

引用格式: 刘颖韬, 赵洪美, 杨万新, 等. 热障涂层厚度太赫兹时域光谱测量影响因素分析[J]. 航空材料学报, 2025, 45(6): 60-67.

LIU Yingtao, ZHAO Hongmei, YANG Wanxin, et al. Analysis of factors influencing terahertz time-domain spectroscopy measurements of thermal barrier coating thickness[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(6): 60-67.

热障涂层厚度太赫兹时域光谱测量影响因素分析

刘颖韬^{1,2,3*}, 赵洪美⁴, 杨万新^{1,2,3}, 朱迪^{1,2,3}, 杨明诚⁴,
郭广平^{1,2,3}, 郑旭⁴

(1. 中国航发北京航空材料研究院 检测研究中心, 北京 100095; 2. 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室, 北京 100095; 3. 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095; 4. 深圳市太赫兹科技创新研究院有限公司, 广东 深圳 518102)

摘要: 为了研究将热障涂层太赫兹时域光谱测厚方法用于自动仿形检测的可行性, 掌握入射角、提离距离、涂层折射率和涂层基体曲率等因素对测厚结果的影响规律, 开展理论分析和基于多种试块的实验研究。结果表明: 测量入射角在 -3° ~ $+3^{\circ}$ 范围内变化时与入射角为 0° 的测厚结果之间相对偏差在0.5%以内。提离距离在 -1.5 ~ $+1.5$ mm范围内变化时与焦距位置测厚结果之间的相对偏差在2.6%以内。涂层折射率在不同批次试块间差异较明显, 10块试块中最大相对偏差超过6%, 但是在同一试块上较为一致, 最大相对偏差绝大多数在2%以内。通过在 $\phi 5$ mm和 $\phi 6$ mm曲面试块上的检测结果发现, 涂层所在基体曲率削弱了反射波最大幅值, 但是并不影响对飞行时间的辨识。总之, 将太赫兹时域光谱测厚方法用于叶片上热障涂层自动仿形检测, 具有可行性和工程应用价值。

关键词: 太赫兹; 热障涂层; 厚度测量; 无损检测

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000025

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000025

中图分类号: TG174.45; TH744; V261.93⁺³

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)06-0060-08

Analysis of factors influencing terahertz time-domain spectroscopy measurements of thermal barrier coating thickness

LIU Yingtao^{1,2,3*}, ZHAO Hongmei⁴, YANG Wanxin^{1,2,3}, ZHU Di^{1,2,3}, YANG Mingcheng⁴,
GUO Guangping^{1,2,3}, ZHENG Xu⁴

(1. Testing Research Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China; 3. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China; 4. Shenzhen Terahertz Technology Innovation Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518102, Guangdong, China)

Abstract: To investigate the feasibility of applying the terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) thickness measurement method for thermal barrier coatings in automated profiling inspection, and to understand the influence of factors such as measurement incidence angle, lift-off distance, coating refractive index and substrate curvature on thickness measurement results, theoretical analysis and experimental studies based on various test blocks are conducted. The results demonstrate that when the incident angle varies with in the range of -3° to $+3^{\circ}$, the relative deviation in thickness measurement compared to the zero-angle condition is within 0.5%. Variations in lift-off distance within ± 1.5 mm result in a relative deviation within 2.6% compared to the focal position. The refractive indexes of coatings show notable variations across different sample batches, with the maximum relative deviation exceeding 6% among ten tested samples. However, the refractive index remains highly consistent across individual samples, with relative deviations largely within 2%. Experiments on curved substrates with diameters of 5 mm and 6 mm reveal that

while substrate curvature reduces the maximum amplitude of the reflected wave, it does not affect the accurate identification of the time-of-flight. In summary, the THz-TDS thickness measurement method demonstrates feasibility and significant engineering application value for automated profiling detection of thermal barrier coatings on blades.

Key words: terahertz; thermal barrier coating; thickness measurement; non-destructive testing

为了满足航空发动机叶片等热端部件更加苛刻的服役环境要求,热障涂层(thermal barrier coatings, TBCs)在航空发动机上得到日益广泛的应用,以提高发动机的关键性能。在涂装和质量检验过程中,陶瓷层(top coating, TC)厚度是一项重要的控制指标,准确测量其厚度成为无损评价方法的重要课题。

西安交通大学的王若男等^[1]采用微波扫频技术对热障涂层厚度进行表征研究,建立微波检测热障涂层减薄缺陷的有限元仿真模型,检测分辨率达 $30\ \mu\text{m}$ 。李永君等^[2]采用激光透射法红外热波检测技术对涂层厚度测量进行研究,但是透射法并不适用航空发动机叶片这种复杂结构产品的热障涂层厚度检测。郭伟等^[3]研究了利用基于小波分解的热波相位特征来测算热障涂层厚度的方法。徐闯^[4]对曲面热障涂层厚度的涡流测量方法进行研究,提出基于阻抗坐标变换的热障涂层厚度检测方法,经信号投影实现陶瓷层和黏结层厚度信号解耦。宋凯等^[5]基于涡流检测技术采用智能反演算法测算热障涂层厚度。

近些年,太赫兹技术成为无损检测领域研究的新热点,其优点主要有:(1)非接触检测;(2)对大部分非金属、非极性材料有较好的穿透性;(3)良好的空间分辨率和出色的纵向分辨率;(4)无伤害、无污染;(5)高信噪比。在热障涂层测厚方面,太赫兹技术不仅检测精度高,而且易于实现自动化检测,具有良好的发展前景。

国内外学者就此开展了大量研究,提出多种模型和算法。White等^[6]提出利用反射式太赫兹时域光谱技术对热障涂层进行厚度检测。Fukuchi等^[7-10]提出未知涂层在太赫兹频段折射率的情况下,依据太赫兹波在空气-陶瓷层界面的反射波、陶瓷层-黏结层界面的1次和2次反射波,计算陶瓷层的折射率,进而利用飞行时间计算出涂层厚度。之后,该课题组对涂层表面粗糙度的影响进行了理论和实验研究,对厚度计算方法进行修正。对于 $200\ \mu\text{m}$ 左右厚的涂层,测量值与显微观察值的相对差小于6%。Krimi等^[11]提出一种高精度的自校准方法也可以同时测定涂层折射率和涂层厚度。

该研究提出一种随机优化算法找到全局最小值,得到较为精确的测量结果,与涡流的测厚结果相比最大相对误差为1%。

国内,福州大学的张平等^[12]采用太赫兹时域光谱设备以反射方式对等离子喷涂的陶瓷层和热生长氧化层(thermally grown oxide, TGO)进行测厚方法研究,推导出利用太赫兹波在空气-陶瓷层界面反射波、陶瓷层-黏结层界面1次和2次反射波的频谱特征计算TC层折射率的方法。西安交通大学的何普等^[13-14]采用太赫兹时域光谱设备以反射方式对等离子喷涂的TC层进行测厚方法研究,随后提出利用太赫兹波在空气-陶瓷层界面反射波、陶瓷层-黏结层界面1次反射波的频谱特征计算TC层折射率和厚度的方法。上述方法中,采用3次回波频域特征进行折射率测定的方法,其测厚精度受第3次回波信号质量的影响明显,需要将样品放置在充满氮气的样品室中以避免水汽的影响^[12]。采用2次回波频域特征进行涂层测厚的研究中,虽然给出试件上50个采样点的厚度平均值^[14],但是未就各个测量点厚度的离散性进行研究。除了上述方法外,中国矿业大学的孙凤山等^[15]提出关键时频信息融合方法,结合深度学习,减少了反射峰变形对折射率测量精度的影响,提高了微观结构不均匀条件下热障涂层测厚的准确性。

虽然,采用统一的折射率计算涂层厚度,可能存在测量结果偏差大的问题,但是当热障涂层制作工艺稳定、同一批次折射率波动小时,采用经过校准、统一的折射率计算同一批次的涂层厚度存在可能,具有一定实际工程应用价值。为了考察将太赫兹时域光谱测厚方法用于自动仿形检测的可行性,本工作对入射角偏转、提离距离变化和折射率离散性对测厚结果影响的规律进行研究,并探究测厚方法的曲面适应性。

1 实验材料与方法

1.1 太赫兹时域光谱测厚方法

太赫兹波对大部分干燥的非金属、非极性材料(如泡沫、陶瓷、玻璃、橡胶等)有良好的穿透能

力。对于热障涂层来讲,如图1所示,太赫兹波在空气-陶瓷层的界面处发生反射形成表面回波 R_0 (表面波),部分太赫兹波穿透陶瓷层,在陶瓷层与金属粘接层的界面处发生多次反射,形成多次反射回波:底波 R_1 、 R_2 等。由于在每个界面处存在菲涅尔反射以及在材料中存在吸收和散射,太赫兹信号在传播过程中幅度不断减小。但是太赫兹时域光谱具有宽频特性,依托材料单次测量的宽频响应和锁模激光器良好的稳定性,使得太赫兹检测回波仍具有良好的信噪比。

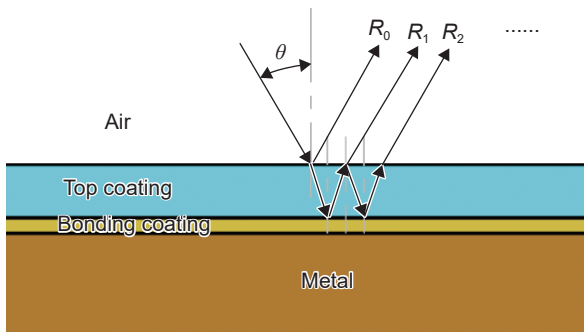


图1 太赫兹波在热障涂层样品中的传播示意图
Fig. 1 Terahertz wave propagation path in thermal barrier coatings

当太赫兹波入射角 $\theta=0^\circ$ 时,即太赫兹波垂直入射时,表面回波 R_0 与一次底波 R_1 、一次底波 R_1 与二次底波 R_2 ,以此类推,它们两两之间的时间差相同,均为太赫兹波在陶瓷层内部往返传播一次所用的时间 Δt (以下称飞行时间),传播距离为陶瓷层厚度的两倍,于是存在式(1)所示关系:

$$l = \frac{\Delta t \cdot c}{2 \cdot n} \quad (1)$$

式中: l 为陶瓷层厚度; c 为光速; n 为折射率,对于非均质的热障涂层陶瓷层而言,这个折射率为主频段下的平均折射率,与陶瓷涂层内部微结构有关。

如图2所示,在求得表面回波 R_0 与一次底波 R_1 或一次底波 R_1 与二次底波 R_2 之间的飞行时间 Δt 后,已知陶瓷涂层折射率的条件下,可以依据式(1)求得陶瓷涂层的厚度。图2中太赫兹信号经过了反相处理。

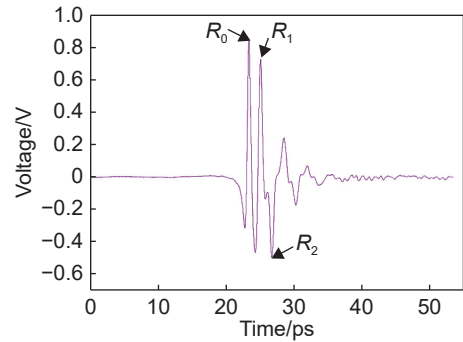


图2 陶瓷层的太赫兹时域回波信号
Fig. 2 Terahertz wave signal from top coating in time domain

1.2 试块

选取10块 $150\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的热障涂层试块,用于研究折射率变化及其对测厚的影响,其中10块试块为不同批次。热障涂层采用气相物理沉积工艺制成。在进行太赫兹测试之前,设定测量点,并作如图3(a)所示的标识。相邻较近的两条纵线间为测量中心区域,宽度 $\leq 2\text{ mm}$,在该区域沿着纵线等距选取3个测量点,右边分别记为1~3点,左边分别记为4~6点,两列测量点相距 20 mm 。图3(a)最下侧正方形小试块尺寸为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$,涂层较薄,用于入射角和提离距离的影响研究。图3(b)中的曲面试块,用于研究太赫兹测厚方法对曲面的适应性,试块直径为 $5\sim 12\text{ mm}$ 。采用太赫兹光纤光谱分析仪CCT-2800进行实验研究,探头为太赫兹可移动式测试探头,性能参数见表1。

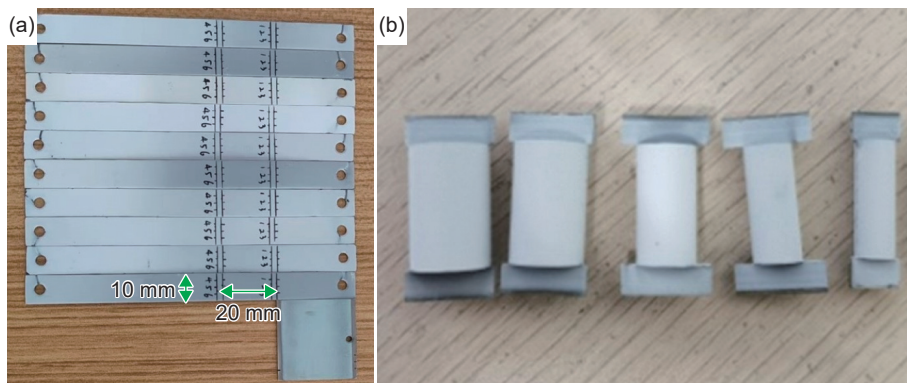


图3 试块和测量点实物图 (a)平面试块;(b)曲面试块

Fig. 3 Photograph of test samples and measurement points (a) flat surface samples; (b) curved surface samples

表1 太赫兹光纤光谱分析仪 CCT-2800 和探头的主要性能参数
Table 1 Main performance parameters of terahertz spectrometer CCT-2800 and sensor head

Bandwidth/ THz	Delay/ ps	Len focal length/mm	Spot diameter/ mm	Spot diameter in -6 DB/mm	Focal length in -6 DB/mm	Minimum time resolution/ps
0.1-4	54	74.5	3	1.4	6.8	0.0067

由于太赫兹波不可见,为了便于检测,尤其是为了适应自动检测,探头内置激光传感器,在测量点处给出指示。

2 结果与分析

2.1 入射角偏转的影响

2.1.1 基于太赫兹波入射模型的理论计算

图4为太赫兹波在涂层内部传播的示意图。只考虑折射率影响下太赫兹波光学路径入射角变化而产生的涂层厚度测量误差。图中太赫兹波由空气入射到陶瓷层, O 为入射点, α 为入射角, β 为折射角, N 为涂层内部反射点, l 为涂层厚度, l' 为空气-陶瓷层界面与陶瓷层-黏结层界面间的光程。由反射角和入射角的关系可知,陶瓷层-黏结层界面与空气-陶瓷层界面间的太赫兹光程也同为 l' 。

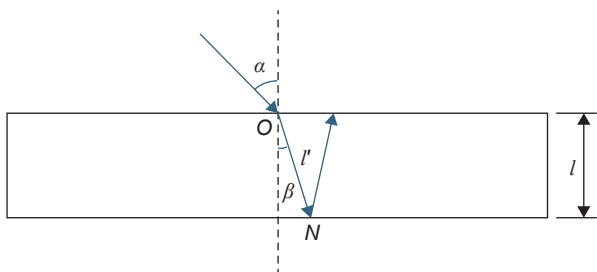


图4 太赫兹波在涂层内部传播的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of terahertz wave propagation within a coating

取空气的折射率近似为1,根据斯涅尔定律,则有涂层折射率 n , 见式(2):

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \quad (2)$$

入射角偏转导致的涂层厚度测量的相对偏差用式(3)计算:

$$m = \frac{l' - l}{l} = \frac{l'}{l} - 1 = \frac{1}{\cos\beta} - 1 = \left(\frac{1}{\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{\sin\alpha}{n}\right)\right)} - 1 \right) \times 100\% \quad (3)$$

取涂层的折射率为 $n=4.4$, 则不同入射角 α 引起的相对偏差见表2。从表2可以看出,从光学路径的角度看,入射角的变化对涂层厚度测量影响很

表2 不同入射角 α 引起的相对偏差

Table 2 Relative deviation induced by variation in incidence angle α

Angle of incidence, $\alpha / (^\circ)$	Relative deviation, $m/\%$
1	0.0008
5	0.0196
10	0.0780
30	0.6520
38	0.9935
60	1.9951

小,当入射角 $\alpha=38^\circ$ 时,相对偏差约为1%。

2.1.2 实验检测

将太赫兹测试探头固定在测试台上,将带有涂层的正方形小试块放在可以旋转的样品架上。首先将试块与内置激光传感器的指示激光粗调垂直,然后通过传感器测距的方式,将试块调到焦点的位置。传感器光斑的位置调整到试块架转轴中心,确保转动转轴时,光斑的位置不发生变化,即测试点不会改变。接着,细调试块与探头的太赫兹光斑轴线垂直,即微调至太赫兹表面回波 R_0 最大值出现的位置,记为中心点。然后,采用螺旋测微计进行旋转,每次转动 0.5° 获取一次太赫兹光谱信号,正向转动范围为 $0^\circ \sim +5^\circ$, 反向转动范围为 $0^\circ \sim -5^\circ$, 共获取21组数据。通过算法自动计算出表面回波 R_0 幅值变化和飞行时间 Δt 的变化,详见图5。由于偏转的角度很小,这里忽略了太赫兹测试探头与试块测试点之间距离的微小变化。

从图5可以发现,入射角 α 在 $-5^\circ \sim +5^\circ$ 的范围内变化时,飞行时间 Δt 略有变化,相对于入射角为 0° 的相对偏差 $\leq 2\%$ 。飞行时间的结果存在一定的波动性,不具备理论上预见的对称性,说明飞行时间变化很小时测量系统随机波动的影响明显。而当入射角 α 在 $-5^\circ \sim +5^\circ$ 的范围内变化时,表面回波 R_0 的最大幅值却明显减小,降至原来的30%左右,且表现出较强的对称性。入射角 α 在 $-3^\circ \sim +3^\circ$ 的范围内变化时,飞行时间 Δt 基本没有变化,相对偏差为0.5%,说明入射角在此范围内变化时对测厚结果没有明显影响。

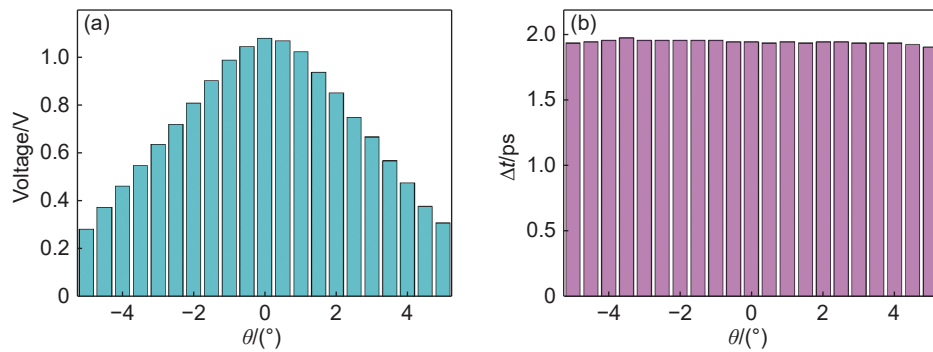


图5 入射角变化对检测信号的影响 (a) R_0 的最大幅值; (b) 飞行时间

Fig. 5 Effect of incident angle variation on detection signals (a) maximum voltage of R_0 ; (b) Δt

2.2 提离距离变化的影响

在实现自动扫查的过程中,机械系统的运动控制精度不仅会引起入射角的偏差,还会引起检测提离距离的变化。所以研究提离距离对检测结果的影响也很有必要。本工作在实验中单独改变提离距离,测试反射信号幅度和飞行时间的变化。提离距离记为 H 。

表3为提离距离对金属板表面反射信号最大幅值的影响,由表3可以看到,提离距离在 $-2.5 \sim +2.5$ mm 范围内变化时,金属表面反射信号的最大幅值大幅减小,并呈现出一定的对称性。这里焦点处的位置记为提离距离的零位,增加提离距离记为“+”,反之记为“-”。

表3 提离距离对金属板表面反射信号最大幅值的影响
Table 3 Effect of lift-off distance on maximum amplitude of the reflected signal from a metal plate surface

H/mm	Peak value of echoed signal, U/V
-2.5	1.21
-1.5	1.60
-0.5	1.88
0	1.93
0.5	1.90
1.5	1.61
2.5	1.17

提离距离的变化对飞行时间也有一定的影响,利用带有涂层的正方形小试块进行实验,结果见表4。提离距离变化时,飞行时间出现波动,但是波动趋势没有明显的规律,这种波动性耦合了检测系统的随机波动。提离距离在 $-1.5 \sim +1.5$ mm 范围内变化时,飞行时间相对于零位处的飞行时间相对偏差在 2.6% 以内。由于实际的运动控制精度通常优于 1 mm,所以提离距离对测厚精度的影响小于 2.6%。

表4 提离距离变化对 Δt 的影响

Table 4 Effect of lift-off distance variation on Δt

H/mm	$\Delta t/\text{ps}$	Deviation, σ/ps
-2.5	1.93	+0.03
-1.5	1.95	+0.05
-0.5	1.95	+0.05
0	1.9	
0.5	1.93	+0.03
1.5	1.9	0
2.5	1.85	-0.05

2.3 涂层折射率离散性的影响

热障涂层的折射率受涂层内部复杂结构的影响,具有一定的离散性。由式(1)可知,折射率变化直接影响测厚结果,因而本工作研究了不同批次试块间、同一试块不同位置间的折射率差异。

在前述 10 块试块上 6 个标记点处进行测厚,得到的厚度值与该位置处解剖后的扫描电镜观测结果进行对比,图 6(a)为某测量点处涂层截面背散射扫描电镜图,该图经自主研发的图像处理算法可自动计算出陶瓷层平均厚度,图 6(b)为图 6(a)在图像处理过程中生成的掩膜。

对上述 60 个测量点处的折射率分别进行计算,分布如图 7 所示。这些点处折射率波动范围为 $3.93 \sim 4.33$,最大相对偏差超过 6%。说明折射率的离散性对测厚结果的准确度会造成较大影响。试块 1 的 6 个点折射率离散性较明显,相对于 6 个点平均值的最大相对偏差达到 3.5%,而其余 9 块的离散性较小,相对于自身 6 点的平均值最大相对偏差基本在 2% 以内。

若以临近的 1、2 和 3 点折射率平均值作为该试块的涂层折射率,计算 4、5 和 6 点处的涂层厚度,则电镜观测值与该值的对比见图 8(a),电镜观

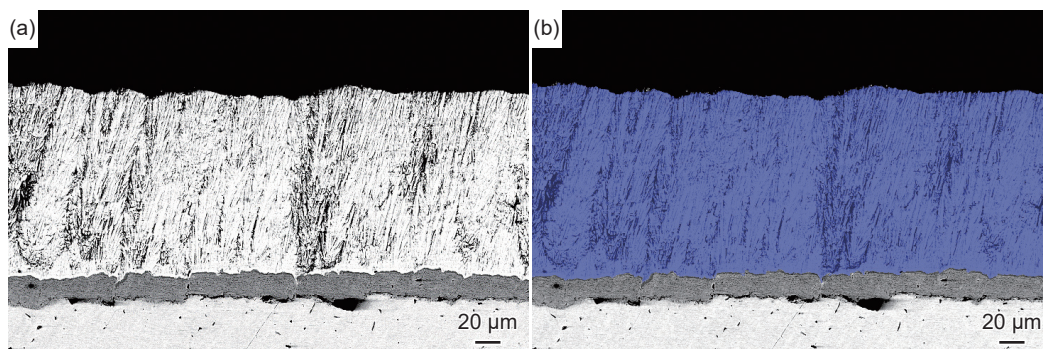


图 6 自动计算测量点处涂层截面陶瓷层厚度 (a)热障涂层剖面的 SEM 图; (b)自动测厚算法生成的掩膜

Fig. 6 Automatically calculated ceramic layer thickness of the coating cross-section at measurement points (a)cross-sectional SEM image of TBC; (b)image mask from automated thickness measurement algorithm

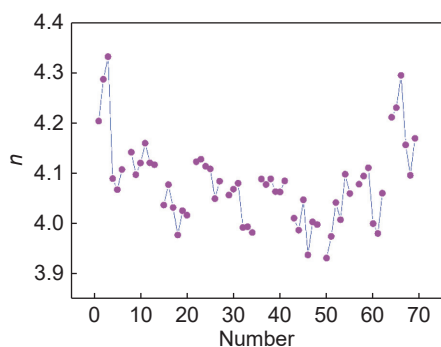


图 7 10 块试块、60 个测量点处的折射率分布

Fig. 7 Refractivity of top coating at sixty measuring points in ten samples

测值与该值的差值分布见图 8(b)。图 8(a)中的直线斜率为-0.5, 各个点的结果集中在该直线附近, 说明计算值与电镜观测值差异很小。从图 8(b)可以看到除了个别点达到-7 μm 外, 大部分差值在-5~+5 μm 范围内, 标准误差为 2.44 μm。折射率离散性在同一试块上较不同批次试块间明显小很多, 使同一批次涂层使用统一的折射率计算涂层厚度存在可能。对实际叶片上热障涂层来讲, 还需要进一步进行检测和解剖验证。

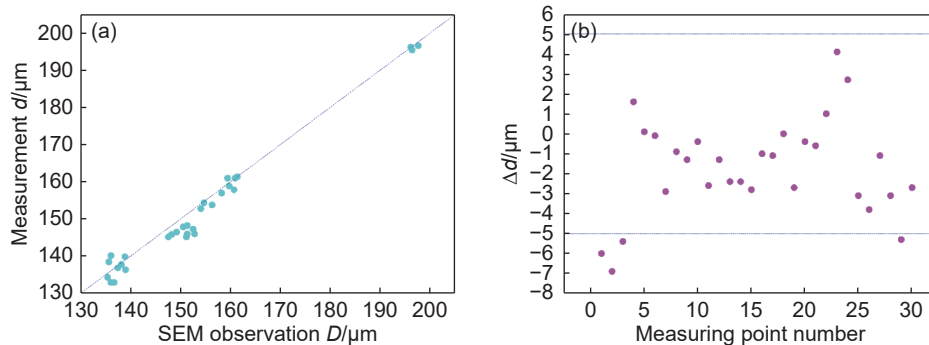


图 8 涂层太赫兹测量值与剖面电镜观测值的对比(a)及差值分布(b)

Fig. 8 Comparison (a) and difference distribution (b) between terahertz measurements and cross-sectional SEM observations of the coating

2.4 曲面检测的适应性

为了研究太赫兹时域光谱测厚方法对曲面的适应性, 制作如图 3(b)所示的曲面试块, 直径为 5~12 mm。对 φ5 mm 和 φ6 mm 的试块进行检测, 得到的时域曲线信号如图 9 所示, 信号最大幅值明显减小, 但是涂层表面反射信号和陶瓷层与黏结层界面的一次反射信号峰值尖锐清晰, 测厚算法中对特征值的识别并不存在困难。测得的涂层厚度分别为 116.7 μm 和 122.3 μm。可见太赫兹时域光谱测厚方法对一定曲率的曲面有良好适应性。

3 结论

(1)入射角在-5°~+5°的范围内变化时, 飞行时间 Δt 略有变化, 相对偏差≤2%, 而表面回波的最大幅值却明显减小, 降至原来的 30% 左右。入射角 α 在-3°~+3°的范围内变化时, 飞行时间 Δt 基本没有变化, 相对偏差为 0.5%, 所以入射角在此范围内变化时其影响可以忽略。

(2)提离距离变化时, 表面反射回波的最大幅值大幅减少, 飞行时间出现波动, 但是变化趋势没

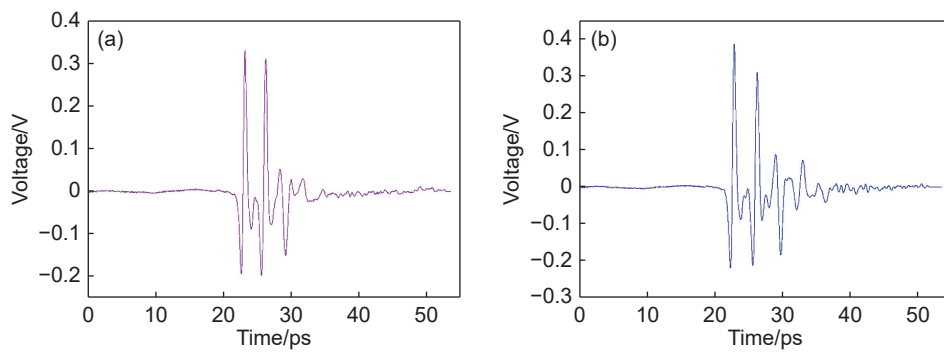


图9 曲面上涂层的太赫兹信号 (a) $\phi 5$ mm 试块; (b) $\phi 6$ mm 试块

Fig. 9 Terahertz wave signal from top coating in curved surface samples (a) $\phi 5$ mm sample; (b) $\phi 6$ mm sample

有明显的规律。提离距离在 $-1.5\sim+1.5$ mm 范围内变化时,飞行时间相对于零位处的飞行时间相对偏差在 2.6% 以内。

(3) 10 块不同批次的试块涂层折射率波动范围为 3.93~4.33,同一试块涂层折射率相对于平均值的最大相对偏差绝大多数在 2% 以内。对于每个试块,采用前 3 点折射率的平均值计算后 3 点涂层厚度,与观测值对比,得到的标准误差为 $2.44\ \mu\text{m}$ 。因此,可知对同一批次热障涂层使用统一的折射率计算涂层厚度存在可能。

(4) 太赫兹时域光谱测厚方法对曲面有一定的适应性,基体曲率在一定范围内并不影响对飞行时间的辨识,在直径 $\phi 5$ mm 和 $\phi 6$ mm 的试块上能够进行有效的涂层厚度测量。

参考文献:

- [1] 王若男,李勇,回沛林,等. 涡轮叶片热障涂层减薄缺陷的微波扫频定量检测[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(8): 104-107.
WANG R N, LI Y, HUI P L, et al. Microwave frequency sweeping quantitative determination of thinning defect in thermal barrier coatings of turbine blades[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(8): 104-107.
- [2] 李永君,肖俊峰,朱立春,等. 热障涂层厚度激光透射法红外热波检测技术研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0704003.
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): 0704003.
- [3] 郭伟,董丽虹,王海斗,等. 基于小波分解的热波相位特征提取及喷涂层厚度评价[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0904003.
GUO W, DONG L H, WANG H D, et al. Phase spectra extract of thermal wave with wavelet decomposition and coating thickness estimation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(9): 0904003.
- [4] 徐闯. 曲面热障涂层厚度的涡流测量方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
XU C. Research on eddy current measurement method of surface thermal barrier coating thickness[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [5] 宋凯,李子璇,陆灵峰,等. 航空发动机关键部位热障涂层厚度智能反演算法[J]. 中国测试, 2023, 49(12): 8-15.
SONG K, LI Z X, LU L F, et al. Research on inversion of thermal barrier coating thickness in key parts of aero-engine[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(12): 8-15.
- [6] WHITE J, FICHTER G, CHERNOVSKY A, et al. Time domain terahertz non-destructive evaluation of aeroturbine blade thermal barrier coatings[J]. American Institute of Physics, 2009, 1096(1): 434-439.
- [7] FUKUCHI T, FUSE N, FUJII T, et al. Measurement of topcoat thickness of thermal barrier coating for gas turbines using terahertz waves[J]. Electrical Engineering in Japan, 2013, 183(4): 1-9.
- [8] FUKUCHI T, FUSE N, OKADA M, et al. Topcoat Thickness measurement of thermal barrier coating of gas turbine blade using terahertz wave[J]. Electrical engineering in Japan, 2014, 189(1): 1-8.
- [9] FUKUCHI T, FUSE N, MIZUNO M, et al. Measurement of refractive index of thermal barrier coating using reflection of terahertz waves and variable aperture[J]. Electronics and Communications in Japan, 2016, 99(5): 54-61.
- [10] FUKUCHI T, OZEKI T, OKADA M, et al. Nondestructive inspection of thermal barrier coating of gas turbine high temperature components[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(4): 391-400.
- [11] KRIMI S, KLIER J, JONUSCHEIT J, et al. Self-calibrat-

- ing approach for terahertz thickness measurements of ceramic coatings[C]//2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Copenhagen: IEEE, 2016: 1-2.
- [12] 张平, 钟舜聪, 张秋坤, 等. 热障涂层折射率与厚度的太赫兹无损检测[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(20): 47-56.
ZHANG P, ZHONG S C, ZHANG Q K, et al. Terahertz nondestructive testing of refractive index and thickness of thermal barrier coating[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(20): 47-56.
- [13] 何普, 赵纪元. 采用太赫兹时域光谱技术的高精度热障涂层测厚方法[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(6): 112-119.
HE P, ZHAO J Y. High-precision thermal barrier coating thickness measurement method using terahertz time-domain spectroscopy technology[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(6): 112-119.
- [14] 何普, 赵纪元, 颜江涛. 基于太赫兹波强度关系的热障涂层厚度测量方法[J]. *中国测试*, 2023, 49(10): 1-6.
HE P, ZHAO J Y, YAN J T. Thermal barrier coating thickness measurement method using terahertz wave intensity relationship[J]. *China Measurement & Test*, 2023, 49(10): 1-6.
- [15] 孙凤山, 范孟豹, 曹丙花, 等. 基于时频关键信息融合的热障涂层太赫兹准确测厚方法[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(14): 10-22.
SUN F S, FAN M B, CAO B H, et al. Terahertz based accurate thickness measurement of thermal barrier coatings using the key time-frequency information fusion[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(14): 10-22.

收稿日期: 2025-02-26; 录用日期: 2025-08-22

基金项目: 稳定支持项目(2019-363)

通讯作者: 刘颖韬(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为太赫兹无损检测技术、红外无损检测技术和设备研发, 联系地址: 北京市 81 信箱 6 分箱(100095), E-mail: Yingt.liu@163.com

(本文责编: 高 磊)