温、森林防火、医学诊断、半导体元件集成电路、工业质量检测等方面的应用也有很大进展^[1]。

2 红外热成像检测常用的两种方法

由于红外光是肉眼所不能看到的,因此不能采用普通照相机原理来摄取红外图像。红外热成像(infrared thermal imaging)技术

即是把红外辐射转换成可见光进行显示的技术。

红外热成像分主动式和被动式两种。主动式红外热成像采用一红外辐射源照射被测物,然后接受被物体反射的红外辐射图像。被动式红外成像则是利用物体自身的红外辐射来摄取物体的热辐射图像,通常称为热像(thermal image),获取热像的装置称热像仪。热像仪无需外部红外光源,使用方便,能精确地摄取反映被测物温差的热图像,因而已成为红外技术的一个重要发展方向。热像技术已被广泛应用于无损缺陷的探索。对不同的材料如金属、陶瓷、塑料、多层纤维板等的裂痕、气孔、异质、截面变异等缺陷均可方便地探查。红外检测法常用两种方法。①有源红外检测法,又称主动红外检测法。其特征是利用外部热源向被测工件注入热量,再借助检测设备测得工件表面各处热辐射分布来判断缺陷的方法。②无源红外检测法,又称被动红外检测法。在工程应用中,有源红外检测法使用较广泛。当均匀热流加到平板表面时,

收稿日期:2006-10-08

基金项目:黑龙江省教育厅 2005 年度科学技术研究项目(10553084)

作者简介:金永君,女,黑龙江科技学院数力系,副教授,研究方向为复合材料的无损检测及应用;E-mail:jjy979@sohu.com



基于平板内的热流各向同性,三维的热传导问题可以简化成二维问题,二维的傅里叶热传导定律为^[2-3]:

$$K_x(y) \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + K_y(z) \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: K_x, K_y 分别为热流方向和其垂直平面的导热系数; ρ 为材料密度; C_p 为材料比热。

由于边界面积相对于上下表面要小得多,因此,可以假设 y 坐标为 0 和 D 处的边界条件为: $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$

输入热流为:

$$Q_{in} = -K_z(0) \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=0} = 0 \quad (2)$$

上边界可以以牛顿冷却公式为基础的第三类边界条件描述:

$$-K_z \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=h} = \alpha(T_h - T_a) \quad (3)$$

式中: α 为工件与周围环境的换热系数; T_h 为工件上表面的温度; T_a 为周围环境空气的温度。

当有一个均匀的热流从复合材料的内部向外流动时,有缺陷区域处的表面比正常区域表面的温度低(热传导示意图如图 1),所以采用红外成像技术,从存在缺陷的区域可获得较低温度的热像图。根据公式(1)和上述边界条件就可以解出工件表面各点的温度值^[5]。

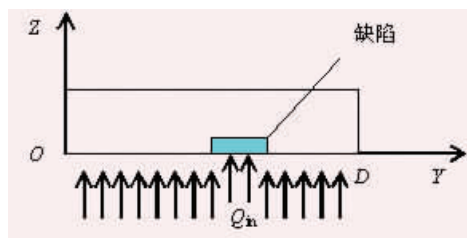


图 1 热传导示意图

Fig. 1 Heat conduction sketch

3 红外热像无损检测的技术关键

红外热像无损检测的使用关键是要建立一个缺陷的判断。对于各种典型的缺陷类型,如层与层之间的空隙结合不良、薄层表面的杂质以及几何核心上较大的不规则性损伤等,要想建立合格的判断,则必须搜集合格的和已知缺陷部分的样品。不合格样品中应包含每一种类型的缺陷,且这些缺陷符合探测和鉴别的最小尺寸,否则要人为制造有关缺陷,进行模拟研究。如我们可以人为地在某种复合材料中制造几个空洞缺陷,空洞分别填充不同的杂质,通过热脉冲后用红外成像检测,可以看到清晰的缺陷图像。

影响红外成像检测精度的因素与被测样品表面特性有关。对于表面不光洁的或者经过抛光处理的金属零件来说,其表面发射率是一个主要系数。发射率降低,反射率增加,扫描仪会探测到环境的背景反射和其他无关热源的反射^[4-5]。

如果每种材料、每种缺陷形式都要人为地制造,再进行实验,毫无疑问这将是影响红外成像技术推广应用的瓶颈。随着计算机技术的发展,计算机模拟和计算机仿真技术为缺陷类型的模拟创造了有利条件。目前武汉等大学提出一种有源红外检测的新方法——内热源红外热成像无损检测。

4 内热源红外热成像检测复合材料——碳纤维混凝土的缺陷

4.1 碳纤维混凝土简介

机敏混凝土是一种将极少量具有某种特殊功能的材料复合于传统混凝土中的机敏材料。碳纤维混凝土是机敏混凝土的一种,是以短切或连续的碳纤维作为填充相,以水泥浆、沙浆或混凝土为基体复合而成的纤维增强水泥基复合材料。其具有比普通混凝土更高的抗弯、抗拉强度及延性和更强的抗冲击性能、抗冻融性能、抗腐蚀性能、低干缩性能,同时具有感知应变(应力)、损伤、温度以及电场等性能,碳纤维混凝土被广泛应用于各个领域,然

而随着机敏混凝土越来越广泛的应用,对其结构进行健康检测就具有越来越明显的实践意义,成为一个重要的研究课题。

碳纤维混凝土(CFRC)外加电压的内热源红外检测是一种新的检测方法,它利用碳纤维混凝土良好的导电性,通过对碳纤维混凝土试件施加一较低的外加电压,由焦耳热效应生热对机敏混凝土内部缺陷进行检测^[6]。

4.2 预制碳纤维混凝土裂纹

预制裂纹碳纤维混凝土(CFRC)通常按图 2 的工艺流程制备。

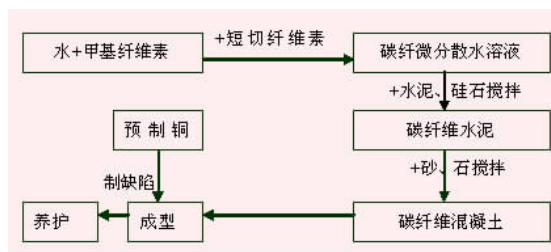


图 2 碳纤维混凝土成型工艺流程图

Fig. 2 The flow chart of carbon fiber-reinforced concrete shaped

4.3 裂纹深度相同电阻值不同的试样

裂纹深度相同,但碳纤维含量与组分的不同会导致试样的电阻不同,产生的热效应不同,最终引起红外热像的不同。考虑阻值不同的影响,采用裂纹深度相同(20mm)的两类试样进行比较,一类碳纤维含量较低,裂缝预制为沿深度方向整齐的切口,由于切口处无碳纤维搭接,因此制得的试样电阻值较大(几千欧姆),直流通电时需采用相对较高的电压。二类碳纤维含量较高,且加入了增加导电性的硅灰成分,裂缝的预制更接近自然情况。先在试样表面切出浅槽,再采用弯折的方法萌生裂纹,由于裂纹尖端破碎区内碳纤维并未完全断开,因此尽管裂纹较深,但试样电阻仍然较小(几十欧姆)。通电时需采用较低的电压(低于 36 伏)就可以在红外热像图上明显地看到裂纹所在,并可以通过调节电压的高低来改变温升值。实验表明:板表面温度在中心线附近明显高于其他区域,裂纹即位于中心线上,对大小电阻两类试样,表面最高温差随时间的变化为图 3、图 4。

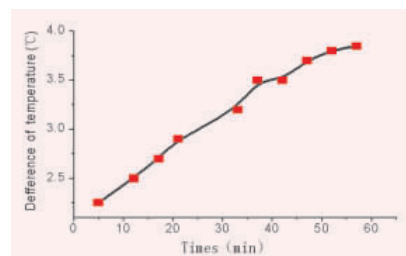


图 3 大电阻板温差随通电时间的变化

Fig. 3 The dependence of temperature difference of dig resistance plate on time

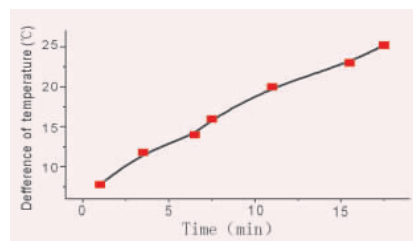


图 4 小电阻板温差随通电时间的变化

Fig. 4 The dependence of temperature difference of small resistance plate on time

金永君,等:碳纤维混凝土复合材料缺陷的红外热像检测

结果可知,小电阻试样对裂纹的响应更快,通电很短时间内即可通过红外图像观察到裂纹所在,而且温差上升很快。

4.4 电阻相同裂纹深度不同的试样

笔者对电阻率较高,但裂纹深度不同的碳纤维混凝土试样进行了红外检测。对于碳纤维含量占水泥重量的 0.5%,配比为水泥:沙:水=1:25:0.6 碳纤维水泥胶沙试样,裂纹深度分别为 20mm、10mm,切口宽度均为 0.1mm 的大电阻试样,不同裂纹深度情况下,板中心线与边缘间表面最高温差随通电时间的变化见图 5。从图中可见即使对大电阻试样,其裂纹深度的影响也是可见的,同时也进一步为用红外热像检测提供了实验依据。

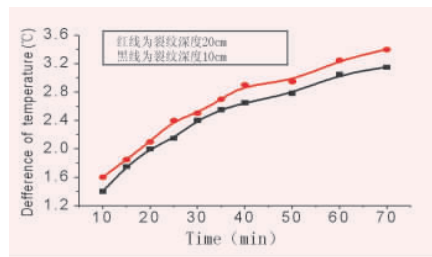


图 5 不同裂纹深度时温差-时间图
Fig. 5 Different cracks depths temperature difference-time chart

结论:利用碳纤维机敏混凝土的导电性和电热效应,可对其中心裂纹进行红外检测,利用红外热像仪测得的热像图和表面温度可对材料的内部缺陷进行反演分析。

5 结束语

目前,红外无损检测技术的发展主要集中在提高检测系统的性能和自动化程度等方面,利用计算机对检测结果进行处理,实现自动检测与评价^[7]。

1) 红外热像检测法检测速度快,造成温差的方式简单,缺陷位置和大小显示直观,可以方便快捷地发现复合材料内部的缺陷,同时检测结果易保存至计算机上,以备进一步数据处理。

2) 可根据红外热像动态检测复合绝缘材料的结果,对复合材料进行定性、定量和定位分析,并评估内部缺陷的危害性;也可用于评价材料质量和评价电老化状态。

3) 在红外热像检测中,实现被检工件快捷、方便、自动化的加热方式,加热源和热像头的自动扫描以及智能化地识别各种缺陷是今后发展的重要方向。

参考文献 (References)

- [1] 曾令可,吴卫生. 复合材料的红外无损检测[J]. 红外与激光,1996,26(2):81-84.
- [2] 刘莹,张记龙. 材料的红外无损检测技术及其发展[J]. 华北工学院测试技术学报,2001,15(4):267.
- [3] 陈钰. 利用红外热像仪测量材料的缺陷[J]. 红外与激光,2000,30(1):39-41
- [4] 陈钰. 材料内部缺陷的红外无损检测 [J]. 红外技术,2001,23(3):39-40
- [5] 李志君. 先进复合材料的无损检测[J]. 宇航材料工艺,2000,5:28-29.
- [6] 黄莉. 碳纤维增强混凝土中裂纹的红外热像检测方法与其机理研究[J]. 实验力学,2003,18(3):405-407
- [7] 李国华,吴立新,吴森,曲敬信. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. 红外与激光工程,2004,33(3):266-268.

(责任编辑 代丽)

·封面文字说明·

白头叶猴——中国学者发现和命名的唯一的一种灵长目动物

白头叶猴是我国特产动物,由我国学者首先发现,也是唯一一种由我国学者发现和命名的灵长目动物。白头叶猴仅分布在广西左江和明江之间的一个十分狭小的三角形地带内——面积不足 200 km²,是分布范围最小的灵长类动物之一。它又叫花叶猴、白叶猴、白头乌猿;头部较小,躯体瘦削,四肢细长,尾长超过身体长度;体毛以黑色为主,头部高耸一撮直立白毛,状如一尖顶白色瓜皮小帽,故名白头叶猴。

在发现白头叶猴之前,中国动物学界只知道广西有俗称“乌猿”的黑叶猴栖息。1952 年,北京动物园哺乳动物专家谭邦杰先生听说在广西还生活着一种更为稀少的“白猿”,他猜测这可能是一种由遗传变异而形成的白化型长臂猿。但后来又听说这种“白猿”长着一条长长的尾巴,显然不可能是长臂猿,于是他又推测可能是一种白化的黑叶猴,但因为没活的动物或者标本,也不知道这种动物的确切产地,故一时无法作出正确的结论。直到有一天,谭先生在南宁郊区的一家小中药店里,发现了一张虽然已残缺褪色但仍能看出来黑白交错的毛色和较为明显的白色头部的陈旧叶猴皮张,他才揭开了这个谜团。

据药店主人介绍,该皮张就是由传说中的“白猿”皮制作而成,采自广西南部扶绥到龙州一带。谭先生敏锐地感觉到,这的确是一种与众不同的新奇动物,与白化的或部分白化的黑叶猴均不同。由于忙于其他工作,他没能及时到产地进



行实地考察。1 年后,北京动物园工作人员再次到广西工作,谭先生特别叮嘱注意对“白猿”进行考察。工夫不负苦心人,这次竟然捕捉到了一只活着的“白猿”。这种“白猿”无论是外部形态、体形大小、身体各部位比例,还是活动时的举止行为等,均与黑叶猴十分相似,只是毛色不同,在头、颈、肩、尾部的下半截、手脚背面和肘部、腿部内侧等部位为白色,而黑叶猴只是颊部有两道白纹而已。

此后,经过数年的进一步比较研究,又发现了“白猿”作为一个新种的许多证据:首先,它和黑叶

猴有几乎相同的分布区,但是却各自保持着独自的生活领域,各自组成种群,绝不混杂;其次,它们的头骨也有一些区别,“白猿”的鼻骨比黑叶猴的长,眶外宽度总大于脑壳宽度,脑壳后部不如黑叶猴显得丰满。据此,“白猿”终于被确定为一个过去未曾描述过的新物种,取名为白头叶猴。

白头叶猴的栖息地为典型的喀斯特地形,石山连绵、山峰挺拔陡峭,悬崖绝壁,岩溶洞洞随处可见,为其生存和繁衍提供了良好的自然环境。它的性情机警,十分活泼、好动,极善跳跃;它喜欢集群生活,早出晚归,生活很有规律。白头叶猴主要在秋季交配,春季产仔。自 20 世纪 70 年代始,由于人口数量不断膨胀,白头叶猴栖息地内的大部分地方都被开垦为农田,原本茂密的植被常年被农民砍伐用作薪柴,同时,当地传统的生产方式“开山炸石”使林立的石山满目疮痍,植被被毁坏,白头叶猴的栖息地由此越来越小。此外,白头叶猴那时还承受着人们肆意的猎杀;即使在禁止捕杀白头叶猴的法规已颁布的今天,偷猎现象仍屡禁不止,因而对白头叶猴种群造成了最直接也是最致命的威胁。目前,白头叶猴仅集中分布在广西崇左市江州区的弄官山区和扶绥的弄廉两片山区中,分布面积不到 80 km²,种群数量仅剩 700 多只。因此,保护白头叶猴迫在眉睫。

本期封面为白头叶猴生活图,由邹映雪设计制作。

(李湘涛 供稿)