

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180123001

再制造喷涂层界面结合性能脉冲红外热像评估技术

郭伟¹, 董丽虹¹, 王海斗¹, 向明¹, 李慧娟², 徐滨士¹

(1. 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; 2. 中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: 针对再制造工程中常见的喷涂层界面结合性能评价问题, 采用脉冲红外热像技术对 3Cr13 合金涂层的界面脱粘缺陷进行检测评估。以信噪比 (SNR) 为评价标准, 对比了两种不同热图序列处理方法在预处理和后处理阶段的效果。结果表明: 在预处理阶段, 基于表面热信号的多项式拟合算法 (PF) 将原始热图的信噪比由 5.34 提升到 9.61, 其效果优于基于单张图像中值滤波算法 (MF); 而在后处理阶段, 基于单张图像的主成分分析法 (PCA) 对缺陷特征的表征比基于表面热信号的脉冲相位法 (PPT) 更加准确, 第三主成分重建热图的信噪比达到 17.99。综合而言, 基于单张图像的热图序列处理方法在再制造喷涂层界面结合性能评价中具有更好的效果。

关键词: 热喷涂涂层; 界面脱粘缺陷; 脉冲热像检测; 图像处理

中图分类号: TH17; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)03-0168-09

Interfacial Adhesion Performance Assessment of Remanufacturing Spraying Coatings by Pulsed Thermography

GUO Wei¹, DONG Li-hong¹, WANG Hai-dou¹, XIANG Ming¹, LI Hui-Juan², XU Bin-Shi¹

(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072; 2. China Polytechnological Establishment, Beijing 100028)

Abstract: Aiming at the interfacial adhesion performance assessment of spray coatings, which was common in remanufacturing engineering, interface debonding defect of the 3Cr13 coating was detected with pulsed infrared thermography. Taking the signal to noise ratio (SNR) as criterion, two different image processing methods were compared both in the pretreatment and post-treatment stages of thermal image sequence. The results show that in pretreatment stage, SNR is improved from 5.34 to 9.61 with the signal-based algorithm polynomial fitting (PF), which is better than the image-based median filtering (MF) algorithm. In post-processing stage, the image-based principal component analysis (PCA) algorithm extracts more precise defect feature than the signal-based pulse phase thermography (PPT), and the SNR reaches 17.99 on the thermal image, which is reconstructed with the third principal component heat map. In a word, the image-based processing algorithms achieve a better result than the signal-based processing algorithms in the evaluation of interfacial adhesion performance of remanufactured sprayed coatings.

Keywords: thermal spray coating; interface debond defect; pulsed thermography; image processing

0 引言

热喷涂技术广泛应用于表面工程和再制造工程中。对带有热喷涂层的零件而言, 最脆弱的部

位是喷涂层与基体的结合界面, 其结合强度远低于涂层的内聚结合强度和基体本身的强度^[1]。以汽车发动机曲轴为例, 一般采用火焰喷涂或电弧喷

收稿日期: 2018-01-23; 修回日期: 2018-05-02

网络出版日期: 2018-05-09 09:10; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180509.0909.006.html>

通讯作者: 董丽虹 (1972—), 女 (汉), 副研究员, 博士; 研究方向: 无损检测与寿命评估; E-mail: lihong.dong@126.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51535011, 51675532)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51535011, 51675532)

引文格式: 郭伟, 董丽虹, 王海斗, 等. 再制造喷涂层界面结合性能脉冲红外热像评估技术[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3): 168-176.

GUO W, DONG L H, WANG H D, et al. Interfacial adhesion performance assessment of remanufacturing spraying coatings by pulsed thermography[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3): 168-176.

涂方式在废旧曲轴表面制备耐磨涂层的方式对其进行再制造,喷涂过程中的热应力会显著影响喷涂层的界面结合性能,如果热应力控制不当,会导致局部涂层界面结合失效,严重影响再制造曲轴的质量^[2]。另外,再制造曲轴在二次服役过程中,承受高温、接触疲劳、腐蚀环境、冲击载荷等因素的作用,喷涂层与基体之间的界面同样易产生脱粘甚至剥落,从而严重影响再制造曲轴的服役安全^[3]。又如航空发动机的关键零件涡轮叶片,为了保证叶片在极端高温环境下正常工作,在其表面制备热障涂层,服役过程中最常见的损伤形式是由热生长氧化物导致的热障涂层界面脱粘甚至涂层剥落,目前尚无有效的方法避免热生长氧化物的产生,因此,必须定期对叶片进行检测,评估热障涂层与基体之间的结合性能,及时发现涂层界面脱粘缺陷,避免服役过程中涂层剥落导致叶片失效,进而危及发动机安全。综上,再制造喷涂层在制备和服役过程中,对其界面结合性能的检测和评估十分重要,关系到再制造零件的服役安全及使用寿命。

喷涂层界面结合性能包括结合强度和结合状态。界面结合强度主要采用拉伸法、划痕法等力学性能测试手段进行测量;界面结合状态主要通过现有无损检测技术进行评估,部分文献中采用超声检测方法进行喷涂层界面脱粘缺陷检测研究,如:张伟等^[4]采用数值模拟手段研究了喷涂层热障涂层中孔隙微观特征对超声检测信号的影响;韩赞东^[5]采用斜入射超声检测陶瓷涂层的界面脱粘缺陷。然而,由于喷涂层中大量孔隙和微裂纹对超声具有散射作用,且会影响超声传播的方向性,加之超声检测对浅层缺陷的敏感性较低,导致传统超声检测技术在喷涂层界面脱粘缺陷检测应用中受到很大局限。工程实际中,喷涂层界面脱粘缺陷的检测仍然大量依靠肉眼检查和经验判断,缺乏一种准确、高效的检测手段。近年来,脉冲红外热像检测技术在材料表面和近表面缺陷检测中显示出较大潜力^[6],其检测效率显著高于传统的超声检测技术,可以实现大面积快速扫查,而且不与涂层表面接触、无需耦合介质^[7]。国内外学者针对喷涂层界面脱粘缺陷检测问题,研究了脉冲激励参数、材料物理性质、缺陷形状特点以及热图处理方法等因素对检测结果的影响和

优化效果^[8-9]。喷涂层界面脱粘缺陷的脉冲红外热像检测原理如图1所示,脉冲闪光灯辐射的光能被涂层表面吸收并转化为热量,热量从涂层表面向内部传导,在正常区域热量会穿过涂层及界面,并继续向基体内部传导,涂层表面温度逐渐下降。而在界面脱粘缺陷位置,热量受到阻碍无法穿过缺陷的空气隙,从而导致缺陷上方的涂层温度高于正常区域,在涂层表面形成温度异常区域。使用热像仪采集涂层降温过程中的一系列表面热像图(简称热图序列),借助图像处理和信号处理技术可以对界面脱粘区域的位置、大小等进行判断和计算。

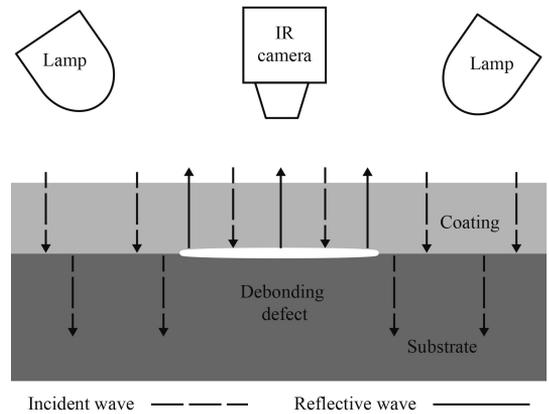


图1 喷涂层界面脱粘缺陷脉冲红外热像检测原理

Fig.1 Sketch of pulsed thermography for coating debonds

热图序列的处理是脉冲红外热像检测中十分关键的步骤^[10]。一般而言,热图序列的处理分为预处理和后处理两个阶段:预处理的目的是去除图像序列中的噪声^[11];后处理的目的是提取缺陷的热信号特征,并采用特征信号重建表面热图,使缺陷更加清楚地表现在热图中,并为缺陷的定量表征奠定基础^[12]。

目前,红外热图序列的预处理和后处理大都基于表面热信号(Signal based)进行,即将热图序列中每个像素点的温度变化趋势作为一个随时间变化的温度信号进行滤波和特征提取^[13-14],基于表面热信号的热图序列处理方法中,应用最广泛的是多项式拟合(Polynomial fitting, PF, 预处理)^[15-16]和脉冲相位法(Pulsed phase thermalgraphy, PPT, 后处理)^[17]。然而,随着图像处理技术快速进步,近年来基于单张图像(Image based)的处理方法在脉冲红外热像检测中应用越来越多,该方法是将

热图序列中每张热图作为一个处理单元进行滤波和特征提取。基于单张图像的预处理方法在红外热图中应用较多的是中值滤波 (Median filtering, MF), 其能够有效去除红外图像中大量的高斯噪声, 同时较好地保留缺陷的边缘信息^[18]。基于单张图像的后处理方法中最典型的是主成分分析法 (Principal component analysis, PCA)^[19-20]。

文中将基于单张图像的热图序列处理方法 (MF 和 PCA) 应用于再制造喷涂层界面脱粘缺陷的评估, 并将其与传统的基于表面热信号的处理方法 (PF 和 PPT) 进行对比, 具体流程如图 2 所示。以信噪比 (Signal to noise ratio, SNR) 为评价标准, 对比了两种处理方法在预处理和后处理阶段对热图质量的提升效果, 并分析了不同处理方法的特点, 以期喷涂层界面缺陷脉冲红外热像检测的研究和工程应用提供参考。

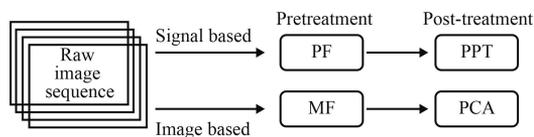


图 2 热图序列处理流程

Fig.2 Procedure of thermal image sequence processing

1 试验材料和方法

采用火焰喷涂方法在 304 不锈钢板材表面制备了 3Cr13 合金涂层, 不锈钢板材厚度为 3 mm, 涂层厚度约 600 μm 。在喷涂过程中, 采用连续喷涂的方式增大涂层内部热应力, 试样边缘涂层界面承受较大的拉应力, 最终导致试样边缘部分涂层发生界面脱粘并轻微翘曲。从涂层表面 (图 3(a)) 无法判断局部界面脱粘的存在及其大小, 但从试样侧面观察, 可以发现试样右侧边缘局部区域涂层界面发生了界面脱粘 (图 3(b))。

采用德国 AT 公司生产的 IR-NDT 红外热成像检测系统, 该系统由热像仪、热激励装置和数据处理系统组成。热激励装置为两个大功率脉冲闪光灯, 每个闪光灯单次脉冲释放的能量为 6 kJ。利用 FLIR SC7000 型热像仪采集脉冲激励后降温过程中涂层表面的温度分布及其变化过程, 其室温下最高温度分辨率 ≤ 0.01 $^{\circ}\text{C}$ 、测温范围 $-20\sim 500$ $^{\circ}\text{C}$ 、图像采集频率为 60 Hz、探测器尺寸 640×512 像素、探测器工作波段为 $7.85\sim 9.5$ μm 。试验过程

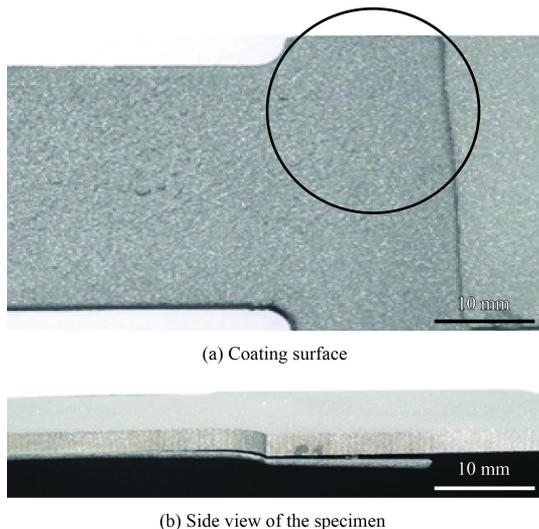


图 3 喷涂层界面脱粘试样

Fig.3 Specimen with coating debond defect

中, 热像仪与脉冲闪光灯同步激发, 从脉冲开始时刻采集涂层表面热图, 采集时间持续 1 s, 即热像仪采集的原始热图序列包含 60 帧图像。

2 涂层表面温度响应过程

图 4 展示了不同时刻的部分原始热图, 由于闪光持续时间很短, 约 0.02 s, 原始热图序列中只有前两帧热图反映了加热阶段涂层表面的温度分布。从第 3 帧开始的降温阶段热图序列中界面脱粘缺陷的区域逐渐显现, 在第 3 帧至 10 帧原始热图中最为明显, 之后随着热扩散进行界面脱粘区域逐渐模糊至消失, 到第 30 帧热图, 已无法从原始热图中分辨界面脱粘缺陷, 因此, 文中后续分析中只采用前 30 帧 (0~0.5 s) 热图作为原始热图序列。

从原始热图序列中缺陷区和非缺陷区各取 5 个点的温度值并对其取平均值, 分别求出缺陷区和非缺陷区在加热及降温过程中的温度变化量 (表面实际温度与环境温度之差)。如图 5 所示, 脉冲激励时缺陷区和非缺陷区温度都迅速升高, 在随后的降温过程中, 非缺陷区温度下降速度明显快于缺陷区。两者之间的温度差及其变化过程如图中黑色曲线 (正方形图标) 所示, 在升温过程中较小, 在降温初期第 4 帧热图达到最大值, 之后随着降温过程的进行, 由于试样内部热扩散导致表面温度逐渐达到平衡, 两点温差逐渐减小, 第 30 帧之后两点的温差已经低于 0.5 $^{\circ}\text{C}$, 在实际检测中很难将其和噪声分辨。

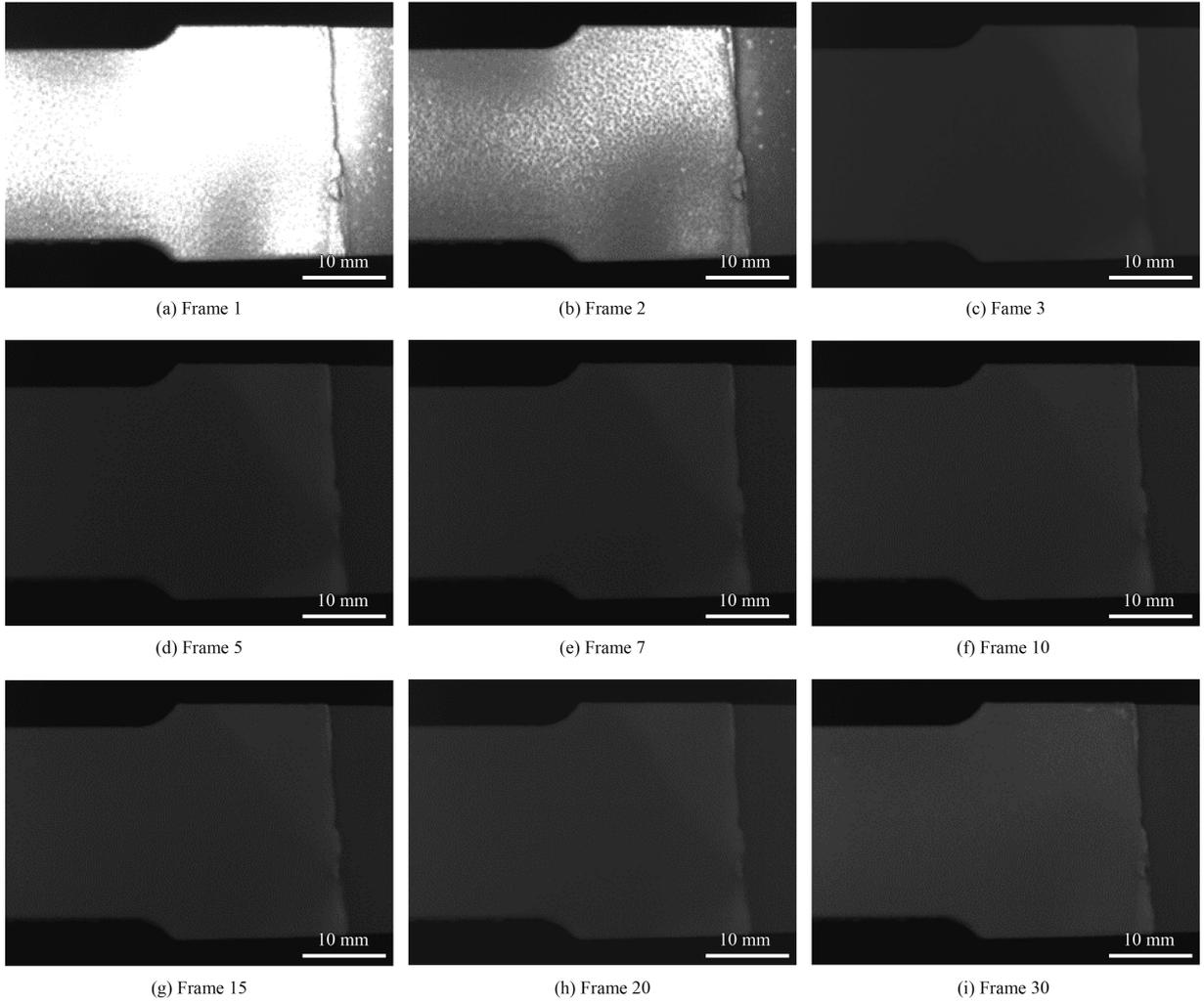


图4 试样表面部分原始热图

Fig.4 Part of the raw thermal images of the samples

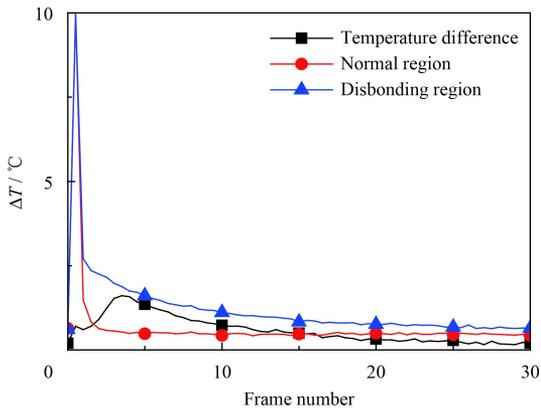


图5 缺陷区与非缺陷区两点的温度响应过程

Fig.5 Temperature evolution on defect and nondefect regions

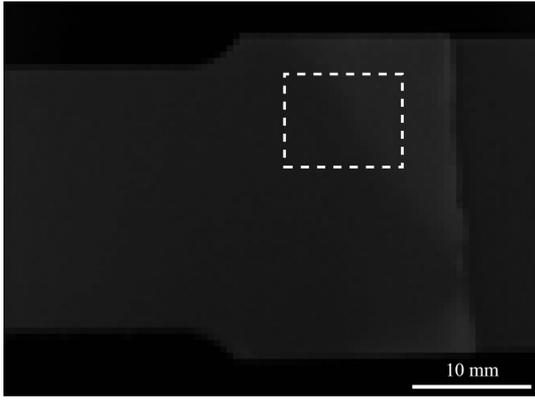
针对涂层界面脱粘缺陷识别, 热图处理的目的是提高缺陷区与非缺陷区的对比度, 同时去除红外热图中的噪声, 使缺陷区的异常热信号更加

清楚地展示在图像中。图像信噪比 SNR 是常用的评价热图质量的参数, 信噪比的计算方法为^[21]:

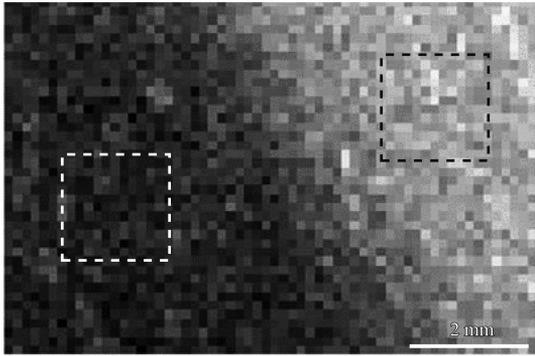
$$SNR = |T_d - T_{nd}| / \sigma_{nd} \quad (1)$$

式中, T_d 和 T_{nd} 分别是缺陷区和非缺陷区信号强度的平均值, σ_{nd} 是非缺陷区信号强度的标准差, 信号可以是图像中对应区域的温度值, 也可以是对应的图像灰度、亮度、饱和度等, 文中的信号是指温度或图像灰度。由公式可见, $|T_d - T_{nd}|$ 反映了界面脱粘区与正常区域之间的对比度, 而 σ_{nd} 反映了图像的整体噪声水平。因此, 信噪比是一个综合指标, SNR 越高, 表明图像整体质量越高。

为了使不同预处理和后处理算法具有可比性, 文中在计算 SNR 时, 所有热图均选取相同区域, 如图 6(a) 所示, 所选区域为缺陷边缘附近一



(a) Raw image



(b) Border region

图6 SNR计算取值区域

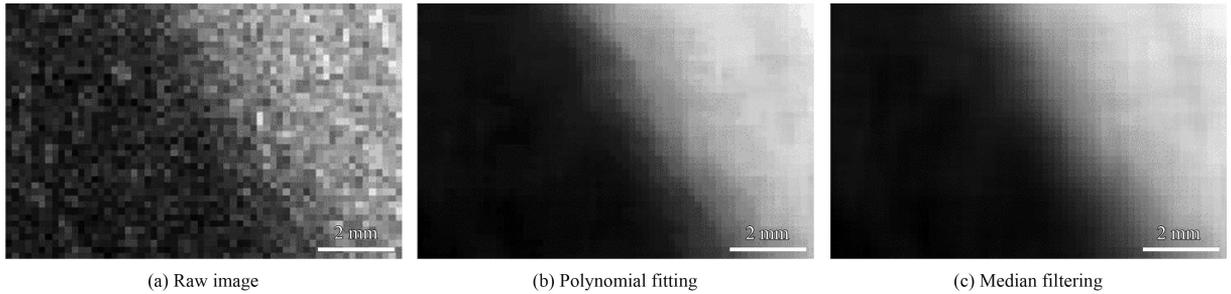
Fig.6 Sampling region for SNR calculation

个100像素×60像素的矩形区域,该区域包含了缺陷区和非缺陷区。在所选区域,左侧较暗的部分为非缺陷区,右侧较亮的部分为界面缺陷区,如图6(b)所示,在两个区域各选取15像素×15像素的区域,对区域内所有像素点的温度(或灰度)值求平均值,从而得到 T_d 和 T_{nd} 。

采用式(1)计算原始热图序列中缺陷区与非缺陷区温差最大的第4帧热图的信噪比为5.34,将其作为原始热图信噪比与处理后的热图进行对比。

3 热图序列预处理

对原始热图序列分别采用基于表面热信号的多项式拟合(PF)和基于单张图像的中值滤波(MF)进行预处理。图7展示了两种滤波算法预处理后对比度最高的第4帧图像缺陷边缘区域的热图,由图可见,两种滤波方式均使图像清晰度比原始热图大幅提高。采用式(1)计算信噪比,PF处理后热图信噪比为9.61, MF处理后为8.78。对比图7(b)(c),可见PF处理后热图中缺陷边缘区域对比更加明显。究其原因,PF虽然是对时域温度信号进行拟合处理,但进行时间域滤波的同时达到了空间域滤波的效果;而MF以单张



(a) Raw image

(b) Polynomial fitting

(c) Median filtering

图7 预处理前后缺陷边缘区域热图对比

Fig.7 Comparison of thermal images at defect border region before and after pretreatment

图像为处理单位,只进行了空间域的滤波。即:PF对原始热图序列的加工更加深入,而MF的加工程度较浅,热图序列中原始信息保留更多。

4 热图序列后处理

对于缺陷检测而言,在热图预处理的基础上,进一步提取缺陷的热信号特征并根据特征参数对表面热图进行重建更加关键,因为图像重建采用的特征参数往往直接与缺陷相关,基于特征参数的热图后处理也是缺陷定量表征的基础。

4.1 脉冲相位法(PPT)

PPT的基本思想是将热图序列中每个像素点的温度随时间变化的趋势(热波信号)通过傅里叶变换从时域变换到频域,在频域中提取热波的相位特征,并采用其相位特征重建表面热像图。

在傅里叶变换中,时域热波信号的采样率对其频域变换结果有较大影响,时域信号采样率越高,变换后其频域信号的分辨率越高,实际检测中红外热像仪的采样率太低,因此,目前大多研究在傅里叶变换之前采用多项式拟合或最小二乘

拟合对图像序列中每个像素点的热波信号进行拟合, 文中直接在多项式拟合 (PF) 预处理的基础上进行离散傅里叶变换 (Discrete fourier transtorm, DFT), 其原理为:

$$F(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} T(n) e^{-i2\pi n f/N} = R(f) + iI(f) \quad (2)$$

其中 N 是热波信号 $F(f)$ 的采样数, $R(f)$ 和 $I(f)$ 分别是热波信号 $F(f)$ 变换后的实部和虚部, 由实部和虚部进一步计算热波相位的公式为:

$$\phi(f) = \arctan[I(f)/R(f)] \quad (3)$$

图 8 为 PPT 法重建相位图 PF 与 PPT 均以单

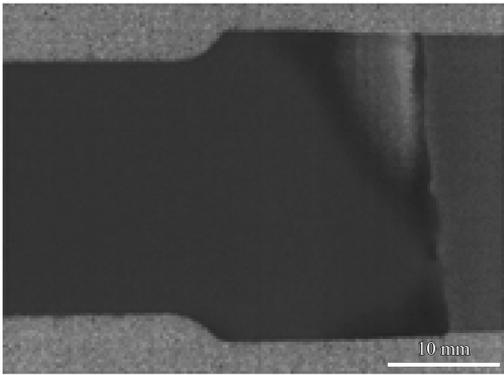


图 8 PPT 法重建相位图

Fig.8 Phase image reconstructed by PPT

个像素点的热波信号作为处理单元, 采用 PPT 法对 PF 预处理后的热图序列进行后处理, 并采用相位信息重建热图, 采用式 (1) 计算其信噪比为 15.30。

4.2 主成分分析法 (PCA)

PCA 基于数据降维的思想, 将热图序列作为一个三维矩阵, 进行降维之后转化为普通二维矩阵, 把时间 t 作为变量, 在 PCA 分析过程中, 根据特征矩阵计算每一主成分 (PC) 的贡献率, 根据相关系数矩阵对应的特征向量分析每一主成分反映的变量范围, 最后选取能够反映涂层界面脱粘区热图特征的主成分进行热图序列重构。

对均值滤波后的热图序列进行 PCA 处理, 前六主成分的重构热图如图 9 所示, 第七主成分之后的重构热图信噪比均低于原始热图, 因此本文未进行展示。对比可见, 第三主成分 (PC3) 重构热图中缺陷区与非缺陷区的对比最为明显。表 1 列出了前 6 个主成分的贡献率以及对应重建热图的信噪比, 由表可见, PC3 的贡献率仅为 0.38%, 其重建热图的信噪比达到 17.99。PC1 贡献率最高, 但重建图像与信噪比均不及 PC3。为了对其原因进行分析, 表 2 展示了每一主成分相关系数矩阵的特征向量中每帧热图对应的权重系数, 为了对比更加明显, 大于 0.2 的权重系数均为灰色

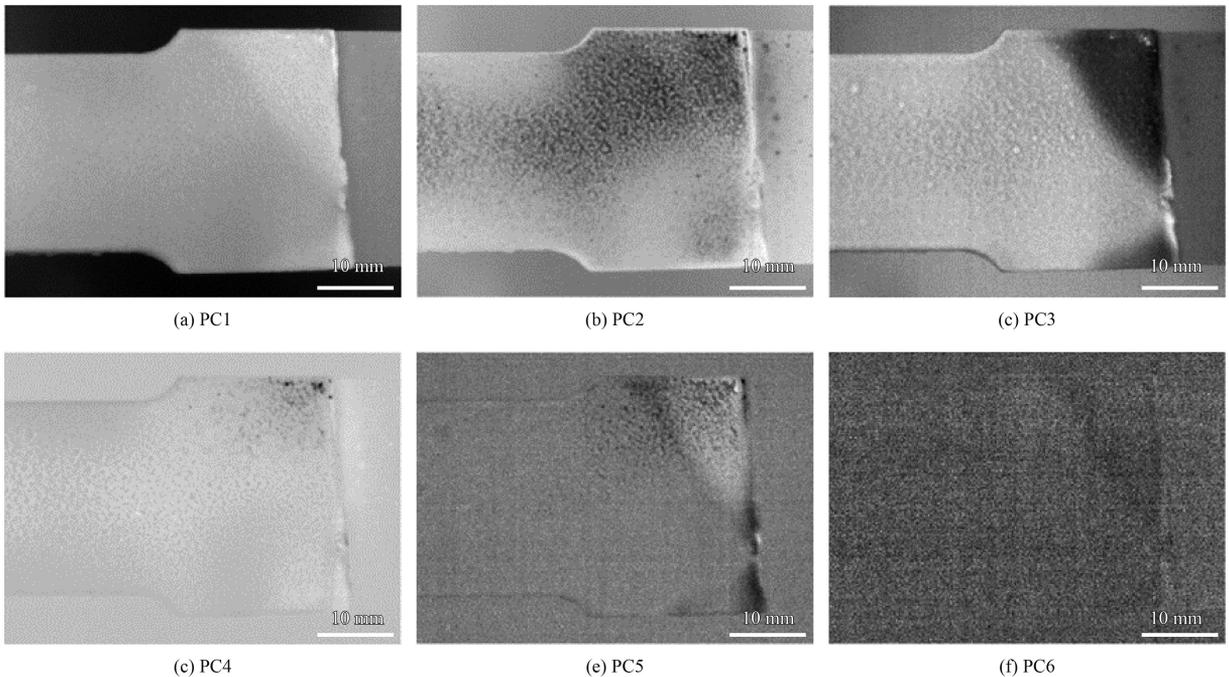


图 9 不同主成分重构热图

Fig.9 Thermal images reconstructed by different PCs

背景。由表可见, PC1 中所有帧的权重系数非常接近, 综合反映了热图序列的整体特征; PC2、PC4 和 PC5 中前两帧热图权重系数均较高, 而前两帧热图属于脉冲加热过程, 由图 4 可知, 加热过程中缺陷特征尚未显现, 同时表现出明显的非均匀加热特征, 因此, PC2、PC4 和 PC5 重建热图不能较好地反映缺陷特征; PC3 中第 5~11 帧以及第 26~30 帧的权重系数较高, 其中第 5~11 帧属于

降温初期, 而第 26~30 帧属于降温末期, 根据图 5, 降温初期缺陷区和非缺陷区温差最大, 热图中缺陷特征最为明显, 而降温末期缺陷特征逐渐减弱, 因此, PC3 重建热图避免了非均匀加热的影响, 也反映了降温初期的热图特征, 从而获得最好效果; PC6 主要反映了降温中后期的热图特征, 其缺陷区和非缺陷区的对比度较低。

需要指出的是, 在红外热图序列的处理中,

表 1 不同主成分的贡献率及重构热图的信噪比

Table 1 Contribution of different PCs and SNR of reconstructed images

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Contribution / %	97.035 8	2.449 5	0.379 9	0.045 4	0.008 3	0.005 2
SNR	12.38	2.93	17.99	2.60	5.77	2.35

表 2 不同时刻热图在各主成分中的权重系数分布

Table 2 Weight coefficients of raw images to different PCs

PCs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
PC1	0.16	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
PC2	0.55	0.52	0.40	0.28	0.16	0.08	0.02	0.01	-0.04	-0.05	-0.06	-0.07	-0.08	-0.08	-0.08	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	
PC3	-0.17	-0.17	-0.04	0.10	0.20	0.26	0.29	0.28	0.27	0.25	0.21	0.18	0.14	0.11	0.07	0.04	0.01	-0.02	-0.05	-0.07	-0.10	-0.12	-0.15	-0.16	-0.19	-0.20	-0.22	-0.24	-0.26	-0.28
PC4	0.74	-0.19	-0.34	-0.32	-0.23	-0.14	-0.05	0.01	0.06	0.09	0.10	0.11	0.11	0.10	0.09	0.07	0.07	0.06	0.05	0.04	0.01	0.01	-0.02	-0.02	-0.03	-0.05	-0.06	-0.07	-0.08	-0.10
PC5	-0.22	0.30	0.18	-0.02	-0.16	-0.24	-0.24	-0.20	-0.14	-0.07	0.00	0.07	0.13	0.18	0.21	0.23	0.24	0.23	0.20	0.18	0.15	0.10	0.05	0.00	-0.06	-0.11	-0.18	-0.22	-0.28	-0.29
PC6	0.06	-0.10	-0.05	0.03	0.07	0.09	0.09	0.07	0.01	-0.02	-0.04	-0.08	-0.14	-0.17	-0.14	-0.17	-0.19	-0.18	-0.04	0.14	0.31	0.34	0.42	0.32	0.18	0.08	-0.09	-0.16	-0.31	-0.32

主成分的贡献率并不作为主成分选择的主要依据, 需要根据主成分反映的时间变量信息, 选取代表缺陷区和非缺陷区对比度最大时间段的主成分进行热图重构。其目的是基于表面热图序列对界面脱粘区域的热波特征进行分离, 使重建热图能够更加清楚、准确地表征缺陷范围及大小。

4.3 讨论

表 3 展示了两种不同的处理思路下, 原始热图、预处理热图和重建热图的信噪比 (SNR)。由表可见, 虽然在预处理阶段基于表面热信号 (Signal based) 的处理方法 PF 获得了更高的信噪比, 但在后处理阶段, 基于单张图像 (Image based) 的 PCA 法取得了更好的效果。这是由于在预处理阶段, PF 方法对原始热图序列的滤波更加彻底, 而 MF 方法则保留了原始热图序列中更多的特征信息, 热图中的缺陷特征信息对于后处理至关重要; 后处理阶段, PCA 以时间作为变量, 在图像重建过程中主要反映了降温过程初期的热图特征, 因此 PCA 重建热图具有更高的信噪比。上述

表 3 原始热图 and 不同处理阶段热图的信噪比

Table 3 SNR of raw image and different treatment

Method	Raw	Pretreatment	Post-treatment
Signal based (PF+PPT)	5.34	9.61	15.30
Image based (MF+PCA)	5.34	8.78	17.99

分析说明, 基于单张图像的热图序列处理方法更加适用于再制造喷涂层的界面脱粘缺陷的检测和识别。

5 结论

针对再制造工程中喷涂层界面脱粘缺陷难以检测的问题, 采用脉冲红外热像技术对喷涂层界面脱粘缺陷进行检测研究, 在热图序列过程中, 将基于单张图像的处理方法 (MF+PCA) 应用于图像序列的预处理和后处理, 并将其与基于热信号的处理方法 (PF+PPT) 进行对比, 主要结论如下:

(1) 在热图序列预处理阶段, 基于表面热信号的滤波算法 PF 和基于单张图像的滤波算法 MF 均使原始热图的信噪比大幅提高。其中, PF 处理的

热图具有更高的信噪比。

(2) 在热图序列后处理阶段,采用 PCA 重建的表面热图比 PPT 法重建的表面热图具有更高的信噪比。分析结果表明,其主要原因在于热图重建时第三主成分(PC3)更好地反映了降温初期的热图特征,该阶段热图序列中的缺陷特征更加明显,受非均匀加热和横向热扩散的影响最小,因而使重建热图的信噪比大幅提高。

(3) 综合而言,基于单张图像(Image based)的处理方法更加适用于再制造喷涂层界面结合性能的评估。虽然在预处理阶段其信噪比略低,但由于在时间域上未进行滤波处理,对原始热图序列中的缺陷特征保留更多,更有利于后处理时缺陷边缘特征的提取。

研究结果对再制造喷涂层制备及服役过程中的界面结合性能评估具有指导意义和工程实用价值。下一步将继续通过热图处理算法对喷涂层界面脱粘缺陷的尺寸进行定量表征研究。

参考文献

- [1] PAWLOWSKI L. The science and engineering of thermal spray coatings: second edition[J]. John Wiley & Sons, 1994, 252(5): 401-407.
- [2] 田浩亮,王长亮,汤智慧,等.高速电弧喷涂 FeNiCrAl 涂层制备工艺对涂层性能影响[J].航空材料学报,2016,36(6): 40-47.
TIAN H L, WANG C L, TANG Z H, et al. Effect of high velocity arc spraying parameters on properties of FeNiCrAl coating[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(6): 40-47 (in Chinese).
- [3] 吕艳红,张启富,吴子健.超音速火焰喷涂 CoCrW 涂层热震过程中的裂纹扩展行为[J].中国表面工程,2015,28(6): 81-87.
LV Y H, ZHANG Q F, WU Z J, et al. Extended behavior of crack during thermal shock testing of HVOF sprayed CoCrW coating[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 81-87 (in Chinese).
- [4] 张伟,马志远,高剑英,等.考虑孔隙微观特征的热障涂层脱粘缺陷超声检测数值模拟[J].中国表面工程,2017,30(3): 115-121.
ZHANG W, MA Z Y, GAO J Y, et al. Ultrasonic testing numerical simulation of debonding defect in thermal barrier coatings considering void microscopic parameters[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 115-121 (in Chinese).
- [5] 韩赞东,李永杰,陈以方.陶瓷涂层结合质量的超声斜入射检测[J].清华大学学报(自然科学版),2017,57(5): 454-458.
- HAN Z D, LI Y J, CHEN Y F. Oblique-incidence ultrasonic testing for the adhesion quality of ceramic coatings[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2017, 57(5): 454-458 (in Chinese).
- [6] BENDADA A, SFARRA S, GENEST M, et al. How to reveal sub-surface defects in Kevlar® composite materials after an impact loading using infrared vision and optical NDT techniques[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 108: 195-208.
- [7] 何箐,吴鹏,汪瑞军,等.模拟服役环境下热障涂层损伤趋势的红外原位检测技术[J].中国表面工程,2013,26(4): 20-26.
HE J, WU P, WANG R J, et al. Infrared thermography in situ inspection for damage trend of TBCs in simulated service environment[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(4): 20-26 (in Chinese).
- [8] LÓPEZ F, IBARRA C C, NICOLAU V, et al. Pulsed thermography signal processing techniques based on the 1D solution of the heat equation applied to the inspection of laminated composites[J]. Materials Evaluation, 2014, 72(1): 91-102.
- [9] TANG Q, DAI J, LIU J, 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.
- [10] IBARRACASTANEDO C, TARPANI J R, MALDAGUE X P V. Nondestructive testing with thermography[J]. European Journal of Physics, 2013, 34(6): S91-S109.
- [11] 唐庆菊. SiC 涂层缺陷的脉冲红外热波无损检测关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
TANG Q J. Research on the key technology of SiC coating defects detection using pulsed infrared thermal wave non-destructive testing method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
- [12] VAVILOV V P, BURLEIGH D D. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing[J]. Ndt & E International, 2015, 73(1): 28-52.
- [13] 刘颖韬,郭广平,杨党纲,等.脉冲热像法在航空复合材料构件无损检测中的应用[J].航空材料学报,2012,32(1): 72-77.
LIU Y T, GUO G P, YANG D G, et al. Pulsed thermography of composite components used in aerospace applications[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(1): 72-77 (in Chinese).
- [14] 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.
- [15] QUEK S, ALMOND D P. Defect detection capability of

- pulsed transient thermography[J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2005, 47(4): 212-215.
- [16] 其达拉图, 郭兴旺. 基于多项式拟合的脉冲红外热像无损检测数据处理方法[J]. 机械工程师, 2009(2): 41-44.
QIDALATU, GUO X W. Data processing technique based on polynomial fitting in pulsed thermography[J]. Mechanical Engineer, 2009(2): 41-44 (in Chinese).
- [17] 陈林, 杨林, 范春利, 等. 基于相位的热障涂层厚度及其脱粘缺陷红外定量识别[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 2050-2056.
CHEN L, YANG L, FAN C L, et al. Quantitative identification of coating thickness and debonding defects of TBC by pulse phase technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 2050-2056 (in Chinese).
- [18] HOLLAND S D, RENSHAW J. Physics-based image enhancement for infrared thermography[J]. Ndt & E International, 2010, 43(5): 440-445.
- [19] BAI L, GAO B, TIAN S, et al. A comparative study of principal component analysis and independent component analysis in eddy current pulsed thermography data processing[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(10): 2213-2219.
- [20] TANG Q, DAI J, LIU J, 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.
- [21] BURGHOLZER P. Thermodynamic limits of spatial resolution in active thermography[J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(9): 2328-2341.

(责任编辑: 王文宇)

• 本刊讯 •

《中国表面工程》关于参考文献著录的要求

本刊参考文献符合国标 GB/T7714—2015, 采用顺序编码著录, 依照其在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字标出, 并将序号置于方括号内, 排列于文后。参考文献应尽量引用国内外正式公开发表的引文且各项信息齐全, 作者的英文名采用姓前名后格式, 姓用全称且全部字母大写, 名用缩写且保留首字母大写, 作者在3名以上只列前3名, 后加“等”; 题名后应标注文献标识类型; 期刊名称(包括英文期刊)采用全称; 著录期刊的年、卷、期信息应齐全。具体格式如下:

- ① 期刊: [序号]作者. 文名[J]. 刊名, 出版年, 卷(期): 起止页码.
- ② 论文集: [序号]作者. 题名[C]. 编者. 文集名, 出版地: 出版者, 出版年.
- ③ 学位论文: [序号]作者. 题名[D]. 保存地: 学位授予单位, 授予年份.
- ④ 专著: [序号]著者. 书名[M]. 版本. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码.
- ⑤ 报告: [序号]作者. 报告题名[R]. 出版地: 出版者, 出版年.
- ⑥ 标准: [序号]著者. 标准名: 标准顺序号-发布年[S]. 出版地: 出版者, 出版年, 起止页码.
- ⑦ 专利: [序号]专利所有者. 专利题名: 专利号[P]. 公告日期或公开日期.
- ⑧ 报纸: [序号]作者. 题名[N]. 报纸名, 出版日期(版次).
- ⑨ 电子文献: [序号]作者名. 题名[J/OL] ([EB/OL]或[DB/OL]). 发表或更新日期[引用日期]. 获取和访问路径.

另为适应国际数据库的要求, 从2014(6)期开始, 本刊要求原属中文的参考文献需同时标出其对应的英文格式。例如:

- [1] 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化[J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.
HE J W. Comments on nano-treatment of surface attrition via historical review[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 1-13 (in Chinese).

(本刊编辑部 供稿)