

采用太赫兹时域光谱技术的高精度 热障涂层测厚方法

何普, 赵纪元

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对标准试块法测量热障涂层厚度需要制作标准试块导致成本高、测量工艺复杂、无法适应热障涂层服役后折射率变化等问题,提出了采用太赫兹时域光谱技术的高精度热障涂层测厚方法。首先,根据太赫兹波在热障涂层中的传播特性建立了热障涂层太赫兹波传播模型,通过模型可以得到太赫兹检测信号回波数量和回波相位对应的变化关系;然后,根据菲涅尔定律和太赫兹检测信号前 3 次回波之间的作用关系建立了折射率计算模型;最后,根据所得到的折射率和相邻两次回波时间差采用飞行时间法求解热障涂层厚度。对所提方法测量热障涂层厚度的可行性和准确性进行了多组实验研究,结果表明:与标准试块法相比,所提方法不需要制作标准试块,仅根据太赫兹检测信号即可同时计算得到热障涂层折射率与厚度,实现了对热障涂层高效、高精度测厚;所提方法测量厚度的相对误差可以达到 1.15%,比标准试块法测量厚度的相对误差降低了 42.5%。

关键词: 热障涂层测厚;无标准试块;太赫兹时域光谱;飞行时间法

中图分类号: TH89 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202206014 **文章编号:** 0253-987X(2022)06-0112-08



OSID 码

High-Precision Thermal Barrier Coating Thickness Measurement Method Using Terahertz Time-Domain Spectroscopy Technology

HE Pu, ZHAO Jiyan

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In terms of the problems of the standard test block method, such as the high cost of making the standard test block, the complicated measurement process, and the inability to adapt to the change of the refractive index of the thermal barrier coating after service, a thermal barrier coating thickness measurement method based on terahertz time-domain spectroscopy is proposed. Firstly, according to the propagation characteristics of terahertz waves in thermal barrier coatings, a terahertz wave propagation model of thermal barrier coatings is established, and the relationship between the number of echoes and the phase of echoes of terahertz detection signals can be obtained through the model. Then, a refractive index calculation model is established according to Fresnel's law and the interaction between the first three echoes of the terahertz detection signal. Finally, according to the obtained refractive index and the time interval between two adjacent echoes, the time-of-flight method is used to calculate the thickness of the thermal barrier coating. The feasibility and accuracy of the proposed method to measure the thickness of thermal barrier coatings are investigated by several groups of experiments. The results show that com-

pared with the standard test block method, the proposed method does not need the making of a standard test block, and the refractive index and thickness of the thermal barrier coating can be calculated at the same time based on the terahertz detection signal, thus realizing the efficient and high-precision thickness measurement of the thermal barrier coating. The relative error of the proposed method can reach 1.15%, which is 42.5% lower than that of the standard test block method.

Keywords: thickness measurement of thermal barrier coating; no standard test block; terahertz time-domain spectroscopy; time of flight method

热障涂层(thermal barrier coatings, TBCs)具有耐高温、防腐蚀、耐磨性能好和导热率低等特点,被广泛应用于航空发动机及燃气轮机中涡轮叶片的热防护,是涡轮叶片的关键技术之一^[1-2]。热障涂层是一种陶瓷涂层,主要结构包括陶瓷层、黏接层及合金基体层,其中陶瓷层的厚度直接影响热障涂层的热障效果^[3-4]。而且在服役过程中,由于热循环载荷、冲刷腐蚀等因素,热障涂层还会减薄甚至脱落,严重时甚至导致涡轮叶片损毁,所以对热障涂层陶瓷厚度的有效检测是无损检测的重要研究内容。

太赫兹波通常是指频率为 0.1 THz~10 THz、波长为 0.03~3 mm 的电磁波。太赫兹波具有相干性、瞬态性和宽频带等突出性能,能够穿透陶瓷、塑料等物质,可实现高精度定量检测且对人体和被检测物无任何损害,使得太赫兹时域光谱技术(terahertz time domain spectroscopy, THz-TDS)在无损检测领域有巨大发展前景。采用 THz-TDS 测量热障涂层厚度的关键问题是准确得到陶瓷层折射率,而陶瓷层的折射率并非定值,Watanabe 等研究发现热障涂层的主要材料钇稳定氧化锆(yttria-stabilised zirconia, YSZ)的折射率与其微观结构有关,折射率分布区间为 4~6,且太赫兹波频率越高材料折射率越大,所以固定的折射率不适用于热障涂层样本厚度测量^[5]。White 等研究使用 THz-TDS 对热障涂层试块进行测厚,首先基于已知的热障涂层厚度反推得到折射率,然后使用 THz-TDS 计算厚度,研究发现当热障涂层折射率取统计平均值 3.73 时,测量结果误差可以达到 2%,虽然获得了较高的精度但需要制作标准试块测量折射率^[6]。Fukuchi 等通过频谱提取太赫兹信号频域特征,同时获取热障涂层的折射率和信号飞行时间,利用该方法测量得到的热障涂层厚度相对误差可以达到约 30 μm ,但由于热障涂层厚度一般在 500 μm 以下,因此相对误差较大难以满足检测需求^[7]。曹丙花等建立太赫兹波测量多层涂层厚度理论模型,采用教与学优

化算法将理论模型拟合检测信号,从而得到被检测涂层的厚度、折射率等各项参数,厚度测量相对误差可以达到 1.5% 以内,但是单次实验需要计算约 50 s^[8]。综上所述,目前热障涂层的太赫兹测厚方法在计算准确率、计算效率等方面难以兼顾,而同时满足高效与准确在太赫兹测厚技术的工程应用上具有重要价值,因此研究高效且准确的热障涂层太赫兹测厚方法具有重要意义。

时域有限差分方法(finite difference time domain, FDTD)是对电磁场中电场和磁场分量在时间和空间上采用交替采样的离散方式,将 Maxwell 方程组转化成差分方程,在时间轴上求解空间电磁场,便于计算不规则、不均匀材料的电磁辐射相关问题,目前已广泛应用于太赫兹仿真。Lopato 等使用 FDTD 方法仿真了太赫兹波在单一介电结构中的传播情况^[9]。Tu 等利用 FDTD 方法对太赫兹波在船舶防护涂层中的传播机理进行了研究^[10]。周桐宇等使用 FDTD 方法对玻璃纤维、橡胶等材料太赫兹无损检测机理进行了研究^[11-12]。

本文在前人研究的基础上,以光电导天线太赫兹时域光谱仪工作原理为基础,考虑太赫兹波偏振方向对折射率计算的影响,提出一种热障涂层厚度计算方法,相对于传统太赫兹测厚方法,本方法无需制作任何标准试块测量热障涂层材料在太赫兹波段的折射率。然后引入 FDTD 方法建模仿真热障涂层太赫兹检测过程,验证模型的理论正确性,同时采用太赫兹时域光谱系统对本计算模型进行实验研究,验证本方法的实际计算效果并进行分析优化。

1 热障涂层测厚原理

1.1 太赫兹波传播路径

热障涂层由陶瓷层、黏接层、合金基底层 3 部分组成,其中陶瓷层材料一般为 YSZ,黏接层材料一般为 MCrAlY 金属^[1]。入射热障涂层的太赫兹波可在空气与陶瓷层界面发生反射和透射,透射后可

继续传播至黏接层。由于金属导电性良好对电磁波近乎全反射,透射的太赫兹波在陶瓷层与黏接层界面发生近乎全反射,因此太赫兹检测信号无法传播至合金基层,仅在陶瓷层内传播。本文以垂直入射太赫兹波为检测信号,仅考虑太赫兹波实际作用部分,忽略热障涂层的合金基层,太赫兹波传播路径如图 1 所示。

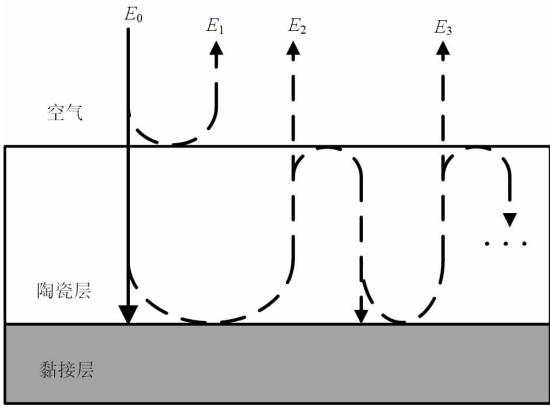


图 1 热障涂层太赫兹波传播路径

Fig. 1 Terahertz wave propagation path in thermal barrier coatings

图 1 中 E_0 为入射太赫兹波,在空气与陶瓷层界面发生反射和透射,反射波形成第 1 次回波 E_1 ;透射波在黏接层发生全反射传播至陶瓷层与空气界面,透射部分形成第 2 次回波 E_2 ;反射部分重新传播至黏接层重复上述过程,形成第 3 次回波 E_3 及后续更高次回波。4 次及以上的高次回波在实际应用中受到涂层厚度、传播衰减等因素影响难以检测到,因此实际应用中主要采用前 3 次回波 E_1 、 E_2 、 E_3 。

1.2 太赫兹波相位变化分析

太赫兹波从空气垂直入射热障涂层,实质为从光疏介质入射光密介质。根据菲涅耳定律,透射波与入射波同相。对反射波而言,当太赫兹波为垂直偏振波即 S 波时,会发生反相,当太赫兹波为水平偏振波即 P 波时,与入射波同相。在涡轮叶片合金基底发生反射后的太赫兹回波为从光密介质入射光疏介质,透射波与入射波同相,S 波的反射波与入射波同相,P 波的反射波与入射波反相。太赫兹前 3 次回波相对于入射波相位变化关系如表 1 所示。

1.3 测厚原理

在太赫兹波垂直入射条件下,热障涂层厚度计算的数学模型为

$$d = \frac{c\Delta t}{2n} \tag{1}$$

式中: d 为陶瓷层厚度; c 为光速; Δt 为两次回波的时间间隔; n 为陶瓷材料的折射率。

表 1 太赫兹前 3 次回波相位变化关系

Table 1 Phase change relationship of the first three terahertz echoes

太赫兹回波次序	回波与入射波相位关系	
	S 波	P 波
1	反相	同相
2	反相	同相
3	同相	反相

在测量厚度时, Δt 与 n 为必需的两个参数,两次回波间隔可以通过 THz-TDS 直接测得。陶瓷层的折射率未知,而且该值与热障涂层陶瓷层结构有关,为区间值^[5]。传统方法通过制造标准试块样本,在已知热障涂层厚度的情况下反推折射率,从而获得热障涂层陶瓷材料在太赫兹波段的折射率,折射率计算方法为

$$n = \frac{c\Delta t}{2d} \tag{2}$$

该方法费时费力,检测成本较高,而且在服役过程中热障涂层结构也会因温度等服役环境因素而变化,从而导致折射率变化,固定的折射率难以适配热障涂层不同工况、不同服役阶段的折射率。针对该问题本文基于太赫兹时域信号直接提取热障涂层折射率,无需制作任何标准试块即可计算得到热障涂层厚度。

2 热障涂层厚度计算方法

2.1 光电导天线检测太赫兹波原理

光电导天线技术(photoconductive antenna, PCA)是激励和检测太赫兹波的主流技术之一^[13],也是当前多数商用太赫兹时域光谱仪采用的技术方案。光电导天线由制作在半导体基片上的两个电极组成,太赫兹信号示意图如图 2 所示。

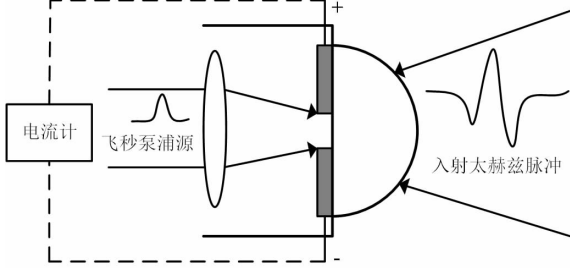


图 2 光电导天线检测太赫兹信号示意图

Fig. 2 Schematic diagram of photoconductive antenna detecting terahertz signal

光电导天线检测太赫兹信号的原理为:将飞秒泵浦光发射到探测天线电极上并产生偏置电场,太赫兹波入射到光电导天线上形成载流子,载流子在偏置电场作用下向两级定向移动形成电流,通过电流计等装置测量电流大小即可获得太赫兹电场时域变化曲线,该电流强度与太赫兹场的强度正相关,因此太赫兹时域信号幅值直接反映了太赫兹场强大小。

2.2 热障涂层折射率提取方法

设垂直入射太赫兹波复数形式电场方程为

$$E_0 = A_0 \exp[i(z - \omega t)] \quad (3)$$

式中: E_0 为入射太赫兹波电场; A_0 为太赫兹波电场振幅; z 为初始空间位置; ω 为角频率; t 为时间。假设入射太赫兹波为 S 波,根据菲涅耳定律有

$$r_{01} = -\frac{n_1 - n_0}{n_0 + n_1} = -\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \quad (4)$$

$$r_{10} = -\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} = -\frac{1 - n_1}{n_1 + 1} \quad (5)$$

$$t_{01} = \frac{2n_0}{n_0 + n_1} = \frac{2}{n_1 + 1} \quad (6)$$

$$t_{10} = \frac{2n_1}{n_0 + n_1} = \frac{2n_1}{n_1 + 1} \quad (7)$$

式中: n_0 为空气的折射率,近似为 1; n_1 为陶瓷层的折射率; r_{01} 、 t_{01} 为由空气层入射陶瓷层的反射率和透射率; r_{10} 、 t_{10} 为由陶瓷层入射空气层的反射率和透射率。第 1、第 2、第 3 次回波传播过程则可分别表示为

$$E_1 = -E_0 r_{01} \quad (8)$$

$$E_2 = -E_0 t_{01} r_{12} t_{10} \quad (9)$$

$$E_3 = E_0 t_{01} r_{12}^2 t_{10}^2 r_{10} t_{10} \quad (10)$$

式中: r_{12} 为从陶瓷层入射金属层的反射率,近似为 1; t_1 为陶瓷层内太赫兹波一个回程的透射损耗;正、负号代表太赫兹波电场在分界面由于半波损失造成相对于入射波的相位变化。通过数学运算消去未知且难以测得的中间量可以得到

$$\frac{E_1 E_3}{E_2^2} = -\frac{r_{01} r_{10}}{t_{01} t_{10}} \quad (11)$$

式(11)左侧视为可通过实验测得的未知量 X ,该值大小与测得太赫兹波信号振幅相关。将式(4)~(7)代入式(11)可得陶瓷层折射率计算表达式

$$n_1 = (2X + 1) \pm \sqrt{(2X + 1)^2 - 1} \quad (12)$$

根据 Maxwell 电磁场理论,物质的折射率为

$$n = \frac{c}{v} \quad (13)$$

式中: v 为电磁波在介质中的传播速度, v 小于光速,则折射率大于 1,可据此筛选式(12)结果。

假设入射太赫兹波为 P 波,在空气与陶瓷层界面处折射率与透射率由式(4)~(7)分别变化为

$$r'_{01} = \frac{n_1 - n_0}{n_0 + n_1} = \frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \quad (14)$$

$$r'_{10} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} = \frac{1 - n_1}{n_1 + 1} \quad (15)$$

$$t'_{01} = \frac{2n_0}{n_0 + n_1} = \frac{2}{n_1 + 1} \quad (16)$$

$$t'_{10} = \frac{2n_1}{n_0 + n_1} = \frac{2n_1}{n_1 + 1} \quad (17)$$

将式(14)~(17)代入式(11)得到当太赫兹波为 P 波时的折射率

$$n'_1 = (2X' + 1) \pm \sqrt{(2X' + 1)^2 - 1} \quad (18)$$

式(18)结果与式(12)结果相同。若将任意偏振方向的太赫兹波视为 S 波与 P 波的矢量合成,则表明本折射率计算方法不受太赫兹波偏振方向影响。

2.3 热障涂层厚度计算方法

热障涂层的测厚数学模型如式(1)所示,将式(12)计算结果代入式(1)可以得到基于太赫兹时域信号的热障涂层厚度计算模型为

$$d = \frac{c \Delta t}{2[(2X + 1) \pm \sqrt{(2X + 1)^2 - 1}]} \quad (19)$$

未知量 Δt 和 X 均可通过单次太赫兹检测信号提取计算得到,无需额外制作标准试块。对于热障涂层而言,陶瓷层材料一般为 YSZ。文献[5]对太赫兹频带 YSZ 材料折射率进行了研究,确定热障涂层 YSZ 材料折射率分布区间为 4~6,按照经验式(19)可取

$$d = \frac{c \Delta t}{2[(2X + 1) + \sqrt{(2X + 1)^2 - 1}]} \quad (20)$$

3 模型 FDTD 仿真验证及分析

FDTD 方法是求解 Maxwell 方程组的时域方法,对电磁场中电磁场分量在时间和空间上采用交替采样的离散方式,将 Maxwell 方程组转化成差分方程,在时间轴上求解空间电磁场。为验证本文热障涂层厚度计算方法,建立热障涂层 FDTD 模型。设定陶瓷层厚度 300 μm ,黏接层为金属材质,对太赫兹波反射率近似为 1,陶瓷层折射率设定为 4。采用 0.1~4 THz 平面波太赫兹源,初始幅值为 1,水平方向为周期性边界条件模拟足够大面积的热障涂层,竖直方向为完全匹配层(PML)边界条件模拟太赫兹波在空间的发散。本文所采用太赫兹源最短波长为 0.075 mm,为保证计算收敛和计算精度,使网格步长小于最短波长的十分之一,所有方向网格步长

取 0.2 μm ,时间步长取 0.19 fs,总计算时长 30 ps。

图 3 显示了太赫兹波经热障涂层反射后接收到的太赫兹信号幅值图,纵坐标表示太赫兹信号振幅大小,横坐标表示时间。在 FDTD 仿真检测信号中,前 3 次回波相位关系符合 1.2 节分析结果,单次回波脉宽约 1.9 ps,各回波之间的飞行时间差约为 7.99 ps,由于有多次反射回波,因此约 25 ps 处可以观察到额外的回波脉冲。将前 3 次回波信号对应峰谷处振幅值共 7 组代入式(12)、(20)中,热障涂层折射率及厚度计算结果如表 2 所示,表中 Δn 、 Δd 分别为 n 、 d 的相对误差。

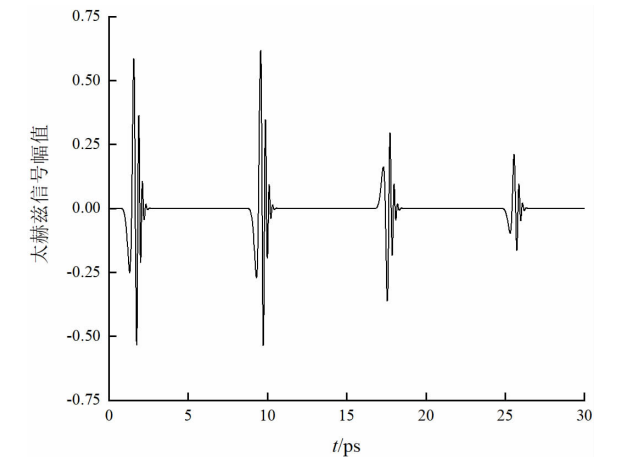


图 3 FDTD 仿真热障涂层检测信号

Fig. 3 Detection signal of thermal barrier coating obtained by FDTD simulation

表 2 基于 FDTD 仿真信号的计算结果
Table 2 Calculation results based on FDTD simulation signals

组序	n	$\Delta n/\%$	$d/\mu\text{m}$	$\Delta d/\%$
1	3.959 5	-1.01	302.48	0.83
2	3.962 2	-0.95	302.27	0.76
3	3.945 5	-1.36	303.55	1.18
4	3.936 1	-1.60	304.28	1.43
5	3.940 9	-1.48	303.91	1.30
6	3.909 5	-2.26	306.35	2.12
7	3.948 4	-1.29	303.33	1.11
平均值	3.943 2	-1.42	303.73	1.24

由计算结果可知,模型折射率计算结果与所设定真值之间最大相对误差-2.26%,平均相对误差-1.42%。模型厚度计算结果与所设定真值之间最大相对误差 2.12%,最大绝对误差 6.35 μm ,平均相对误差 1.24%,平均绝对误差 3.73 μm 。计算结

果基本与设定真值保持一致。并且考虑到存在 FDTD 方法网格划分精度及计算误差带来的影响,本厚度计算方法可正确提取热障涂层折射率并计算厚度。

4 THz-TDS 实验验证及分析

4.1 实验样本与实验系统

为验证本计算方法的实际使用效果,使用流延工艺制作 YSZ 陶瓷样本模拟热障涂层陶瓷层^[14],使用铝合金基板模拟黏接层。YSZ 陶瓷与铝合金基板尺寸相同,尺寸均为 5 cm $\times$ 5 cm,YSZ 陶瓷片厚 0.3 mm,铝合金基板厚 2 mm。

YSZ 陶瓷片表面经过打磨,表面粗糙度轮廓算数平均偏差约为 0.8 μm 。铝合金基板表面经过拉丝,表面粗糙度轮廓算数平均偏差约为 0.8 μm 。将 YSZ 陶瓷片压紧在铝合金基板上并用夹板从边缘固定,较光滑的表面可以尽可能使夹层空气排出,模拟热障涂层陶瓷层、黏接层结构。

本文使用反射式太赫兹时域光谱系统进行数据采集,该系统主要由上位机、接发共线适配探头、飞秒激光器、运动平台等部分组成。运动平台与探头连接实现扫描、对焦等功能,飞秒激光重复频率 80 MHz,发射太赫兹波频率为 0.06~4 THz,聚焦距离 18 mm,时间延迟窗口最高可达 3 200 ps。反射式太赫兹时域光谱系统工作原理如图 4 所示,飞秒激光器产生的激光经激光分束器分为两束,分别为泵浦光和探测光。接发共线适配器内部包含非球面对焦透镜和分束器,可对太赫兹入射波进行聚焦,并将反射波传导至 PCA 探测器。泵浦光射入 PCA 激发器,在偏置电压作用下产生太赫兹波,经聚焦后入射样品;探测光射入 PCA 探测器,通过电流计测量

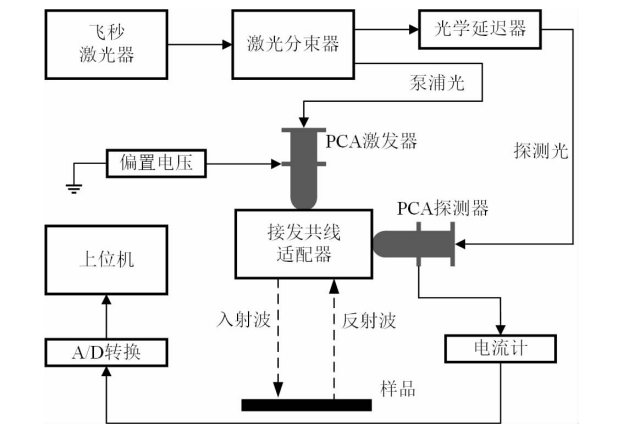


图 4 反射式太赫兹时域光谱系统工作原理

Fig. 4 Working principle of reflective terahertz time domain spectroscopy system

反射波太赫兹电场变化获取信号波形,上位机通过模数(A/D)转换收集太赫兹信号。

4.2 实验结果与误差分析

调整时间延迟窗口至适当值,采集样本太赫兹反射信号共 4 096 个数据点,信号时域波形如图 5 所示。由图 5 可知,太赫兹检测信号的第 1 回波与第 2 回波的相位相同,第 3 回波与第 1、第 2 回波相位相反。3 次回波相位关系与第 1.2 节所述热障涂层中太赫兹波相位变化关系相同,说明本文所用方法正确模拟出了热障涂层结构,陶瓷片与铝合金基板良好接触,没有空气等其他介质干扰。

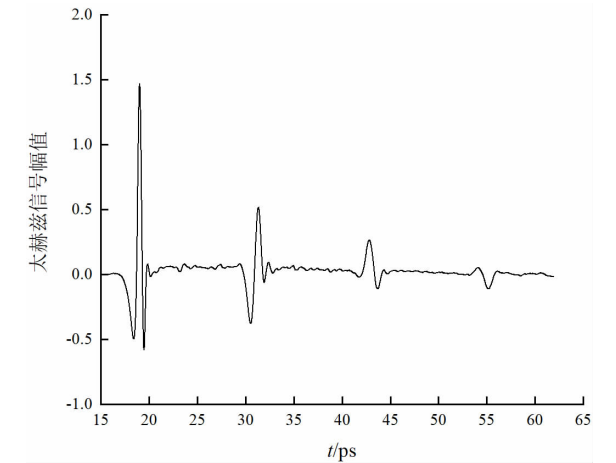


图 5 反射式太赫兹时域光谱系统采集时域信号
Fig. 5 Time domain signals collected by reflective terahertz time domain spectroscopy system

图 5 中太赫兹检测信号两次回波之间间隔时间约为 12.11 ps,将 YSZ 陶瓷厚度与时间间隔代入式(2)以标准试块法得到 YSZ 陶瓷的折射率约为 6.05。将前 3 次回波对应峰谷处信号幅值共 4 组代入式(12)中,计算得到折射率如表 3 所示。

表 3 基于实验采集信号对应峰谷值计算结果
Table 3 Calculation results based on the corresponding peak and valley values of the experimental signal

组序	n	$\Delta n/\%$
1	5.54	-8.43
2	4.16	-31.24
3	24.76	309.26
4	1.53	-74.71

当采用实验信号代入模型进行计算时发现仅第 1 个峰值处有相对精确的计算结果,其余峰值处计算结果误差较大,且第 3 组、第 4 组折射率计算结果误差偏离极大。相较于图 3 所示仿真信号波形,图

5 所示实验信号的第 2 回波与第 3 回波相较于前一回波振幅衰减极为明显,实验信号第 3 回波的第 3、第 4 个峰的幅值衰减至 0.1 以下,显著的衰减导致本方法计算结果产生巨大误差。产生该现象主要原因可能为:①THz-TDS 使用宽带太赫兹信号,不同波段太赫兹波的衰减特性存在差异^[5];②YSZ 材料对太赫兹波的吸收和散射;③材料表面粗糙度对太赫兹波的散射;④在实验环境下大气尤其是水蒸气对太赫兹信号造成的吸收^[15]。受以上因素影响,对应波峰、波谷幅值已难以准确反映太赫兹反射信号多次反射特征,因此采用对应波峰、波谷处幅值进行计算会产生较大误差。

4.3 实验计算方法优化

太赫兹回波可以视为入射太赫兹波的分量,将太赫兹回波的整体振幅均值代入模型计算,通过求解回波整体振幅的平均值,将太赫兹信号衰减、吸收、散射等因素产生的误差减小。

在样本中心位置逐点扫查采集十组数据,扫查步长 0.5 mm。单次太赫兹回波脉宽约 3.39 ps,平均回波间隔 12.112 ps。提取太赫兹波前 3 次回波,计算各回波振幅的均值,将第 1、第 2 和第 3 回波振幅均值代入式(20)。将每组数据的回波时间间隔、YSZ 样本厚度代入式(2)计算得到折射率,进一步可计算得十组数据的折射率平均值为 5.97,将该值作为样本折射率的参考值,优化后的实验模型计算结果如表 4 所示。

表 4 优化后的实验模型计算结果
Table 4 Calculation results of the optimized experimental model

组序	n	$\Delta n/\%$	$d/\mu\text{m}$	$\Delta d/\%$
1	5.89	-1.34	308.24	2.75
2	6.01	0.67	302.29	0.70
3	5.39	-9.72	336.84	12.28
4	6.66	11.56	272.60	-9.13
5	6.39	7.04	284.12	-5.29
6	6.11	2.35	297.14	-0.95
7	5.62	-5.86	323.05	7.68
8	6.24	4.52	290.95	-3.02
9	6.07	1.68	299.10	-0.30
10	5.45	-8.71	333.13	11.04
平均值	5.983	0.22	303.45	1.15

通过本方法计算出的折射率计算误差大小与厚度计算误差大小正相关。其中热障涂层折射率最大相对误差为 11.56%,最小相对误差 0.67%,平均相

对误差 0.22%。计算热障涂层厚度最大绝对误差 36.84 μm , 最大相对误差 12.28%, 最小绝对误差 -0.9 μm , 最小相对误差 -0.30%, 平均绝对误差 3.45 μm , 平均相对误差 1.15%, 计算折射率、厚度的均方根差 (root mean square error, RMSE) 分别为 0.41、20.89。个别计算结果误差偏大, 可能是由于 YSZ 陶瓷内部密度不均匀、存在微气泡等因素导致, 但总体上计算结果与测量参考值基本吻合。

通过采用太赫兹回波平均振幅作为计算参数, 本方法计算的误差大大降低, 说明太赫兹回波的振幅均值比波峰波谷单点振幅能更加准确地反映各太赫兹回波变化关系。对于厚为 300 μm 的 YSZ 样本, 通过积累一定量数据后, 本方法计算平均绝对误差可达 3.45 μm , 平均相对误差可达 1.15%, 相较于文献[6]方法, 相对误差降低了 42.5%, 已经具备一定测量参考价值。

5 结 论

针对热障涂层无损测厚需求, 本文结合光电导天线检测太赫兹波原理, 提出了一种无需制作标准试块即可直接根据太赫兹时域检测信号测量热障涂层厚度的方法。采用 FDTD 方法及太赫兹时域光谱系统进行实验验证, 本计算方法的特点及优势如下。

(1) 从太赫兹信号提取热障涂层折射率。热障涂层的折射率是测量热障涂层厚度必须参数, 通过太赫兹信号直接计算得到折射率, 适应热障涂层服役前后折射率变化, 实现了无样本热障涂层测厚。

(2) 不受太赫兹波偏振方向影响。本方法同时适用于 S 波与 P 波及其他偏振方向的合成波, 无需考虑太赫兹波偏振方向对测量的影响, 本方法具有良好的工程适用性。

(3) 无需复杂信号处理模型。本方法从光电导天线检测太赫兹波原理出发, 直接使用太赫兹时域信号, 无需对信号进行复杂处理, 计算效率较高。

参考文献:

[1] 王博, 刘洋, 王福德, 等. 航空发动机及燃气轮机涡轮叶片热障涂层技术研究及应用 [J]. 航空发动机, 2021, 47(S1): 25-31.
WANG Bo, LIU Yang, WANG Fude, et al. Research and application of thermal barrier coatings for aero-engine and gas turbine blades [J]. Aeroengine, 2021, 47(S1): 25-31.
[2] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展 [J]. 中国材料进展, 2009, 28(9): 18-

26.
GUO Hongbo, GONG Shengkai, XU Huibin. Progress in thermal barrier coatings for advanced aero-engines [J]. Materials China, 2009, 28(9): 18-26.
[3] 赵荻, 安宇龙, 赵晓琴, 等. 不同厚度 8YSZ 热障涂层的结构及性能表征 [J]. 表面技术, 2020, 49(1): 276-284.
ZHAO Di, AN Yulong, ZHAO Xiaoqin, et al. Structure and properties of 8YSZ thermal barrier coatings with different thickness [J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 276-284.
[4] 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.
[5] 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.
[6] WHITE J, FICHTER G, CHERNOVSKY A, et al. Time domain terahertz non-destructive evaluation of aeroturbine blade thermal barrier coatings [J]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1096(1): 434-439.
[7] 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.
[8] 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/OL]. 光学学报 [2021-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.o4.20210709.1609.002.html>.
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/OL]. Acta Optica Sinica [2021-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.o4.20210709.1609.002.html>.
[9] LOPATO P, CHADY T, SIKORA R, et al. Full wave numerical modelling of terahertz systems for non-destructive evaluation of dielectric structures [J]. COMPEL-the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2013, 32(3): 736-749.
[10] TU Wanli, ZHONG Shuncong, SHEN Yaochun, et al. Nondestructive testing of marine protective coat-

- ings using terahertz waves with stationary wavelet transform [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 582-592.
- [11] 周桐宇, 李丽娟, 任姣姣, 等. 基于 FDTD 的玻璃纤维增强复合材料脉冲太赫兹无损检测 [J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 190-198.
- ZHOU Tongyu, LI Lijuan, REN Jiaojiao, et al. Pulsed terahertz nondestructive testing of glass fiber reinforced plastics based on FDTD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 190-198.
- [12] 周桐宇, 李丽娟, 任姣姣, 等. 基于 FDTD 的橡胶粘接质量的脉冲太赫兹检测方法研究 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(1): 36-41.
- ZHOU Tongyu, LI Lijuan, REN Jiaojiao, et al. Simulation study on bonding defects of pulsed terahertz rubber based on finite difference time domain [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 44(1): 36-41.
- [13] 程伟, 王迎新, 赵自然. 光电导太赫兹源新进展 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(6): 597-604.
- CHENG Wei, WANG Yingxin, ZHAO Ziran. New research progress of photoconductive terahertz source [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(6): 597-604.
- [14] 宋斌, 黄月文, 冯超, 等. 5YSZ 陶瓷基体的成型及烧结收缩率调节 [J]. *佛山陶瓷*, 2020, 30(5): 9-13.
- SONG Bin, HUANG Yuewen, FENG Chao, et al. Forming and sinter shrinkage adjustment of 5YSZ ceramic matrix [J]. *Foshan Ceramics*, 2020, 30(5): 9-13.
- [15] 姚建铨, 汪静丽, 钟凯, 等. THz 辐射大气传输研究和展望 [J]. *光电子·激光*, 2010, 21(10): 1582-1588.
- YAO Jianquan, WANG Jingli, ZHONG Kai, et al. Study and outlook of THz radiation atmospheric propagation [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(10): 1582-1588.
- [16] MOHAN S, ODANI N, HOSSAIN M N, et al. Terahertz time of flight spectroscopy as a coating thickness reference method for partial least squares near infrared spectroscopy models [J]. *Analytical Chemistry*, 2020, 92(5): 3658-3665.
- [17] 李迎, 张朝晖, 赵小燕, 等. 非金属涂层缺陷的太赫兹时域谱检测 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(11): 129-136.
- LI Ying, ZHANG Zhaohui, ZHAO Xiaoyan, et al. Terahertz time-domain spectrum detection of non-metallic coating defects [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(11): 129-136.
- [18] 艾夏. 复杂色散介质电磁散射的 FDTD 算法及其改进方法的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [19] TAFLOVE A, UMASHANKAR K R. The finite-difference time-domain (FD-TD) method for electromagnetic scattering and interaction problems [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1987, 1(3): 243-267.
- [20] ZHONG Shuncong. Progress in terahertz nondestructive testing: a review [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019, 14(3): 273-281.
- [21] 孟坤, 李泽仁, 刘乔. 太赫兹波在介质中传播的 FDTD 分析 [J]. *信息与电子工程*, 2011, 9(3): 277-279.
- MENG Kun, LI Zeren, LIU Qiao. FDTD analysis of terahertz pulse traveling in media [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2011, 9(3): 277-279.
- [22] CLARKE D R, PHILLIPS S R. Thermal barrier coating materials [J]. *Materials Today*, 2005, 8(6): 22-29.
- [23] 冯国英, 周寿桓. 波动光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 22-80.
- [24] WADDIE A J, SCHEMMEL 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.
- [25] CHANG Tianying, ZHANG Xiansheng, YANG Chuanfa, et al. Measurement of complex terahertz dielectric properties of polymers using an improved free-space technique [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(4): 045002.
- [26] 刘志刚. 平面电磁波在两种介质表面上的反射与折射 [J]. *北京联合大学学报(自然科学版)*, 2004, 18(1): 32-35.
- LIU Zhigang. Reflection and refraction of the planar electromagnetic wave on the interface between two media [J]. *Journal of Beijing Union University (Natural Sciences)*, 2004, 18(1): 32-35.
- [27] 莫英桂, 苏翼雄, 康慧雯, 等. 漆膜涂层厚度检测方法及其发展趋势 [J]. *现代制造技术与装备*, 2020, 56(10): 123-126.
- MO Yinggui, SU Yixiong, KANG Huiwen, et al. Testing methods and development trend of film coating thickness [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2020, 56(10): 123-126.

(编辑 赵炜 刘杨)