

# 喷涂层下基体疲劳裂纹的超声红外热成像检测

郭伟<sup>1</sup>, 董丽虹<sup>1a</sup>, 王海斗<sup>1a</sup>, 邢志国<sup>1a</sup>, 冯辅周<sup>1b</sup>, 高治峰<sup>2</sup>, 王博正<sup>3</sup>

(1.陆军装甲兵学院 a.装备再制造技术国防科技重点实验室 b.车辆工程系, 北京 100072; 2.西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048; 3.中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083)

**摘要:** **目的** 验证一种喷涂层下基体疲劳裂纹红外热成像识别方法。**方法** 综合采用理论分析、数值模拟和试验研究相结合的方法, 基于热波传导理论分析超声波激励下基体裂纹产生的热波与喷涂层裂纹产生的同频率热波, 在向涂层表面传播过程中发生的叠加干涉效应, 以及由此导致的表面热波相位偏移现象。采用数值模拟手段研究涂层裂纹热波与基体裂纹热波之间的叠加干涉规律, 开展喷涂层下基体疲劳裂纹的超声红外热成像检测试验验证该方法的有效性。**结果** 受到脉冲超声波激励后, 基体裂纹与涂层裂纹产生的热波向表面传导过程中会发生叠加干涉效应, 并导致涂层表面热波相位发生偏移, 低频热波相位偏移现象比高频热波更加明显。**结论** 采用涂层表面热波相位特征识别涂层下基体中的疲劳裂纹是一种可行且高效的方法。

**关键词:** 喷涂层; 基体疲劳裂纹; 超声红外热成像; 图像处理; 热波相位

**中图分类号:** TG174.442; TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)12-0369-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.045

## Inspection of Substrate Crack under Spray Coating by Ultrasonic Thermography

GUO Wei<sup>1</sup>, DONG Li-hong<sup>1a</sup>, WANG Hai-dou<sup>1a</sup>, XING Zhi-guo<sup>1a</sup>,  
FENG Fu-zhou<sup>1b</sup>, GAO Zhi-feng<sup>2</sup>, WANG Bo-zheng<sup>3</sup>

(1.a.Key Laboratory for National Defense Science and Technology on Equipment Remanufacturing,

b.Department of Vehicle Engineering, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;

2.School of Material Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3.School of Engineering and Technology, China University of Mining, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** The work aims to validate a method for fatigue crack identification in the substrate under spray coating. Based on the thermal wave conduction theory, theoretical analysis, numerical simulation and experimental methods were utilized to analyze the superimposed interference effect and the phase deviation of surface thermal wave caused by the thermal wave generated by the substrate crack and the thermal wave with the same frequency generated by the spray coating crack in the process of propagating to the coating surface. Numerical simulation was utilized to investigate the regular pattern of superimposed interference between heat waves emitted from coating crack and substrate crack, and ultrasonic infrared thermal

收稿日期: 2019-03-14; 修订日期: 2019-06-03

Received: 2019-03-14; Revised: 2019-06-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51675532, 51535011, 51875576)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51675532, 51535011, 51875576)

作者简介: 郭伟 (1988—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为红外热成像无损检测。

Biography: GUO Wei (1988—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: infrared thermography nondestructive testing.

通讯作者: 董丽虹 (1972—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为无损检测与寿命评估。邮箱: lihong.dong@126.com

Corresponding author: DONG Li-hong (1972—), Female, Doctor, Associate research fellow, Research focus: nondestructive examination and life assessment. E-mail: lihong.dong@126.com

imaging test was carried out to detect the fatigue cracks of the substrate under the spray coating to verify the effectiveness of the method. After being excited by pulsed ultrasonic wave, the thermal wave generated by the substrate crack and the coating crack had superposition interference effect in the process of conducting to the surface, caused the phase deviation of the thermal wave on the coating surface. The phase deviation of the low-frequency thermal wave was more obvious than that of the high-frequency thermal wave. It is a feasible and efficient method to identify the fatigue cracks in substrate under the spray coating by PD.

**KEY WORDS:** spray coating; fatigue crack defect; ultrasonic thermography; image processing; phase of thermal wave

热喷涂技术在再制造工程中应用十分广泛,表面喷涂层作为一种表面强化和改性手段,是对废旧机械零件进行尺寸恢复和性能提升的重要方法,大量再制造零件表面均带有喷涂层,如再制造发动机曲轴表面的Fe基耐磨涂层、海洋装备表面的Al基防腐涂层、航空发动机叶片表面的热障涂层等<sup>[1-3]</sup>。带有表面喷涂层的零件在服役过程中受到交变应力、热应力等服役载荷作用,其涂层和基体中均可能产生疲劳裂纹。喷涂层中的疲劳裂纹可能引起涂层局部功能失效,当裂纹扩展到界面会导致涂层结合失效或剥落<sup>[4]</sup>。而喷涂层下基体中产生的疲劳裂纹直接影响零件或结构的强度和刚度,当裂纹扩展到一定尺寸时,甚至会引起结构断裂酿成严重事故<sup>[5]</sup>。因此,再制造零件服役或检修过程中必须对涂层和基体中的裂纹缺陷进行检测评估,避免因裂纹扩展而导致零件失效。目前,对于喷涂层中的裂纹缺陷常采用目视检测、涡流检测等方法进行检测和识别<sup>[6]</sup>,而对于基体中的裂纹,由于受到喷涂层的遮挡,肉眼和机器视觉检测手段无法透过涂层直接识别,加之热喷涂涂层具有层片状多孔结构,限制了磁粉、渗透、超声检测等技术的应用,因此,尚无有效的无损检测手段能够对喷涂层下基体中的裂纹进行识别和评价。工程实际中大多首先去除表面涂层,后采用超声、渗透、涡流等检测技术对喷涂层下基体缺陷进行检测<sup>[7-8]</sup>,喷涂层的去除一般采用热处理和机械去除方式,如喷砂、车削等<sup>[9]</sup>。去除喷涂层后进行基体检测的方法存在诸多不足,如效率低、成本高、能耗大,当零件缺陷率较低时,其低效率高能耗的缺点更加突出。因此,开发一种能够透过喷涂层对基体裂纹缺陷进行识别评价的无损检测技术,对再制造工程而言具有重要意义。

超声红外热成像检测技术是一种近年来快速发展的裂纹无损检测方法<sup>[10]</sup>,其基本原理如图1所示,首先,将低频、高能量超声波导入待测零件,使零件内部产生机械振动,当零件中存在闭合裂纹时,相互接触的裂纹面之间由于振动不同步相互摩擦并产生热量,从而导致裂纹位置表面温度升高,热辐射增强。利用红外热像仪捕捉零件表面温度分布图(下文简称表面热图),通过识别超声激励时热图中的异常温度信号识别裂纹所在位置及尺寸。目前已经有大量研究成果表明超声红外热成像检测技术对金属零件表面

的微小裂纹具有良好的检测效果,如:Guo和Vavilov等人<sup>[11]</sup>采用超声激励红外热成像技术检测燃气轮机转子叶片中的疲劳裂纹,并对比了超声波激励、闪光灯激励和激光激励三种不同的主动热激励方法,结果证明,超声激励方法能够使裂纹在热图中产生更加明显的异常热信号。Ruhge等人<sup>[12]</sup>对比了超声热成像技术和渗透检测两种方法对燃气轮机叶片疲劳裂纹检测的效果,结果表明,超声热像方法更加有效。冯辅周等<sup>[13]</sup>系统地研究了超声波频率、振幅、入射角度等参数对金属板中闭合裂纹缺陷生热规律的影响。

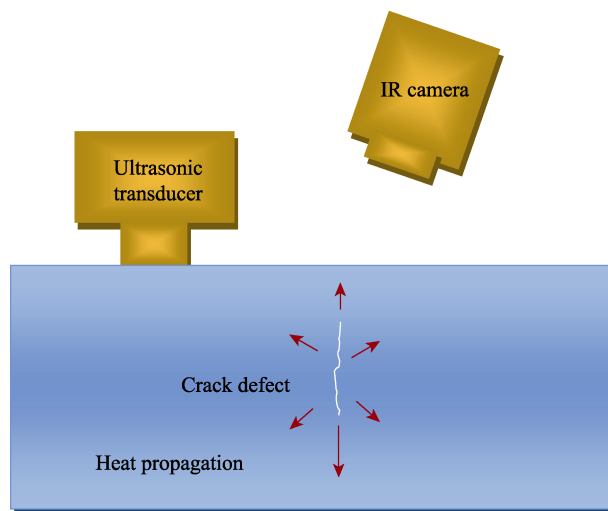


图1 超声红外热成像检测裂纹缺陷的原理  
Fig.1 Sketch of crack detected by ultrasonic thermography

在超声波激励下,材料中裂纹面闭合区域由于相互摩擦生热,在热传导理论中可以作为内部热源<sup>[14]</sup>。已有研究表明,热源的深度与表面热波的频率、相位等特征参数具有对应关系<sup>[15]</sup>。采用热波频率判断缺陷深度的方法称为盲频率法<sup>[16-17]</sup>,但该方法要求热像仪具有较高的采样率。俞嘉捷<sup>[18]</sup>针对采用FFT进行积分变换时存在的热像仪采样频率不能满足盲频率测量精度要求的问题,提出了一种相位阈值提取方法,代替盲频率进行热源深度表征。然而,目前采用热波相位进行缺陷深度表征的研究尚较少,未能建立表面热波相位与缺陷深度的定量对应关系。

本文针对喷涂层下基体疲劳裂纹识别与检测难题,以热量传导的波动理论为基础,分析了不同深度

热源产生热波在向表面传播过程中发生的干涉作用, 以及由热波干涉引起的表面热波相位偏移 (Phase deviation, 下文简称 PD) 原理。采用数值模拟方法探究了金属基体中裂纹缺陷引起的热波相位偏移规律及特征, 在此基础上, 利用表面热波相位偏移特征对涂层下基体裂纹进行识别, 在带有表面喷涂层的试样中制备了涂层裂纹和基体裂纹, 采用试验手段验证了理论分析和数值模拟结果的有效性, 证明了采用超声红外热成像技术检测喷涂层下基体裂纹的可行性。

## 1 理论分析

在超声波激励下, 由于裂纹面之间的摩擦生热作用, 材料中的闭合裂纹或表面开口裂纹的闭合部位会产生热量, 并从裂纹生热部位向周围传导, 此时, 裂纹生热部位本质上是材料内部的热源。因此, 超声波激励下裂纹缺陷红外热像检测在传热学中是一个典型的包含内热源的瞬态热传导问题。

根据热传导的波动理论, 材料中的裂纹缺陷在受到超声波激励后, 会发出各种频率的热波, 将裂纹内热源分解称为多个点热源时, 不同点热源发出的同频率热波在传导过程中会发生叠加干涉。如图 2 所示, 假设各向同性材料中深度不同的两个点热源  $P_1$  和  $P_2$ , 与材料表面的距离分别为  $d_1$  和  $d_2$ 。

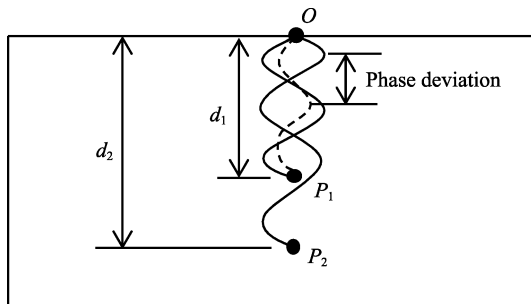


图 2 不同深度的点热源热波干涉示意图

Fig.2 Coherent superposition sketch of thermal waves emitted from pot-like heat sources in different depth

频率为  $f$  的热波分量分别从两个点热源向外传导, 假设该热波分量的形式为简谐波, 且热源位置初相位为 0, 两个点热源产生的频率为  $f$  的热波分量在热源正上方表面  $O$  点处的表达式分别为:

$$T_1 = A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} d_1\right) \quad (1)$$

$$T_2 = A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} d_2\right) \quad (2)$$

其中,  $\omega$  为该热波分量的角频率,  $\omega=2\pi f$ ;  $\lambda$  为热波的波长。

根据波的干涉原理, 两个点热源发出的同频率热波在向表面传导过程中会发生叠加干涉, 并在  $O$  点形成一个混合热波, 其表达式为:

$$T = T_1 + T_2 = A \left[ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} d_1\right) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} d_2\right) \right] \quad (3)$$

根据三角函数的和差化积公式, 式 (3) 整理为:

$$T = 2A \cos\left(\frac{\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)\right) \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\lambda}(d_1 + d_2)\right) \quad (4)$$

式中:  $\cos(\pi/\lambda)(d_2 - d_1)$  为与时间无关的常数, 因此混合热波  $T$  仍然是一个角频率为  $\omega$  的周期波。

上述分析表明, 当材料中仅存在点热源  $P_1$  时, 表面  $O$  点热波为  $T_1$ ; 当  $P_1$  下方同时存在点热源  $P_2$  时, 两个热源产生的同频率热波发生干涉, 在表面  $O$  点形成一个混合热波  $T$ 。与  $T_1$  相比, 混合热波  $T$  的幅值和相位均会发生变化, 在此仅考虑混合热波  $T$  与热波  $T_1$  之间的相位差  $\Delta\varphi$ , 即:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_1 = -\frac{\pi}{\lambda}(d_1 + d_2) + \frac{\pi}{\lambda}d_1 = -\frac{\pi}{\lambda}d_2 \quad (5)$$

由式 (5) 可见, 混合热波  $T$  与热波  $T_1$  之间的相位差  $\Delta\varphi$  的大小仅与热波波长  $\lambda$  及点热源  $P_2$  的深度  $d_2$  有关。进一步, 根据热波波长  $\lambda$ 、热波传导速度  $v$ 、热波频率  $f$  三者之间的关系:  $\lambda=v/f$ , 速度  $v$  仅与材料种类有关, 当材料和热波频率  $f$  一定, 其波长即为定值, 此时,  $\Delta\varphi$  的大小仅与  $d_2$  有关。

上述分析可以理解为, 点热源  $P_2$  的出现导致表面  $O$  点的混合热波相位发生了偏移, 相位偏移 (Phase deviation, 下文简称 PD) 量可由混合热波  $T$  与热波  $T_1$  之间的相位差求得, 即:

$$PD = \Delta\varphi = -\frac{\pi}{\lambda}d_2 \quad (6)$$

在热波波长  $\lambda$  为定值的前提下, PD 的大小仅与  $d_2$  有关, 以仅存在点热源  $P_1$  时的表面  $O$  点的热波  $T_1$  作为参考信号, 通过热源表面混合热波的 PD 特征判断点热源  $P_2$  的存在。对于该类问题, 可采用格林函数法求解。格林函数法首先将内热源分解为多个点热源, 求解一个点热源的导热问题, 然后采用积分的方法将点热源沿整个生热区域进行积分, 从而获得任意形状和体积的内热源传热结果。

首先分析单一均质材料中与表面垂直的线热源的热波表达式, 如图 3 所示, 线热源  $l$  从表面  $O$  点延伸到内部的  $P$  点,  $P$  点深度为  $d$ 。

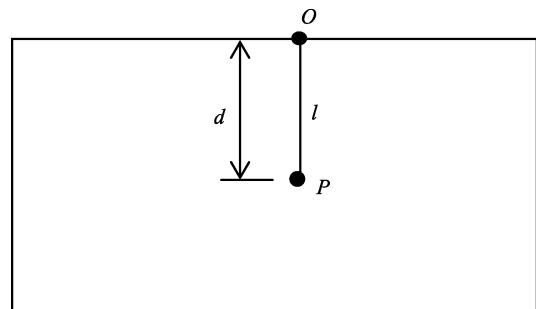


图 3 线热源示意图

Fig.3 Sketch of a line heat source

点热源  $P$  产生的频率为  $f$  的热波分量在表面  $O$  点的表达式为:

$$T = A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \quad (7)$$

根据格林函数的思想, 由线热源  $l$  产生的频率为  $f$  的热波分量在表面  $O$  点的表达式可以由点热源  $P$  沿  $l$  积分的方式得到, 其表达式为:

$$T = \int_d^0 A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) dx \quad (8)$$

采用复合函数积分法求解, 设:

$$h = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (9)$$

带入式 (8), 则有:

$$T = -\frac{A\lambda}{2\pi} \int_{\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} d}^{\omega t} \cos(h) dh \quad (10)$$

整理可得:

$$T = -\frac{A\lambda}{2\pi} \left[ \sin(\omega t) - \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \right] + C \left|_{\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} d}^{\omega t} \right. \quad (11)$$

根据三角函数和差化积公式, 进一步变换可得:

$$T = \frac{A\lambda}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\lambda} d\right) + C \quad (12)$$

式 (12) 中,  $C$  为常数, 当  $d$  为定值时, 即对于深度一定的垂直裂纹, 正弦函数项  $\sin(2\pi d/\lambda)$  为定值, 因此, 本质上为一余弦函数, 线热源在表面  $O$  点同样为简谐波, 其波动幅度和相位均与先热源的深度  $d$  和波长  $\lambda$  有关。进一步, 根据热波波长  $\lambda$ 、热波传导速度  $v$ 、热波频率  $f$  三者之间的关系:  $\lambda = v/f$ , 速度  $v$  仅与材料种类有关, 当材料和热波频率  $f$  一定, 其波长即为定值。综上, 如果材料的热物性确定, 表面  $O$  点热波的相位仅与裂纹深度  $d$  有关。

进一步, 假设存在两个深度不同的线热源  $l_1$  和  $l_2$ , 如图 4,  $l_1$  从  $O_1$  点延伸到  $P_1$  点, 深度为  $d_1$ ,  $l_2$  从  $O_2$  点延伸到  $P_2$  点, 根据格林函数思想, 由线热源  $l_1$  和  $l_2$  产生的频率为  $f$  的热波分量在表面  $O_1$  点和  $O_2$  点的表达式, 可以由点热源  $P_1$  和  $P_2$  沿  $l_1$  和  $l_2$  积分的方式得到, 推导过程不再重复。此处仅给出结果:

$$T_1 = \frac{A\lambda}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi d_1}{\lambda}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\lambda} d_1\right) + C \quad (13)$$

$$T_2 = \frac{A\lambda}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi d_2}{\lambda}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\lambda} d_2\right) + C \quad (14)$$

热波  $T_2$  相对于热波  $T_1$  的相位偏移  $PD$ , 即两者之间的表面热波相位差为:

$$PD = \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{\pi}{\lambda} d_2 + \frac{\pi}{\lambda} d_1 \quad (15)$$

若将热源  $l_1$  作为已知深度的参考热源 (即  $d_1$  为定值), 由式 (15) 可见, 线热源  $l_2$  的表面热波相对于参考热源发生了偏移, 相位偏移量  $PD$  与热波的波长  $\lambda$  及裂纹深度  $d_2$  有关。热波的波长与热波传导速度

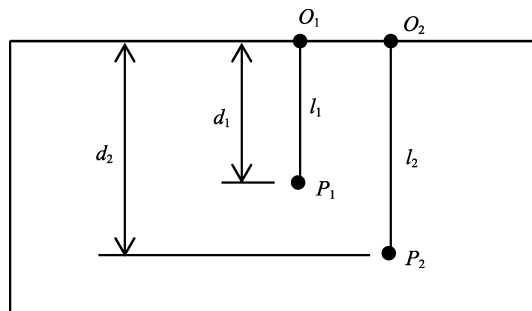


图 4 不同深度的线热源示意图

Fig.4 Sketch of line heat sources in different depth

$v$  和热波频率  $f$  有关,  $v$  由材料种类决定, 当材料和热波频率  $f$  一定, 其波长即为定值。此时, 相位偏移量  $PD$  仅与裂纹深度  $d_2$  有关。需要指出的是, 上述理论分析过程的前提是两个热源处在垂直于表面的同一直线上, 对于线热源角度与表面不垂直的情况, 该结果需进行修正。

## 2 数值模拟

### 2.1 涂层和基体裂纹的生热模型及边界条件

将第 1 节中的理论分析结果推广到涂层和基体垂直裂纹, 若将贯穿涂层的垂直裂纹作为参考裂纹, 则当涂层下基体开裂时, 会导致裂纹表面热波相位发生偏移, 相位偏移  $PD$  可以作为判断涂层下基体裂纹的特征参数, 同时, 根据式 (12), 相位偏移量与基体裂纹深度之间存在对应关系。

喷涂层和基体中的垂直裂纹缺陷受到超声波激励时, 由于其闭合区域是沿裂纹尖端分布的带状区域, 当材料厚度较小时, 裂纹的生热区域可近似为一条直线。在实际计算中, 为了降低计算的复杂程度, 也往往将材料中与表面垂直的裂纹生热区域简化为直线热源, 如 Stephen D. Holland 将裂纹热源分解为多条平行的线热源试图对裂纹生热强度进行量化<sup>[19]</sup>。本文将超声波激励下材料中裂纹缺陷的生热区域简化为沿裂纹尖端的一条线段 (即一个线热源), 并将该线热源分解为无数个点热源, 通过积分方式计算线热源的瞬态热传导过程, 获得线热源引起的材料表面温度变化过程。

将垂直裂纹的生热区域简化为一条直线后, 首先, 建立了包含喷涂层和基体的三维结构模型, 并在模型中预置了两个不同的垂直裂纹, 如图 5 所示, 裂纹 A 只存在于涂层中, 而裂纹 B 存在于涂层和基体中, 两个裂纹的尖端区域即其生热区域, 如图 5 中虚线所示。模型中涂层厚度为 0.3 mm, 基体厚度为 3 mm。涂层的导热系数、密度和比热分别为 1.5 W/(m·K)、6037 kg/m<sup>3</sup>、500 J/(kg·K), 基体的导热系数、密度和比热分别为 9.5 W/(m·K)、8300 kg/m<sup>3</sup>、440 J/(kg·K)。采用 ANSYS 软件中的发热速率 (heat

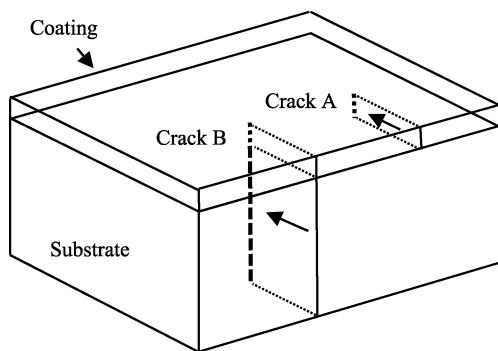


图 5 涂层裂纹和基体裂纹数值模拟模型

Fig.5 FEM model for cracks in coating and substrate (crack A: only in coating; crack B: both in coating and substrate)

generation rate) 对裂纹的生热区域进行加载, 模拟超声波激励下裂纹的生热, 生热载荷  $H_{\text{gen}}=6.5 \times 10^5 \text{ J/s}$ , 加载时间为 1 s。在模拟过程中, 涂层表面与基体底面设置对流边界条件, 对流系数  $h=10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ , 模型的四个侧面设置为绝热边界条件。

## 2.2 基体裂纹与涂层表面热波相位偏移 (PD) 特征

经过 1 s 激励, 裂纹 A 和裂纹 B 表面的温度变化趋势如图 6 所示, 可见由于基体裂纹的存在, 裂纹 B 在超声波激励下温度升高速度和稳定温度均高于裂纹 A。然而, 在实际检测过程中, 缺陷表面的温度受多种因素影响, 可靠性和可重复性都较低, 无法作为判断涂层下基体裂纹的依据。

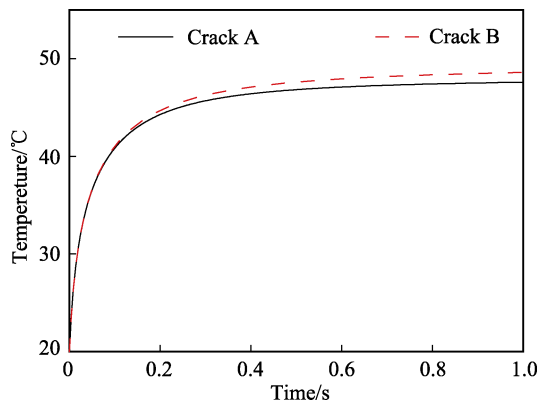


图 6 加载过程中裂纹 A 和裂纹 B 的表面温度变化趋势  
Fig.6 Surface temperature evolution of crack A and crack B during superposition

图 7 展示了采用离散傅里叶变换 (DFT) 对裂纹 A 和裂纹 B 温度变化趋势进行处理得到的两个裂纹的相位谱曲线。由图 7 可见, 裂纹 B 的相位曲线相对于裂纹 A 发生了明显的偏移, 两者相减, 得到不同频率下混合热波的相位偏移值, 如图 7 中纵坐标负半轴曲线所示, PD 值在低频区域比高频区域更加明显, 这一差异是由热波的特征扩散长度不同引起的。根据热波理论, 不同频率的热波在材料中可以扩散的长度不同, 其特征扩散长度与材料导热系数和热波频率

有关, 可以表示为:  $\mu = \sqrt{\alpha / (\pi f)}$ 。由此可见, 热波频率越低, 则其在材料中可以扩散的长度越长。以  $\alpha=0.9 \text{ m}^2/\text{s}$  计算, 3Cr13 喷涂层中频率为 1 Hz 和 30 Hz 热波的特征扩散长度分别为 1.34 m 和 0.245 m; 以  $\alpha=1.37 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  计算, 不锈钢基体中频率为 1 Hz 和 30 Hz 热波的特征扩散长度分别为  $5.23 \times 10^{-3} \text{ m}$  和  $9.56 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。因此, 基体裂纹受到超声波激励后产生的低频热波更容易扩散到达涂层表面, 而导致低频部分的热波相位偏移相对高频部分更加明显。

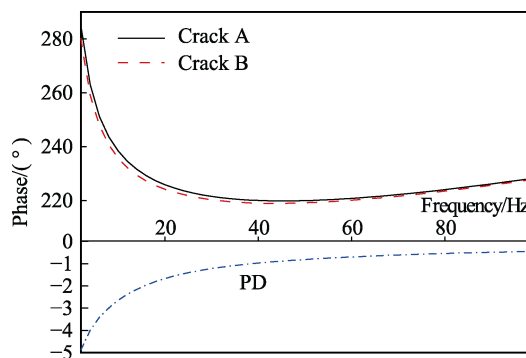


图 7 涂层裂纹和基体裂纹热波相位特征及 PD 值  
Fig.7 Phase spectrum and the PD graph of coating and substrate cracks

## 3 基于相位偏移 (PD) 特征的涂层下基体裂纹识别试验

为了验证上述理论分析和数值模拟结果, 检验表面热波相位偏移特征与基体中垂直裂纹缺陷的对应关系。采用试验手段在喷涂层/基体结构中制备了两种裂纹缺陷, 一种仅存在于喷涂层中, 另一种同时存在于涂层和基体中。从热像仪采集的原始热图序列中提取了超声激励下两种裂纹缺陷的表面热波变化曲线, 通过傅里叶变换得到其各自的相位曲线, 分析了涂层下基体裂纹的存在对涂层表面热波相位特征的影响, 及其热波相位偏移规律。

首先, 采用拉-拉疲劳载荷  $F$  在厚度为 3 mm 且带有中心缺口的不锈钢板材上预制了裂纹缺陷, 标记为裂纹 2, 如图 8 所示, 裂纹沿试样中心缺口向试样内部扩展, 裂纹面与板材表面垂直; 其次, 在板材其中一个表面喷涂 YSZ 热障涂层, 涂层厚度为 300~400  $\mu\text{m}$ 。之后, 对喷涂后的试样进行二次拉伸, 加载方式同样为拉-拉疲劳载荷, 其值略小于制备基体裂纹时的载荷  $F$ , 此时, 基体中心位置的裂纹 2 表面的涂层会在拉伸载荷作用下沿基体裂纹的走向开裂, 最终, 裂纹 2 成为同时存在于涂层和基体中的垂直裂纹缺陷。另外, 由于喷涂层的内聚结合强度低于基体板材的拉伸断裂强度, 在拉伸载荷作用下, 其他位置的喷涂层也会从边缘萌生裂纹 (图 8 中裂纹 1), 并向

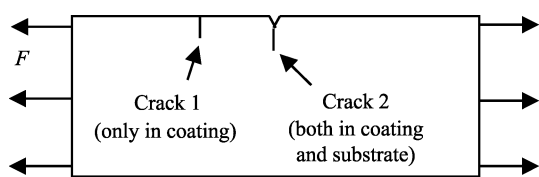


图8 拉伸疲劳裂纹产生示意图  
Fig.8 Sketch of tensile fatigue crack generation

内部扩展，该裂纹的萌生和扩展仅发生在喷涂层中，最终成为仅存在于涂层中的垂直裂纹缺陷。裂纹1和裂纹2在扫描电镜（SEM）下的横截面微观形貌如图9a、c所示，可见裂纹1仅存在于涂层中，而裂纹2同时存在于涂层和基体中。

采用低频脉冲超声波对上述含有两种裂纹缺陷的试样进行激励，超声枪从涂层表面远离裂纹1和裂纹2的某一位置将超声振动能量导入试样，具体激励参数为：预紧压力80 N，振动频率20 kHz，激励时间1 s。激励过程中使用NEC R300D型红外热像仪采集试样表面热图，采集频率为60 Hz，在激励过程中，试样中的裂纹缺陷由于摩擦作用会生热。图9b展示了热像仪采集的最后一帧热图，即脉冲激励结束时刻的原始热图，图中裂纹1和裂纹2表面均出现明显的高温信号。

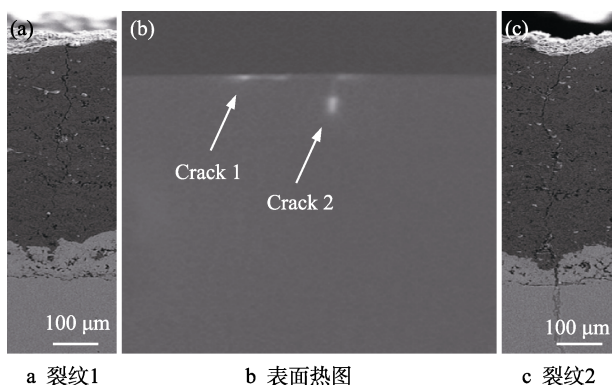


图9 超声激励过程中试样表面热图及两个裂纹的SEM截面形貌

Fig.9 IR image on coating surface and the SEM pattern of two cracks during ultrasonic excitation: (a) a raw IR image of coating surface at 1s, (b) intersecting pattern of crack 1, (c) intersecting pattern of crack 2

从热像仪采集的原始热图序列中提取裂纹1和裂纹2的表面温度在超声激励过程中的变化趋势，即原始热波信号，结果如图10所示。由图10可见，脉冲超声激励过程中，两个裂纹所在位置的表面温度迅速升高，其变化规律与数值模拟结果相似，裂纹2表面的升温速率和温度均高于裂纹1，两者的区别在于裂纹2同时存在于涂层和基体中，而裂纹1仅存在于涂层中，这表明基体中的垂直裂纹导致裂纹2在超声波激励下产生的热量速率更大。另外，热像仪的采集频率较低，仅为60 Hz，根据香农采样定理，后期通过傅里叶变换计算表面热波的相位曲线时，其频率分

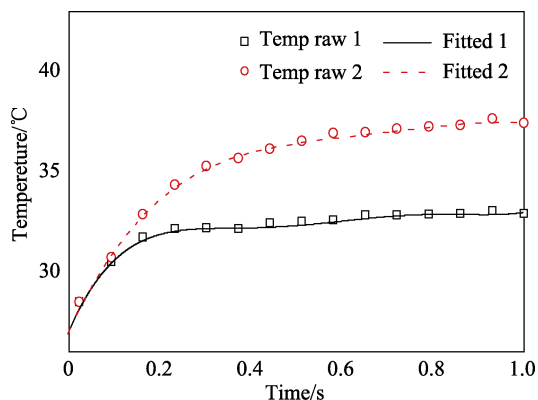


图10 裂纹1和裂纹2表面温度变化趋势及多项式拟合结果  
Fig.10 Surface temperature variation and polynomial fit results of crack 1 and crack 2

辨率不大于30 Hz。为了提高热波相位曲线的频率分辨率，对两个裂纹表面的原始热波信号进行了4次多项式拟合，拟合结果同样展示在图10中。由图10可见，拟合曲线与原始温度变化曲线吻合较好，完整反映了超声激励过程中裂纹表面的温度变化趋势。

对图10中的两条拟合热波曲线进行离散傅里叶变换，获得裂纹1和裂纹2的表面热波相位频谱曲线，如图11所示，图中第四象限的曲线是裂纹2的相位曲线与裂纹1的相位曲线相减的结果，即裂纹2相对裂纹1的相位偏移（PD）曲线，可见两个裂纹的相位曲线，以及裂纹2的相位偏移特征与数值模拟结果完全一致。

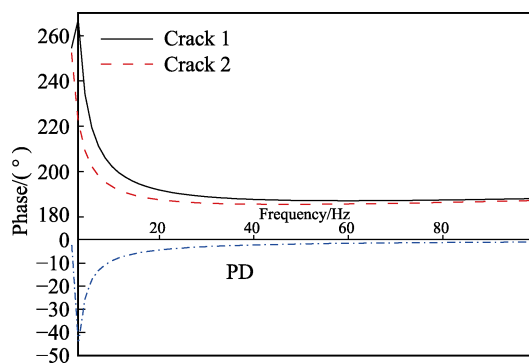


图11 裂纹1和裂纹2的相位曲线以及PD结果  
Fig.11 Phase spectrums and the PD graph of crack 1 and crack 2

## 4 结论

本文针对涂层下基体中裂纹缺陷的识别表征问题，首先，基于波的相干干涉原理，采用理论分析方法研究了单一均质材料中不同深度点热源之间的热波干涉规律，以及表面干涉热波的相位偏移特点。在此基础上，基于格林函数思想采用点热源积分的方法研究了垂直线热源扩展深度与表面热波相位偏移量之间的关系。其次，采用数值模拟手段研究了喷涂层和基体中的垂直裂纹之间的热波干涉效应，探究了基体中的裂纹缺陷对表面热波相位的影响规律，提出了

一种采用热波相位特征对涂层下基体裂纹进行识别的方法。最后,采用试验手段验证了理论分析和数值模拟结果,证明了通过表面热波相位偏移特征对涂层下基体裂纹进行识别和表征的可行性。需要指出的是,本文理论分析和数值模拟过程中均假设涂层裂纹与基体裂纹处于垂直于表面的同一直线上,而在实际检测条件下,真实裂纹很难与表面严格垂直。此外,基体中裂纹扩展深度与表面热波相位偏移量之间存在的定量映射关系有待深入探究,两者之间的映射关系是对基体中裂纹扩展深度进行定量表征的基础。

### 参考文献:

- [1] 徐滨士. 舰船装备再制造防腐技术及应用[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 405-413.  
XU Bin-shi. Research and application of anti-corrosion remanufacture on ship equipment[J]. Materials China, 2014, 33(7): 405-413.
- [2] 田浩亮, 魏世丞, 陈永雄, 等. 高速电弧喷涂再制造曲轴 FeAlCr/3Cr13 复合涂层的性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(3): 727-732.  
TIAN Hao-liang, WEI Shi-chen, CHEN Yong-xiong, et al. Properties of the FeAlCr/3Cr13 composite coating applied in remanufacturing crankshaft by high velocity arc spraying[J]. Rare metal materials and engineering, 2014, 43(3): 727-732.
- [3] PADTURE N P. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science, 2002, 296: 280-284.
- [4] 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.  
LYV Yan-hong, ZHANG Qi-fu, WU Zi-jian, et al. Extended behavior of crack during thermal shock testing of HVOF sprayed CoCrW coating[J]. China surface engineering, 2015, 28(6): 81-87.
- [5] PAWLOWSKI L. The science and engineering of thermal spray coatings: Second edition[J]. John wiley & sons, 1994, 252(5): 401-407.
- [6] LIU M B, LI B B, LI J T, et al. Smart coating sensor applied in crack detection for aircraft[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 330: 383-388.
- [7] 李振, 陈国明, 谷悦, 等. 基于电容成像检测技术的带防腐层金属结构缺陷检测[J]. 装备环境工程, 2018, 15(8): 1-9.  
LI Zhen, CHEN Guo-ming, GU Yue, et al. Defect detection of metal structure with anticorrosive coating based on capacitive imaging technology[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(8): 1-9.
- [8] CAMERINIC, REBELLO J M, BRAGA L, et al. In-line inspection tool with eddy current instrumentation for fatigue crack detection[J]. Sensors, 2018, 18(7).
- [9] SEE T L, CHANTZIS D, ROYER R, et al. Ultraviolet-diode pump solid state laser removal of titanium aluminiumnitride coating from tungsten carbide substrate[J]. Lasers in manufacturing & materials processing, 2017, 4(3): 1-15.
- [10] 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.
- [11] GUO X, VAVILOV V. Crack detection in aluminum parts by using ultrasound-excited infrared thermography[J]. Infrared physics & technology, 2013, 61(6): 149-156.
- [12] GUO Y, RUHGE F R. Comparison of detection capability for acoustic thermography, visual inspection and fluorescent penetrant inspection on gas turbine components[J]. Mathematical models, 2009, 1096(1): 1848-1854.
- [13] 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.
- [14] 贾庸, 张瑞民, 张炜, 等. 超声热成像对含曲率 TC4 结构表面裂纹的检测仿真[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 313-319.  
JIA Yong, ZHANG Rui-min, ZHANG Wei, et al. Simulation of surface crack detection of TC4 curvature structure by ultrasonic infrared thermography[J]. Surface technology, 2018, 47(10): 313-319.
- [15] MARTIN M R, SUSANA LAGUELA S, AGUILERA D G, et al. Prediction of depth model for cracks in steel using infrared thermography[J]. Infrared physics & technology, 2015, 71: 492-500.
- [16] HERNANDEZVALLE S, PETERS K. Numerical simulation of phase images and depth reconstruction in pulsed phase thermography[J]. Measurement science & technology, 2015, 26(11): 115602.
- [17] BAI W, WONG B S. Evaluation of defects in composite plates under convective environments using lock-in thermography[J]. Measurement science & technology, 2001, 12(12): 142.
- [18] 俞嘉捷, 伍耐明, 曾智, 等. 基于红外脉冲相位热成像技术的玻璃钢深度测量[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1894-1896.  
YU Jia-jie, WU Nai-ming, ZENG Zhi, et al. FRP depth measurement based on pulsed phase thermography[J]. Infrared and laser engineering, 2012, 41(7): 1894-1896.
- [19] VADDI J S, HOLLAND S D. Identification of heat source distribution in vibrothermography[J]. AIP conference proceedings, 2014, 1581(1): 1639-1643.