

基于太赫兹技术的热障涂层平行裂纹监测研究

叶东东¹, 王卫泽¹, 周海婷², 方焕杰¹, 黄继波¹, 龚汉红³, 李振³

(1.华东理工大学, 上海 200237; 2.中国计量大学, 杭州 310018; 3.上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 监测热障涂层内部的平行裂纹。**方法** 针对采用大气等离子喷涂方法制备的热障涂层, 在内部预制不同规格的两种平行裂纹, 利用反射式太赫兹时域光谱系统进行测试, 获取时域谱图, 联合 Hanning 窗函数-小波降噪滤波方法进行反卷积处理, 提取不同反射峰间的时间间隔, 建立数学模型进行裂纹规格参数计算。**结果** 太赫兹时域光谱可以有效测量服役前未出现平行裂纹的热障涂层的陶瓷顶层厚度 D 。针对不同类型和规格的平行裂纹, 通过提取时域光谱反射峰 1 和反射峰 2 的时间间隔 Δt_1 , 用于计算裂纹上端距涂层表面预制值 d_1 和判断裂纹的位置类型。当 $d_1 < D$ 时, 裂纹为内部平行裂纹; 当 $d_1 \approx D$ 时, 裂纹为界面平行裂纹。针对宽度为 130 μm 的较大裂纹, 利用反射峰 2 和反射峰 3 的时间间隔 Δt_2 进行 ΔD 计算, 引起的误差尚在合理范围, 约为 16.47%。而针对宽度为 80 μm 的较小裂纹, 误差可达 41.10%。使用 Hanning 窗函数联合小波降噪反卷积滤波可以有效提取裂纹内部二次反射的特征时间间隔 Δt_a , 用于裂纹宽度计算, 宽度较大和较小裂纹的计算误差显著降低, 分别为 4.61% 和 10.01%。实验结果证明, 反卷积可以有效地降低 ΔD 的计算误差, 并且为宽度更窄的裂纹监测提供了可能。**结论** 基于太赫兹时域光谱系统的热障涂层探伤技术提供了一种非接触、低辐射、在线无损的平行裂纹监测方法, 能够对热障涂层界面和内部的平行裂纹进行有效识别和监测。

关键词: 太赫兹; 热障涂层; 平行裂纹; 反卷积

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)05-0091-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.011

Parallel Crack Monitoring of Thermal Barrier Coatings Based on Terahertz Technology

YE Dong-dong¹, WANG Wei-ze¹, ZHOU Hai-ting², FANG Huan-jie¹,
HUANG Ji-bo¹, GONG Han-hong³, LI Zhen³

(1.East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2.China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 3.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to monitor the parallel cracks in thermal barrier coatings. For the thermal barrier coating prepared

收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2020-04-03

Received: 2019-09-16; Revised: 2020-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51775189)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775189)

作者简介: 叶东东 (1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为表面改性及无损检测技术。

Biography: YE Dong-dong (1992—), Male, Ph. D., Research focus: surface modification and nondestructive evaluation technology.

通讯作者: 王卫泽 (1975—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为表面改性。邮箱: wangwz@ecust.edu.cn

Corresponding author: WANG Wei-ze (1975—), Female, Doctor, Professor, Research focus: surface modification. E-mail: wangwz@ecust.edu.cn

引文格式: 叶东东, 王卫泽, 周海婷, 等. 基于太赫兹技术的热障涂层平行裂纹监测研究[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 91-97.

YE Dong-dong, WANG Wei-ze, ZHOU Hai-ting, et al. Parallel crack monitoring of thermal barrier coatings based on Terahertz technology[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 91-97.

by atmospheric plasma spraying method, two kinds of cracks with different sizes were prefabricated. The time domain spectrum was obtained by the reflective Terahertz time-domain spectroscopy system, and the Hanning window function-wavelet noise reduction filtering method was used to carry out reverse-convolution to extract the featured time interval between different reflection peaks and establish mathematical models for crack dimension parameters estimation. The terahertz time-domain spectroscopy could effectively measure the D thickness of ceramic coatings without parallel cracks. For the parallel cracks with different sizes, the pre-made distance d_1 between the upper surface of the crack and the top surface of ceramic coatings could be estimated by extracting the time interval Δt_1 between the 1st reflection peak and the 2nd reflection peak, and it could be used to determine the location type of the crack. When d_1 was smaller than D , the crack was an internal parallel crack, and when d_1 was approximately equal to D , the crack was an interface parallel crack. For the larger crack with width of 130 μm , the error caused by the time interval Δt_2 between the 2nd reflection peak and the 3rd reflection peak in the calculation of D was still within a reasonable range, which was about 16.47%. For the smaller crack with width of 80 μm , the error was 41.10%. The characteristic time interval Δt_a of the secondary reflection inside the crack which was effectively extracted by Hanning window function-wavelet noise reduction filtering method was used for the crack width estimation, and the error of the cracks with larger and smaller width was significantly reduced, respectively 4.61% and 10.01%. The experimental results showed that reverse-convolution could effectively reduce the estimation error ΔD and provide a possibility for detecting crack of narrower width. Thermal barrier coatings evaluation technology based on Terahertz time-domain spectroscopy system provides a non-contact, low-emission, on-line and non-destructive parallel cracks monitoring method, which can effectively identify and monitor the thermal crack coating interface and internal parallel cracks.

KEY WORDS: terahertz; thermal barrier coatings; parallel crack; reverse-convolution

航空发动机技术被称为工业皇冠上的明珠,是世界各国竞相追逐的焦点技术。航空发动机推重比的不断提高,给发动机热端部件的耐高温侵蚀性能提出了更高的要求和挑战。纵然使用最有效的冷却结构技术,先进高温合金材料的极限温度仍远无法满足发动机涡轮叶片的表面温度。热障涂层(Thermal Barrier Coatings, TBCs)因其优异的耐高温、低导热、防磨损和抗腐蚀性能,能够有效提高燃气轮机的工作温度和推重比,目前已作为航空发动机热端部件的保护性材料而被广泛应用^[1-3]。热端部件因长期处于高温氧化、冲蚀撞击、高次热疲劳的恶劣服役环境中,加之金属材料与表面喷涂的陶瓷涂层间的热膨胀系数差异,在热应力失配作用下,陶瓷涂层会出现减薄、生成热生长氧化层(Thermal growth oxide, TGO)、界面分离、剥落等现象,严重制约了热障涂层的服役寿命和可靠性^[4-6]。研究表明,内部裂纹的萌生、扩展及合并是陶瓷涂层失效的最主要原因之一^[7-8]。在反复高温热震循环作用下,TGO的出现会导致陶瓷层和粘结层的界面产生平行裂纹,而轴向应力的作用会使陶瓷顶层内部产生平行裂纹,两类平行裂纹都会引发陶瓷涂层的剥落失效^[9-12]。为了保障航空发动机叶片的服役结构完整性和寿命安全,亟需对热障涂层的平行裂纹进行有效的监测。

近年来,太赫兹技术作为一种新兴的监测技术,逐渐应用于无损检测领域。太赫兹通常是指频率在 0.1~10 THz,波长范围在 0.03~3 mm,介于无线电波和光波之间的电磁波。对比传统无损检测方法,太赫

兹对介电材料的穿透性强,可以在低辐射、非接触和无损伤的条件下对物体进行检测,并且检测时精度较高且无需耦合,是未来无损检测领域重要的研究方向之一^[13]。目前国内外学者关于利用太赫兹技术进行无损评价技术的研究已应用于各领域,主要包括:人体安检、集成电路、生物制药、玻璃钢材料以及热障涂层等^[14]。其中针对热障涂层的无损评价研究主要集中在陶瓷层厚度^[15-16]、界面 TGO^[17]、陶瓷层孔隙率^[18]以及冲蚀形貌^[19]的检测和表征等方面,而关于太赫兹技术进行热障涂层平行裂纹检测的相关研究目前还鲜有报道。

本文利用反射式太赫兹时域光谱(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)系统对分别预制陶瓷层-粘结层界面平行裂纹(以下简称界面平行裂纹)和陶瓷层内部平行裂纹(以下简称内部平行裂纹)的试样进行测试,联合小波降噪及频域加 Hanning 窗函数滤波进行反卷积处理,对裂纹特征参数进行表征研究。

1 试验

1.1 太赫兹系统及测试方法

试验用于热障涂层平行裂纹监测的 THz-TDS 系统主要组件包括飞秒激光模块、THz-TDS 模块、延迟线模块、发射器模块和接收器模块。飞秒激光器产生的飞秒激光的脉冲宽度、中心波长、重复频率、频谱半高宽以及输出功率分别为 80 fs、800 nm、

76 MHz、11 nm 以及 1.1 W。考虑到热障涂层的结构特征, 选用反射式模式配置和垂直方式入射(入射角 0°)。为了确保测试的可靠性, 每个试样通过测试 5 个光斑不重合的位置, 每个位置的数据组通过 256 次扫描获得, 最后取平均值。为了避免水汽对太赫兹的吸收, 利用氮气进行干燥, 使系统测试环境的水汽含量低于 1%^[19]。进行试验测试前, 先获取无样品时的反射参考信号, 如图 1 所示, 参考信号时域谱图仅存在 1 个完整脉冲信号。

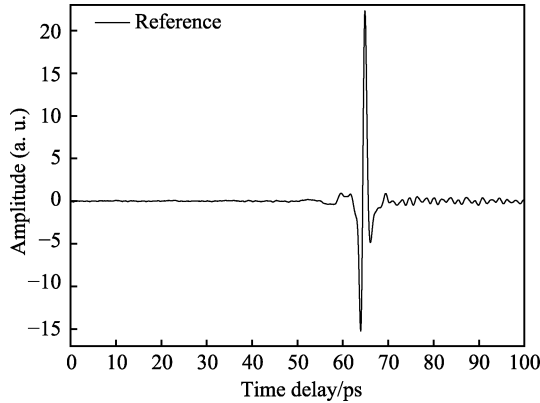


图 1 无样品时参考信号的太赫兹时域光谱图

Fig.1 Terahertz time-domain spectroscopy of reference signal without samples

图 2 为太赫兹波在热障涂层中传播光路示意图。如图所示, 当 THz 波入射到试样上表面, 部分在陶瓷层上表面发生反射, 部分透射进入陶瓷层内部, 并在陶瓷层和金属粘结层界面发生完全反射。从界面反射出的 THz 波部分通过陶瓷顶层表面重新返回空气中, 部分又反射回陶瓷层内部, 继续在陶瓷层内发生多次反射。

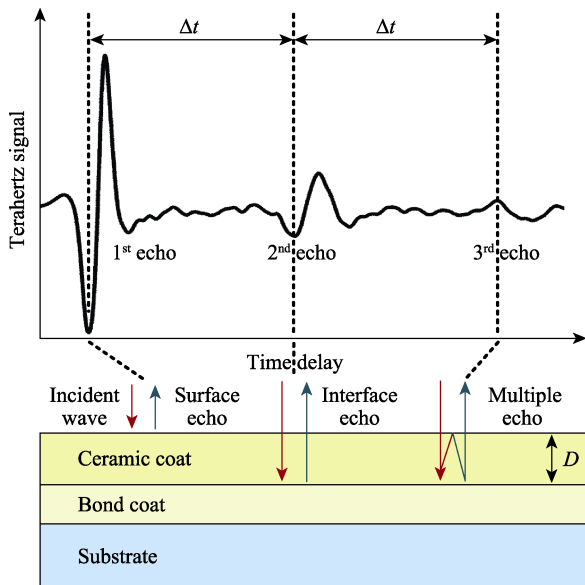


图 2 太赫兹波在热障涂层中传播光路示意图

Fig.2 Schematic diagrams of terahertz waves propagation path in thermal barrier coatings

其中, 1st 反射峰为表面反射, 2nd 反射峰为界面反射, 3rd 反射峰为二次界面反射。1st 反射峰中蕴含着陶瓷层上表面的特征信息, 2nd 和 3rd 反射峰蕴含着陶瓷层内部和陶瓷层-金属粘结层界面的特征信息。

结合图 2 所示的太赫兹波在热障涂层中的传播规律, 建立陶瓷层未开裂前原始厚度 D 数学计算模型^[13-14,19], 如式(1)和(2)所示:

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

$$\frac{F_1 F_3}{F_2^2} = \frac{(n-1)^2}{4n} \quad (2)$$

如图 2 所示, Δt 为相邻两次反射峰的时间延时, n 为陶瓷层的折射率, F_1 、 F_2 及 F_3 分别为前三次反射峰经傅里叶变换得到的频谱图的光谱强度。在图 3 所示的时域谱图中, 接收到的 THz 反射信号 $y(t)$ 是入射 THz 脉冲 $x(t)$ 与脉冲响应函数 $h(t)$ 的卷积, $h(t)$ 与被检测热障涂层的指定被检测区域的结构和性质相关, $h(t)$ 可由卷积定理通过傅里叶逆变换按照式(3)、(4)计算得到。

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) \quad (3)$$

$$h(t) = \text{FFT}^{-1} \left[\frac{\text{FFT}(y(t))}{\text{FFT}(x(t))} \right] \quad (4)$$

其中, FFT 代表傅里叶变换, FFT^{-1} 代表傅里叶逆变换, 但由于高频噪声的存在会导致时域波形存在较严重的震荡和波动(可参考图 1 中的参考信号), 所以直接进行反卷积变换并不能得到期望的结果。因此, 按照式(5)所示, 通过在频域进行加滤波函数来修正和抑制高频噪声。

$$h'(t) = \text{FFT}^{-1} \left[\text{FFT}(g(t)) \times \frac{\text{FFT}(y(t))}{\text{FFT}(x(t))} \right] \quad (5)$$

式中, $g(t)$ 为选用的时域滤波函数。为了能够有效地分辨时域反射峰的回波特征, $g(t)$ 的时域长度应该足够短, 并且主峰两侧不应存在额外的冗余信号, 避免在反卷积重构的信号中掩盖真实的反射峰特征。为了兼顾考虑时域分辨率和频域滤波的需求, 本文选用 Hanning 窗函数作为 $g(t)$ 的输入, 其频谱如式(6)所示^[20]。

$$G(\omega) = \begin{cases} e^{i\omega t_0} \cos^2 \left(\frac{\pi f}{2f_c} \right) & |\omega| \leq 2\pi f_c \\ 0 & |\omega| > 2\pi f_c \end{cases} \quad (6)$$

式中, t_0 为主峰到达时间, f_c 为截止频率。这种滤波方式通过改变截止频率完成滤波, 使用时高效便捷, 且容易实现, 如图 3 所示 $t_0 = 64$ ps、 $f_c = 3$ THz 的 Hanning 窗函数。

通常, 仅通过加窗函数进行频域反卷积, 较难得到质量较好的信噪比, 所以利用小波信号处理方法对信号进行分解, 得到信号分解后的近似系数和细节系数加以重构滤波。本文选择 symlet4 小波函数, 采取软阈值方法进行降噪处理^[21-22]。

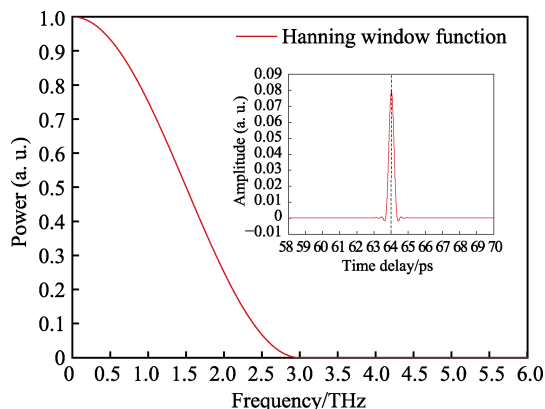


图3 Hanning窗函数的频域功率谱和时域谱

Fig.3 Frequency domain power spectrum and time domain spectrum of Hanning Window Function

1.2 涂层制备

热障涂层基体选用圆盘状普通碳钢（其规格为 $\phi 25.4 \text{ mm} \times 3.1 \text{ mm}$ ）材料，陶瓷层材料选用如图4所示的 $8\% \text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ （8YSZ）粉末（粒径 $15 \sim 45 \mu\text{m}$ ，北京桑尧科技开发有限公司）。考虑到太赫兹在金属层表面会发生全反射，所以此处省略粘结层的制备过程。采用商用大气等离子喷涂设备（APS-2000，北京航空工艺研究所）进行陶瓷层制备，喷涂时分别采用氢气和氩气作为辅气和主气，气压分别控制为 0.25 MPa 和 0.4 MPa ，主气的流量控制为 47 L/min ，氩气作为送粉气时，流量控制为 10 L/min 。喷枪的移动速度为 150 mm/s ，功率选用 36 kW （ $600 \text{ A}/60 \text{ V}$ ），喷涂距离控制为 70 mm 。

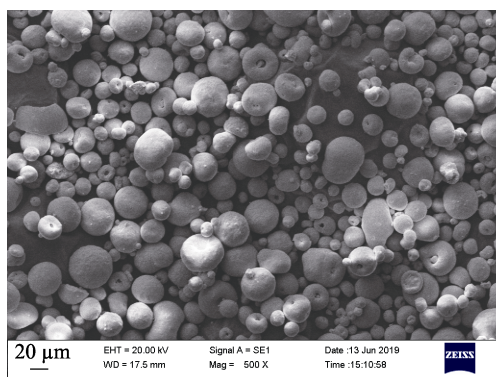


图4 YSZ粉末形貌及粒径分布

Fig.4 Morphology and particle size distribution of YSZ powder

针对喷涂后的涂层试样，选用酸洗剥离作用较强的稀硫酸快速获取不含基体的YSZ陶瓷片，用去离子水清洗后，利用透明胶带（厚度 $50 \mu\text{m}$ ）和双面胶（厚度 $80 \mu\text{m}$ ）在圆盘试样表面最外圈贴附一层胶环（环宽 2 mm ），之后将不含基体的YSZ陶瓷片平行叠加于试样表面，且考虑到双面胶体有一定的流动性，需在表面均匀地施加一定的压力保持一段时间，每隔一段时间利用游标卡尺进行厚度测量，以确保胶

层粘附状态完好，中心状态为镂空的平行裂纹预制区域，裂纹宽度为所设预制值。图5所示为在热障涂层内部预制的内部平行裂纹和界面平行裂纹示意图，其中 ΔD 为裂纹宽度， D 为陶瓷层原始厚度（内部平行裂纹时： $D=d_1+d_2$ ）。其中1、2、3和4分别对应太赫兹波在各层界面的第一次反射峰，3a为第3次反射在裂纹内部的二次反射峰。根据菲涅尔定理和比尔朗伯吸收定律，3a相比3强度会弱很多，难以被检测和提取，但却是计算裂纹宽度的关键特征参量。如果能提取各界面反射峰对应的时间延时 Δt ，则可以计算出包括裂纹宽度 ΔD 和裂纹距离陶瓷顶层上表面的距离 D_1 等裂纹特征信息。

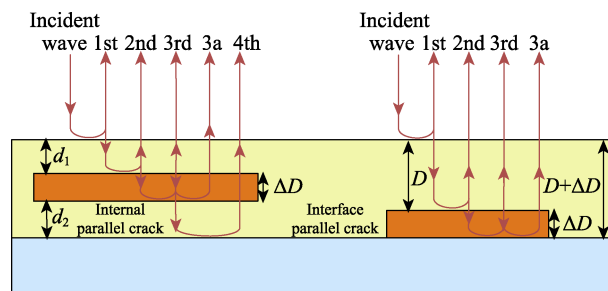


图5 热障涂层内部预制的内部平行裂纹和界面平行裂纹示意图

Fig.5 Schematic diagram of prefabricated internal parallel and interface parallel cracks inside thermal barrier coatings

2 结果及分析

图6所示为内部平行裂纹试样滤波前后信号波形，结合图5，可建立用于计算裂纹上端厚度 d_1 的数学模型，如式(7)所示：

$$d_1 = \frac{c\Delta t_1}{2} \quad (7)$$

同样，结合图5可知，裂纹宽度 ΔD 理论上可根据反射峰2和3间的时间差，按照式(8)所示的数学模型进行计算。

$$\Delta D = \frac{c\Delta t_2}{2} \quad (8)$$

图6所示反射峰2和3的强度都相对较大，并且二者会发生相互叠加干扰。由于反射峰2和3上的自身波形在时域上都具有一定的宽度，加之涂层自身色散效应的影响，当裂纹宽度 ΔD 较大时，反射峰2和3在时域上离得较远，二者互相叠加干扰较小；随着裂纹宽度的减小，二者互相叠加干扰也随即越来越大，所以 Δt_2 的值较实际的裂纹宽度 ΔD 对应的 Δt 会出现偏差，导致 Δt_2 不适合作为裂纹宽度计算的特征参数，并且裂纹宽度越小时，产生的误差越大。 Δt_a 作为裂纹自身内部产生的二次反射，能够精确地表征裂纹自身的宽度信息。但是根据电磁波能量与其振幅的平方成正比，从时域图6a中大致估算可知，反射峰

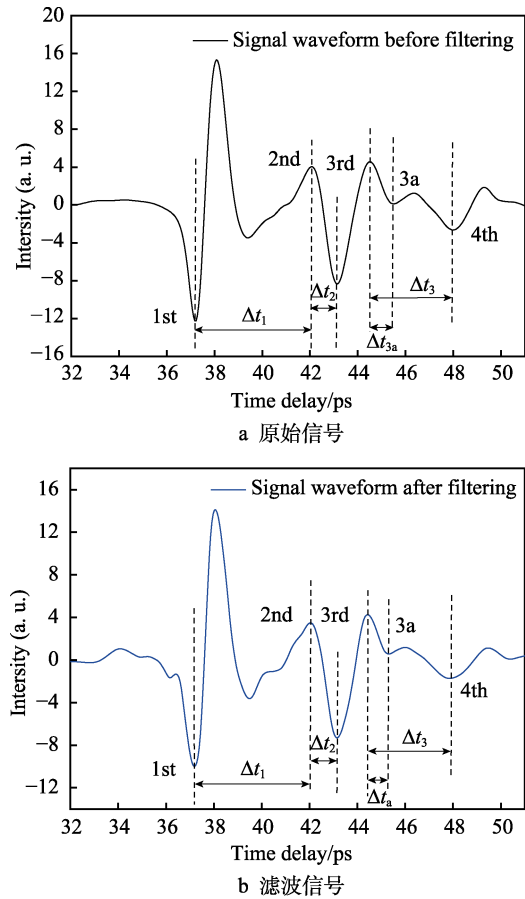


图 6 内部平行裂纹试样滤波前后信号波形
Fig.6 Signal waveform of sample with internal parallel crack before (a) and after (b) filtering

2 和 3 的能量比反射峰 3a 大约数十倍，这一结论也和菲涅尔定律和朗伯比尔定律相一致。简言之即，峰 3a 对峰 3 的影响相对很小，用于 ΔD 计算时产生的误差也小很多。因为图 6 中的内部平行裂纹预制的宽度相比界面平行裂纹宽度较大，所以对于反卷积滤波前后的波形，峰 3a 都比较容易识别， Δt_a 也比较容易提取。

图 7 所示为界面平行裂纹试样滤波前后信号波形。因为界面平行裂纹预制的宽度相比图 6 所示的内部平行裂纹较小，所以此时从原始信号波形中已很难直接提取 3a 对应的特征反射峰。原因在于此时裂纹宽度较小，太赫兹波来回穿梭的光程很短，并且产生的反射峰 3a 本身较弱，很容易湮没在各界面的主反射脉冲和各类噪声信号中，无法跟上面的 130 μm 宽裂纹一样直接从时域图中读取 Δt_a 。本文选取 Hanning 窗函数联合小波降噪反卷积滤波进行寻峰，成功提取裂纹自身专属的反射峰 3a 对应的 Δt_a 。图 7b 所示为通过反卷积滤波获取的 Δt_a ，对比原始信号可知，前者的 Δt_a 几乎无法被直接提取，后者清晰可见，信号特征清晰，可用来进行裂纹宽度表征计算。

表 1 所示为热障涂层未开裂前完整试样的陶瓷顶层厚度的预设值和 THz 测量值的对比，以及图 6 和图 7 中所示的两种裂纹的预制参数与 THz 测量值的对比。由表 1 可知，利用太赫兹不但可以得到开裂

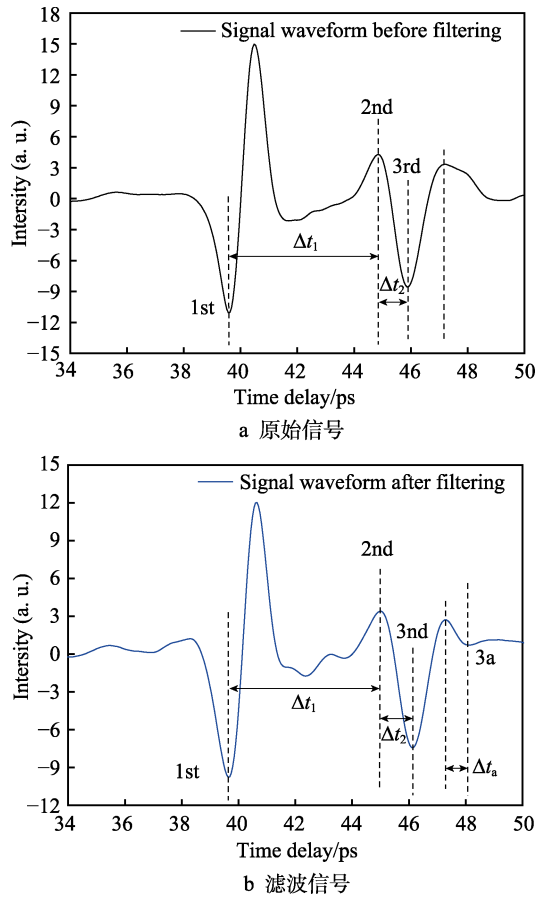


图 7 界面平行裂纹试样滤波前后信号波形
Fig.7 Signal waveform of sample with interface parallel crack (a) before and after (b) filtering

表 1 完整陶瓷层厚度及两种裂纹预制参数与测量值对比
Tab.1 Comparison of the original thickness of the ceramic coatings and the prefabrication parameters of two cracks with the measured values

Samples and parameters (mean)	Internal parallel crack (relative error)	Interface parallel crack (relative error)
Initial thickness $D/\mu\text{m}$	435.79	246.17
Calculated value $D/\mu\text{m}$	443.80 (1.84%)	253.80 (3.10%)
Set value $d_1/\mu\text{m}$	201.57	253.80
Set value $\Delta D/\mu\text{m}$	130	80
$\Delta t_2/\text{ps}$	1.01	0.75
$\Delta t_a/\text{ps}$	0.91	0.59
Calculated value $\Delta D-\Delta t_2/\mu\text{m}$	151.41 (16.47%)	112.88 (41.10%)
Calculated value $\Delta D-\Delta t_a/\mu\text{m}$	135.99 (4.61%)	88.01 (10.01%)
Calculated value $d_1/\mu\text{m}$	207.8	261.41

前完整陶瓷层的厚度，且误差较小，还可以在服役过程中有效地识别平行裂纹的类型（界面或者内部），并计算距离顶层的距离 d_1 以及宽度 ΔD 。将 d_1 与 D 进行对比，当 $d_1 < D$ 时，裂纹类型为内部平行裂纹，当 $d_1 \approx D$ 时，裂纹为界面平行裂纹。对比不同裂纹宽

度时的太赫兹时域波形,当裂纹宽度较大时,利用 Δt_2 进行宽度计算出现的误差相比 Δt_a 较大,但仍在相对可接受范围内,并且反卷积处理前后的波形中 Δt_a 对应的反射峰都较易于提取。而当裂纹宽度较小时,利用 Δt_2 进行宽度计算偏差较大,且此时 Δt_a 难以分辨,利用反卷积滤波可以较为有效地分辨和提取 Δt_a 作为裂纹宽度计算的特征时间,达到有效降低测量误差的目的。

本文研究结果表明,THz无损检测技术可以作为热障涂层平行裂纹的有效检测手段,其展现出的对陶瓷材料良好的穿透能力,较高的测量精度,友好的人体安全性能,以及优异的非接触、无损伤在线监测能力,都可以很好地满足实际工程测量需求,有望成为未来评价航空发动机热端部件表面热障涂层结构完整性和服役寿命的重要手段和有效方法。

3 结论

1) 利用反射式太赫兹时域光谱系统分别获取服役前完整试样和含有平行裂纹的热障涂层的时域谱图,可以提取得到各涂层和裂纹缺陷各界面的特征反射峰,用于建立完整涂层厚度和缺陷规格参数计算的数学模型,进行分析对比后得到最优计算特征参数。

2) 通过提取反射峰1和反射峰2的时间间隔 Δt_1 ,可计算得到裂纹上端距涂层表面预制值 d_1 用于判断平行裂纹的类型。当 $d_1 < D$ 时,裂纹为内部平行裂纹,而当 $d_1 \approx D$ 时,裂纹为界面平行裂纹。

3) 针对宽度较大的裂纹,利用峰2和峰3的时间间隔 Δt_2 进行 ΔD 的计算时,较裂纹内部二次反射的时间间隔 Δt_a 引起的误差大,但结算结果尚可接受,此时是否进行反卷积滤波处理 Δt_a 都比较容易提取。针对宽度较小的裂纹,利用 Δt_2 进行 ΔD 的计算时,较 Δt_a 引起的误差大很多,且在原始波形中 Δt_a 难以提取,此时使用窗函数联合小波降噪反卷积滤波可以有效提取裂纹特征时间间隔 Δt_a ,降低 ΔD 的计算误差。

参考文献:

- [1] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.
- [2] NICHOLLS J R. Advances in coating design for high-performance gas turbines[J]. MRS bulletin, 2003, 28(9): 659-670.
- [3] 杨丽, 谭明, 周文峰, 等. 航空发动机涡轮叶片热障涂层冲蚀试验装置的研制[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 48-56.
YANG Li, TAN Ming, ZHOU Wen-feng, et al. Development of erosion equipment for turbine blade with thermal barrier coatings in aeroengine[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(3): 48-56.
- [4] 朱晨, 于建海, 郭亚飞, 等. 航空发动机热障涂层存在的问题及其发展方向[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 13-19.
ZHU Chen, YU Jian-hai, GUO Ya-fei, et al. Problems of aircraft engine thermal barrier coating and its developing direction[J]. Surface technology, 2016, 45(1): 13-19.
- [5] KUMAR V, BALASUBRAMANIAN K. Progress update on failure mechanisms of advanced thermal barrier coatings: A review[J]. Progress in organic coatings, 2016, 90: 54-82.
- [6] 杨丽, 周益春, 齐莎莎. 热障涂层的冲蚀破坏机理研究进展[J]. 力学进展, 2013, 42(6): 704-721.
YANG Li, ZHOU Yi-chun, QI Sha-sha. Research progress in erosion mechanisms of thermal barrier coatings[J]. Advances in mechanics, 2013, 42(6): 704-721.
- [7] 俞泽新, 于景业, 吴良敏, 等. 无冷却喷涂工艺对其制备的热障涂层的裂纹系统和寿命的影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(10): 55-58.
YU Ze-xin, YU Jing-ye, WU Liang-min, et al. Effect of uncooled spraying process on crack system and life of thermal barrier coatings[J]. Transactions of the China welding institution, 2016, 37(10): 55-58.
- [8] AHMADIAN S, JORDAN E H. Explanation of the effect of rapid cycling on oxidation, rumpling, microcracking and lifetime of air plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface and coatings technology, 2014, 244(15): 109-116.
- [9] 廖红星, 宋鹏, 周会会, 等. 陶瓷层与界面孔隙率对热障涂层寿命及其失效机制的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 33(8): 1785-1793.
LIAO Hong-xing, SONG Peng, ZHOU Hui-hui, et al. Effect of porosity of ceramic-coats and interface on lifetime and failure mechanism of thermal barrier coating[J]. Acta materiae compositae sinica, 2015, 33(8): 1785-1793.
- [10] 董会, 姚建洮, 李霄, 等. 传统等离子喷涂热障涂层的裂纹扩展行为[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(1): 158-162.
DONG Hui, YAO Jian-tao, LI Xiao, et al. State-of-art research on crack propagation behavior in traditional atmospheric plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. Journal of materials science and engineering, 2018, 36(1): 158-162.
- [11] 陈和兴, 周克崧, 金展鹏. 等离子喷涂热障涂层失效机理的研究[J]. 广东有色金属学报, 2002, 12(2): 116-119.
CHEN He-xing, ZHOU Ke-song, JIN Zhan-peng. Study of failure mechanisms of thermal barrier coatings by plasma spraying[J]. Journal of Guangdong non-ferrous metals, 2002, 12(2): 116-119.
- [12] 徐惠彬, 宫声凯, 陈立强, 等. 热、力耦合作用下热障涂层的失效机制[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(10): 919-923.
XU Hui-bin, GONG Sheng-kai, CHEN Li-qiang, et al. Failure process of thermal barrier coatings under thermal and mechanical loading[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(10): 919-923.
- [13] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010, 22(6): 703-707.
YAO Jian-quan. Introduction of THz-wave and its appli-

- cations[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (natural science edition), 2010, 22(6): 703-707.
- [14] ZHONG S. Progress in terahertz nondestructive testing: A review[J]. Frontiers of mechanical engineering, 2018(3): 1-9.
- [15] FUKUCHI T, FUSE N, OKADA M, et al. Measurement of refractive index and thickness of topcoat of thermal barrier coating by reflection measurement of terahertz waves[J]. Electronics and communications in Japan, 2013, 96(12): 37-45.
- [16] 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.
- [17] CHEN C C, LEE D J, POLLOCK T, et al. Pulsed-terahertz reflectometry for health monitoring of ceramic thermal barrier coatings[J]. Optics express, 2010, 18(4): 3477-3486.
- [18] WATANABE M, KURODA S, YAMAWAKI H, et al. Terahertz dielectric properties of plasma-sprayed thermal-barrier coatings[J]. Surface and coatings technology, 2011, 205(19): 4620-4626.
- [19] YE D, WANG W, HUANG J, et al. Nondestructive interface morphology characterization of thermal barrier coatings using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Coatings, 2019, 9(2): 89.
- [20] FLETCHER J R, SWIFT G P, DAI D C, et al. Pulsed terahertz signal reconstruction[J]. Journal of applied physics, 2007, 102(11): 113105.
- [21] CHEN Y, HUANG S, PICKWELL-MACPHERSON E. Frequency-wavelet domain deconvolution for terahertz reflection imaging and spectroscopy[J]. Optics express, 2010, 18(2): 1177-1190.
- [22] DONG J, LOCQUET A, CITRIN D S. Enhanced terahertz imaging of small forced delamination in woven glass fibre-reinforced composites with wavelet de-noising[J]. Journal of infrared millimeter and terahertz waves, 2016, 37(3): 289-301.

(上接第 60 页)

- [50] ZHENG Y H, LI X N, CHENG X T, et al. Ni-V(or Cr) Co-addition Cu alloy films with high stability and low resistivity[J]. Materials chemistry and physics, 2018, 205: 253-260.
- [51] ZHANG C, TIAN H, HAO C, et al. First-principles calculations of elastic moduli of Ti-Mo-Nb alloys using a cluster-plus-glue-atom model for stable solid solutions[J]. Journal of materials science, 2013, 48(8): 3138-3146.
- [52] ZHANG J, WANG Q, WANG Y M, et al. Effect of heat treatment on the highly corrosion-resistant $\text{Cu}_{70}\text{Ni}_{27.7}\text{Fe}_{2.3}$ alloy[J]. Journal of alloys and compounds, 2010, 505(2): 505-509.
- [53] LI H, ZHAO Y, LI X, et al. Electrical resistivity interpretation of ternary Cu-Ni-Mo alloys using a cluster-based short-range-order structural model[J]. Journal of physics D: Applied physics, 2015, 49(3): 35306.
- [54] TAKEUCHI A, INOUE A. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element[J]. Materials transactions, 2005, 46(12): 2817-2829.
- [55] ALMAZOUZI A, MACHT M, NAUNDORF V, et al. Diffusion of iron and nickel in single-crystalline copper[J]. Physical review B, 1996, 54(2): 857.
- [56] ALMAZOUZI A, MACHT M P, NAUNDORF V, et al. Diffusion of manganese, chromium, and titanium in single crystalline copper[J]. Physica status solidi A, 1998, 167(1): 15-28.
- [57] HOSHINO K, IJIMA Y, HIRANO K. Diffusion of vanadium, chromium, and manganese in copper[J]. Metallurgical transactions A, 1977, 8(3): 469-472.
- [58] VILJOEN E C, Du PLESSIS J, SWART H C, et al. Sn bulk-to-surface diffusion in a Cu(111)(Sn) single crystal[J]. Surface science, 1995, 342(1-3): 1-10.
- [59] 葛永能. 块体 Zr 基非晶合金过冷液相区中变形及扩散连接性能研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2010.
- GE Yong-neng. Superplastic formation and diffusion behavior of a Zr-based bulk metallic glass in the supercooled liquid region[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2010.
- [60] LI X N, LIU L J, ZHANG X Y, et al. Barrierless Cu-Ni-Mo interconnect films with high thermal stability against silicide formation[J]. Journal of electronic materials, 2012, 41(12): 3447-3452.
- [61] LI X, DING J, WANG M, et al. Application of cluster-plus-glue-atom model to barrierless Cu-Ni-Ti and Cu-Ni-Ta films[J]. Journal of vacuum science & technology A: Vacuum, surfaces, and films, 2014, 32(6): 61510.
- [62] LI X N, ZHAO L R, LI Z, et al. Barrierless Cu-Ni-Nb thin films on silicon with high thermal stability and low electrical resistivity[J]. Journal of materials research, 2013, 28(24): 3367-3373.
- [63] LI X N, WANG M, ZHAO L R, et al. Thermal stability of barrierless Cu-Ni-Sn films[J]. Applied surface science, 2014, 297: 89-94.
- [64] ZHENG Y, LI X, CHENG X, et al. Enhanced thermal stability of Cu alloy films by strong interaction between Ni and Zr(or Fe)[J]. Journal of physics D: Applied physics, 2018, 51(13): 135304.
- [65] LI X N, LIU M, ZHENG Y H, et al. Addition of strong interaction element Fe(or Sn) to improve the stability of solid solution Cu(Ge) film[J]. Surface and coatings technology, 2017, 321: 328-335.