文章编号:1674-8190(2025)06-139-09

基于标准具的涂层厚度高精度检测技术研究

顾健[1],张霁旸[2],雷涛[1],张丹丹[1],任姣姣[1],薛俊文[2],陈奇[2],杨文韬[1]
(1.长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)
(2.长春理工大学 中山研究院,中山 528400)

摘　要: 随着航空航天科技的快速发展,涂层厚度的准确测量显得尤为重要,直接关系到飞行器性能和安全性。针对航空航天领域涂层厚度检测提出一种基于标准具的涂层厚度太赫兹无损检测方法,通过使用石英窗口将材料厚度引起的飞行时间变化转为等效空气厚度引起的折射率变化,实现无需先验知识条件下准确测量复合涂层总厚度及折射率。结果表明:本文方法对单介质材料的厚度测量精度可达3 μm,对涂层材料的厚度测量精度可达5 μm,能够精确获取样品在太赫兹波段的等效折射率。此项技术能有效对复合涂层的厚度和折射率进行高精度无损检测,对航空航天等需要精确涂层厚度控制的领域具有重要的应用价值。

关键词: 涂层;厚度测量;标准具;太赫兹;无损检测
中图分类号: V262.7　　**文献标识码:** A
DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2025.06.16

Research on high precision detection technology of coating thickness based on standard tool

GU Jian[1], ZHANG Jiyang[2], LEI Tao[1], ZHANG Dandan[1], REN Jiaojiao[1], XUE Junwen[2], CHEN Qi[2], YANG Wentao[1]
(1. School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)
(2. Zhongshan Institute, Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528400, China)

Abstract: With the swift advancement of aerospace science and technology, the accurate measurement of coating thickness is particularly important, which is directly related to the performance and safety of aircraft. A terahertz non-destructive test method of coating thickness based on a standard tool is developed for the coating thickness measurement in aerospace field. By using a quartz window, the time-of-flight change caused by material thickness in transformed into the refractive index change caused by equivalent air thickness, the total thickness and refractive index of the composite coating can be accurately measured without prior knowledge. The results show that the thickness measurement accuracy of the method proposed in this paper can reach up to 3 μm for single dielectric material and 5 μm for coating material, also can accurately obtain the equivalent refractive index of the sample in terahertz band. The aforementioned technology can effectively detect the thickness and refractive index of composite coatings with high precision, making it highly valuable for precise coating thickness control applications such as aerospace.

Key words: coating; thickness measurement; standard tool; terahertz; non-destructive test

收稿日期: 2024-05-09;　**修回日期:** 2024-07-31
基金项目: 中山市第九批创新科研团队项目(GXTD2022010)
通信作者: 任姣姣(1988－),女,博士,副教授。E-mail: zimengrenjiao@163.com
引用格式: 顾健,张霁旸,雷涛,等. 基于标准具的涂层厚度高精度检测技术研究[J]. 航空工程进展,2025,16(6):139-147.
GU Jian, ZHANG Jiyang, LEI Tao, et al. Research on high precision detection technology of coating thickness based on standard tool[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(6): 139-147. (in Chinese)

0 引 言

涂层厚度在航空航天工程中具有显著的影响力，是保障飞行器性能和安全的关键因素，涂层能够提供对环境的防护，例如对腐蚀和热影响的抵抗，并且涂层厚度的适当性对飞行器的基本结构性能起着决定性的作用[1]。因此，无损检测（Non-destructive Testing，NDT）在航空航天领域显得至关重要。经典的无损检测技术，如超声波、X射线和红外热像等技术[2]，虽然能够在一定程度上满足检测要求，然而，传统的手段通常受限于航空航天的复杂应用场景及高精度的检测需求[3-4]。太赫兹技术凭借其超低辐射、非破坏性、高分辨率等特点，为涂层厚度检测技术空缺提供了可能的解决方案。脉冲太赫兹无损检测技术是根据多层结构界面间产生的折射、反射引起的电磁性质变化获得界面回波信息来实现厚度及缺陷的检测，对于涂层厚度检测通常采用太赫兹飞行时间技术（THz-TOF）[5-6]，该技术利用不同界面处的太赫兹峰值变化，结合材料的光学特性计算材料厚度。由于太赫兹波宽带特性和高时间分辨率，其可以检测亚毫米甚至微米级的厚度[7]。近年来，利用太赫兹技术解决涂层厚度测量问题的研究工作受到研究者广泛关注，众多研究者致力于提升涂层厚度检测的精度。Yasui等[8]、Izutani等[9]提出了一种非接触测量汽车漆层厚度的方法；Su K等[10]构建了一维电磁模型来描述太赫兹波与物质的相互作用，结合数值拟合方法确定了各层涂层的厚度。伴随研究的深入，涂层厚度太赫兹无损检测的难点也随之显现，即涂层折射率及太赫兹峰值位置的高精度定位。因此，Krimi等[11]开发了一维电磁多层介质中太赫兹传播的仿真模型，并对涂层材料的光学参数和厚度进行了优化，从而实现了对最小厚度为10 μm的涂层检测。

此外，也有研究者通过一些高精度滤波器（例如维纳[12]，双高斯，汉宁[13]等）提取太赫兹峰值，Tu W[14]提出了一种利用基于太赫兹脉冲成像（Terahertz Pulse Imaging，TPI）的神经网络混合信号处理方法提高涂层厚度分辨能力；张洪桢等[15]建立了太赫兹反射信号的多元回归模型，借助差分进化算法计算模型参数及求解样品厚度，能够在涂层折射率未知的情况下进行厚度测量，实现了0.22 μm厚度测量的不确定度，但无法应用于多层涂层结构的厚度测量；Pfeiffer等[16]通过引入额外的距离传感器实现了湿涂层的厚度测量，能够对涂层固化后的厚度进行预测。在对热障涂层（Thermal Barrier Coatings，TBC）的厚度监测方面，Fukuchi等[17]对用于燃气轮机高温部件的热障涂层进行太赫兹厚度测量，其测得的表层厚度与显微镜观察的测量结果相近；Chen等[18]利用太赫兹脉冲技术对不同热暴露时间下的热障涂层厚度变化进行监测，证明了太赫兹技术在热障涂层监测方面的可行性；Sun F等[19]提出了一种由太赫兹信号理论模型驱动的长短时记忆网络（Long Short-Term Memory Network，LSTM）框架自动定位峰值，并用于TBC的折射率和厚度计算；何普等[20]建立了热障涂层太赫兹传播模型，根据涂层界面的多次反射建立折射率求解模型，并利用TOF法计算涂层界面厚度，测量相对误差达到1.15%，且无需制作标准样件。

上述研究方法在提高涂层厚度检测的准确性和可行性方面做出了显著贡献，但是受制于预先知道样件的折射率这一约束，意味着在没有先验知识的实际情况下，这些方法的应用会受到航空航天领域涂层测试场景及测试效率的限制。因此，本文提出一种基于标准具的涂层厚度太赫兹无损检测方法，利用石英窗口将原本的材料厚度引起的飞行时间变化转化为等效空气厚度引起的折射率变化，采用该方法在涂层折射率未知的条件下对复合涂层总厚度及折射率进行测量。

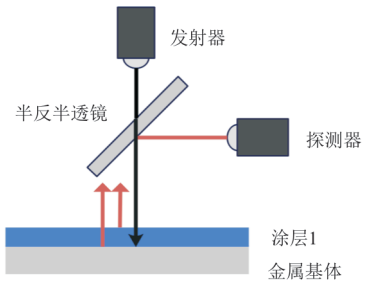
1 原 理

1.1 太赫兹飞行时间厚度检测原理

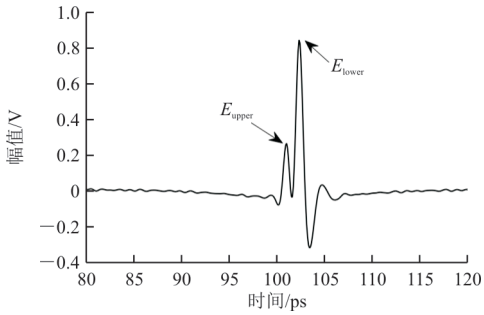
太赫兹时域光谱系统能够同时获得信号幅值和相位信息，太赫兹波穿过材料时会产生相位延迟，在已知材料光学参数的条件下可以得到材料的厚度。

反射式太赫兹涂层厚度测量方法能够对基体不可穿透涂层样品厚度进行测量，厚度检测原理如图1(a)所示。太赫兹发射器产生的太赫兹波垂直入射到涂层表面，并分别在涂层1的上表面发生

反射,并产生第一反射峰。太赫兹波穿透涂层1的表面继续向下传播,在涂层1—金属基体表面反射并产生第二反射峰,由于太赫兹波无法穿透金属基体,因此太赫兹波不再继续向下传播。各界面反射的太赫兹波经半反半透镜反射被探测器接收,产生的时域信号如图1(b)所示。



(a) 反射式厚度测量模型



(b) 反射式太赫兹时域信号

图1　反射式太赫兹厚度检测原理图

Fig. 1　Schematic diagram of reflective terahertz thickness detection

附着于金属基体的单层涂层厚度可由公式(1)计算得到。

$$d=\frac{c\Delta t}{2n_s}=\frac{c(T_{lower}-T_{upper})}{2n_s} \tag{1}$$

式中:n_s为材料在太赫兹波段的折射率;c为真空中光速。

1.2　涂层厚度太赫兹检测技术

传统基于太赫兹TOF法的测厚方式无法同时确定样品厚度及样品折射率,必须事先获取样品折射率信息后才能计算样品厚度。针对此问题,本文设计一种快速的涂层厚度测量装置并提出一种测量方法,能够同时测量涂层的总厚度及折射率,且无需复杂计算。

涂层厚度太赫兹测量装置如图2所示,由高透过率石英片作为窗口材料、金属反射板及固定支架组成,样品放置于石英窗口及金属板之间,太赫兹波E_0垂直石英窗口入射并在各个分界面发生反射和透射。

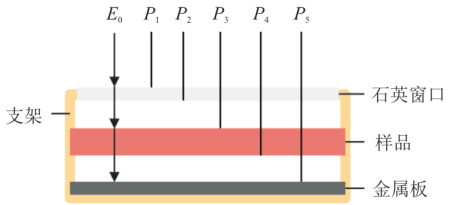
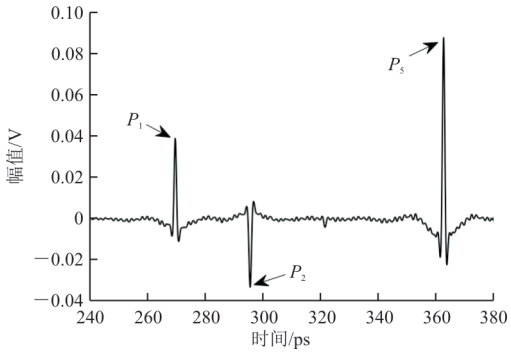


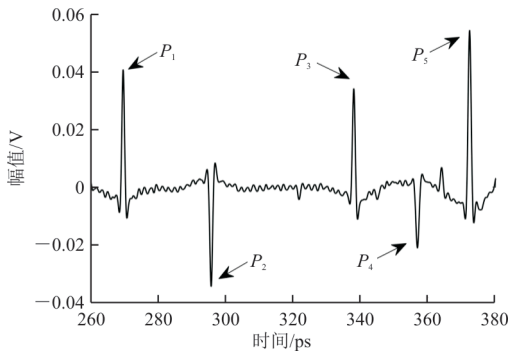
图2　涂层厚度太赫兹测量装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of terahertz measurement device for coating thickness

为了对样品厚度进行测量,首先需要获得未放置样品时的太赫兹信号作为参考信号,如图3(a)所示,其中波峰P_1及P_2为石英窗口上、下表面反射信号,波峰P_5为金属板反射信号。获得参考信号后,再次测量放入样本后的太赫兹时域信号,如图3(b)所示,太赫兹波同样在样品上、下表面产生反射信号P_3、P_4。



(a) 无样品



(b) 有样品

图3　涂层太赫兹时域信号示意图

Fig. 3　Schematic diagram of terahertz time-domain signal of coating

在获取参考信号及样本信号后，参考信号中金属板反射波峰 P_5 与石英窗口下表面反射波峰 P_2 的飞行时间差 Δt_1 可以表示为

$$\Delta t_1 = \frac{2n_a d}{c} \tag{2}$$

式中：n_a 为空气折射率。

同理，样本信号中金属板反射峰 P_5 与石英窗口下表面反射峰 P_2 的飞行时间差 Δt_2 可以表示为

$$\Delta t_2 = \frac{2n_a d_a}{c} + \frac{2n_s d_s}{c} \tag{3}$$

式中：d_s 为样品厚度；n_s 为样品折射率；d_a 为放置样品后石英窗口下表面到金属板上表面的剩余厚度，$d_a = d - d_s$。

太赫兹波在样品中的飞行时间 Δt_3 可以表示为

$$\Delta t_3 = \frac{2n_s d_s}{c} \tag{4}$$

综上所述，样品的厚度可以由公式(5)得到：

$$d_s = \frac{[\Delta t_3 - (\Delta t_2 - \Delta t_1)] \cdot c}{2n_a} \tag{5}$$

则材料的折射率 n_s 为

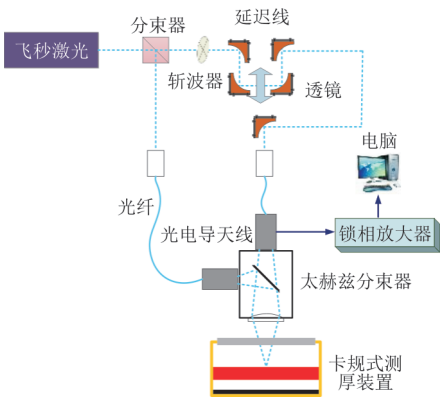
$$n_s = \frac{c \cdot \Delta t_3}{2d_s} \tag{6}$$

由此，可以利用石英窗口在无需预先获得材料折射率的前提下，计算材料的厚度及在太赫兹波段的等效折射率。

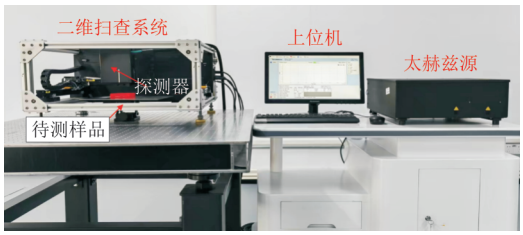
2 实 验

2.1 太赫兹时域光谱系统及涂层测厚装置

本文采用的太赫兹时域光谱检测装置如图 4 所示。



(a) 太赫兹时域光谱系统原理图



(b) 涂层厚度测量系统

图 4 检测系统
Fig. 4 Test system

太赫兹时域光谱系统原理如下：由锁模钛蓝宝石飞秒激光器产生的超快飞秒激光脉冲，通过分束器将其分解为探测脉冲和泵浦脉冲。泵浦脉冲（占激光脉冲能量的 60%）激发光导天线（PCA），然后发射太赫兹辐射。利用计算机控制的机械工作台，通过调节泵浦脉冲与检测脉冲的光程差，对太赫兹信号进行脉冲跟踪和采样。利用二维运动装置实现逐像素点扫描以实现样品各个位置的厚度检测。

2.2 实验样品

为了实现涂层厚度及折射率的检测，本文设计并制作 4 种涂层厚度实验样品，样品设计参数如表 1 所示。

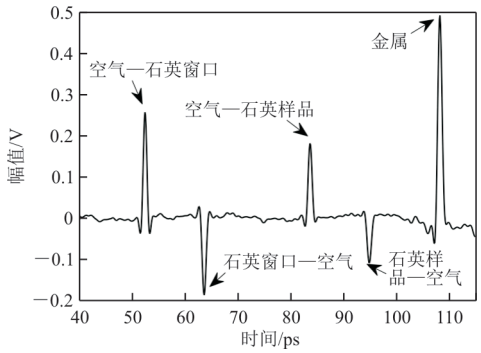
表 1 卡规式检测方法涂层样品设计参数
Table 1 Design parameters of coating samples for gauge detection method

编号	样品尺寸/(mm×mm)	材料	设计厚度/mm
1#	80×80	石英	1.0
2#	80×80	底漆涂层	0.5
		石英基体	1.0
3#	80×80	底漆涂层	0.5
		金属基体	2.0
4#	80×80	面漆涂层	0.5
		底漆涂层	0.5
		金属基体	2.0

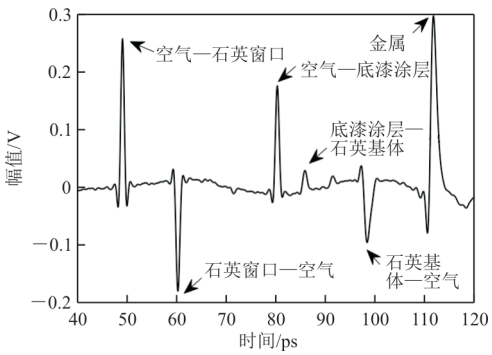
样品尺寸均为 80 mm×80 mm，1#样品为厚度 1.0 mm 的石英单介质测试材料，2#样品在石英基体上喷涂 0.5 mm 的底漆涂层，3#样品在厚度 2.0 mm 的金属基体上喷涂 0.5 mm 的底漆涂层，4#样品在金属基体上喷涂由面漆和底漆组成的 1.0 mm 的复合涂层。

3　结果与分析

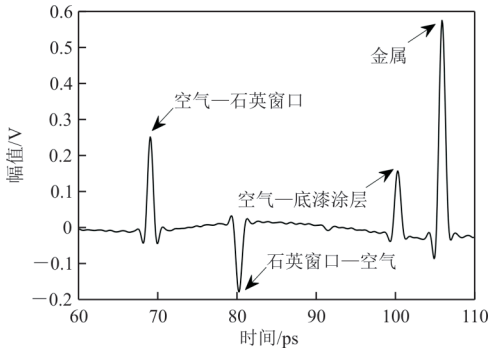
1#样品太赫兹时域信号如图5(a)所示,被测试的石英样品水平放置在石英窗口和金属板之间,在石英窗口—空气界面与金属板界面之间产生了一对太赫兹峰谷信号,它们由石英样件的上、下表面反射而来。2#样品太赫兹时域信号如图5(b)所示,在石英窗口—空气界面与金属板界面之间产生了两个峰值和一个谷值信号。这是由于石英材料折射率约为1.93,底漆涂层折射率为2.07,当太赫兹波从底漆涂层到达石英基体时,从光疏介质进入到光密介质,在太赫兹信号上表现为一个峰值。3#样品太赫兹时域信号如图5(c)所示,在石英窗口—空气界面及金属板界面之间只存在一个峰值信号,由于底漆涂层直接喷涂在金属基体上,太赫兹波从底漆涂层到达金属基体后产生全反射。4#样品太赫兹时域信号如图5(d)所示,在石英窗口—空气界面及金属板界面之间产生了一对太赫兹峰谷信号,由于在金属基体上依次喷涂了底漆涂层和面漆涂层,面漆涂层折射率约为2.33,大于底漆涂层,当太赫兹波从面漆涂层到达底漆涂层时,从光密介质进入到光疏介质,在太赫兹信号上表现为一个谷值。



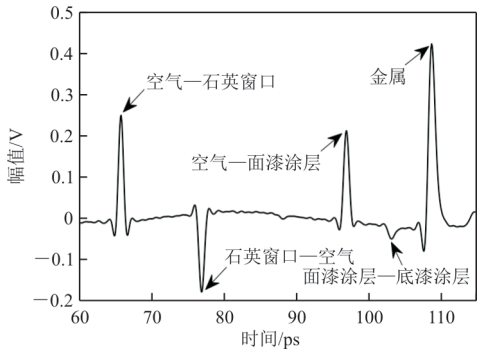
(a) 1#样品



(b) 2#样品



(c) 3#样品



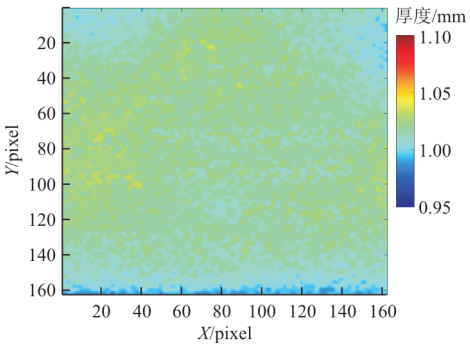
(d) 4#样品

图5　涂层样件太赫兹时域信号

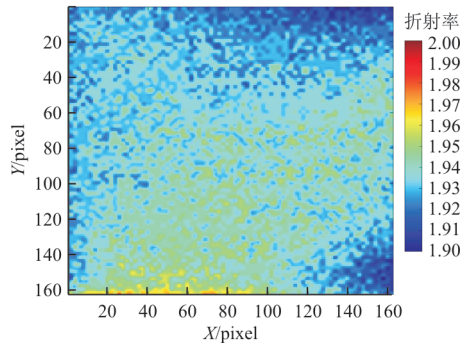
Fig. 5　Terahertz time-domain signal of coated samples

对涂层的厚度和太赫兹波段的等效折射率进行计算并形成样品厚度及等效折射率分布图像,如图6所示,样本厚度的图像中每个像素的值代表该位置的厚度,在样品等效折射率分布图像中,颜色趋向于红色代表厚度或折射率变大,颜色趋向于蓝色代表厚度或折射率变小。

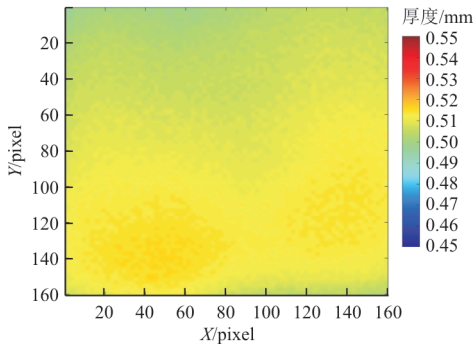
为了对厚度测量的准确性进行估计,本文在样品中随机选取10个不同位置的点并标记在样品基体上,采用千分尺对样品厚度进行测量。



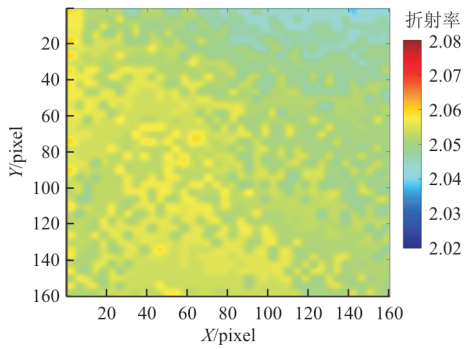
(a) 1#样品厚度



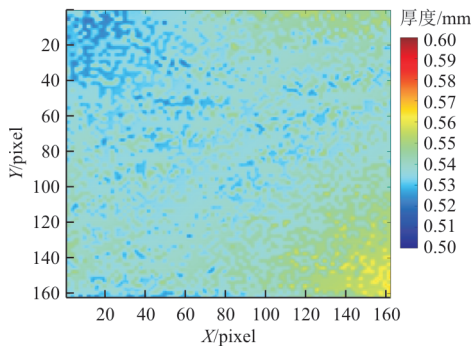
(b) 1#样品折射率



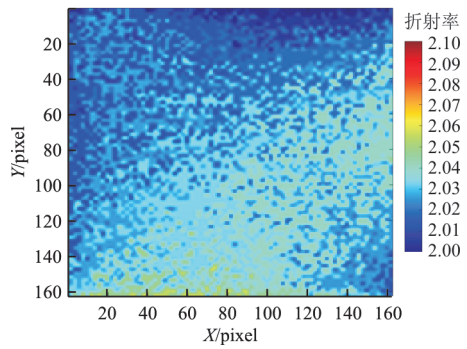
(c) 2#样品厚度



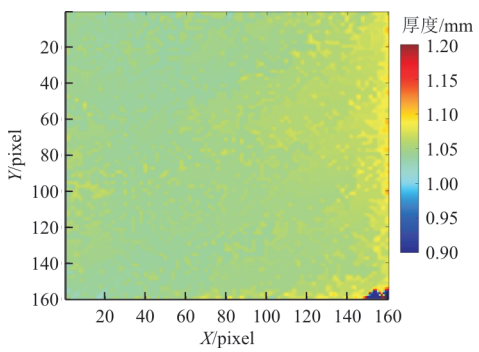
(d) 2#样品折射率



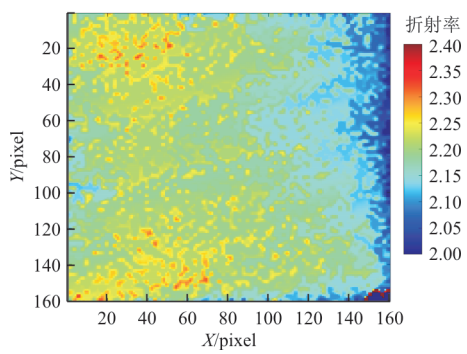
(e) 3#样品厚度



(f) 3#样品折射率



(g) 4#样品厚度



(h) 4#样品折射率

图 6 4 个样品厚度及折射率分布图像

Fig. 6 Four sample thickness and refractive index distribution images

为了避免引入基体带来的厚度误差，在喷涂前，先对基体进行厚度测量，并标记测量位置，然后再进行喷涂，待固化完全后，对标记位置厚度再次进行测量，涂层的厚度即为两次测量的差值，其中 1#样品的平均误差为 0.003、2#样品的平均误差为 0.008、3#样品的平均误差为 0.004、4#样品的平均误差为 0.005。采用平均误差对 10 次测量

结果进行评价,平均误差采用公式(7)进行计算。

$$\Delta=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|x_i-y_i| \tag{7}$$

式中:N为测量点数量;x_i为千分尺测量值;y_i为计算值。

太赫兹卡规式涂层厚度测量结果如表2所示。由于1#样品为单介质的石英材料,表面光滑且均匀,易于测量,因此具有最小的平均误差。其余3个样品可能存在喷涂不均匀等情况,影响厚度测量的结果,平均误差均高于1#样品。由于2#样品的参考基体厚度与喷涂时所用基体厚度存在一定偏差并累积到最后的测量结果中,导致2#样品测量误差偏大。3#和4#样品涂层直接喷涂在金属基体上,不存在上述误差,具有较小的平均误差。4#样品为多层复合涂层,其平均误差受到不同涂层之间界面状态的影响,较单一涂层偏高1.2 μm。本文提出的卡规式涂层厚度太赫兹检测方法可以实现对厚度的精确测量,对于单介质材料厚度测量精度可达3.0 μm,对于涂层材料厚度测量精度最高可达5.0 μm。

表2　两种测量方式厚度测量结果对比

Table 2　Comparison results of two measurement methods

测量点	1#样品		2#样品		3#样品		4#样品	
	计算值/mm	实测值/mm	计算值/mm	实测值/mm	计算值/mm	实测值/mm	计算值/mm	实测值/mm
1	1.001	1.003	0.531	0.522	0.498	0.502	1.012	1.005
2	1.012	1.010	0.528	0.536	0.506	0.509	1.056	1.049
3	1.008	1.009	0.542	0.531	0.512	0.506	1.038	1.041
4	1.014	1.011	0.529	0.536	0.507	0.505	1.022	1.026
5	1.005	1.001	0.537	0.546	0.509	0.512	1.029	1.035
6	1.011	1.006	0.533	0.541	0.499	0.504	1.047	1.046
7	1.015	1.012	0.541	0.537	0.511	0.508	1.065	1.058
8	1.005	1.008	0.528	0.534	0.504	0.509	1.052	1.045
9	1.010	1.007	0.539	0.545	0.510	0.515	1.045	1.052
10	1.006	1.005	0.536	0.543	0.501	0.504	1.050	1.052

本文方法在确定样品厚度的同时,可以计算得出样品在太赫兹波段的等效折射率。透射式太赫兹光谱系统所测得的样品折射率曲线如7所示。取1 THz下样品的折射率作为标准值,用来评估折射率测量的准确性。在该频率下,石英基体的折射率约为1.94,底漆涂层的折射率约为2.07,面漆涂层的折射率约为2.33,面漆—底漆复合涂层的折射率约为2.16。

为了进一步对各样品的折射率进行量化,本文采用均值μ、标准差σ代表样品的折射率及其均匀性,标准差越小表明折射率的波动越小、均匀性越好,反之则均匀性越差。采用误差值对测量结果进行评价,两种测量方法折射率测量结果如表3所示。

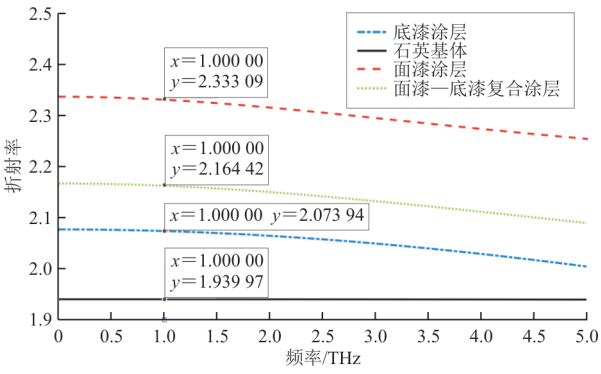


图7　不同样品折射率曲线

Fig. 7　Refractive index curves of different samples

表 3 两种测量方式折射率结果对比

Table 3 Comparison results of refractive index of two measurement methods

样品编号	等效折射率		实际折射率	误差
	均值	方差		
1#	1.935	0.009	1.940	0.005
2#	2.027	0.010	2.074	0.047
3#	2.047	0.007	2.074	0.027
4#	2.166	0.579	2.164	0.002

表3中等效折射率为卡规式太赫兹涂层折射率检测结果,实际折射率为透射式太赫兹光谱系统在1 THz下的折射率检测结果。1#样品的误差值略高于4#样品,但是其方差远小于4#样品,折射率分布均匀,因为1#样品是石英单介质材料,表面均匀,其测量结果最接近实际折射率。2#样品在厚度测量时有累积的偏差,而等效折射率的计算与厚度测量值有关,因此2#样品的误差值较大,但方差很小,折射率分布均匀。3#样品直接喷涂在金属基体上则不存上述问题,折射率误差值较小,方差最小,折射率分布均匀。4#样品为面漆—底漆复合涂层,受不同涂层界面间的状态的影响,方差远大于其他3种样品,折射率分布均匀性较差。本文提出的卡规式涂层厚度太赫兹检测方法可以同时实现对厚度和折射率的精确测量。

4 结 论

1) 本文提出了一种基于标准具的涂层厚度太赫兹无损检测方法,利用石英窗口将原本的材料厚度引起的飞行时间变化转化为等效空气厚度引起的折射率变化,此方法能够在涂层折射率未知的条件下,对复合涂层总厚度及折射率进行精确测量。

2) 在保证石英窗口、涂层样品和基体平行度的条件下,单介质材料厚度测量精度可达3 μm,多层复合涂层材料厚度测量精度最高可达5 μm,对涂层的检测精度达到微米级别。

本文提出的方法能够在实际工业应用中提供高精确度的涂层厚度检测,对航空航天等需要精确涂层厚度控制的领域有重要应用价值,未来的工作将集中在优化测量设备、扩展方法适用性范围以及进一步减小测量误差等方面。

参 考 文 献

[1] 陈举, 苏倩, 耿永祥, 等. 热障涂层失效行为及其修复再制造研究进展[J]. 航空工程进展, 2021, 12(4): 25-35. CHEN Ju, SU Qian, GENG Yongxiang, et al. Research progress on failure behavior and repair remanufacturing of thermal barrier coatings [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 25-35. (in Chinese)

[2] LIU J, XU W J, HU W X. Evolution of the ultrasonic resonance modes in a three-layer structure with change of material and interface adhesion properties[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 56(7): 074301.

[3] REN J, LI L, ZHANG D, et al. Study on intelligent recognition detection technology of debond defects for ceramic matrix composites based on terahertz time domain spectroscopy [J]. Applied Optics, 2016, 55(26): 7204-7211.

[4] ZHANG J, REN J J, LI L J, et al. Thz imaging technique for nondestructive analysis of debonding defects in ceramic matrix composites based on multiple echoes and feature fusion[J]. Optics Express, 2016, 28(14): 948-955.

[5] YANG X, ZHANG D, WU B, et al. Accurate characterization of the adhesive layer thickness of ceramic bonding structures using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Materials, 2022, 15(19): 6972.

[6] YANG X, ZHANG D, WANG Z, et al. Super-resolution reconstruction of terahertz images based on a deep-learning network with a residual channel attention mechanism [J]. Applied Optics, 2022, 61(12): 3363-3370.

[7] WANG X, CUI Y, SUN W, et al. Terahertz pulse reflective focal-plane tomography[J]. Optics Express, 2007, 15 (22): 14369-14375.

[8] YASUI T, YASUDA T, SAWANAKA K, et al. Terahertz paintmeter for noncontact monitoring of thickness and drying progress in paint film[J]. Applied Optics, 2005, 44 (32): 6849-6856.

[9] IZUTANI Y, AKAGI M, KITAGISHI K. Measurements of paint thickness of automobiles by using THz time-domain spectroscopy[C]// 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Wollongong: IEEE, 2012: 1-17.

[10] SU K, SHEN Y C, ZEITLER J A. Terahertz sensor for non-contact thickness and quality measurement of automobile paints of varying complexity[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2014, 4(4): 432-439.

[11] KRIMI S, KLIER J, JONUSCHEIT J, et al. Highly accurate thickness measurement of multi-layered automotive paints using terahertz technology[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(2): 7518-7526.

[12] 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.

[13] 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.

[14] TU W, ZHONG S, SHEN Y, et al. Neural network-

based hybrid signal processing approach for resolving thin marine protective coating by terahertz pulsed imaging [J]. Ocean Engineering, 2019, 173: 58-67.

[15] 张洪桢, 何明霞, 石粒力, 等. 随机优化算法应用于太赫兹测厚方法的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(10): 3066-3070.
ZHANG Hongzhen, HE Mingxia, SHI Lili, et al, Terahertz thickness measurement based on stochastic optimization algorithm [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(10): 3066-3070. (in Chinese)

[16] PFEIFFER T, WEBER S, KLIER J, et al. Terahertz thickness determination with interferometric vibration correction for industrial applications[J]. Optics Express, 2018, 26 (10): 1121-1134.

[17] FUKUCHI T, FUSE N, MIZUNO M, et al. THz measurement of refractive index and thickness of ceramic coating on a metal substrate[C]// 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim. Kyoto: IEEE, 2013: 6476.

[18] 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.

[19] SUN F, FAN M, CAO B, et al. Terahertz based thickness measurement of thermal barrier coatings using long short-term memory networks and local extrema[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18 (4): 2508-2517.

[20] 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 Pu, ZHAO Jiyuan. 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. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)

(上接第112页)

[16] 史浩祥, 林光. 扇区动态容量评估方法现状分析[J]. 电脑知识与技术, 2022, 18(17): 112-113,119.
SHI Haoxiang, LIN Guang. Analysis of current situation of sector dynamic capacity evaluation methods[J]. Computer Knowledge and Technology, 2022, 18(17): 112-113,119. (in Chinese)

[17] 曾子明, 张瑜, 李婷婷. 多特征融合的突发公共卫生事件潜在谣言传播者识别[J]. 图书情报工作, 2022, 66(13): 80-90.
ZENG Ziming, ZHANG Yu, LI Tingting. Detection of potential rumor spreaders in public health emergencies based on multi-feature fusion[J]. Library and Information Service, 2022, 66(13): 80-90. (in Chinese)

[18] 张璋. 基于仿真和工作负荷的容量评估及扇区优化[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
ZHANG Zhang. Capacity evaluation and sector optimization based on simulation and workload[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)

[19] 许辰澄, 江斌, 许蕾, 等. 多机场终端区多场景运行仿真建模与性能评估[J]. 航空计算技术, 2024, 54(2): 57-61.
XU Chencheng, JIANG Bin, XU Lei, et al. Simulation modeling and performance evaluation of multi-airport terminal area operation under multi-scenarios[J]. Aeronautical Computing Technique, 2024, 54(2): 57-61. (in Chinese)

[20] 万莉莉. 管制员工作负荷评估问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
WAN Lili. The research on the evaluation of controller's workload[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)

(编辑:马文静)

(上接第121页)

system for civil aircrafts[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(7): 1-5. (in Chinese)

[15] 杨斌, 雷国志. 大中型飞机分布式通信导航监视系统架构设计[J]. 电讯技术, 2022, 62(7): 865-873.
YANG Bin, LEI Guozhi. Architecture design of distributed CNS system for large and medium aircrafts[J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(7): 865-873. (in Chinese)

[16] 程学军, 雷国志. 航空电子系统基于需求的自动测试方法[J]. 电讯技术, 2010, 50(8): 165-169.
CHENG Xuejun, LEI Guozhi. An automatic test method based on avionics system requirement[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(8): 165-169. (in Chinese)

[17] 张辉, 陈世浩. 民用飞机着陆系统安全性评估的故障树分析[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 64-71,90.
ZHANG Hui, CHEN Shihao. Fault tree analysis for safety assessment of civil aircraft landing system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 64-71,90. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)