

文章编号:1001-5078(2018)09-1067-06

· 综述与评论 ·

涂层疲劳寿命预测中的红外热像技术应用现状

马润波,董丽虹,王海斗,邢志国,郭伟,靖建农
(陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室,北京 100072)

摘要:红外热像技术是一种重要的无损检测技术,与传统的无损检测技术相比优势明显。本文从热喷涂层接触疲劳失效形式出发,综述了传统无损检测技术在涂层疲劳寿命预测研究中的应用现状,以及红外热像技术在涂层服役状态、厚度、缺陷检测等领域的应用实例。同时,综述了融合红外热像技术的信息融合技术在复合材料疲劳极限确定、材料结构健康诊断、裂纹监测等领域中的应用现状。指出了这种技术存在的问题及面临的困难,并对信息融合技术在热喷涂层接触疲劳寿命预测中的应用与研究进行了展望。

关键词:涂层;接触疲劳;寿命预测;红外热像

中图分类号:TG174.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.09.001

Application status of infrared thermography technology in the fatigue life prediction of coating

MA Run-bo, DONG Li-hong, WANG Hai-dou, XING Zhi-guo, GUO Wei, JING Jian-nong
(National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: Infrared thermography technology is an important nondestructive testing technology (NDT). The advantages of this technology is significant compared with traditional nondestructive testing technologies. Starting from the contact fatigue damage form of thermal sprayed coating, the application status of traditional NDT in coating fatigue life prediction research is reviewed, and infrared thermography technology application examples on coating serving, thickness and defects detection, etc are introduced. In the meantime, the application status of fusion infrared thermography technology in material fatigue limit determination, structural health diagnosis and crack monitoring and other fields is also summarized. The problems in the method is pointed out too. The application and research of information fusion on contact fatigue life prediction of thermal sprayed coating is prospected.

Key words: coating; contact fatigue; life prediction; infrared thermography

1 引言

热喷涂技术^[1]是再制造工程中用于修复轴类、齿轮等可再制造旋转部件的重要表面处理技术,这些旋转部件在服役中受到循环接触应力的作用而处于滚动、滑动或滚动/滑动并存的运动状态。随着再

制造技术的发展,耐磨性喷涂层的寿命预测问题已成为再制造工程中的重点和难点。无损检测由于是在不损伤被测对象材质和结构的前提下,利用材料内部结构异常或缺陷存在所引起的对声、光、电、磁、热等反应的信息,实现对各种工程材料、零部件、结

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 51535011);国家自然科学基金面上项目(No. 51675532)资助。

作者简介:马润波(1976-),女,博士,讲师,主要研究方向为再制造寿命与服役安全。E-mail: marunbo@139.com

通信作者:王海斗(1969-),男,博士,研究员,博士研究生导师,主要研究方向为表面工程与再制造工程。

收稿日期:2017-12-29; **修订日期:**2018-01-28

构件等内部和表面缺陷的探测,并对缺陷的类型、性质、数量、形状、位置、尺寸和分布等情况作出判断和评价的技术,已在许多领域发挥了重要的作用^[2-4]。

红外热像技术是一种新兴的无损检测技术,能够实现实时在线监测,对被检对象适用范围广。本文就红外热像技术关于热喷涂层接触疲劳失效的预测展开综述,及对提高预测精确度进行了展望。

2 热喷涂层接触疲劳失效形式

研究发现,涂层接触疲劳失效的损伤主要包括分层失效、剥落和表面磨损等形式。分层和剥落失效是亚表面主要的失效形式,主要是由于涂层内的剪切应力和正交应力引发的裂纹萌生和发展导致^[5]。分层失效发生的位置随着接触条件的改变而改变,其或者位于涂层内部或者位于涂层与基体结合的界面处^[6]。一般情况下,剥落导致涂层失效时,剥落坑较分层失效的深度浅,剥落坑可能存在于磨痕内部,也可能面积较大且超过了磨痕的宽度。表面磨损主要是由于摩擦接触引起的近表面失效,一般在涂层表面形成大量的点蚀坑,与另两种失效形式相比,点蚀坑较浅^[7]。图1(a)给出了在淬火45钢圆环形基体上制备的等离子金属陶瓷涂层CrC-NiCr,以轴承球直径为11 mm,材料为GCr15钢(AISI52100钢)的11球轴承作为配对摩擦副,采用燕山大学自行研制YS-1型接触疲劳试验机进行接触疲劳试验后涂层磨损形貌。由图1(b)可见,采用国防科技重点实验室研制的RM-1型试验机,在调质AISI 1045钢基体上制备等离子AT40涂层,以淬火+低温回火处理后的AISI 52100钢作为配对摩擦副,在滚动/滑动状态下,AT40涂层的表面磨损形貌同样表现为大量微点蚀连接构成的大面积浅层材料去除^[8]。

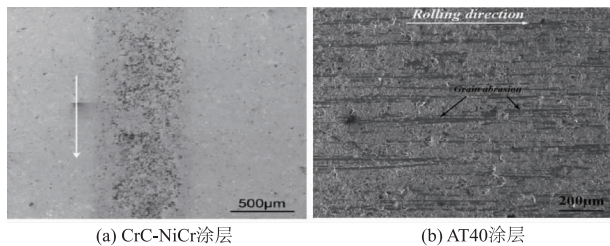


图1 表面磨损形貌

Fig. 1 Surface wear morpholog

3 传统无损检测技术

目前,传统的无损检测技术分为缺陷检测和性能检测两类,主要有超声波检测、射线检测、磁粉检

测、渗透检测和涡流检测等。

超声波检测技术最早被用于海洋中的冰山探测,之后被陆续应用到了产品缺陷的检测中。具有灵敏度高、速度快、定位准确的特点,同时对人体及环境没有损害,对内部及内外表面尺寸很小的缺陷均能较好地适用^[9]。然而,这种技术却难以实现非接触式检测,且检测的精确度受材料性能和组织的影响较大。利用超声波的传播特性,可以实现对熔覆层厚度的测量^[10]。研究发现,涂层中的孔隙以及其特有的组织结构,与超声波在传播过程中的衰减系数存在着相关性,但是由于超声波在涂层内部的传播特性影响了有用回波信息的提取,限制了这种技术在涂层性能测定与评价中的应用^[11]。为了实现涂层质量检测及服役状态监测,可通过采集无涂层时的回波信号,通过有效的时频分析方法,综合分析有、无涂层两种回波信号以达到评价的目的^[12]。然而,这样的处理方法虽能够从一定程度上对涂层进行性能评价,但是需要获取无涂层时的回波信息,必然导致试验成本及研究周期的增加。

射线检测技术对复合材料中的分层结构、与表面平行的裂纹等不灵敏,且不易操作、成本高、易对人体造成伤害。磁粉检测技术利用磁现象探测材料或工件的缺陷,可有效检测表面、近表面的缺陷,能直观地反映磁性材料缺陷的形状、位置、尺寸和损伤程度,但是无法反馈缺陷深度及检测较深的内部缺陷。渗透检测技术具有操作简单、成本低、结果直观可见等特点,适用于检测工程材料、零件的表面或近表面各种开口缺陷,对零件尺寸和形状没有特殊要求,但是检测结果受表面污染状态和粗糙度的影响较大。涡流检测技术对零件表面的污染状态没有要求,对磁性和非磁性材料均能较好地适应,具有灵敏度高、成本低、可靠性高、非接触的优点,在航空航天领域中应用最为广泛^[13]。但是,存在检测速度慢、探测深度小、对提离效应敏感等缺点,极大地限制了这种检测技术的应用。涂层的成形过程导致了层状结构特征明显,及存在孔洞、微观裂纹等天然缺陷。涂层这些微观结构的存在不仅使得信号反馈的准确性受到影响,加之上述无损检测技术自身使用的局限性,限制了它们在热喷涂层接触疲劳损伤监测中的应用,寻找合适的无损检测方法将是解决这一问题的关键。

4 红外检测技术在涂层相关领域的应用

一切温度超过热力学温度的物体都会向周围不断地发出红外辐射,红外热像检测技术就是以红外辐射原理为基础,采用红外辐射测量方法对物体的表面温度及温度分布进行测量,检验其内部缺陷或判断其运行状态的一种无损检测技术,适用于与温度变化有关的测量,在航空航天、机械、医疗、电力、军事、地质勘探等领域已得到广泛应用。这种技术具有直观、非接触、易操作、使用安全等特点,对动态、静态目标均能探测,对于整体结构的无损检测和可靠性筛选等均具有较高的适用性。其检测方式按照是否借助外部热激励源分为主动式和被动式^[14],被动式主要依靠自身热量产生温差,利用被检测对象热辐射能量和温度的对应关系,将被测对象表面温度分布用颜色图像显示出来,并通过图像分析获取信息。主动式检测方式适用于当被测对象的热辐射无法被有效分辨时,通过外部热激励源产生温差明显的热图,以达到提高检测精度的目的。高效的热激励方式是提高红外热像仪识别精度的重要手段,常用的热激励方式主要有热灯激励^[15]、超声波激励^[16]、电磁激励^[17]、微波激励^[18]、激光激励^[19]等,每种激励方式都有各自的特点和适用范围。

红外热像技术利用红外热像仪进行对被测对象表面温度的分布及变化的监测,并实现对缺陷的探测。红外热像仪的基本工作原理,主要基于 Planck 定理,即对于热辐射体,其波长 λ 、热力学温度 T 和光谱辐射出射度有如下关系:

$$M_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (1)$$

式(1)称为 Planck 公式^[20],是最基本的热辐射公式。其中,第一辐射常数 $C_1 = 3.741833 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$;第二辐射常数 $C_2 = 1.438832 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; $M_{\lambda,T}$ 称为黑体的光谱辐射出射度。给定波长 λ ,利用式(1)得到 M 后即能算出温度 T 。

目前,尚未见将红外热像技术运用于热喷涂层接触疲劳失效研究中的报道。然而,这一技术在涂层服役状态检测、涂层厚度检测、涂层缺陷检测、涂层下基体的裂纹检测等研究领域已经得到了较好的应用,并取得了突破性的研究成果。由于红外线反射系数能随着喷涂层在服役中的状态改变而发生变化,学者们通过将稀土氧化物引入涂层的亚表面,利用稀土元素能产生强烈光能的特性,实现了反射系

数对涂层各阶段的信息实时采集^[21]。涂层厚度是影响涂层质量和寿命的一个重要参数,通过研究热响应幅值和涂层厚度及热循环次数之间的关系,利用红外热像技术对涂层厚度在失效过程中的变化进行了有效监测^[22]。对预设了缺陷的大厚度吸波涂层和高反射率涂层进行红外检测,利用缺陷区域和完好区域热扩散系数不同的特点,可以实现对缺陷的快速、有效识别^[23]。通过热激励装置,运用脉冲红外热像法对吸波涂层的缺陷进行检测,发现缺陷部位涂层表面温度高于正常涂层的表面温度,红外热图能清晰地显示缺陷情况,有效地解决了吸波涂层无损检测的问题^[24]。随着数据处理技术的进一步深入,学者们提出了 Markov-PCA-BP 算法,并有效地解决了利用脉冲红外热像试验法确定热障涂层脱粘缺陷尺寸和深度^[25]。利用红外热像技术对经激励源从外部激励的涡轮叶片进行监测,通过对红外热图的分析已经能较准确地确定热障涂层脱落的位置和尺寸^[26]。采用超声热成像技术,对涂层下基体的疲劳裂纹进行监测研究。受到超声波激励后,基体裂纹处的涂层表面温度表现为迅速升高,并且在激励结束时裂纹区域和非裂纹区域的温差显著,如图2所示。结果表明这种方法可以对基体的疲劳裂纹作定性识别,并进行定量分析^[27]。

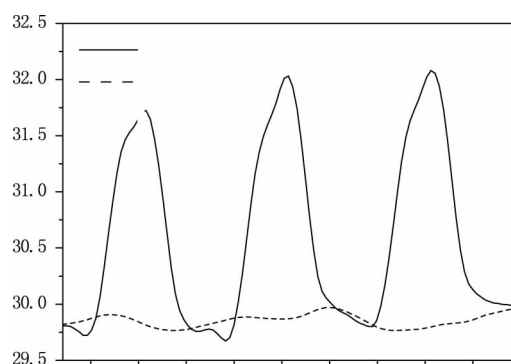


图2 裂纹与非裂纹区表面温度变化过程

Fig. 2 Surface temperature change process in the crack and non-crack area

5 信息融合中的红外热像技术应用

单个传感器在检测中的信息准确性和可靠性,由于受到使用条件的限制而限制颇多,通过使用多个传感器获取多种特征量,并对这些特征量含有的信息进行分析和处理,可以有效地解决单个传感器的弊端。信息融合正是处理这些多传感器信息的有力工具,又称为数据融合,是利用计算机技术,对按

时序获取的多个传感器的检测信息,在一定的准则或算法下进行信息的组合,以获取更多有效信息,从而产生对观测对象的一致性解释和描述的过程^[28]。其优点在于通过扩大时空感知范围,使得被测对象具有较高的可探测性,从而有效降低了推理的模糊程度,使得系统容错能力和自适应性增强,及决策的可靠性和精确度得到提高^[29]。

随着信息融合在军事、机械、航空、经济、医学、交通等众多领域中的不断深入应用,学者们提出了许多信息融合模型,如 JDL 模型、Boyd 控制环模型、Dasarathy 模型等。其中,关于 JDL 模型的扩展与应用的研究成果较多^[30-32]。目前,应用红外热像技术的信息融合在复合材料疲劳极限确定、材料结构健康诊断、裂纹监测中应用的成果较为丰硕。对铝 1050 H16 和交叉层 SiC / BMAS 陶瓷基复合材料在各种应力水平下进行疲劳负载,采用红外锁定热成像技术实时检测由于热机械耦合产生的热波,及在材料的动态加载期间内在消散的能量,声发射技术用于记录由裂纹扩展产生的瞬态波,从而实现快速、可靠和经济的确复合材料的疲劳极限。这一方法由于显著地减少了试验时间,从而可以突破 Wöhler (S-N) 曲线的限制,通过较少的样本获取材料疲劳极限,其结果与常规 S-N 曲线方法获得的结果一致^[33]。在碳纤维增强复合材料的静载荷拉伸试验中,利用声发射和红外热成像监测材料的损伤演变过程。经研究证实了两种技术之间具有互补性,同时对每种方法定义了关于每种机制特有的敏感性。研究发现,声发射技术更加适合检测基体开裂,而红外热成像技术更适合于纤维断裂和界面失效的检测^[34]。同样,采用声发射技术和红外热像技术相结合,测量了 SiC 纤维增强陶瓷基复合材料 (SiC/BMAS) 在拉伸载荷下裂纹的扩展。研究表明,这两种无损检测技术的组合检测方式,具有较高的分辨率和精确度,可以实现对任何性质复合材料裂纹生长的实时监测^[35]。由于玻璃纤维增强聚合物层压板发生损坏的现象非常复杂,其本质上是一种各向异性、多源和多尺度的过程。同时使用了声发射、红外热像等多种无损检测技术评估在单轴拉伸试验下发生在玻璃纤维增强聚合物层压板中的机械损伤。结果表明,应用多种无损检测技术以验证或完成材

料的结构健康诊断是可行的。多种无损检测技术的组合示意图如图 3 所示^[36]。

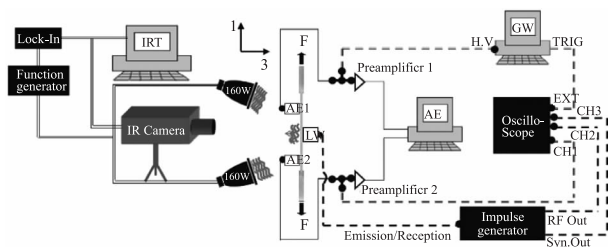


图 3 多种无损检测技术的组合示意图

Fig. 3 Schematic illustration of the NDT multi-technique setup

6 面临的困难与展望

6.1 面临的困难

目前,将红外热像技术运用于喷涂层接触疲劳失效领域的研究面临以下问题和困难:

(1) 红外热像技术主要依托红外热像图提供涂层损伤失效的信息,然而往往由于环境、设备、人员等因素的影响,红外热像图易受到噪声的影响,进一步影响着涂层损伤失效的信息提取及失效阶段的分类识别,存在着图像分辨率不高、定量检测准确性较低、对于声阻小的缺陷及损伤的识别效果差等缺点。目前,红外热像技术用于监测涂层的接触疲劳失效损伤尚不成熟,亟待有效的解决方法。

(2) 针对涂层接触疲劳寿命预测与损伤识别的特征信号提取尚未建立。合理的信号分析与处理技术是从红外信号中提取有用信息,剔除噪声干扰,实现对涂层接触疲劳损伤预测的关键。

6.2 展 望

红外热像技术适用于与温度变化有关的测量,在涂层接触疲劳失效过程中,摩擦副在循环载荷的作用下,涂层表面发生温度升高,温度的升高使得涂层内部存在一个温度分布。且在涂层的结合强度、显微硬度、厚度等交互作用下,使得涂层发生磨损、剥落、分层等损伤失效。涂层伴随表面温度变化并发生损伤失效的过程,可采用红外热像检测方式对涂层表面温度状态进行监测。同时,可采用具有实时捕捉材料在损伤失效时所释放的某种能量的技术,如声发射技术。声发射技术能够获取因涂层损伤失效引起应变能快速释放产生的应力波,并具有通过幅度、能量、计数、上升时间等参数识别材料损伤类型、损伤程度的优势,在涂层接触疲劳失效监测中应用广泛,然而其易受噪声干扰的缺点影响了监

测结果的精确度。

将红外热像技术与声发射技术应用于热喷涂层接触疲劳预测研究,实现多源信息融合,将二者的优势和缺点进行互补,有效利用两种无损检测技术提供的数据资源,采用数据挖掘技术充分提取涂层损伤失效与表面温度变化、声发射信号的信息,发现其规律性,对涂层失效损伤进行辨识,建立涂层接触疲劳失效与无损检测信号的关联关系,较好地实现对涂层接触疲劳的预警,将是再制造工程的研究及发展中的重要尝试。

参考文献:

- [1] WANG Haidou, XU Binshi, Jiang Yi, et al. Microstructure and mechanical properties of supersonic plasma sprayed coating[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 1. (in Chinese)
王海斗, 徐滨士, 姜伟, 等. 超音速等离子喷涂层的组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 1.
- [2] Linkert Gregory. Nondestructive testing, then, now and in the future[J]. Aircraft Maintenance Technology, 2014, 25: 20 - 22.
- [3] S Shuaib Ahmed, B Purna Chandra Rao, T Jayakumar. Greedy breadth-first-search based chain classification for nondestructive sizing of subsurface defects[J]. Applied soft computing, 2016, 40: 260 - 273.
- [4] Chen Ni, Lin Huan, Xiaokai Wang, et al. Coupling method of magnetic memory and eddy current nondestructive testing for retired crankshafts[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(7): 3097 - 3104.
- [5] CUI Huawei, CUI Xiuying, WANG haidou, et al. Research progress in effects of surface integrity on rolling contact fatigue life of coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(11): 1 - 8. (in Chinese)
崔华威, 崔秀英, 王海斗, 等. 表面完整性对涂层滚动接触疲劳寿命影响的研究进展[J]. 金属热处理, 2014, 39(11): 1 - 8.
- [6] X C Zhang, B S Xu, F Z Xuan, et al. Rolling contact fatigue behavior of plasma-sprayed CrC-NiCr cermet coatings[J]. Wear, 2008, 265: 1875 - 1883.
- [7] ZHANG Xiancheng. Structural integrity of plasma-sprayed coating-based systems aiming to life prediction in remanufacturing engineering[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
张显程. 面向再制造的等离子喷涂层结构完整性及寿命预测基础研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [8] Kang Jiajie, Xu Binshi, Wang Haidou, et al. Competing failure mechanism and life prediction of plasma sprayed composite ceramic coating in rolling-sliding contact condition[J]. Tribology International, 2014, 73: 128 - 137.
- [9] XIA Jianwen, HAN Cheng. Ultrasonic inspection for zirconium alloy nuclear[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(3): 122 - 126. (in Chinese)
夏健文, 韩承. 核燃料锆合金包壳管的超声波探伤[J]. 核动力工程, 2016, 37(3): 122 - 126.
- [10] LIU Bin, DONG Shiyun, XU Binshi, et al. Non-destructive evaluation for thickness of laser cladding coating based on surface acoustic wave[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, 1: 38 - 41. (in Chinese)
刘彬, 董世运, 徐滨士, 等. 基于表面超声波无损评价激光熔覆层厚度的实验研究[J]. 材料工程, 2012, 1: 38 - 41.
- [11] Cox R L, Almond D P, Petter H. Ultrasonic attenuation in plasma-sprayed coating material[J]. Ultrasonics, 1981, (1): 17 - 22.
- [12] CHANG Junjie. Evaluation of the Al_2O_3 coating by ultrasonic wear propagation character[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007, 31(2): 62 - 64. (in Chinese)
常俊杰. 利用超声波传播特性对 Al_2O_3 涂层进行评价[J]. 机械工程材料, 2007, 31(2): 62 - 64.
- [13] M R Vijaya, Lakshmi, A K Mondal, C K Jadhav, et al. Overview of NDT methods applied on an aero engine turbine rotor blade[J]. Aero engine inspection, 2013, 55(9): 482 - 486.
- [14] DAI Jingmin, WANG Zijun. Infrared thermography non-destructive testing technology and its application[J]. Techniques of Automation & Application, 2007, 26(1): 1 - 7. (in Chinese)
戴国民, 汪子君. 红外热成像无损检测技术及其应用现状[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(1): 1 - 7.
- [15] GUO Wei, DONG Lihong, XU Binsi, et al. Research status and progress of active infrared thermographic nondestructive testing[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(4): 58 - 66. (in Chinese)
郭伟, 董丽虹, 徐滨士, 等. 主动红外热像无损检测技术的研究现状与进展[J]. 无损检测, 2016, 38(4): 58 - 66.
- [16] Manohar A, Lanza F, Scalea D. Determination of defect depth and size using virtual[J]. Experimental Mechanics, 2012, 13(53): 661 - 671.
- [17] Ignatovich S R, Bouraou N I. The reliability of detecting cracks during nondestructive testing of aircraft components[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2013, 49(5): 294 - 300.
- [18] Yin Aijun, Gao Bin, Tian Guiyun, et al. Physical interpretation and separation of eddy current pulsed thermography[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(6): 1011 - 1018.
- [19] Bodnar J L, Nicolas J L, Candore J C, et al. Non-destructive testing by infrared thermography under random excitation and ARMA analysis[J]. Int J Thermophys, 2012

- (33):2011–2015.
- [20] WANG Yanbin, WANG Min, ZOU Qianjin, et al. Setup of blackbody's temperature and area for simulating real target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 779–784. (in Chinese)
王彦斌, 王敏, 邹前进, 等. 黑体模拟真实目标温度和面积的设定[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 779–784.
- [21] Jeffrey I, Timothy J. Monitoring delamination of plasma-sprayed thermal barrier coatings by reflectance-enhanced luminescence[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2001, 201/206:3926–3930.
- [22] Frank E B, Sohn Y H, Chen X. Monitoring damage evolution in thermal barrier coatings with thermal wave imaging[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 200(5): 1292–1297.
- [23] LIU Pengrui, XIAO Shengrong, ZHANG Tong, et al. Application of infrared thermography in the research of functional coating defects[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2014, 4:49–51. (in Chinese)
刘鹏瑞, 肖圣荣, 张桐, 等. 红外热成像技术在功能涂层缺陷研究中的应用[J]. *航空维修与工程*, 2014, 4: 49–51.
- [24] WANG Zhiyong, LIU Yingtao, WANG Xiaohu, et al. Application of infrared thermography in research of radar absorbing coating defects[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(3):91–95. (in Chinese)
王智勇, 刘颖韬, 王小虎, 等. 红外热像检测技术在吸波涂层缺陷研究中的应用[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(3):91–95.
- [25] Tang Qingju, Dai Jingmin, Liu Junyan, et al. Quantitative detection of defects based on Markov-PCA-BP algorithm using pulsed infrared thermography technology[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 77:144–148.
- [26] FENG Chi, HU Xiang. Applications of the infrared thermal wave technology in thermal barrier coating testing[J]. *Applied Science and Technology*, 2015, 42(1):15–18. (in Chinese)
冯驰, 滑翔. 红外热波技术在涡轮叶片涂层检测上的应用[J]. *应用科技*, 2015, 42(1):15–18.
- [27] GUO Wei, DONG Lihong, XU Binshi. Ultrasonic Infrared thermal imaging detection of fatigue cracks of the substrate under remanufacturing blanks coating[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2016, 30(2): 89–93. (in Chinese)
郭伟, 董丽虹, 徐滨士. 再制造毛坯涂层下基体疲劳裂纹超声红外热像检测[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2016, 30(2):89–93.
- [28] HAN Chongzhao, ZHU Hongyan, DUAN Zhansheng. Multi-source information fusion[M]. 2nd ed. Beijing:Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)
韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2010.
- [29] PAN Quan, WANG Zengfu, LIANG Yan, et al. Basic methods and progress of information fusion(II)[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10):1233–1244. (in Chinese)
潘泉, 王增福, 梁彦, 等. 信息融合理论的基本方法与进展(II)[J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(10): 1233–1244.
- [30] Steinberg A N, Bowman C L, White F E. Revisions to the JDL data fusion model[C]//*Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications III*. Florida, USA: The International Society for Optical Engineering, 1998: 430–441.
- [31] Hall M J, Hall S A, Tate T. Removing the HCI bottleneck: how the human computer interface(HCI) affects the performance of data fusion systems[C]//*Proceedings of the 2000 MSS National Symposium on Sensor and Data Fusion*. San Diego, California: Sensing Information Analysis Center, 2000:89–104.
- [32] BLASCH E, PLANO S. DFIG Level 5 user refinement issues supporting situational assessment reasoning[C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Information Fusion*. Pennsylvania, USA: IEEE, 2005:9–16.
- [33] E Z Kordatos, K G Dassios, D G Aggelis, T. E. Matikas. Rapid evaluation of the fatigue limit in composites using infrared lock-in thermography and acoustic emission[J]. *Mechanics Research Communications*, 2013, 54: 14–20.
- [34] V Munoz, B Valès, M Perrin, et al. Damage detection in CFRP by coupling acoustic emission and infrared thermography[J]. *Composites Part B Engineering*, 2015, 85: 68–75.
- [35] Konstantinos G Dassios, Evangelos Z Kordatos, Dimitris G Aggelis, et al. Crack growth monitoring in ceramic matrix composites by combined infrared thermography and acoustic emission[J]. *Journal of the American Ceramic Society-Dassios*, 2014, 97(1):251–257.
- [36] S Chaki, W Harizi, G Bourse, et al. Multi-technique approach for non destructive diagnostic of structural composite materials using bulk ultrasonic waves, guided waves, acoustic emission and infrared thermography[J]. *Composites: Part A*, 2015, 78:358–361.