

引文格式:张政浩,黄异,钟舜聪,等.基于稀疏分解的热障涂层TGO厚度太赫兹计算方法[J].航空制造技术,2024,67(22):96-101.
ZHANG Zhenghao, HUANG Yi, ZHONG Shuncong, et al. Terahertz calculation method for TGO thickness in thermal barrier coatings based on sparse decomposition[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(22): 96-101.

基于稀疏分解的热障涂层 TGO 厚度太赫兹计算方法*

张政浩^{1,2},黄异^{1,2},钟舜聪^{1,2},庄彩虹³,陈志雄³,黄永林^{1,2},刘鑫财³

- (1. 福州大学,福州 350108;
2. 福州大学福建省太赫兹功能器件与智能传感重点实验室,福州 350108;
3. 福建龙溪轴承(集团)股份有限公司,漳州 363005)

[摘要] 热障涂层(Thermal barrier coatings, TBCs)中热生长氧化物(Thermally grown oxide, TGO)的生长容易引发涂层内热失配应力和热氧化应力,是导致陶瓷层剥落失效的重要原因。多孔陶瓷材料对太赫兹波的强吸收、环境噪声和系统振荡等问题导致现有太赫兹时域光谱技术难以准确测量早期 TGO 厚度,因此提出基于稀疏分解的 TGO 厚度太赫兹计算方法。根据太赫兹脉冲和噪声信号特点,构建过完备原子库,从原子库中寻找最佳原子并对信号分解重构,在此基础上计算信号的飞行时间增长来确定 TGO 厚度。结果表明,该方法能准确计算 TBCs 中自然生长的 TGO 厚度,绝对误差为 0.28 μm ,可满足实际工程的应用需求。

关键词:热障涂层(TBCs);太赫兹时域光谱;热生长氧化物(TGO);飞行时间;稀疏分解

Terahertz Calculation Method for TGO Thickness in Thermal Barrier Coatings Based on Sparse Decomposition

ZHANG Zhenghao^{1,2}, HUANG Yi^{1,2}, ZHONG Shuncong^{1,2}, ZHUANG Caihong³,
CHEN Zhixiong³, HUANG Yonglin^{1,2}, LIU Xincai³

- (1. Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Terahertz Functional Devices and Intelligent Sensing,
Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
3. Fujian Longxi Bearing (Group) Co., Ltd., Zhangzhou 363005, China)

[ABSTRACT] Thermal mismatch and thermal oxidation stress caused by generation of thermally grown oxide (TGO) in thermal barrier coatings (TBCs) are the main reasons for spalling failure of ceramic coating. Most terahertz time-domain spectroscopy methods have trouble correctly measuring early TGO thickness due to the significant absorption of porous ceramic material to terahertz radiation, external noise, and system oscillation. Therefore, a sparse decomposition-based TGO thickness calculation method through terahertz technique is proposed. A complete atom library is structured based on the characteristics of the terahertz pulse and noise signal. The best atom is searched in the atomic library, and the signal is decomposed and reconstructed. On this basis, the increment of time-of-flight of signal is computed to determine the TGO thickness. The results verified the proposed method can accurately calculate the thickness of naturally grown TGO in TBCs, with an absolute error of 0.28 μm , meeting the requirement of practical engineering application.

Keywords: Thermal barrier coatings (TBCs); Terahertz time-domain spectroscopy; Thermally grown oxide (TGO); Time-of-flight; Sparse decomposition

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.22.096

* 基金项目:国家自然科学基金项目(52275096);福建省技术创新重点攻关及产业化项目(2022G021);福建省自然科学基金项目(2022J01071);福建省中青年教育科研项目(JAT210006)。

热障涂层(TBCs)是一种由陶瓷层、金属粘结层和合金基底层构成的先进复合材料体系,被广泛应用于航空发动机和船舶燃气轮机等热工装备中^[1]。TBCs具有耐高温、抗腐蚀和高隔热等优异性能,可以增强基底合金的抗高温氧化腐蚀能力,提高设备的工作温度和热效率,是热端部件的关键材料。在热循环服役过程中,陶瓷层和金属粘结层之间将生长出一层薄(厚度 $<10\ \mu\text{m}$)的热生长氧化物(TGO),会引发TBCs的热失配应力和热氧化应力,容易导致层间界面及其附近萌生裂纹及陶瓷层的开裂脱落^[2-3]。TGO被认为是引起TBCs失效的最关键原因,因此在TGO生长初期对其厚度进行监测,对TBCs的寿命预测和热工装备的结构健康监测至关重要。

众多学者采用多种检测技术对TBCs进行无损检测研究。Dou等^[4]采用超声技术检测TBCs厚度,通过复超声反射系数测量得到的厚度相对误差小于9.1%。杨丽等^[5]采用声发射技术实时监测TBCs的裂纹萌生和演化过程,发现表面裂纹、剪切型界面裂纹、张开型界面裂纹及基底塑性变形的声发射信号主频分别为0.21 MHz、0.29 MHz、0.44 MHz和0.15 MHz。陈棣湘等^[6]研制出TBCs平面阵列式电磁/电容复合传感器,其中电磁检测和电容检测单元对涂层厚度的检测灵敏度分别为 $0.1\ \Omega/\text{mm}$ 和 $15\ \text{pF}/\text{mm}$ 。Zhang等^[7]采用YAG:Ce³⁺荧光压电光谱技术表征TBCs的内应力,所提出的Ce³⁺传感介质灵敏度为 $4.48\ \text{cm}^{-1}/\text{MPa}$ 。敖波等^[8]采用聚焦离子束-扫描电子显微镜对TBCs进行三维成像,分辨率可达20 nm,并分析真实TGO三维结构和柱间空隙对TBCs中热应力的影响。虽然这些技术在TBCs的无损检测中已有部分应用,但超声、电磁/电容技术的检测精度有限,声发射、压电光谱技术无法检测涂层厚度,聚焦离子束需要对样品进行轰击,因此难以实现对TBCs厚度的精确无损测量。

太赫兹时域光谱技术对非金属材料具有良好的穿透性,可进行非接触检测并具有高精度,因此在TBCs及其他涂层材料的无损检测中崭露头角^[9-11]。叶东东等^[12]在TBCs中预制平行裂纹,采用汉宁窗-小波分析方法对信号进行处理,计算得到陶瓷层厚度和裂纹宽度的相对误差分别为1.84%和4.61%。Waddie等^[13]提出一种正入射太赫兹反射技术测量TBCs的厚度和光学双折射率,厚度计算结果的相对误差小于4%。曹丙花等^[14]建立了太赫兹波测量多层样品厚度的理论模型,提出自适应教与学优化算法,测量得到陶瓷层厚度的最大标准差为 $1.7\ \mu\text{m}$ 。Chen等^[15]通过扫描电子显微镜(SEM)研究热循环后TGO厚度与太赫兹时域信号反射脉冲的关系,发现TGO厚度与飞行时间(Time-of-Flight, ToF)成正增长关系。但实际检测时,太赫兹波在传播过程中受水蒸气、陶瓷材料吸收和界面反射等影响,导致其信号衰减严重,

反射特征极其微弱,因此难以测量早期TGO的厚度。

针对以上问题,本文提出一种基于稀疏分解的热障涂层TGO厚度太赫兹计算方法。首先针对TBCs的太赫兹信号波形特点,构建了以调制高斯窗函数构成的Gabor过完备原子库;然后从原子库中选出与待分解信号最为匹配的原子,并从信号中减去该分解信号在最佳原子上的分量,完成一步分解;经过迭代后,由选择出的最佳原子进行信号重构,并通过信号的ToF增长计算TGO厚度。本文通过构建解决太赫兹微弱特征提取问题的噪声去除及特征增强方法,实现热循环后热障涂层TGO厚度的精确计算。

1 稀疏分解算法原理

1.1 基于匹配追踪的信号稀疏分解

匹配追踪(Matching pursuit, MP)是稀疏分解中的一种迭代贪婪算法,在每一次的迭代过程中从原子库中选择最能匹配信号结构特征的一个原子(也称为最佳原子),从而逐渐逼近信号,完成对信号的稀疏表示。原始太赫兹信号 f 中不仅包含有用的样本信号 f_s ,同时也存在试验过程中的环境噪声及系统振荡波形所形成的综合噪声信号 f_n 。因为这些噪声信号没有明显的规律,且其结构特征也不同,因此通过建立过完备原子库来表示样本信号,从而去除噪声信号。设 $D=\{g_r\}_{r\in\Gamma}$ 是用于信号稀疏分解的过完备原子库,其中 g_r 是由参数组 r 定义的原子, Γ 为参数组 r 的集合。

从原子库中选取与样本信号结构最为相似的原子信号,在分解过程中信号分解为在最佳原子上的分量(或投影)和剩余残差两部分,即

$$f = \langle f, g_{r_0} \rangle g_{r_0} + R_1 f \quad (1)$$

式中, $\langle f, g_{r_0} \rangle g_{r_0}$ 是信号 f 在最佳原子 g_{r_0} 上的分量或投影; $\langle f, g_{r_0} \rangle$ 是信号 f 与原子 g_{r_0} 的内积; $R_1 f$ 表示最佳原子对原信号进行最佳匹配后的剩余残差。对剩余残差不断进行同样的分解,得到

$$R_1 f = \langle R_1 f, g_{r_1} \rangle g_{r_1} + R_2 f \quad (2)$$

式中, $R_2 f$ 为信号第二次分解后的剩余残差。MP算法是一个迭代过程,通过从原子库中选取与第 k 次分解的剩余残差信号 $R_k f$ 最匹配的原子,完成对信号的分解。经过 k 次迭代后,剩余残差为

$$R_{k-1} f = \langle R_{k-1} f, g_{r_{k-1}} \rangle g_{r_{k-1}} + R_k f \quad (3)$$

而原始信号最终可以表示为

$$f = \sum_{k=0}^{m-1} \langle R_k f, g_{r_k} \rangle g_{r_k} + R_m f \quad (4)$$

式中, $R_m f$ 为噪声信号, m 为总分解次数,这样就可以通过

分离噪声信号提取出最能代表实际信号特征的有用信号。

构造过完备原子库是 MP 算法中最核心的问题。由于高斯函数比较符合太赫兹信号的脉冲波形特征,因此选用经过调制的高斯窗函数构成 Gabor 原子库,即

$$g_r(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} e^{-\pi \frac{(t-u)^2}{s}} \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

式中, s 为尺度伸缩因子; u 为位移因子; ω 为原子角频率; φ 为原子相位; 由这 4 个时频参数确定原子波形。此外, t 为信号的时间序列。

1.2 基于 ToF 增长的 TGO 厚度计算

反射模式太赫兹时域波形的厚度计算公式^[16]为

$$\begin{cases} d_c = c\Delta t_1 \cos \theta / 2n_c \\ n_a \sin \alpha = n_c \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中, d_c 为陶瓷层厚度; c 为光速; Δt_1 是空气 / 陶瓷反射波和陶瓷 / 金属层反射波之间的信号延迟; n_c 为陶瓷层的折射率; n_a 为空气层的折射率; α 为太赫兹波从空气到陶瓷层的入射角; θ 为太赫兹波的折射角。

热循环服役后,自然生长的 TGO 厚度计算公式为

$$\begin{cases} d_T = c(\Delta t_2 - \Delta t_1) \cos \beta / 2n_T \\ n_c \sin \theta = n_T \sin \beta \end{cases} \quad (7)$$

式中, d_T 为 TGO 层的厚度; Δt_2 为经过热循环后的时间延迟; n_T 为 TGO 层的折射率; β 为太赫兹波从陶瓷层到 TGO 层的反射角。

受喷涂工艺影响,实际 TBCs 样品不同位置的陶瓷层厚度不一致,而且在热失配应力和 TGO 热氧化应力下,陶瓷层和金属粘结层的厚度及轮廓的不一致性进一步加剧,因此采集涂层检测区域的每个点位信号后,采用平均 ToF 和平均厚度表征 TBCs 的整体状况,厚度计算流程如图 1 所示。

2 试验及结果分析

2.1 热循环测试试验

为了验证所提出方法的准确性,对 TBCs 样品进行热循环测试试验。样品的基底层为镍基合金块(牌号 DZ125),金属粘结层为镍基合金粉(牌号 TSNi05-01)经大气等离子喷涂制得,陶瓷层由 8% 的 Y_2O_3 稳定 ZrO_2 (牌号 KF-231)喷涂制得。试验中,首先采用太赫兹时域光谱系统(TeraView, Terapulse 4000)对样品的监测区域(尺寸为 $9.2 \text{ mm} \times 18.0 \text{ mm}$)进行扫描,步长为 0.2 mm ,如图 2 所示。随后对样品端面进行打磨抛光,采用 SEM 观测涂层端面形貌,并采用 SEM 系统自带的标尺功能测量涂层厚度。为减少打磨抛光在热循环中对端面附近 TGO 生长演化的影响,采用耐高温胶对端面进行涂覆固化。耐高温胶主要成分为硅酸铝,整体热

膨胀系数与陶瓷接近,最高工作温度可达 $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ 。之后将样品放入试验电炉中进行加热保温,以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率将温度从 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热到 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 20 h 后,取出样品并自然冷却。对冷却后的样品采集太赫兹时域信号后,去除其端面的耐高温胶并进行打磨抛光,然后再次采用 SEM 进行厚度检测。

2.2 结果分析与讨论

未加热样品的端面形貌和涂层厚度结果如图 3 所示,可知样品的陶瓷层平均厚度为 $388.25 \text{ } \mu\text{m}$,同时还可以看出陶瓷层的外表面和内部层间界凹凸不平,主要是由喷涂加工工艺及材料粒度造成的。太赫兹参考信号

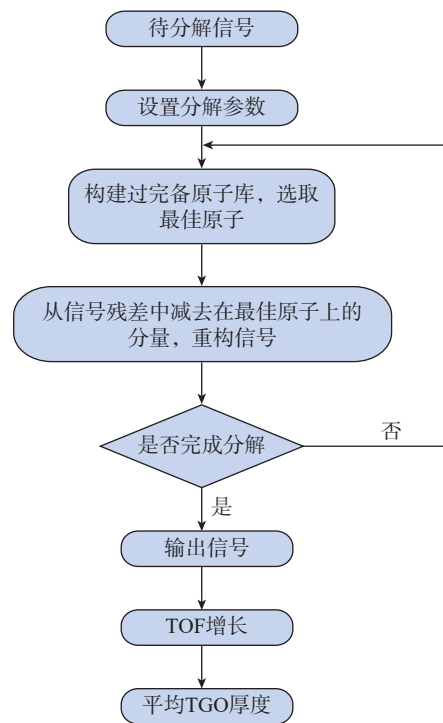


图 1 平均 TGO 厚度计算流程图

Fig.1 Calculation flow chart of average TGO thickness

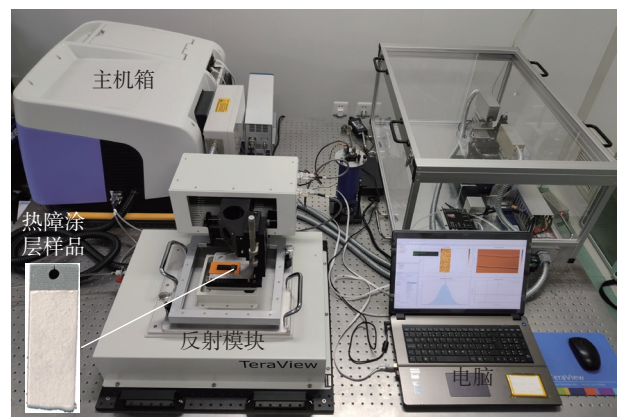


图 2 太赫兹时域光谱系统

Fig.2 Terahertz time-domain spectroscopy system

(空气/金属界面的反射信号)和样品经过 60 h 热循环后的试验信号如图 4 所示。可知,参考信号中空气/金属界面的反射波形特征非常明显,峰值为 3.03;而试验信号中空气/陶瓷界面的反射波形峰值有所下降,为 1.59;TGO/金属粘结层的反射波特征波形非常细微,其波谷峰值仅为 -0.07,波峰已基本不可见,被噪声掩盖。造成这一现象的主要原因是陶瓷材料为多孔介质,在太赫兹波传播过程中可进行散射和吸收,造成太赫兹波在传播时峰值急速衰减。经陶瓷传播的太赫兹波中 TGO/金属粘结层反射特征微弱,同时还受到环境噪声及系统振荡波形的干扰,使得波形特征的分辨更加困难,难以准确计算太赫兹信号的 ToF 和样品涂层厚度。

分别采用移动平均滤波、小波软阈值、基于双高斯滤波器的反卷积和稀疏分解方法对样品的试验信号进行处理,结果如图 5 所示。相较于未处理信号,经过移动平均滤波的信号更加光滑,曲线“毛刺”较少,但干扰谐波依然存在,同时信号的整体幅值有所降低,峰值仅为 0.75,移动平均滤波虽然可去除环境噪声,但是无法去除振荡干扰波形,信号幅值的降低导致 TGO/金属粘结层的反射特征波形更加难以分辨。小波软阈值消噪(采用 sym4 小波,层数 5)后的信号同样比较光滑,且其幅值没有降低,表明小波软阈值法在去除环境噪声时可

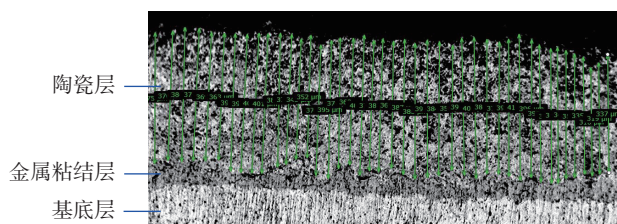
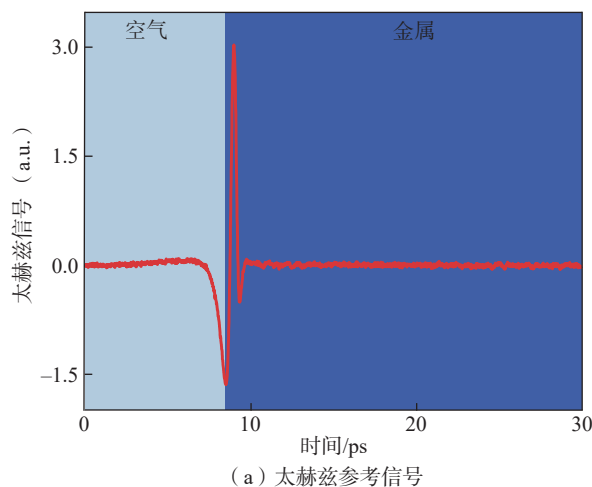


图 3 样品的端面形貌和涂层厚度

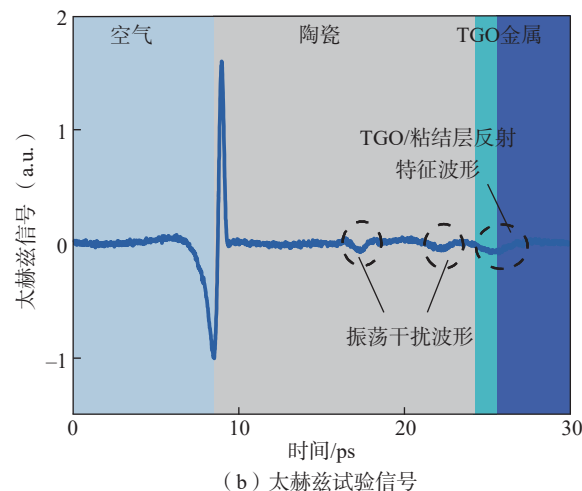
Fig.3 Edge morphology and coating thickness of the sample



(a) 太赫兹参考信号

以保持原本的信号特征,但也无法去除振荡干扰波形。经反卷积后,可看到试验信号的空气/陶瓷界面反射波形和 TGO/金属粘结层界面的反射波形被显著增强了,信号峰值可达 2.05,原本并不突出的 TGO/金属粘结层界面的反射波形也被增强,但经过反卷积后的信号波形向右进行相移,且 TGO/金属粘结层界面的反射特征波形相移程度更大,导致 ToF 的计算误差更大。经过稀疏分解后的信号,除反射特征波形外,其余曲线比较光滑,有效去除了环境噪声及振荡干扰波形,同时特征反射波形的相位也没有发生变化,不会在 ToF 及厚度的计算中引入新误差。稀疏分解可有效去除干扰谐波的原因是太赫兹反射波形符合所构建的 Gabor 原子波形特征,太赫兹反射波形为入射信号的相干信号,而噪声和干扰谐波为非相干信号。Gabor 原子波形根据太赫兹入射波形而构建,在太赫兹信号稀疏分解过程中,符合其特征的波形被保留下来,不符合其特征的波形被去除。由于陶瓷材料对太赫兹波的强吸收,致使稀疏分解后信号在 TGO 处的反射波形特征较为微弱,但仍符合 Gabor 原子波形,因此可被用于后续 ToF 的计算。

纯氧化锆在 1170 °C 时会发生四方相→单斜相的转变,而试验中热循环温度设置为 1100 °C,且 8% Y_2O_3 及其他氧化物的掺杂会使陶瓷各相保持稳定^[17-18]。为方便计算, TBCs 经热循环后的陶瓷层厚度变化可忽略不计。TGO 的主要成分为 Al_2O_3 、 $(Cr, Al)_2O_3$ 、 $(Ni, Co)(Cr, Al)_2O_4$ 等尖晶石结构混合氧化物,其中,纯净 Al_2O_3 晶体的折射率为 1.76。Fattinger 等^[19]发现晶体状 Al_2O_3 是双折射晶体,在寻常光中的折射率为 3.07,在非常光中的折射率为 3.41。在此基础上, Rutz 等^[20]制备了宏观各向同性的多晶 Al_2O_3 ,测量得其折射率为 3.17。本文采取 3.17 为 TGO 的折射率,通过未加热前



(b) 太赫兹试验信号

图 4 太赫兹参考信号与样品试验信号的对比

Fig.4 Comparison of terahertz reference signal and experimental signal of the sample

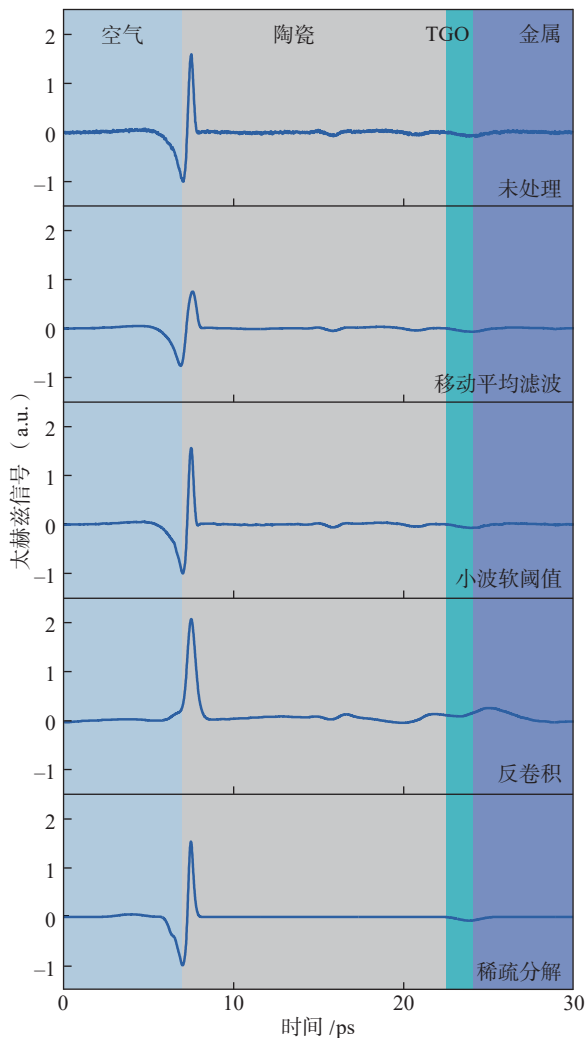


图5 不同方法处理后的太赫兹试验信号
Fig.5 Terahertz experimental signals processed by different methods

样品的平均 ToF 计算得到陶瓷层的折射率为 6.43。采用不同方法处理试验信号,计算热循环后样品的平均 ToF,并对样品的 TGO 厚度进行求解,结果如图 6 所示。原始试验信号的 ToF 为 17.15 ps,经过移动平均滤波和小波软阈值消噪后信号的 ToF 分别为 17.10 ps 和 16.89 ps,表明这两种方法对噪声有一定的去除效果,减小了计算误差;反卷积法处理后信号的 ToF 为 17.48 ps,稀疏分解后信号的 ToF 为 16.86 ps。可知,反卷积法虽然可有效提取信号的波形特征,但由于产生了 TGO/金属粘结层反射特征波形相移,因此其计算结果偏大。

采用 SEM 测得热循环 60 h 后样品的平均 TGO 厚度为 4.99 μm ,原始信号的厚度计算结果为 18.51 μm ,经过移动平均滤波、小波软阈值、反卷积和稀疏分解信号的厚度计算结果分别为 16.21 μm 、6.62 μm 、34.22 μm 、4.71 μm 。其中,反卷积的计算结果与真实值偏差最大,

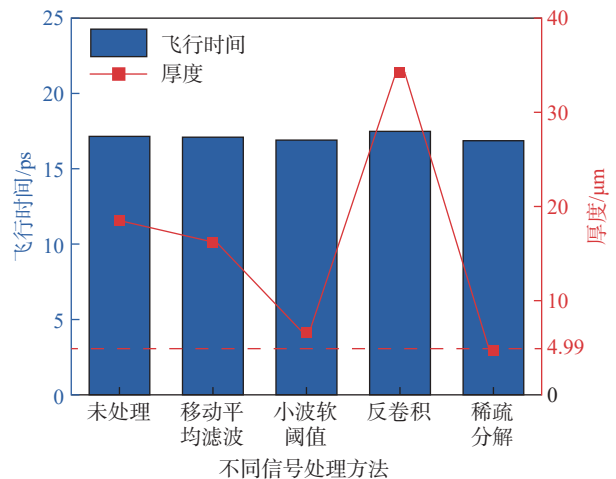


图6 不同方法的 ToF 和厚度计算结果
Fig.6 Results of ToF and thickness calculated by different methods

绝对误差为 29.23 μm ,稀疏分解的绝对误差最小,为 0.28 μm ,表明稀疏分解后的信号计算结果与 SEM 测量的真实值最接近,误差最小,证明本文所提出的方法可以有效去除环境噪声与振荡波形的干扰,提取 TGO/金属粘结层的反射波形特征,精确计算 TGO 的涂层厚度。

随着 TBCs 热振次数的增加,残余应力和 TGO 均发生变化,并且相互耦合、相互影响。残余应力的方向和大小影响 TGO 的生长,而 TGO 的厚度及界面形貌是残余应力的关键影响因素。如何在太赫兹波信号中对二者的变化进行解耦,是未来 TBCs 太赫兹无损检测的重要研究方向之一。Wang^[21]和 Kang^[22]等采用课题组自搭建的试样拉伸及检测系统对应力状态进行表征,发现基于应力-光学定律的折射率变化将会引起太赫兹波形的相位变化,同时介质的厚度变化也将改变光程差引起的相位和幅值变化。张旭^[23]研究了应力-光学效应和泊松效应对光程变化的影响,发现二者的共同作用项可忽略不计,对于单个影响因素引发的太赫兹波变化,可以通过幅值变化(介质损耗引起)来确定介质的厚度变化,从而确定介质厚度变化引起的太赫兹波相位变化量,最终确定折射率变化导致的相位变化。上述研究为太赫兹信号中残余应力和 TGO 变化的解耦提供了思路。

3 结论

针对太赫兹波在陶瓷材料传播过程中的严重衰减,以及环境噪声、振荡波形的严重干扰导致特征波形难以辨别的问题,基于稀疏分解提出了热障涂层(TBCs)中热生长氧化物(TGO)的厚度太赫兹计算方法,构建了完备 Gabor 原子库对信号进行稀疏分解,从而精确计算飞行时间(Time-of-Flight, ToF)的增长并确定热循

环后样品的 TGO 厚度。相较于移动平均滤波、小波软阈值和基于双高斯滤波器的反卷积法,本文所提方法在保持信号幅值的同时,有效削弱了环境噪声和振荡波形的干扰,使 TGO/金属粘结层的反射波形特征清晰可辨。在此基础上,通过太赫兹信号 ToF 增长计算样品的 TGO 厚度,与实测结果的绝对误差仅为 0.28 μm ,表明基于稀疏分解的太赫兹计算方法能够准确地对热障涂层的 TGO 厚度进行无损检测。精确的 TGO 厚度计算不仅可以为 TBCs 热氧化应力分析提供新方法,对 TBCs 和热工装备的结构健康监测也有一定意义。

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] 周益春, 刘奇星, 杨丽, 等. 热障涂层的破坏机理与寿命预测[J]. *固体力学学报*, 2010, 31(5): 504–531.
- ZHOU Yichun, LIU Qixing, YANG Li, et al. Failure mechanisms and life prediction of thermal barrier coatings[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2010, 31(5): 504–531.
- [3] 叶东东, 王卫泽. 热障涂层太赫兹无损检测技术研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(10): 126–137, 197.
- YE Dongdong, WANG Weize. Research progress in terahertz non-destructive testing of thermal barrier coatings[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(10): 126–137, 197.
- [4] DOU P, ZOU L S, WU T H, et al. Simultaneous measurement of thickness and sound velocity of porous coatings based on the ultrasonic complex reflection coefficient[J]. *NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, 2022, 131: 102683.
- [5] 杨丽, 周益春, 朱旺. 热障涂层失效的声发射实时表征技术研究进展[J]. *中国材料进展*, 2020, 39(11): 878–896.
- YANG Li, ZHOU Yichun, ZHU Wang. Research progress in the real-time acoustic emission characterization of failure in thermal barrier coatings[J]. *Materials China*, 2020, 39(11): 878–896.
- [6] 陈棣湘, 任远, 王伟. 热障涂层电磁/电容复合检测技术研究[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(14): 41–47.
- CHEN Dixiang, REN Yuan, WANG Wei. Research on electromagnetic/capacitive composite testing method of thermal barrier coatings[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(14): 41–47.
- [7] ZHANG S J, ZHANG Y H, WANG Z, et al. YAG : Ce^{3+} piezo-spectroscopy: A high-sensitive method used for stress characterization of thermal barrier coating[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2022, 19(5): 2623–2631.
- [8] 敖波, 邬冠华. 涡轮叶片热障涂层三维成像研究进展[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(4): 20–27.
- AO Bo, WU Guanhua. Research progress on three-dimensional imaging of thermal barrier coatings for turbine blade[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(4): 20–27.
- [9] FERGUSON B, ZHANG X C. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26–33.
- [10] ZHONG S C. Progress in terahertz nondestructive testing: A review[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019, 14(3): 273–281.
- [11] HUANG Y, ZHONG S C, SHI T T, et al. Terahertz plasmonic phase-jump manipulator for liquid sensing[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 3011–3021.
- [12] 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 Dongdong, WANG Weize, ZHOU Haiting, et al. Parallel crack monitoring of thermal barrier coatings based on terahertz technology[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(5): 91–97.
- [13] WADDIE A J, SCHEMMELE P J, CHALK C, et al. Terahertz optical thickness and birefringence measurement for thermal barrier coating defect location[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31535–31552.
- [14] 曹丙花, 郑德栋, 范孟豹, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的多层涂层高效可靠测厚方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 127–137.
- CAO Binghua, ZHENG Dedong, FAN Mengbao, et al. Efficient and reliable thickness measurement method for multilayer coatings based on terahertz time-domain spectroscopy technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 127–137.
- [15] 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.
- [16] PICKWELL E, WALLACE V P, COLE B E, et al. A comparison of terahertz pulsed imaging with transmission microradiography for depth measurement of enamel demineralisation in vitro[J]. *Caries Research*, 2007, 41(1): 49–55.
- [17] LUGHI V, CLARKE D. Transformation of electron-beam physical vapor-deposited 8 wt% yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 88(9): 2552–2558.
- [18] 王华仁. 热喷涂氧化钇稳定的氧化锆相退火时的变化[J]. *国外金属热处理*, 2004, 25(6): 24–27.
- WANG Huaren. Changes of thermal sprayed yttria stabilized zirconia during annealing[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2004, 25(6): 24–27.
- [19] FATTINGER C, GRISCHKOWSKY D. Observation of electromagnetic shock waves from propagating surface-dipole distributions[J]. *Physical Review Letters*, 1989, 62(25): 2961–2964.
- [20] RUTZ F, KOCH M, MICELE L, et al. Ceramic dielectric mirrors for the terahertz range[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(31): 8070–8073.
- [21] WANG Z, ZHANG Y, LU N, et al. Measurement of stress optic coefficient for thermal barrier coating based on terahertz time-domain spectrum[J]. *Coatings*, 2021, 11(10): 1265.
- [22] KANG K, DU Y F, WANG S B, et al. Full-field stress measuring method based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2021, 29(24): 40205–40213.
- [23] 张旭. 基于多频太赫兹波平面应力测量方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- ZHANG Xu. Method of plane stress measurement based on multi-frequency terahertz spectroscopy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

通讯作者: 钟舜聪, 教授, 博士, 主要研究方向为智能传感与诊断、光学与太赫兹系统、结构健康监测、无损检测与评估、信号/成像处理以及诊断与预测的模式识别。

(责编 向阳)