

加热片粘结质量无损检测方法研究

张 彬¹, 于全朋², 姚鹏娇², 李少华¹, 帅家盛³

(1 北京卫星环境工程研究所 北京 100094

2 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081

3 北京嘉盛智检科技有限公司 北京 100016)

摘要: 加热片在粘结过程中, 由于操作不当, 在粘结层内会出现气泡、分层、夹杂等缺陷, 这些缺陷会导致加热片传热不均匀, 引起热量集聚, 进而加热片中加热丝被烧坏, 最终造成加热片失效, 严重影响设备的正常运行, 甚至使整个设备报废。因此, 设备在投入使用前进行全面无损检测是十分有必要的。无损检测有很多种方式和方法, 针对加热片粘结质量进行无损检测试验, 对比分析空耦超声单侧一发一收法、空耦超声对侧一发一收法和太赫兹检测法对加热片的检测效果, 结果发现, 太赫兹无损检测法对加热片粘结层内部缺陷具有很好的检出率, 试验研究为加热片粘结层内部缺陷的检测提供了有效方法。

关键词: 加热片; 粘结层; 粘结缺陷; 无损检测方法

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)04-0040-09

Research on nondestructive testing method of bonding quality of heating patch

ZHANG Bin¹, YU Quanpeng², YAO Pengjiao², LI Shaohua¹, SHUAI Jiasheng³

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. JiashengTest Engineering CO., Ltd., Beijing 10016, China)

Abstract: In the process of pasting the heating plate, due to improper operation, defects such as bubbles, delamination and inclusions will appear in the bonding layer. These defects lead to uneven heat transfer of the heating patch, causing heat accumulation. And then the heating wire in the heating patch is burned out, which eventually leads to the heating patch failure, seriously affects the normal operation of the equipment, and even scrapes the whole equipment. Therefore, it is very necessary to carry out comprehensive nondestructive testing before the equipment is put into use. There are many ways and methods of non-destructive testing. In this paper, non-destructive testing is carried out for the bonding quality of heating patch, and the testing effects of one-side pitch-catch technique of air-coupled ultrasonic, opposite pitch-catch technique of air-coupled ultrasonic and terahertz testing method are compared and analyzed. The results show that the THz nondestructive testing method has a good detection rate for the internal defects of the bonding layer of the heating patch, and the experimental study provides an effective method for the detection of the internal defects of the bonding layer of the heating patch.

Key words: Heating patch; Bonding layer; Adhesion defect; NDT method

引 言

加热片起到控制设备工作环境温度、确保设备正常运行的重要作用, 广泛应用于机械设备及其他电子设备在寒冷天气下的低温保护、新能源汽车电池组低温保护等。特别地, 航天器及零部件工作在太空环境中, 而太空环境温度很低, 可达零下 200℃ 以下。因此, 对航天器及零部件工作环境温度进行精确控制就显得尤为重要, 实现这个目标的有效方法就是在结构及零部件上粘结加热片。加热片在粘接过程中由于工艺、人工操作不当等原因容易导致粘接界面出现脱粘, 在粘结层内部出现气泡、夹杂等缺陷^[1]。航天器在太空工作, 然而太空中没有对流传热, 如果加热片在粘结过程中出现缺陷, 很

可能引起加热片产生的热量无法传播而发生热集聚, 最终会烧伤加热丝造成加热片失效。因此, 粘附有加热片的航天器在投入工作之前, 对每一个加热片的粘结质量进行全方位的检测, 是确保航天器能正常工作的必要前提。

目前, 关于粘结结构件的粘结质量检测方法有很多, 例如, 针对复合材料的检测方法有超声波检测方法^[2-4]、射线检测方法^[5,6]、红外热成像检测方法^[7-9]以及太赫兹检测方法^[10,11]等。研究表明, 超声波检测方法对粘接界面缺陷^[12]、粘接层缺陷^[13]以及单个小气孔、密集小气孔和大面积脱粘等典型缺陷有很好的检测效果。其中, 李建文^[14]等人采用超声透射成像、扫描声学显微镜成像和阵列超声成像三种方法对钢/铅胶结件脱粘缺陷进行了对比试验, 结果显示, 超声透射成像、扫描声学显微镜成像方法检测效果较好。JIAO Jingpin^[15]等人采用 Lamb 波方法对食物容器(简化为平板)上的污垢进行检测试验, 取得了很好的检测效果。FAN Zichuan^[16]等人针对板中存在的气泡缺陷, 采用空气耦合超声导波(Lamb 波)方法进行了仿真和试验研究, 结果表明, 仿真和试验结果比较吻合, 对气泡的检测效果较好。射线检测结果具有直观、精度高等优点, 同时, 也存在一些不足之处。Amenabar^[17]等学者使用 X 射线层析成像方法检测多层结构粘结缺陷, 发现 X 射线检测具有高分辨率, 并且能对试件进行 3D 重构, 定位和检测到试件中的微型缺陷。但 X 射线受材料厚度和缺陷深度的影响较严重, 对于厚度较深的检测具有局限性。同样, 红外检测技术适用于近表面缺陷的探测, 对于一定埋深的缺陷检测效果并不显著。有学者^[18]采用主动式红外检测技术, 研究试件材料的均匀性和内部结构信息, 该方法介绍了红外热波检测原理, 并利用玻璃钢平底洞试件验证热波理论。林鑫^[19]等采用红外热成像技术针对粘结结构进行实验研究, 结果表明, 红外无损检测技术可以有效地对玻璃钢泡沫夹层、软木粘结、碳纤维蒙皮蜂窝夹层等较薄粘结结构进行产品质量检测。ZHENG Kaiyi^[20]等提出一种三维图像分割热成像自动缺陷检测方法, 针对碳纤维粘结构件进行实验研究, 得到很好的结果。太赫兹无损检测技术是近几十年发展起来的新兴技术, 超快激光技术的发展使太赫兹波的产生成为了可能, 从而使太赫兹无损检测技术得到突破^[21]。太赫兹波具有频率高($10^{11}\text{Hz}\sim 10^{13}\text{Hz}$)、波长短($30\mu\text{m}\sim 3\text{mm}$)的特点, 能检测到很小或者埋深很浅的缺陷, 广泛应用于复合材料等粘结结构缺陷的检测^[22,23]。

有学者研究表明, 空耦超声无损检测技术可应用于蜂窝夹芯复合材料内部脱粘、分层缺陷粘结质量检测^[24], 但目前对于加热片粘结质量检测还缺少研究, 考虑到加热片和粘结层非常薄(其厚度为 0.1mm 左右), 缺陷信号和界面信号重合度很高, 很难判别是否出现缺陷信号。本文针对蜂窝夹芯复合材料外加热片粘结质量进行无损检测试验, 对比分析了空耦超声单侧一发一收法、空耦超声对侧一发一收法和太赫兹检测法对加热片的检测效果, 研究发现, 太赫兹无损检测法对加热片粘结层内部缺陷具有很好的检出率, 该研究试验为加热片粘结层内部缺陷的检测提供了有效方法。

1 空耦超声检测试验

1.1 空耦超声对侧一发一收法检测原理

空耦超声对侧一发一收法检测原理如图 1 所示, 超声波入射到两种材料的界面时, 声能会分成两部分, 一部分声能被界面反射, 另一部分则会透过界面。空耦超声对侧一发一收法根据透射声能的变化判断工件内部缺陷状况, 缺陷会反射声能, 使透射声能的能量降低, 由此可判断缺陷是否存在。采用空耦超声对侧一发一收法进行检测时需要一发一收两个超声探头, 探伤仪产生激励脉冲, 激励发射探头振动产生超声波, 超声波透射通过样品后使接收探头振动产生脉冲电流, 不同状况的样品会产生不同的脉冲电流, 进而可以判断缺陷是否存在。

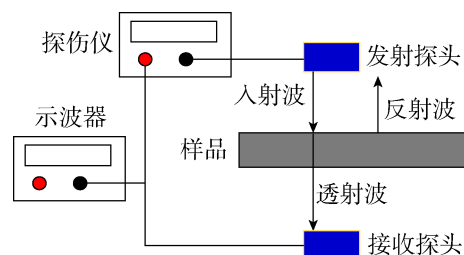


图 1 空耦超声对侧一发一收法检测原理

Fig. 1 Detection principle of opposite pitch-catch technique of air-coupled ultrasonic

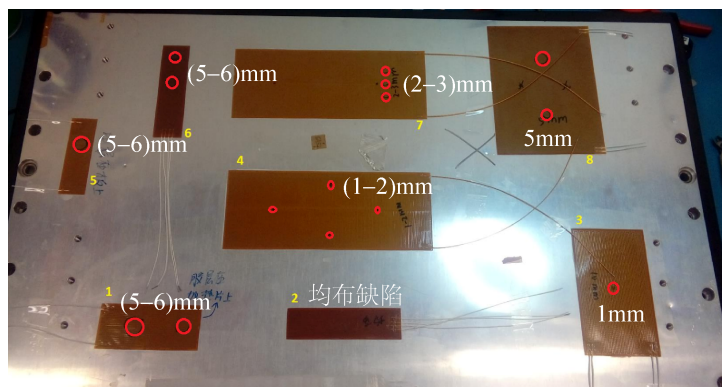
空耦超声单侧一发一收法检测原理如图 2 所示, 超声波入射到样品中, 遇到缺陷会反射声能, 空耦超声单侧一发一收法根据反射声能的变化判断工件内部缺陷状况。探伤仪产生激励脉冲, 激励发射探头振动产生超声波, 超声波遇到样品内部缺陷反射后使接收探头振动产生脉冲电流, 不同状况的样品会产生不同的脉冲电流, 进而可以判断缺陷是否存在。

1.2 试验样件

待检测试验样品如图 3 所示, 图 3 (a) 为加热片, 加热片由 PVC 材料与加热铜丝复合而成, 加热片厚 0.1mm~0.2mm。图 3 (b) 为蜂窝板上加热片位置示意图, 其中, 蜂窝板由铝皮和蜂窝芯复合而成, 铝皮厚 0.3mm~0.5mm, 蜂窝板厚度约 10mm, 长约 530mm, 宽约 500mm。大小各异的加热片粘结在铝皮制的蜂窝板上, 固体粘结剂厚 0.1mm~0.2mm。在加热片和铝皮之间预制有大小不等的气泡、脱粘等缺陷, 缺陷类型、大小已标注在加热片或铝板上, 加热片分别被标记为 1~8 号。



(a) 加热片
(a) Heating sheet



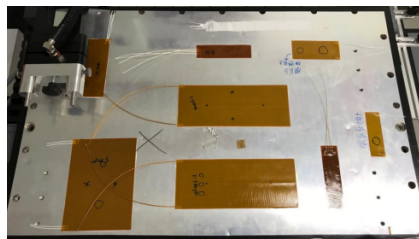
(b) 蜂窝板上加热片位置
(b) Position of the heating sheet on the panel

图 3 试验样品

Fig. 3 Test sample

1.3 探头参数与实验方法

分别采用 75kHz 压电陶瓷探头、12mm 和 25mm 直径的 230kHz 压电陶瓷探头、400kHz 压电陶瓷探头进行空耦超声对侧一发一收法检测试验, 探头最大扫查速度为 100mm/s。空耦超声对侧一发一收法试验装置如图 4 所示, 空耦超声单侧一发一收法试验装置如图 5 所示。



(a) 检测装置正面
(a) Front of detection device



(b) 检测装置反面
(b) Back of detection device

图 4 空耦超声对侧一发一收法试验装置

Fig. 4 Experimental device of opposite pitch-catch technique of air-coupled ultrasonic

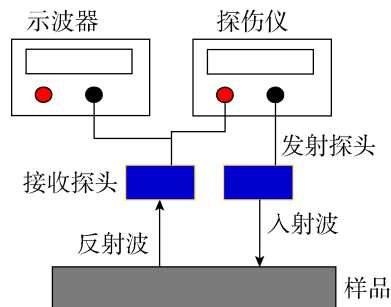


图 2 空耦超声单侧一发一收法检测原理

Fig. 2 Detection principle of one-side pitch-catch technique of air-coupled ultrasonic

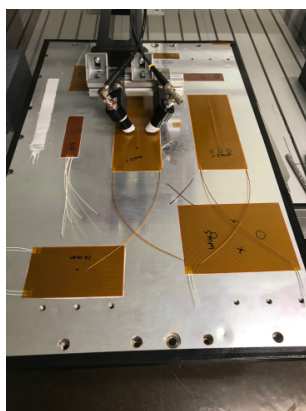


图 5 空耦超声单侧一发一收法试验装置

Fig. 5 Experimental device of one-side pitch-catch technique of air-coupled ultrasonic

1.4 空耦超声对侧一发一收法试验结果

探头频率为 75kHz 时的空耦超声检测图如图 6 所示。探头频率为 230kHz、直径分别为 12mm 和 25mm 时的空耦超声检测图如图 7 和图 8 所示。图中蓝色深的区域表示信号损失较多,说明此区域出现了不连续空间。从图 6~图 8 可以看出,采用频率为 75kHz 和频率为 230kHz、直径为 12mm 的探头进行试验时,能检测出尺寸为 5mm~6mm 的缺陷,不能检测出尺寸小于 5mm 的缺陷。采用频率为 230kHz、直径为 25mm 的探头进行试验时,对缺陷的检测效果不明显。

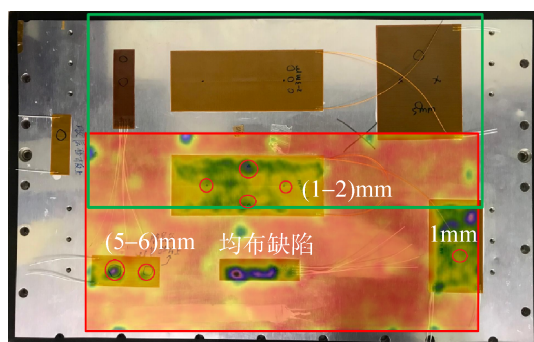


图 6 75kHz 探头的空耦超声检测图

Fig. 6 Air-coupled ultrasonic probe detection diagram of 75kHz probe

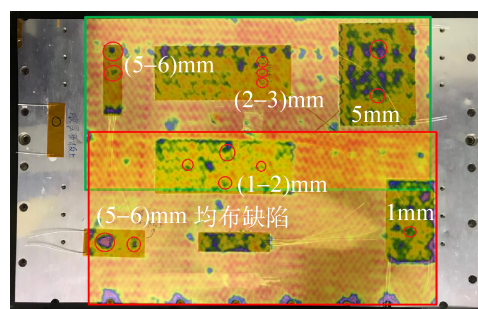


图 7 探头频率为 230kHz、直径为 12mm 的空耦超声检测图

Fig. 7 Air-coupled ultrasonic inspection chart with probe frequency of 230kHz and diameter of 12mm

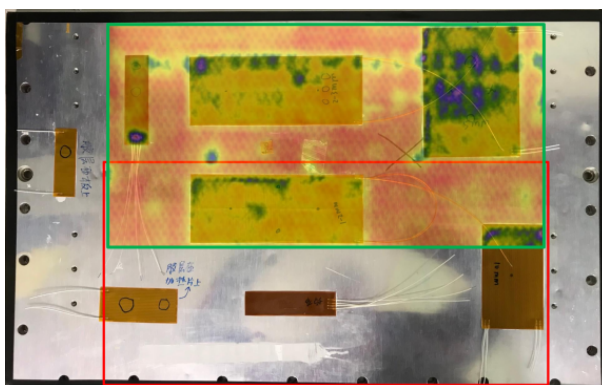


图 8 探头频率为 230kHz、直径为 25mm 的空耦超声检测图

Fig. 8 Air-coupled ultrasonic inspection chart with probe frequency of 230kHz and diameter of 25mm

400kHz 探头的空耦超声检测图如图 9 所示, 可以看出, 400kHz 探头的分辨率太高, 由于蜂窝的影响, 很难区分与蜂窝尺寸相当的缺陷。

1.5 空耦超声单侧一发一收法试验结果

采用 12mm 直径、230kHz 探头进行空耦超声单侧一发一收法试验, 整个蜂窝板空耦超声成像结果如图 10 所示, 图中蓝色深的区域表示信号损失较多, 说明此区域出现了不连续空间。从图中可以看出, 采用空耦超声单侧一发一收法进行试验很难检测出缺陷的存在。

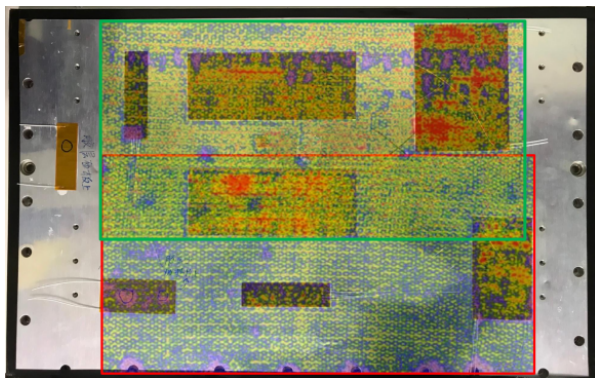


图 9 400kHz 探头的空耦超声检测图
Fig. 9 Air-coupled ultrasonic detection diagram of 400kHz probe

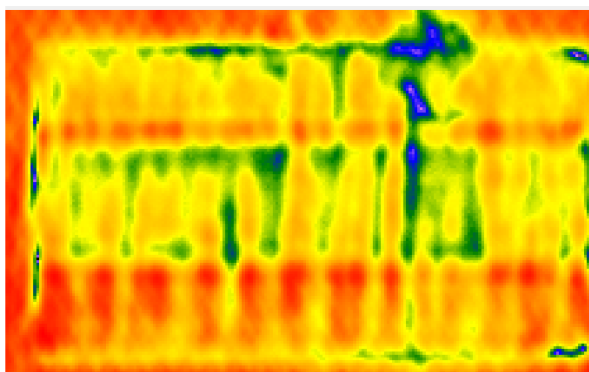


图 10 空耦超声单侧一发一收法检测图
Fig. 10 Detection diagram of one-side pitch-catch technique of air-coupled ultrasonic

1.6 小结

通过空耦超声检测试验可以发现, 采用空耦超声对侧一发一收法能有效检测出尺寸在 5mm 以上的缺陷及其位置分布, 对于尺寸在 5mm 以下的缺陷不具有检测效果, 采用空耦超声单侧一发一收法对加热片缺陷没有检测效果。空耦超声对侧一发一收法检测可实现部件级检测, 但需要在被测件两侧配置探头, 为保证最终产品的质量, 加热片粘结质量检测在设备总装完成后进行, 此时只能在产品外部单侧配置探头, 无法采用对侧一发一收法。鉴于此, 本文探索采用反射式太赫兹法进行检测, 以验证此方法对加热片缺陷检测的可行性。

2 太赫兹检测试验

2.1 太赫兹无损检测技术简介

太赫兹无损检测是指根据太赫兹波对材料中缺陷的不同响应进行检测、分析及评估的技术。太赫兹波是频率为 0.1THz~10THz、波长为 30 μ m~30mm 的电磁波, 它具有频带宽、能量低 (对人体无害)、穿透能力强等特性, 在无损检测领域具有广泛的应用。太赫兹无损检测技术是近几十年发展起来的新兴检测技术, 上世纪八十年代中期超快激光技术的发展为太赫兹波的稳定产生提供了可能, 使太赫兹的研究得到蓬勃发展。

图 11 为反射式 THz 波检测系统工作原理, 飞秒激光由飞秒激光器产生, 然后经过分束片后分成泵浦光和探测光两束光。泵浦光聚焦后入射到光电导天线上产生 THz 波脉冲。THz 波脉冲由一对离轴抛物面镜聚焦到样品表面, THz 波脉冲经样品表面反射后经过另一对离轴抛物面镜聚焦到 ZnTe 晶体上。探测光与 THz 波脉冲共线入射到 ZnTe 晶体上, ZnTe 晶体受到 THz 波脉冲的作用后折射率椭圆发生变化, 探测光受到调制后偏振状态发生变化。调制后的探测光经过波片 (QWP)、渥拉斯顿棱镜 (WP) 分成两束偏振状态垂直的光, 照射到平衡探测器上。平衡探测器得到的信号经过锁相放大器得到 THz 脉冲某一时刻的信号, 通过调整在探测光路上的延迟线可以得到整个 THz 脉冲的时域波形。

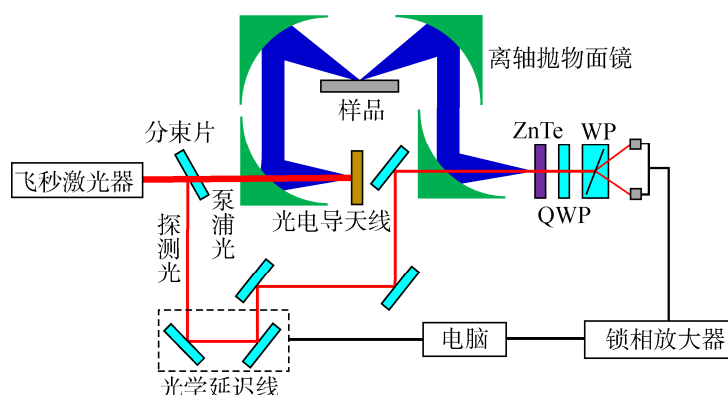
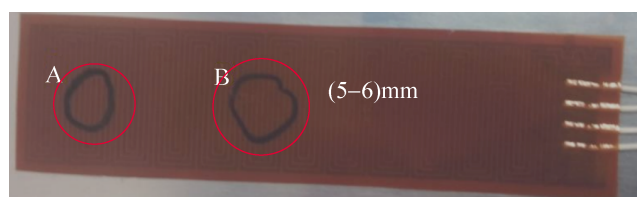


图 11 反射式 THz 波检测系统

Fig. 11 Reflection THz wave detection system

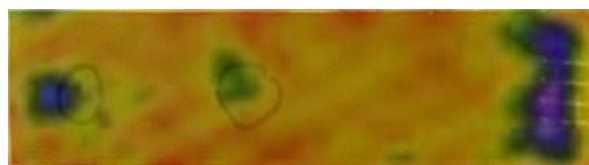
2.2 太赫兹法试验结果

6号加热片和7号加热片采用太赫兹与空耦超声对侧一发一收法得到的检测图像对比如图12和图13所示。根据图像中的黑白对比度以分析确定缺陷的特征与位置。从图12可以看出,对于5mm~6mm尺寸的缺陷,太赫兹法与空耦超声对侧一发一收法都具有良好的检测效果。从太赫兹图像12(c)中黄色椭圆表示区域可以看出,太赫兹检测法能检测到空耦超声对侧一发一收法检测不到的小缺陷(4mm左右)。7号加热片的预制缺陷如图13(a)中的黑色圆圈所示,分别为2mm~3mm尺寸的缺陷,对比图13(b)和图13(c)可以看出,对于2mm~3mm尺寸的缺陷,太赫兹法能清晰检测到空耦超声对侧一发一收法无法检测到的缺陷形状及位置,如图13(c)中的黑色箭头所示。同时,太赫兹法还发现了由于粘结工艺不完善引起的聚集性小气泡,对比可知尺寸约为0.5mm左右,如图13(c)中红色椭圆区域所示。



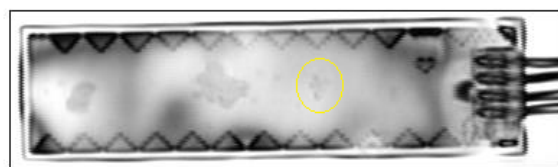
(a) 加热片

(a) Heating patch



(b) 空耦超声检测图

(b) Air-coupled ultrasonic detection diagram



(c) 太赫兹检测图

(c) Terahertz detection diagram

图 12 6号加热片太赫兹与空耦超声法图像对比

Fig. 12 Comparison of THz and air-coupled ultrasonic images of No.6 heat patch

5号加热片实物与太赫兹检测图如图14所示。从图14(b)可以看出,太赫兹图像有明显的白色纹路条纹,与加热片内部的铜片分布一致,这是由于铜片太宽,太赫兹波不能穿透金属,无法检测到铜片之下的缺陷,但能检测到铜片间隙有黑色缺陷区域,如图14(b)中的红色椭圆区域,这可能是

脱粘缺陷。

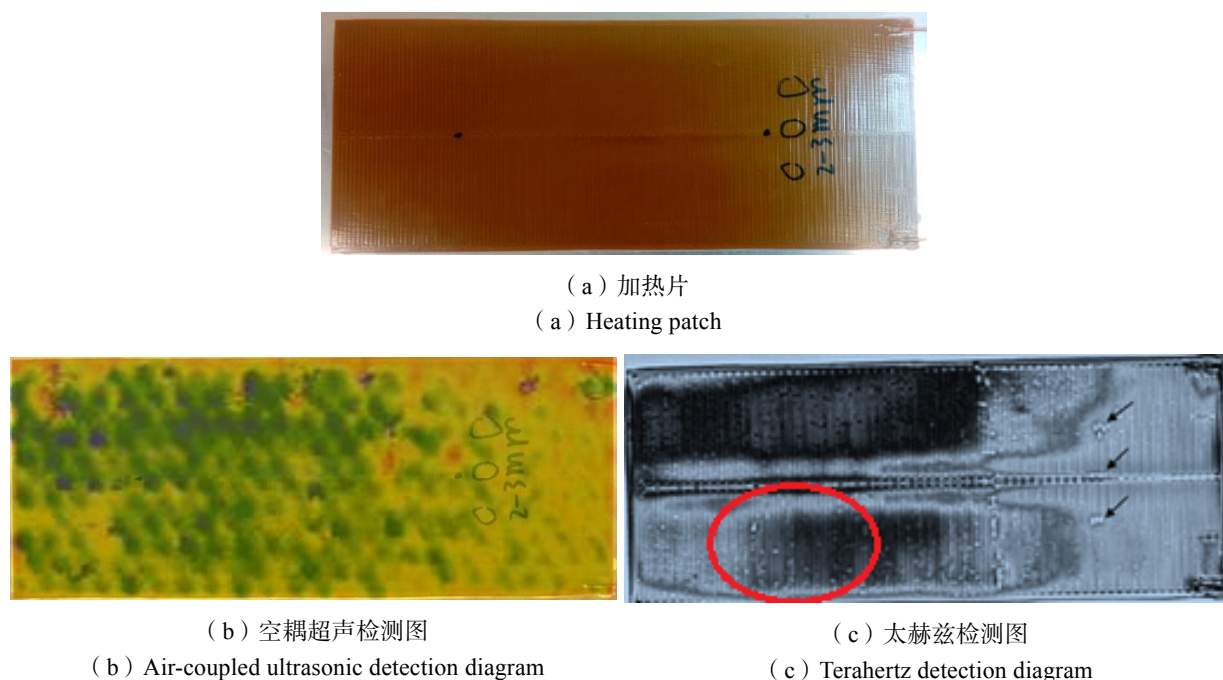


图 13 7 号加热片太赫兹与空耦超声图像对比

Fig. 13 Comparison of THz and air-coupled ultrasonic images of No.6 heat patch

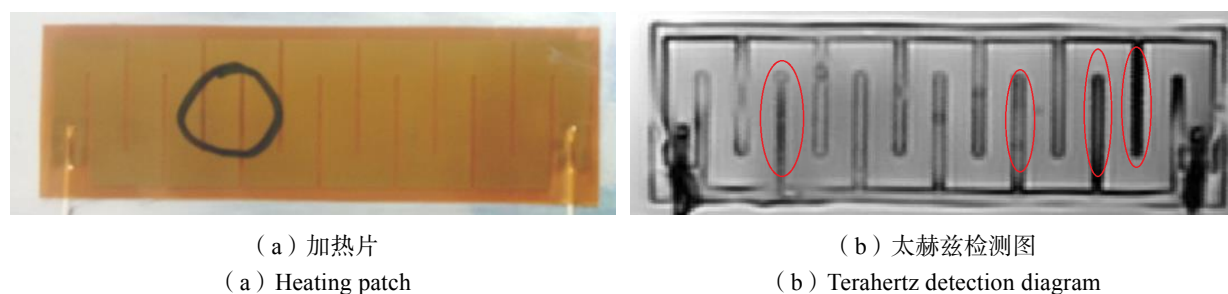


图 14 5 号加热片实物与太赫兹图像

Fig. 14 Physical object and terahertz image of No.5 heat patch

2.3 小结

通过太赫兹波检测试验, 并对比空耦超声对侧一发一收检测法试验结果可以发现: 采用空耦超声对侧一发一收检测法和太赫兹法能有效检测出尺寸大于 5mm 的缺陷及其位置分布; 对于尺寸在 1mm~3mm 的缺陷, 空耦超声对侧一发一收检测法没有检测效果, 而太赫兹检测法能有效检测出缺陷的形状及位置; 同时, 2 号、3 号、7 号和 8 号加热片太赫兹图像中还出现一些密密麻麻的黑色小圆点 (0.2mm 左右), 这可能是由于粘结工艺的原因, 在粘结过程中出现的非预制小气泡缺陷造成的。可见, 采用太赫兹检测法不仅能达到预期的检测效果, 还能检测到非预制的缺陷, 但是太赫兹法也有一定的局限性, 不能检测到宽加热片以下的缺陷。

3 结束语

本文针对蜂窝夹芯复合材料外加热片粘结质量进行无损检测试验, 对比分析空耦超声单侧一发一收检测法、空耦超声对侧一发一收检测法和太赫兹检测法对加热片缺陷的检测效果, 得出以下结论:

①采用空耦超声对侧一发一收法可检测出尺寸大于 5mm 的缺陷及其位置分布,但不能可靠检测出尺寸小于 5mm 的缺陷检测,空耦超声单侧一发一收法无法检测加热片脱粘缺陷;

②太赫兹检测方法可有效检测出预制的 2mm~3mm 脱粘缺陷形状及位置,但无法检测宽加热丝加热片,具有一定的局限性;太赫兹检测过程中,还发现了由于粘结工艺不完善引起的非预制小缺陷,预测其可检出 0.5mm 以上的小气泡脱粘缺陷;

③通过本研究确定加热片粘结质量检测方法:设备总装完成后,采用太赫兹检测法进行粘结质量检测,对于粘结有宽加热丝加热片的设备,应在部件级采用空耦超声对侧一发一收法进行粘结质量检测。

参考文献

- [1] 凡丽梅,王从科,郑杰,等.薄壁金属与非金属环形粘接件粘接质量超声检测方法研究[J].测试技术学报,2014,28(6):489-493.
FAN Limei, WANG Congke, ZHENG Jie, et al. Study on ultrasonic detection method of thin-walled metal and non-metal annular adhesive specimen adhesive quality[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2014, 28(6): 489-493.
- [2] SU Zhongqing, YE Lin, LU Ye. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: a review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3): 753-780.
- [3] ZHENG Kaihong, LI Zheng, MA Zhaoyang, et al. Damage detection method based on Lamb waves for stiffened composite panels[J]. Composite Structures, 2019, 225: 111137.
- [4] DENG Peiwen, SAITO O, OKABE Y, SOEJIMA H. Simplified modeling method of impact damage for numerical simulation of Lamb wave propagation in quasi-isotropic composite structures[J]. Composite Structures, 2020, 243: 112150.
- [5] 蔡兰,陈祯,王亮,等.复合材料的射线检测[J].国外建材科技,2005,26(2):17-18,33.
CAI Lan, CHEN Zhen, WANG Liang, et al. Radiographic inspection of composite materials[J]. The World of Building Materials, 2005, 26(2): 17-18, 33.
- [6] 徐丽,张幸红,韩杰才,等.射线检测在复合材料无损检测中的应用[J].无损检测,2004,26(9):450-456.
XU Li, ZHANG Xinghong, HAN Jiecai, et al. Application of radiographic inspection methods for composite[J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(9): 450-456.
- [7] 江海军,陈力.红外热波成像技术在复合材料无损检测中的应用[J].无损检测,2018,40(11):37-41.
JIANG Haijun, CHEN Li. Application of infrared thermal imaging technology in nondestructive testing of composite materials[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(11): 37-41.
- [8] 张剑,齐暑华.红外热成像技术在复合材料无损检测中的应用现状[J].工程塑料应用,2015,43(11):122-126.
ZHANG Jian, QI Shuhua. Application of infrared thermography in nondestructive testing of composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(11): 122-126.
- [9] 林隆荣,伏喜斌,黄学斌,等.复合材料缺陷的红外热成像检测研究[J].机电工程,2019,36(6):628-632.
LIN Longrong, FU Xibin, HUANG Xuebin, et al. Defects detection of composite materials based on infrared thermography[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(6): 628-632.
- [10] 周小丹,李丽娟,赵铎,等.太赫兹技术在陶瓷基复合材料缺陷无损检测中的应用[J].红外与激光工程,2016,45(8):234-241.
ZHOU Xiaodan, LI Lijuan, ZHAO Duo, et al. Application of terahertz technology in nondestructive testing of ceramic matrix composite defects[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 234-241.
- [11] 叶东东,王卫泽,周海婷,等.基于太赫兹技术的热障涂层平行裂纹监测研究[J].表面技术,2020,49(5):91-97.
YE Dongdong, WANG Weize, ZHOU Haiting, et al. Parallel crack monitoring of thermal barrier coatings based on terahertz technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 91-97.
- [12] 江洋,罗林,王泽勇,等.粘接结构的空气耦合超声导波检测仿真信号研究[J].通信技术,2017,50(6):1188-1192.
JIANG Yang, LUO Lin, WANG Zeyong, et al. Simulation received signal in bonded-joint inspection using air-coupled guided waves[J]. Communications Technology, 2017, 50(6): 1188-1192.

- [13] KORZENIOWSKI M, PIWOWARCZYK T, MAEV R G. Application of ultrasonic method for quality evaluation of adhesive layers[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(4): 661–670.
- [14] 李建文, 王增勇, 孙朝明, 等. 粘接质量成像检测研究[J]. 中国胶粘剂, 2010, 19(6): 1–3.
LI Jianwen, WANG Zengyong, SUN Chaoming, et al. Study on testing ability of imaging method for bonding quality[J]. China Adhesives, 2010, 19(6): 1–3.
- [15] JIAO Jingpin, GE Haiyan, WU Bin, et al. Fouling detection in food vessels using interdigital lamb wave transducer[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(1): 111–114.
- [16] FAN Zichuan, JIANG Wentao, CAI Maolin, et al. The effects of air gap reflections during air-coupled leaky lamb wave inspection of thin plates[J]. Ultrasonics, 2016, 65(2): 82–295.
- [17] AMENABAR I, MENDIKUTE A, LÓPEZ-ARRAIZA A, LIZARANZU M, AURREKOETXEA J. Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades[J]. Composites Part B, 2011, 42(5): 1298–1305.
- [18] 张小川, 金万平, 李艳红, 等. 玻璃钢平底洞缺陷试件红外热波检测方法[J]. 激光与红外, 2006, 36(1): 16–18.
ZHANG Xiaochuan, JIN Wanping, LI Yanhong, et al. Measurement of thickness of glass fiber reinforced plastic flat bottom hole sample by infrared thermal NDT[J]. LASER & INFRARED, 2006, 36(1): 16–18.
- [19] 林鑫, 葛丽, 程茶园, 等. 红外无损检测技术粘接结构产品应用[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(3): 72–75.
LIN Xin, GE Li, CHENG Chayuan, et al. Application of infrared non-destructive testing technology in adhesive structure products[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(3): 72–75.
- [20] ZHENG Kaiyi, CHANG Yusung, WANG Kaihong, et al. Thermographic clustering analysis for defect detection in CFRP structures[J]. Polymer Testing, 2016(49): 73–81.
- [21] 沈京玲, 张存林. 太赫兹波无损检测新技术及其应用[J]. 无损检测, 2005, 27(3): 146–147.
SHEN Jingling, ZHANG Cunlin. Terahertz nondestructive imaging technology and its application[J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(3): 146–147.
- [22] 梁达川, 关松. 太赫兹波无损检测技术及其应用[J]. 光电技术应用, 2018, 33(6): 1–8.
LIANG Dachuan, GUAN Song. Research on non-destructive testing technology and application of terahertz wave[J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(6): 1–8.
- [23] 张紫茵, 邢砾云, 张瑾, 等. 太赫兹复合材料无损检测技术及其应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(4): 562–568.
ZHANG Ziyin, XING Liyun, ZHANG Jin, et al. Terahertz composite nondestructive testing technology and application[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(4): 562–568.
- [24] 危荃, 金翠娥, 周建平, 等. 空气耦合超声技术在航空航天复合材料无损检测中的应用[J]. 无损检测, 2016, 38(8): 6–11.
WEI Quan, JIN Cuie, ZHOU Jianping, et al. Application of air-coupled ultrasonic technology for nondestructive testing of aerospace composites[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(8): 6–11.

[作者简介]

张 彬 1981 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天产品装配与装备技术。
于全朋 1988 年生, 博士研究生, 主要研究方向为超声波无损检测技术。
姚鹏娇 1993 年生, 硕士, 主要研究方向为超声波无损检测技术。
李少华 1985 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星总装技术及工艺设计。
帅家盛 1970 年生, 硕士, 主要研究方向为无损检测新技术及其应用。