文章编号：1001-4888(2025)05-0591-08

涂层厚度检测的锁相红外方法研究*

刘昌虎[1]，周军[2]，朱建国[1]，卓立军[1]

（1.江苏大学 土木工程与力学学院，江苏镇江 212013；2.航天材料及工艺研究所，北京 100076）

摘要： 天线罩的有机涂层厚度直接关系到雷达对目标的定位精度和追踪能力等功能。锁相红外无损检测技术具有非接触、大面积检测等优势，可以对涂层厚度进行检测和评估。本文通过理论分析和仿真模拟，研究了不同频率热激励下涂层厚度与相位的函数关系，分析了加载频率对厚度检测的影响；通过制备环氧涂层和陶瓷基体试件，开展了不同厚度涂层的锁相红外实验研究，并获取了涂层厚度标定曲线。结果表明，厚度测量平均误差在 5% 以内，具有较好的工程应用价值。

关键词： 无损检测；锁相红外；涂层结构；厚度检测

中图分类号： TN219　　**文献标志码：** A　　DOI：10.7520/1001-4888-24-083

0 引言

天线罩能够保护雷达免受外界环境损害，并保障雷达信号的传输和接收。为了防止紫外线辐射、湿气和温度变化等干扰因素，雷达罩表面会涂覆一层有机涂层，如有机硅、聚丙烯酸酯树脂和聚氨酯等。在涂层涂覆过程中，涂层厚度的均匀性至关重要，否则会严重影响雷达对目标的定位精度和追踪能力，因此，对雷达天线罩涂层厚度进行无损检测与评估具有重要的工程意义。涂层无损测量技术主要有涡流检测、超声检测和红外检测。涡流检测基于电磁感应原理，将探头或传感器放置在涂层表面，通过检测涡流变化进行涂层厚度测量。涡流检测速度快，无需耦合剂，适合应用于导电金属材料[1-2]。超声检测使用超声波测量涂层厚度，通过将换能器耦合在涂层表面上，记录超声波在涂层中的反射时间来进行厚度测量。超声波法适合测量较厚的材料，需要在试件表面涂抹耦合剂[3-4]；红外检测具备非接触、非破坏性、检测面积大等优势，通过外激励使热源在涂层内热传导，利用红外相机记录涂层表面的温度变化，并以此评估涂层的厚度[5]。

用于厚度检测的红外热成像方法主要有时间特征值法、脉冲相位法和锁相法等。时间特征值法通常以长、短脉冲作为热激励源，对涂层表面温度衰减曲线进行一阶或二阶导数求解，通过导数极值点获取特征时间来评估涂层厚度。LI 等[6]开展短脉冲红外热成像法研究，建立了涂层表面温度曲线的极值点与涂层厚度之间的线性关系。HUANG 等[7]开展长脉冲红外热成像法研究，提出的基于二阶导数特征时间的涂层厚度测量方法，能够有效测量热障涂层厚度。CHEN 等[8]用扫描激光热成像方法来评估薄涂层的厚度，并通过控制扫描线速度提高检测精度。由于温度曲线导数的峰值时间与涂层厚度成线性关系，因此时间特征法标定过程简单。为了获得更高的检测精度，需要使用较高采样频率的热像仪，否则求导计算会引入较大的测试误差。脉冲相位法以脉冲信号作为热激励源，基于连续多幅红外热图提取温度序列中的相位来计算涂层厚度。SHRESTHA 等[9-10]通过对脉冲热激励下涂层表面温度数

* 收稿日期：2024-05-16；修回日期：2024-05-29
基金项目：国家自然科学基金项目(12202162)；江苏省自然科学基金项目(BK20210740)
通信作者：朱建国(1973—)，男，教授，博士生导师。主要从事固体实验力学研究。Email：zhujg@ujs.edu.cn

据进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT)处理,建立了相位角与涂层厚度的关系。UNNIKRISHNAKURUP等[11]研究了基于脉冲红外热成像方法的涂层厚度检测技术,并与太赫兹检测结果进行了对比验证。MUZIKA等[12]对脉冲相位法和幂函数法进行了比较,结果表明,脉冲相位法对薄涂层脉冲的检测灵敏度更高。脉冲相位法可以针对一次脉冲实验获得多个频率下的相位值,检测效率高,但要求使用较高采样频率的红外热像仪。锁相红外方法以锁相信号为激励源,根据特定激励频率计算不同涂层厚度的相位差,通过建立涂层厚度与相位差之间的关系进行厚度检测。张金玉等[13]利用有限元法对施加有正弦规律变化热流密度的涂层试件进行分析,并采用数据拟合求相位的方法对涂层厚度进行了检测。江海军等[14]理论分析了涂层厚度与相位的关系,并讨论了锁相频率、反射系数对涂层厚度检测的影响。李波等[15-16]采用锁相红外热波检测技术对电力设备防护涂层进行实验,验证了该技术测量涂层厚度的有效性。杨羿等[17]对锁相红外涂层厚度检测参数进行优化,分析了不同锁相频率下涂层厚度与相位的关系。与时间特征法和脉冲相位法相比,锁相红外热成像方法可以使用较低采样频率的热像仪,抗噪性更强。为了实现几百微米厚度涂层的检测,锁相红外热成像方法还存在诸如激励频率选择、非线性标定等难点,需要进一步开展研究。

本文研究了对涂层厚度进行高精度检测的锁相红外热成像方法。首先,理论分析锁相红外热成像技术中涂层厚度检测原理,利用有限元仿真得到不同加载频率下涂层厚度与相位的关系,进而分析了不同涂层厚度检测时激励频率的选择方法。接着,开展锁相红外热成像实验,建立涂层厚度与相位之间的标定曲线,并实现了对非均匀表面的涂层厚度检测。

1 测试方法研究

锁相热成像中涂层表面的外部周期激励可以表示为

$$q(t) = q_0[1-\cos(2\pi ft)] \tag{1}$$

式中:$q(t)$为瞬时热流密度;q_0 为热源产生的初始瞬时热流密度;f 为热源的激励加载频率。

检测过程中,激励能量被涂层吸收并转化为热能,在涂层内部形成局部热流场,该热流场在涂层内部周期性地变化并传播。涂层的厚度 d 发生变化时,由于热波传播的距离不同,导致温度变化的相位也随之变化。当采用锁相热成像检测涂层厚度时,涂层表面温度 t 的表达式为[14]

$$t(d,f) = \frac{t_0}{4k\sigma}\frac{(1+R)(1+R\cdot e^{-2\sigma l})}{1-R^2\cdot e^{-2\sigma l}} \tag{2}$$

式中:t_0 为一个常数;R 为涂层厚度与基底之间的反射系数,$R=(e_1-e_2)/(e_1+e_2)$,$e_i=\sqrt{\rho_i c_i k_i}$($i=1$,2)为材料蓄热系数,下标1为涂层,下标2为基体;k 为涂层材料的传热系数;ρ 为涂层的密度;c 为涂层的比热容;σ 为与热扩散长度相关的复数波数。从而建立相位与涂层厚度的计算表达式:

$$\varphi = \arctan\frac{\mathrm{Im}\ t(d,f)}{\mathrm{Re}\ t(d,f)} \tag{3}$$

式中:φ 为试件表面的激励热波与反射热波的相位角差值。由于式(3)中相位没有简单的解析解,因此本文通过有限元法建模分析。

以环氧树脂涂层和氧化铝陶瓷基体为研究对象,其热力学参数见表1。仿真模型选取二维模型,基底的尺寸为300 mm(长度)×5 mm(高度)。涂层的厚度从0.010 mm增加到0.400 mm,在0.010~0.200 mm的涂层厚度内,以0.010 mm的梯度递增;在0.200~0.400 mm的涂层厚度内,以0.050 mm的梯度递增。根据工程工况选择了1组加载频率,分别为0.01、0.05、0.10、0.50 Hz。锁相激励的热流密度为$50[1-\cos(2\pi ft)]$,周期数设置为3,加载时间根据激励频率确定。通过Abaqus仿真软件,获取不同加载频率下涂层表面的温度曲线,使用MATLAB软件中FFT方法获取不同加载频率下涂层表面温度曲线的相位值,如图1所示。

仿真结果表明,整体上涂层的厚度与红外相位无正或负相关;当涂层厚度为0.5倍热扩散长度到2倍热扩散长度时,涂层厚度变化与相位变化呈负相关,此时激励热波能够更好地穿透涂层并反射,由此可以通过相位值求解厚度大小,如图2所示。热扩散长度表示为 $L=\sqrt{k/\pi\rho cf}$。由图1可看出,涂层厚

度在(0.5～2)L 内，当加载频率增大时，可检测的涂层厚度减小，高频率激励适用于较薄涂层厚度检测；当加载频率降低时，可检测的涂层厚度增大，低频率激励适用于较厚涂层厚度检测。

表 1　环氧树脂涂层和氧化铝陶瓷基体的热物理属性

Tab. 1　Thermophysical properties of epoxy coating and alumina ceramic substrate

结构类型	$k/(\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}})$	$\rho/(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$	$c/(\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}})$
涂层	0.20	1 200	1 000
基体	20.00	3 800	750

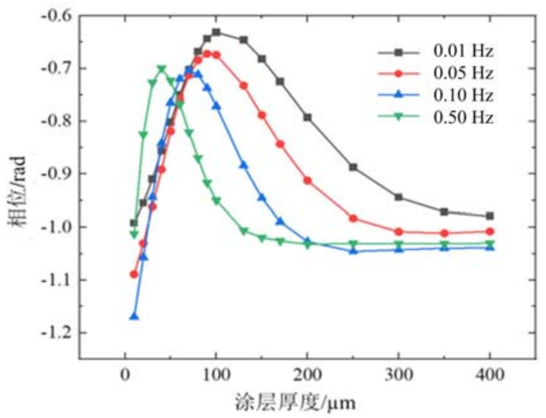

图 1　不同加载频率下涂层厚度与相位的关系

Fig. 1　Relationship between coating thickness and phase angle using different loading frequency

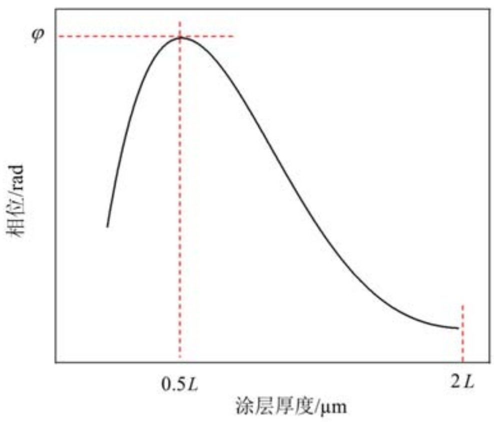

图 2　涂层厚度与红外相位的典型曲线

Fig. 2　Typical relationship between coating thickness and phase angle

2　试件制备与实验研究

2.1　试件制备

为了验证锁相红外无损检测技术对涂层厚度检测方法的有效性，制备了环氧树脂涂层和氧化铝陶瓷基材构成的双层试件，如图 3 所示。氧化铝陶瓷板尺寸为 20 mm×20 mm，厚度为 2 mm。环氧树脂涂层通过空气喷涂技术涂覆于氧化铝基材表面，并在 100 ℃的环境中固化 2 h，以确保涂层的均匀性和附着力[18−19]。为了调整表面发射率，在涂层表面喷涂了黑色颜料，用千分尺控制颜料厚度在 0.010 mm 以内。涂层试件的厚度经千分尺测量分别为0.325、0.416、0.465、0.535 mm。

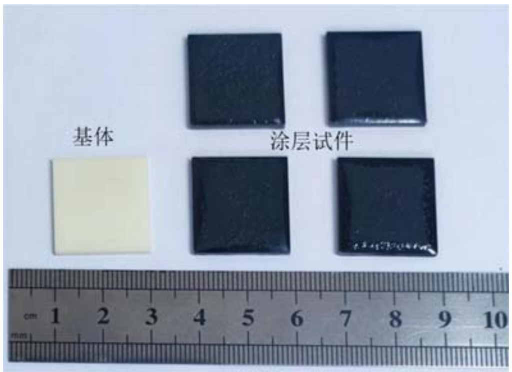

图 3　基体和涂层试件图

Fig. 3　Image of substrate and coating samples

制备了具有非均匀厚度的涂层和基体试件，以验证锁相红外检测方法。制备过程中同样先使用喷涂法在基体上涂覆一层大约 0.500 mm 厚的涂层，然后通过机械研磨的方法对涂层进行局部处理，制造出非均匀表面的涂层。

锁相红外无损检测测试平台包括红外热像仪、激光器及计算机，如图 4 所示。热像仪记录的图像分辨率为 720 ppi，采样频率最高 30 Hz，温差分辨率最高 30 mK。激光器包括一个光纤耦合连续二极管激光器(最高功率 50 W，波长 808 nm)和数据采集卡。数据采集卡通过控制电流能够稳定地输出激发信号，实现激光波形的控制，并保证激光激发和热图像记录同步。用红外热像仪记录试件表面的温度变

化过程,并存储为一系列热图像序列。

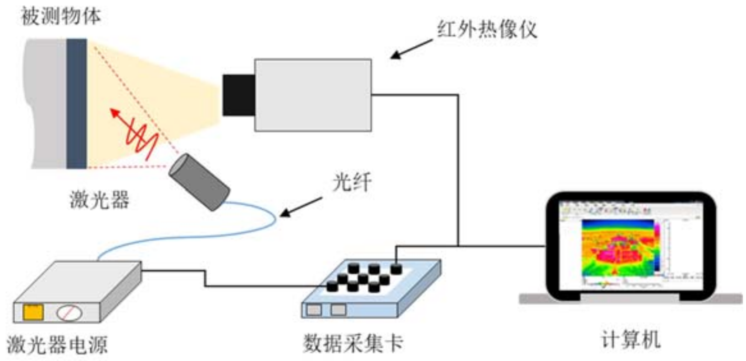

图 4 激光激励锁相红外热成像测试平台示意图

Fig. 4 Schematic testing platform of laser excited lock-in infrared thermography

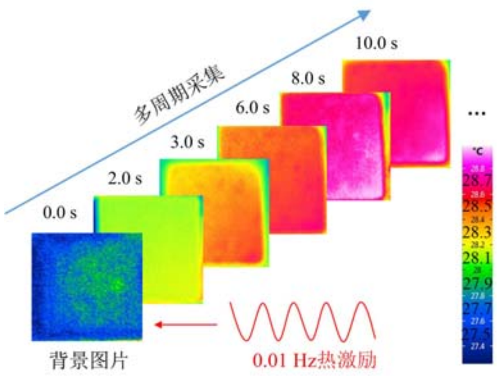

图 5 涂层表面热图像

(激励频率 0.01 Hz,涂层厚度 0.325 mm

Fig. 5 Thermal image of the coating surface

(excitation frequency 0.01 Hz,

coating thickness 0.325 mm)

2.2 标定实验

将频率为 0.01 Hz 的周期性热激励作用于试件表面,实验中记录了若干红外图像,这些红外图像序列包含了空间坐标和时间的信息,如图 5 所示。选取试样中心 20×20 个像素点,计算该区域的温度平均值及温度差值,并据此绘制出温度差值随时间变化的曲线,如图 6(a)所示。根据式(1),涂层表面温度是由交流分量(T_{AC})和直流分量(T_{DC})叠加而成,即分别由周期性激励和恒定激励产生的温度变化。对涂层表面温度数据进行线性拟合,得到直流分量曲线,如图 6(b)所示。从实际温度数据中减去直流分量,可得到近似为余弦函数的交流分量曲线,如图 6(c)所示。通过对交流分量进行 FFT 分析可得到振幅与相位。对不同加载频率下的交流分量数据进行 FFT 处理,并提取其加载频率对应的相位,建立相同加载频率下涂层厚度与相位的关系,如图 6(d)所示。不同加载频率下的热扩散长度值计算结果见表 2。

表 2 不同加载频率下的热扩散长度值

Tab. 2 Values of thermal diffusivity length at different frequencies

加载频率/Hz	0.01	0.05	0.10	0.50
$0.5L/\mu m$	204.12	91.29	64.55	28.87
$2L/\mu m$	816.50	365.14	258.20	115.47

从图 6(d)中可以看出,在对 200～450 μm 厚度涂层的检测中,激励频率的选择至关重要。以 0.50 Hz 的激励频率为例,由表 2 可以看出,其有效检测厚度范围为 28.87～115.47 μm,因此,图 6(d)中显示的相位在 300～500 μm 厚度内几乎无改变;0.05 Hz 的激励频率的有效检测厚度为91.29～365.14 μm,图 6(d)中显示,在厚度小于 400 μm 时,相位随厚度发生一致性改变,而在厚度大于 400 μm 时,相位随厚度变化不明显;对 0.01 Hz 的激励频率,在厚度为 300～500 μm 时,涂层厚度变化均会引起相位较为明显的一致性变化。

为了获取锁相红外涂层厚度检测的标定曲线,采用三阶多项式函数对 0.01 Hz 热激励数据进行拟合,得到关系式

$$d=-5.729\times10^{-9}\cdot\varphi^{3}+1.198\times10^{-5}\cdot\varphi^{2}-7.800\times10^{-3}\cdot\varphi+0.955 \tag{4}$$

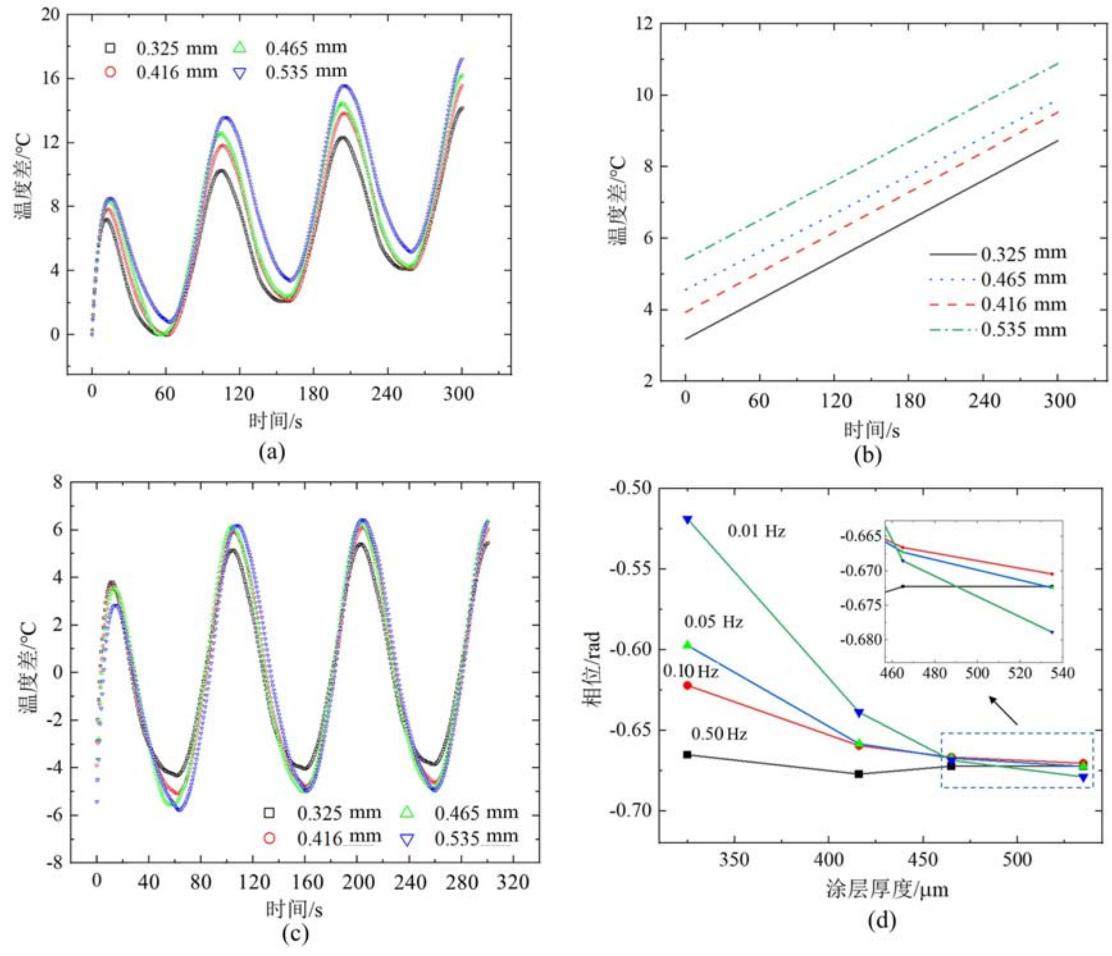

图 6　锁相红外实验结果：(a)0.01 Hz 热激励原始数据；(b)0.01 Hz 热激励拟合后的直流分量；(c)0.01 Hz 热激励交流分量；(d)不同加载频率下涂层厚度与相位的关系

Fig. 6　Results of locked infrared experiment: (a) raw data of 0.01 Hz thermal excitation; (b) direct current component after fitting of 0.01 Hz thermal excitation; (c) alternating current component of 0.01 Hz thermal excitation; (d) relationship between coating thickness and phase using different loading frequency

式中：d 为涂层厚度；φ 为锁相红外检测相位差。

锁相红外标定曲线拟合结果如图 7 所示，整体拟合度 $R^2=0.996$，拟合效果较好。

2.3　非均匀表面涂层厚度检测

为了验证标定曲线的准确性，进一步对不均匀厚度的涂层和基体试件进行实验，同样采用 0.01 Hz 热激励，选取待测涂层 5 个区域，根据热图像序列获取其相位信息，并利用式(4)给出的标定关系计算厚度。各测量区域用锁相红外方法与卡尺测厚的比较结果见表 3。由锁相红外法得到的测量值平均相对误差在 5%以内，最大相对误差为 6.15%。

表 3　用锁相红外方法与卡尺测量的不均匀涂层厚度的误差比较

Tab. 3　Comparison between lock-in infrared method and caliper thickness measurement

测量区域	1	2	3	4	5
锁相测量/mm	0.412	0.401	0.224	0.263	0.253
卡尺测量/mm	0.439	0.423	0.233	0.276	0.261
相对误差/%	6.15	5.20	3.86	4.71	3.07

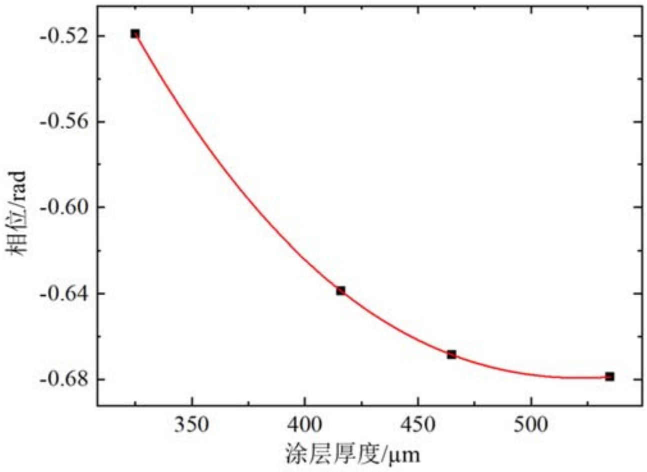

图 7 相位和涂层厚度之间的关系(激励频率 0.01 Hz)

Fig. 7 Relationship between phase and coating thickness (excitation frequency 0.01 Hz)

2.4 讨论

对涂层厚度的测量灵敏度,第 1 个影响因素是热激励频率。锁相红外检测方法中,需要根据涂层的厚度范围选择特定的热激励频率,涂层较薄时,采用高频率激励效果较好,当涂层较厚时,采用低频率激励效果较好。改变激励频率可以改变 L 的大小,检测时应使(0.5～2)L 覆盖待检测涂层厚度。对于较薄的涂层,通过改变激励频率使(0.5～2)L 覆盖待检测涂层厚度,可以提高涂层厚度检测的灵敏度。第 2 个影响因素是涂层厚度与基底之间的反射系数 R,根据式(2)可知,涂层表面的温度受反射系数 R 影响,当涂层是绝热介质,基底是良好热传导介质时,R 值接近－1,热波反射信号微弱;当 R 为 0 时,几乎没有热波反射,因此,锁相方法不适合 R 值接近 0 和－1 的双层材料。此外,锁相红外方法获取的相位只与材料的物理特性相关,不受热激励强度分布、试件表面的吸收率及辐射率等参数影响,因此,与特征时间法和脉冲相位法相比,具有更强的抗干扰性。

3 结论

本文利用制备的变厚度环氧树脂涂层和氧化铝陶瓷试件开展锁相红外检测实验。基于 FFT 获得的相位数据,分析了激励频率与涂层厚度的相位响应关系,建立了涂层厚度标定模型,得出以下结论:

1)在一定的激励频率范围内,涂层厚度与锁相红外热图相位存在定量关系,该定量关系可用于涂层厚度检测。

2)在涂层厚度检测时,锁相红外激励频率越高,检测的涂层厚度越小,高频率的锁相红外成像适用于较薄涂层厚度检测;通过改变激励频率可以改变 L 的大小,检测时应使(0.5～2)L 覆盖待检测涂层厚度。

3)锁相红外测量方法可以实现非均匀表面涂层厚度检测,平均相对误差在 5%以内,表明用于厚度检测的锁相红外成像方法具有较好的工程应用价值。

参考文献:

[1] ZHANG D J, YU Y T, LAI C, et al. Thickness measurement of multi-layer conductive coatings using multifrequency eddy current techniques[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2016, 31(3):191-208.

[2] 金泽宇, 范高廷, 刘飞. 涡流类技术在承压设备带涂层表面检测中的应用分析[J]. 山东化工, 2023, 52(17): 177-180 (JIN Zeyu, FAN Gaoting, LIU Fei. Application analysis of eddy current technology in the surface detection of pressure equipment with coating[J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(17): 177-180 (in

Chinese))

[3] LEMLIKCHI S, MARTINSSON J, HAMRIT A, et al. Ultrasonic characterization of thermally sprayed coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28(3):391-404.

[4] 刘红伟，吴旭辉，黄子扬，等. 利用超声无损检测导波法检测陶瓷涂层的厚度[J]. 陶瓷学报，2021，42(3):480-484 (LIU Hongwei, WU Xuhui, HUANG Ziyang, et al. Thickness measurement of ceramic coating using ultrasonic nondestructive test guided wave[J]. Journal of Ceramics, 2021, 42(3):480-484 (in Chinese))

[5] DOSHVARPASSAND S, WU C Z, WANG X Y. An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 96:366-389.

[6] LI Y J, XIAO J F, ZHU L C, et al. Research on detection of thickness of thermal barrier coating by laser transmission infrared thermal wave method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7):704003.

[7] HUANG Z, ZHU J G, ZHUO L J, et al. Non-destructive evaluation of uneven coating thickness based on active long pulse thermography[J]. NDT & E International, 2022, 130:102672.

[8] CHEN F, ZHANG K, JIANG H J, et al. Thickness evaluations for thin coatings using laser scanning thermography[J]. NDT & E International, 2023, 137:102817.

[9] SHRESTHA R, KIM W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography—Part I: Simulation[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 83:124-131.

[10] SHRESTHA R, KIM W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography — Part II: Experimental investigation [J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 92:24-29.

[11] UNNIKRISHNAKURUP S, DASH J, RAY S, et al. Nondestructive evaluation of thermal barrier coating thickness degradation using pulsed IR thermography and THz-TDS measurements: A comparative study[J]. NDT & E International, 2020, 116:102367.

[12] MUZIKA L, ŠVANTNER M, HOUDKOVÁ Š, et al. Application of flash-pulse thermography methods for quantitative thickness inspection of coatings made by different thermal spraying technologies[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 406:126748.

[13] 张金玉，孟祥兵，杨正伟，等. 红外锁相法涂层测厚数值模拟与分析[J]. 红外与激光工程，2015，44(1):6-11 (ZHANG Jinyu, MENG Xiangbing, YANG Zhengwei, et al. Numerical simulation and analysis of lock-in thermography for thickness measurement of coating[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1):6-11 (in Chinese))

[14] 江海军，陈力. 锁相热波成像技术对涂层厚度的测量[J]. 无损检测，2017，39(4):38-41，48 (JIANG Haijun, CHEN Li. Lock-in thermal wave imaging for measurement of coating thickness[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(4):38-41, 48(in Chinese))

[15] 李波，陈俊卫，刘卓毅，等. 锁相红外检测技术对耐候涂层厚度的评估[J]. 红外技术，2022，44(3):303-309 (LI Bo, CHEN Junwei, LIU Zhuoyi, et al. Thickness evaluation of weather resistant coatings based on lock-in thermography[J]. Infrared Technology, 2022, 44(3):303-309 (in Chinese))

[16] 李波，陈俊卫，刘卓毅，等. 基于锁相红外热成像技术的电力设备防护涂层质量检测[J]. 无损检测，2023，45(8):73-78 (LI Bo, CHEN Junwei, LIU Zhuoyi, et al. Quality detection of protective coating for power equipment based on lock-in infrared thermography[J]. Nondestructive Testing, 2023, 45(8):73-78 (in Chinese))

[17] 杨羿，刘朵，张建东. 基于红外热成像的涂层厚度检测及均匀性评价[J]. 无损检测，2024，46(1):23-27 (YANG Yi, LIU Duo, ZHANG Jiandong. Coating thickness detection and uniformity evaluation based on infrared thermography[J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(1):23-27 (in Chinese))

[18] ZHANG H Y, LI X, QIAN W J, et al. Characterization of mechanical properties of epoxy/nanohybrid composites by nanoindentation[J]. Nanotechnology Reviews, 2020, 9(1):28-40.

[19] CHEN B B, JIA Y H, ZHANG M J, et al. Tribological properties of epoxy lubricating composite coatings reinforced with core-shell structure of CNF/MoS_2 hybrid [J]. Composites Part A: Applied Science and

Manufacturing, 2019, 122:85-95.

Research on evaluation of coating thickness by lock-in infrared thermography

LIU Changhu[1], ZHOU Jun[2], ZHU Jianguo[1], ZHUO Lijun[1]

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 2. Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The thickness of the organic coating on the radome is directly related to the radar target positioning accuracy and tracking capabilities. Lock-in infrared non-destructive testing technology has the advantages of non-contact measurement and a large detection area, which can be used to detect and evaluate the thickness of the coating. This paper theoretically and numerically investigated the functional relationship between the thickness of the coating and the phase under thermal excitation at different frequencies, and analyzed the influence of loading frequency on thickness detection. Epoxy-coated/ceramic substrate samples were prepared, lock-in infrared experiments were conducted on coatings of different thicknesses, and a calibration curve was established. The results show that the average error of thickness measurement is within 5%, which has good practical value for engineering applications.

Keywords: non-destructive testing; lock-in infrared; coating structure; thickness measurement