

基于太赫兹无损检测技术的热障涂层厚度测量方法

Thickness Measurement Method of Thermal Barrier Coatings Based on Terahertz Non-Destructive Testing Technology

■ 王兆祺 孔祥兴 杨博闻 / 中国航发研究院

太赫兹无损检测是近年来兴起的一种先进检测方法，具有优异的非接触、非电离、高精度和极强的非极性材料穿透性等技术优势，在热障涂层（TBC）性能评价和寿命预测方面展现出巨大的潜力。

太赫兹光谱技术在过去的几十年中得到了广泛关注并取得了迅速发展，并作为一种有效的检测手段在多个技术领域得到应用。作为一种新型的无损检测技术，太赫兹无损检测技术具有相干性、瞬态性、能够穿透陶瓷层等特点，可以对航空发动机上的热障涂层进行损伤检测与评估，从而在航空发动机领域发挥重要作用。

基本原理

太赫兹波通常是指频率处于0.1 ~ 10THz之间、波长范围0.03 ~ 3mm的辐射波，在电磁频谱上处于微波与红外波之间。由于处于远红外波段，太赫兹波兼具了宏观电子学与微观光子学的特性，从而在无损检测领域具有较大的技术优势。

太赫兹波具有多种独特的物理性质：第一，太赫兹波穿透性好，许多非金属、非极性材料，如陶瓷、橡胶、泡沫、塑料、树脂等，在太赫兹波段内缺乏相应的振动模式且散射率较低，具有无损检测的潜力；第二，太赫兹波具有分辨率高、波

长短的特性，基于太赫兹波的成像技术具有更高的空间分辨率以及更大的景深，无损检测的成像效果更好；第三，太赫兹波的光子能较低且属于非接触测量，不会损伤被测物体表面，更不会破坏被测物质从而造成二次损伤，且对人体无害。

太赫兹时域光谱检测技术是一种采用相干探测技术的太赫兹波产生与探测技术，基于太赫兹脉冲波与待测样品之间发生的相互作用，可以测定经待测样本透射（或反射）后的太赫兹波电场随时间变化的波形，再通过傅里叶变换，即可测定出样本数据的幅值和相位，是太赫兹无损检测领域重要的技术成果。由于该技术纵向分辨率高，可达微米级，能够满足薄涂层的测量要求，因此，在航空发动机热障涂层的无损检测领域具有较大的应用潜力。

热障涂层是一类应用在航空发动机涡轮叶片表面的高温保护层，通过在涡轮叶片金属基体表面喷涂隔热陶瓷材料从而有效改善发动机的效率、推力和工作温度。热障涂层系统是一种典型的多层系统，一般由陶瓷层、黏结层、超合金基体

和热生长氧化层组成。在服役过程中，热障涂层的陶瓷层脱落或减薄是造成热障涂层失效的主要原因之一，而热障涂层的失效则会严重影响涡轮叶片的使用寿命甚至造成叶片损伤或断裂，因此开展针对热障涂层陶瓷层的无损检测与厚度测量研究对于提高发动机的使用寿命具有重要意义，是当前发动机健康管理领域亟须解决的关键问题。

热障涂层的陶瓷层一般选用质量分数为7% ~ 8%的氧化钇稳定氧化锆（YSZ）材料，黏结层材料是钴铬铝钇合金（CoCrAlY）或镍铬铝钇合金（NiCrAlY），主要作用为抗氧化、抗腐蚀。由于太赫兹波具有非金属穿透性，因此射入热障涂层的太赫兹波可在空气与陶瓷界面发生反射和透射，并且透射后的太赫兹波还可继续传播至黏结层。同时，由于金属材料对于太赫兹波近乎是全反射，因此太赫兹波在黏结层发生全反射而无法继续传播至金属基底，从而实现太赫兹波在陶瓷层内部的传播，太赫兹波在热障涂层的传播路径可简化为图1所示。

在太赫兹波垂直入射条件下，

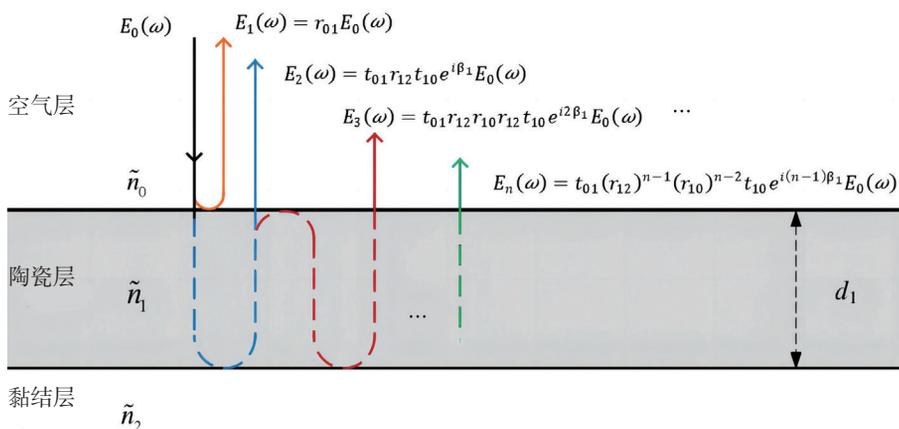


图1 热障涂层太赫兹波传播路径

热障涂层厚度计算的数学模型为 $d=c\Delta t/2n$ ，这表明如果可以测量材料上下两个表面回波之间的相对延时 Δt ，就可以根据涂层的折射率和光速计算得到涂层的厚度，从而实现叶片健康状态的监测。

测厚系统

基于太赫兹时域光谱技术的热障涂层测厚系统主要包括飞秒激光器、光电导天线、光学延迟线、信号处理与采集模块、上位机软件等，如

图2所示。系统的工作原理为飞秒激光脉冲经光纤传输至 1×2 光纤分束器被分为一强一弱两束光，经光纤分束器后分出较强的一束光经光纤传入太赫兹发射器，产生脉宽为皮秒量级的太赫兹脉冲波，该太赫兹脉冲波经样品反射后被太赫兹发射器接收；另一束较弱的飞秒激光经光学延迟线的延时形成探测光，与从样品反射后载有样品信息的太赫兹脉冲波共线经过探测器，然后经过电流放大器、锁相放大器的处

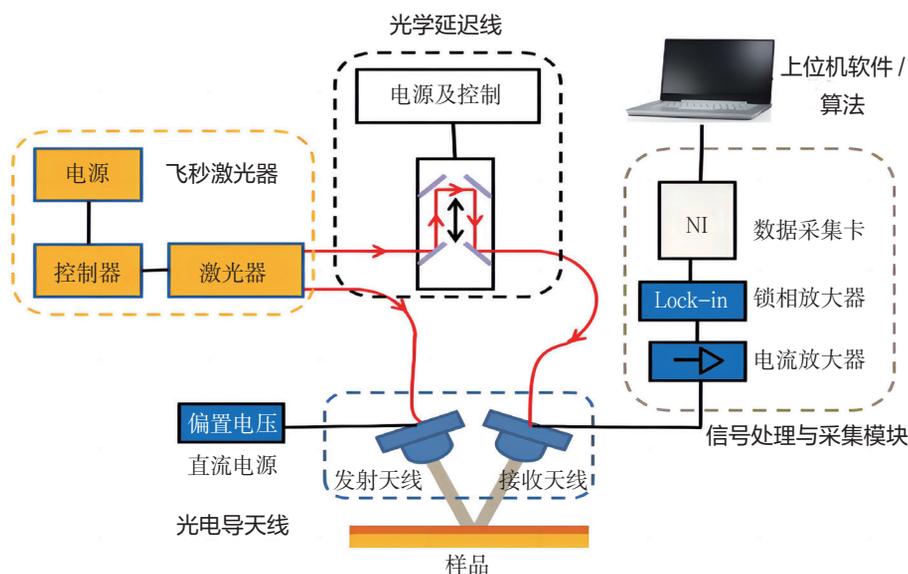


图2 太赫兹热障涂层测厚系统结构

理与放大，再经过采集卡采集后输入PC机进行处理，利用相关算法计算获得样品参数。在信号检测过程中，利用控制光学延迟线的移动来调节太赫兹脉冲波和探测光间的相对光程差，并利用逐点扫描得出太赫兹脉冲波的整个时域波形，试验装置如图3所示。

飞秒激光器

飞秒激光器的主要作用是作为泵浦源，使所发出的激光在经波分复用后被分为两个光束，其中一束作为泵浦光束，而另一束则作为探测光束。在激光器的波长选择方面，使用了1560nm的飞秒激光器。相比于自由空间的钛蓝宝石激光器，1560nm的飞秒激光器通常是掺铒的光纤激光器，可以搭建全光纤的时域光谱仪，且同时具备高稳定性、高可靠性以及更小的体积，在一定程度上给太赫兹时域光谱仪的小型化提供了发展可能。

光电导天线

光电导天线的主要作用是实现太赫兹波的产生与探测。在保证太赫兹波时域信号脉宽的前提下，为获得更高的信号能量，拟选择光电导天线作为太赫兹波产生和探测的

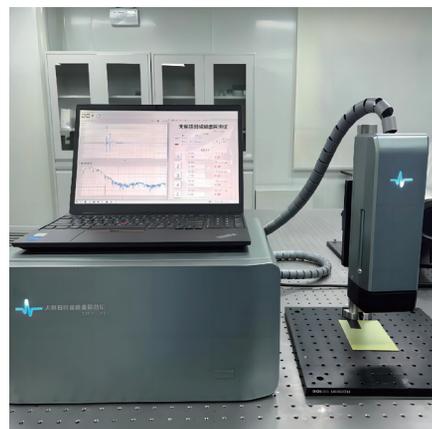


图3 太赫兹反射系统试验装置

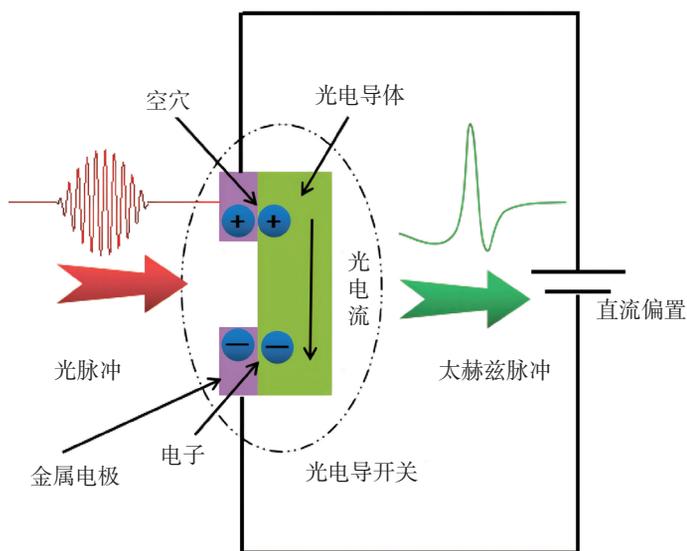


图4 光电导天线产生太赫兹脉冲

功能模块。光电导天线产生和探测太赫兹波都利用光电导体，可以看成一种在激光作用下电导发生变化的半导体开关。当一束飞秒激光脉冲打到光电导体上时，如果入射飞秒激光的光子能量大于该光电导体的能量带隙，则在光电导体内部会产生电子-空穴对。这些电子-空穴对在外加偏置电压的作用下会产生加速运动，从而形成瞬变的光电流，这些瞬变的电流会向外辐射太赫兹脉冲波，通常太赫兹脉冲波的脉宽在皮秒量级，原理如图4所示。

对于太赫兹脉冲波信号的接收探测，同样利用光电导天线，可以看作是产生太赫兹脉冲波的逆过程。一束飞秒激光作为探测光照射到光电导天线上，使光电导体内部产生光生载流子，与此同时，太赫兹脉冲波也照射到光电导天线上，则可将太赫兹脉冲波看作电场施加于光电导体上，使光电导体内部的光生载流子加速运动从而产生感应电流。该感应电流正比于照射在光电导天线的太赫兹脉冲波的强度。

光学延迟线

利用飞秒激光器激发电光导天线产生太赫兹脉冲波，太赫兹脉冲波的重复频率与用于泵浦的飞秒激光脉冲的重复频率相同。对于这样的瞬态信号，常用的实时采样方法，即对被采样信号利用奈奎斯特采样定理在一段时间内抽取足够多的采样点，对光电探测器的响应频率要求过高，难以实现。因此，针对周期性超快的信号，可采用等效时间采样，通过抽取不同周期上的信号点，实现对被采样信号的重建，原理如图5所示。

为了实现等效时间采样，普遍采用光学延迟线结构。这种结构是在精密移动平台上放置一对成45°角的平面全反光镜，使采样光经过该平面镜组，利用精密平移台的移动带动平面镜组移动，从而改变光程。

信号处理与采集模块

信号处理与采集模块主要是对所获取的太赫兹波信号进行放大与滤波，从而获取信号采集板卡所能

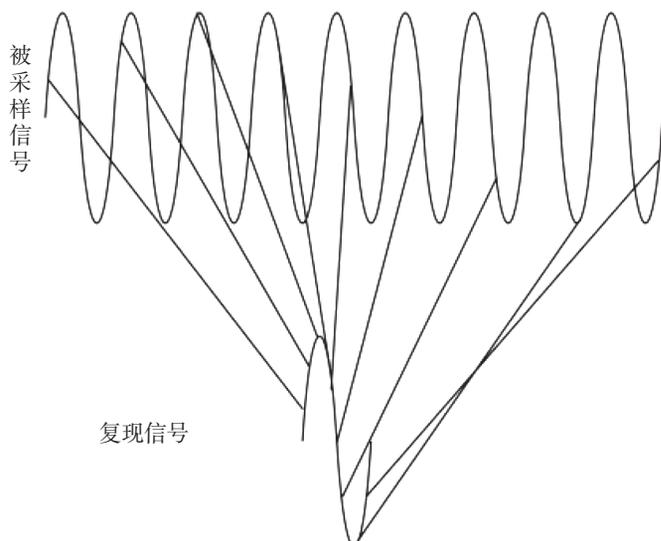


图5 等效时间采样原理

接收到的电信号。光电导天线输出的光电流较小，须经电流放大器放大后，由锁相放大系统进行信号提取，锁相放大调制信号作用于光电导天线的发送端。电流放大器所输出的信号与调制信号相乘后，将待测信号转移至零频附近，后经低通滤波器滤除高频信号，从而提取到太赫兹波信号，并由信号采集板卡进行信号采集，并将太赫兹波信号传输至上位机。

上位机软件模块

上位机软件模块主要作用是完成太赫兹波信号的获取，根据所获取的太赫兹波信号，利用热障涂层测厚原理结合相应的算法，完成厚度的计算，并将测厚结果进行显示。软件界面主要包括了太赫兹时域/频域的波形显示区域，人机交互区域以及结果显示区域，其中上位机软件的厚度计算流程如图6所示。

试验验证

目前，已在实验室环境下设计开发完成基于反射式太赫兹时域光谱技

表1 TBC 试片厚度统计

TBC 试片编号	1	2	3	4	5	6
喷涂次数	25	28	31	34	37	40
陶瓷层/ μm	287	309	321	349	414	437
金属层/ μm	70	104	84	72	85	78

表2 TBC 试片厚度试验数据统计

TBC 试片编号	1	2	3	4	5	6
陶瓷层实际值/ μm	287	309	321	349	414	437
陶瓷层测量值/ μm	284.17	316.49	318.12	368.54	429.18	455.87
太赫兹测厚系统测量相对误差/%	-0.99%	2.42%	-0.90%	5.60%	3.67%	4.32%
太赫兹测厚系统精度	2.35%					

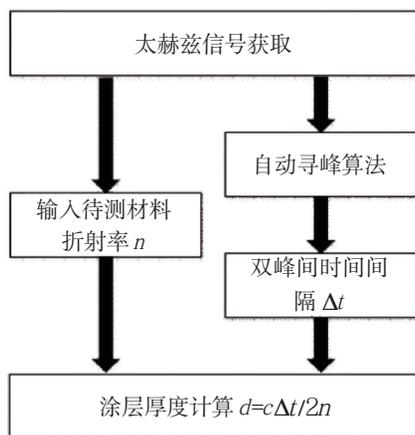


图6 太赫兹测厚系统上位机软件测厚流程

术的热障涂层测厚系统，为了验证该系统对于热障涂层的测量精度与测厚效果，试制了6块热障涂层平面试片，所采用的喷涂技术与现役发动机涡轮叶片上的热障涂层喷涂技术一致，厚度统计如表1所示。

表1中6个热障涂层样件分别具备不同厚度的金属层，在样件上喷涂不同次数的涂层材料，再利用扫描电镜测出陶瓷层厚度的实际值，利用实际厚度反算涂层材料的折射率，并取

6个试片的折射率平均值4.63作为该陶瓷层材料的等效折射率。

在获得了陶瓷层的折射率之后，可以利用测厚系统对试片的厚度进行测量。将待测样片置于机械臂的中心测点，通过调整机械臂的角度从而保证太赫兹波的垂直入射。之后，系统可以得到待测样片中心位置的太赫兹波时域信号，通过自动寻峰算法寻找两个陶瓷层的上下界面，根据信号的时间延迟计算出1~6号样品的厚度。将太赫兹时域光谱测厚系统与扫描电镜实测出的厚度进行比较，得到的试验数据对比如表2所示。

通过数据对比可知，太赫兹时域光谱测厚系统测量的相对误差在5.6%以内，测量精度可达到2.35%。对比试验表明太赫兹时域光谱测厚系统可以完成实验室条件下的热障涂层厚度测量，并具备较高测量精度与测量可靠性，后续配合具体的健康管理算法，可以完成对涡轮叶片在实验室环境下的健康评估与寿

命预测。

结束语

太赫兹技术目前已经在热障涂层性能评估和寿命预测方面展现出巨大的潜力，但是由于太赫兹波的产生与探测主要依赖于高精度的光学元器件，所形成的传感器探头一般都较为笨重，因此对于航空发动机这样内部空间紧凑的精密系统，太赫兹无损检测技术依旧停留于实验室阶段，难以真正应用于发动机的外场原位检测中。因此，为推动航空发动机太赫兹无损检测技术的发展，需要进一步优化和发展先进传感技术，开展光电导天线结构设计、工艺设计、封装设计等研究，进而完成太赫兹探头的小型化设计与制造，从而真正实现太赫兹无损检测技术在航空发动机健康评估与寿命预测中的应用。

航空动力

(王兆祺，中国航发研究院，工程师，主要从事航空发动机健康管理与控制技术研究)