

【特邀稿】

热障涂层太赫兹无损检测技术研究进展

叶东东, 王卫泽

(华东理工大学, 上海 200237)

摘 要: 太赫兹技术是近年来兴起的一种先进无损检测方法, 因其优异的非接触、非电离、高精度和可实现自动化在线检测等技术优势, 目前已经在热障涂层性能评价和寿命预测方面展现出巨大的潜力。简要介绍了热障涂层太赫兹无损检测技术的发展概况, 分别从陶瓷厚度测量, TGO 和冲蚀监测, 孔隙、裂纹及应力状态表征方面进行重点分析和总结。指出目前利用太赫兹技术进行单层和多层陶瓷顶层厚度的监测技术已经较为成熟, 可以逐步推广到工程应用中。在 TGO 监测方面, 围绕利用太赫兹时域反射峰的时间差和振幅衰减进行 TGO 厚度监测取得了一定进展, 但是检测精度有待进一步提高。在冲蚀监测方面, 已经可以较为精确地对冲蚀造成的减薄进行定量检测, 不过虽然已经可以对涂层内部渗入的 CMAS 进行定性判定, 但是定量表征方面尚缺乏试验研究。在孔隙监测方面, 探索了孔隙率大小对热障涂层的太赫兹频段光学参数变化的影响, 提出相对展宽比是在孔隙率测量方面较折射率、消光系数和介电常数, 既保留较高测量精度又兼具工程实用性的表征参量, 但是目前对孔隙的微结构特征缺乏全方面表征。在裂纹监测方面, 通过小波降噪及频域加 Hanning 窗函数滤波进行反卷积处理, 已经可以分辨平行裂纹的位置和宽度, 但是对于多条裂纹的监测尚有难度。在应力状态表征方面, 发现折射率的改变与应力变化呈现线性关系, 并且根据折射率的变化可以反推出光学应变系数, 进而获取应力情况, 但是目前反射式测量系统还需要进一步开发。最后针对目前热障涂层太赫兹无损检测技术应用现状、存在的问题及未来发展方向进行了总结和展望。

关键词: 热障涂层; 太赫兹; 无损检测; 厚度; 孔隙; 裂纹

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)10-0126-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.014

Research Progress in Terahertz Non-destructive Testing of Thermal Barrier Coatings

YE Dong-dong, WANG Wei-ze

(East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

ABSTRACT: Terahertz (THz) technology is an advanced non-destructive testing method that has emerged in recent years. Owing to excellent characteristic of non-contact, non-ionization, high-precision, and automated online detection, it has now

收稿日期: 2020-03-14; 修订日期: 2020-05-12

Received: 2020-03-14; Revised: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51775189); 上海航天科技创新基金资助项目 (SAST2019056)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51775189), Shanghai Aerospace Science and Technology Innovation Fund (SAST2019056)

作者简介: 叶东东 (1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为太赫兹无损检测技术。

Biography: YE Dong-dong (1992—), Male, Ph. D., Research focus: terahertz 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. 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.

YE Dong-dong, WANG Wei-ze. Research progress in terahertz non-destructive testing of thermal barrier coatings[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 126-137.

shown great potential in thermal barrier coating (TBCs) performance evaluation and life prediction. The development of terahertz non-destructive testing technology for thermal barrier coatings was introduced briefly and analysis and summary of ceramic thickness measurement, TGO and erosion monitoring, and pore, crack and stress state characterization were carried out emphatically. It is pointed out that the current technology for monitoring the thickness of single-layer and multi-layer ceramic top layers using terahertz technology is mature enough and can be gradually extended to engineering application. In terms of TGO monitoring, some progress has been made on TGO thickness monitoring by the time difference and amplitude attenuation of terahertz time-domain reflection peaks, but the detection accuracy needs to be further improved. In terms of erosion monitoring, the thickness loss caused by erosion can be quantitatively detected accurately. Although CMAS that has penetrated into the coatings can be detected qualitatively, there is still a lack of experimental research on the quantitative characterization. In terms of pore monitoring, the effect of the porosity on the change of the terahertz optical parameters of the thermal barrier coating has been explored. It is proposed that the relative broadening ratio is a more proper measure of the porosity than the refractive index, extinction coefficient and dielectric constant for engineering application. Nevertheless, the microstructure characteristics of the pore still lack a comprehensive characterization. In terms of crack monitoring, the positions and widths of parallel cracks can be distinguished by deconvolution filtering combined Hanning window function with wavelet denoising, but it is still difficult to monitor multiple cracks. In terms of stress state characterization, it is found that the change in refractive index has a linear relationship with the stress change, and the optical strain coefficient can be derived from the change in refractive index to obtain the stress state, but the current reflective measurement system needs further development. Finally, the current status, existing problems and future development direction of terahertz nondestructive testing for thermal barrier coatings are summarized and prospected.

KEY WORDS: thermal barrier coatings; terahertz; non-destructive testing; thickness; pore; crack

自 20 世纪 50、60 年代美国国防部和美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 等牵头开始热障涂层 (Thermal Barrier Coatings, TBCs) 的研究以来, 热障涂层技术在过去几十年中获得迅速发展和持续关注。热障涂层因其优异的耐高温、低导热、防腐蚀和抗磨损综合性能, 目前已被广泛应用于航空发动机 (燃烧室, 透平动叶和静片) 以及燃气轮机热端部件^[1-3]。热障涂层系统具有典型的多元结构特征, 其组成主要包括陶瓷顶层、粘结层、热生长氧化层 (Thermal Growth Oxide, TGO) 以及合金基底层。在高温严苛环境下服役时, 各组元成分层间的相互作用及性能变化, 共同决定了热障涂层系统的失效形式和服役寿命。虽然低热导率的陶瓷顶层能够有效降低热端部件的进口温度, 且能提升航空发动机和燃气轮机的工作效率, 但是金属材料和表面喷涂的陶瓷涂层间的热膨胀系数差异会导致热应力失配, 加之长时间处于高温烧结、循环氧化、冲蚀撞击、高次热疲劳的严苛服役环境, 热障涂层会发生各种形式的失效。目前研究人员对热障涂层的失效机理尚未完全认识清楚^[4-7]。热障涂层的失效因素主要可以归纳总结为四个方面因素, 即: 材料因素、时间老化因素、尺寸形状因素以及环境和载荷因素^[1,6-8]。其中, 材料因素具体体现在各层组元间热力学性能不匹配, 陶瓷顶层的烧结现象和相变效应; 时间老化因素具体体现在涂层的高温疲劳、蠕变以及 TGO 的扩展引起的涂层开裂剥落^[9-12]; 形状尺寸因素具体体现在各层组元的尺寸分配和热端部件形状特征; 环境和

载荷因素具体体现在高温燃气的热冲蚀和玻璃相沉积物 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS) 腐蚀, 以及多重化、力、热多物理场的耦合作用^[13-14]。

由于热障涂层自身独特的微结构特征, 在严苛条件下服役时会出现减薄或剥落、孔隙结构改变 (机械性能和热力学性能退化)、界面裂纹扩展、应力状态改变、TGO 生长及 CMAS 腐蚀等现象。这些现象的出现都会影响热障涂层系统的结构完整性, 严重的会导致涂层发生破坏, 甚至使热端部件迅速发生失效, 严重的更会造成重大经济损失和安全问题。例如: 热障涂层内部的各类裂纹的萌生扩展会导致涂层发生失效破坏, 若未能及时发现, 裂纹进一步扩展到叶片基材, 会直接影响叶片强度和服役寿命, 甚至会导致叶片发生报废; 众多失效因素中, TGO 和冲蚀被认为是影响热障涂层失效的第一和第二关键因素, 所以亟需行之有效的方法对涂层各类失效破坏加以有效监测^[14-17]。同时, 热障涂层老化后需要进行再喷涂处理进行修复, 为了确保热障涂层在老化过程中的服役安全性, 也亟需有效的方法对涂层的剩余服役寿命及是否具有可修复性进行安全评估监测。合适的监测方法不但能够确保热端部件的安全性, 降低失效破坏带来的损失, 同时也能降低日常维护成本。现有的热障涂层质量和寿命评价方法包括有损检测、模拟实际工作环境进行分析检测^[17-20]和无损检测^[21-25]。目前欧美日等发达国家都非常重视热障涂层的制备加工和检测评价新技术的探索研究, 例如: 美国能源部为了保证高温燃气轮机和航空发动机的发展需求, 投入大量

资金开展了多个与热障涂层有关的国家项目,其中DOENTEL计划就重点针对热障涂层的无损测试和性能表征展开了大量的研究,并系统地研究了检测信号、涂层特征及其性能变化间的关系^[26];日本也投入巨资开展了NEDO计划针对热障涂层的先进加工和无损评价方法进行专项研究^[27-28]。我国热障涂层无损检测技术发展方面近些年也取得了长足的进步,但是由于相对美日等国家起步较晚,尚存较大差距。

基于无损检测技术自身独有的非破坏性特点且有利于实现标准化和自动化,国内外学者在热障涂层无损评价方面开展了一系列卓有成效的研究。但是由于热障涂层自身多层、多相、多界面的结构特征,这使得热障涂层的无损检测变得非常困难,且热障涂层的尺寸规格一般在数百微米尺度范围内,像裂纹、孔洞、TGO等微结构特征的尺寸规格,更是一般仅在数十个或几个微米尺度以内,这些都给各种现有的无损评价方法的检测精度带来了极大的挑战和困难。例如:针对常用的目测法和渗透法,虽然操作简单,实际应用也较为广泛,但是更多是仅针对表面缺陷进行监测,无法深入内部;针对涡流检测法,由于顶层为不导电的陶瓷层,所以涡流检测无法识别陶瓷层内部的裂纹,虽然涡流检测可以进行陶瓷厚度测量,但是厚度检测精度受到粘结层的影响^[29-30];针对红外热成像法,虽然可以有效检测到热障涂层厚度和剥落,但是由于空间分辨率弱,无法识别垂直裂纹和界面裂纹,也无法对界面TGO层进行监测,检测精度受到涂层自身的尺寸规格和导热系数的影响^[31-33];针对超声检测法,主要根据超声的波速来评价涂层厚度、弹性模量、孔隙率和界面结合质量等,但是由于热障涂层很薄且具有多孔特性,这让界面裂纹信号和界面信号混叠难以分辨,目前尚无行之有效的信号处理方法能够将其有效提取^[34-35];针对荧光光谱检测法,可以对涂层内部开裂和TGO层进行监测,但是属于半定量表征,无法定量检测^[36-38];针对声发射检测法,它在涂层的裂纹萌生、扩展和破坏机理等方面研究展现出较好的应用前景,但是无法进行裂纹和厚度的定量测量,且由于声发射技术实际应用时信号复杂,处理难度大且理论分析尚不够完善,所以目前距离实际工程检测还有较大距离;针对阻抗法,研究表明其对TGO的检测非常有效,但是实际检测中如果在叶片表面加置测试电极,检测精度强烈依赖于接触面积,冷却通道的存在也会对其测试精度有较大的影响,且作为一种接触式测量很大程度上限制了其未来在热障涂层无损评价中的应用^[39-41]。

现有的无损检测方法都有其自身的优势和缺陷,究其原因在于每种检测手段自身的检测瓶颈,以及热障涂层自身的独特结构特征导致的,这都给实际检测提出了很高的要求和设置了诸多障碍。鉴于热障涂层的结构完整性无损评价工作非常重要,国内和国际上都非常重视该领域,且目前相关技术还不够完善,近

年来新的热障涂层无损检测技术也在不断发展和向前探索。太赫兹时域光谱(Terahertz Time-domain Spectroscopy, THZ-TDS)技术作为一种新兴的技术,已逐渐在无损检测领域崭露头角。相较于传统无损检测方法,太赫兹对介电材料具有很强的穿透能力,是一种新兴的在线、非接触、无损伤、非电离、可定量的新型安全自动化检测方法,并且检测时精度高且无需耦合,是未来无损检测领域重要的研究方向之一^[42]。目前中外学者关于太赫兹无损评价技术的研究已应用在不同领域,其中主要包括集成电路、汽车制造、环境监测、医学诊断、生物信息提取、人体安检以及热障涂层等,目前关于利用太赫兹进行热障涂层无损评价研究,已经在厚度、孔隙率、冲蚀以及TGO的检测和表征等方面展,现出较大的潜力和优势^[43-44]。本文综述了近年来国内外学者在利用太赫兹无损检测技术热障涂层结构完整性评价和性能检测方面的最新研究成果,结合笔者所在研究团队的相关研究成果,对目前热障涂层太赫兹无损检测技术方面存在的优势和不足展开讨论,并对未来热障涂层无损检测发展方向提出展望。

1 太赫兹无损检测技术

如图1中的电磁波谱图分布示意图所示,太赫兹波(或称为太赫兹辐射、亚毫米波、远红外、T-射线,简称为THz)通常是指频率为0.1~10 THz、波长为0.03~3 mm,且介于毫米波和红外之间的电磁波^[45]。相较于波谱图中太赫兹两侧的红外和微波,后两者的技术已经非常成熟且已应用于各行各业,但是太赫兹的研究目前还相对处于空白阶段,根本原因在于太赫兹在频段上有其特殊性,其在低频段与毫米波相重合,而在高频段与红外光相重合,而这一区域是宏观经典理论向微观量子理论的过渡区,也是电子学向光子学的过渡区,这也导致太赫兹被学界称为电磁波谱中的“太赫兹空隙(THz Gap)”。虽然目前关于太赫兹技术的研究基础尚浅,但是在太赫兹诸多强大优势吸引力之下,如太赫兹比光波具有更高的能量转换率、拥有比微波高1~4个数量级的带宽特性等,进而太赫兹技术也被各国竞相追逐。例如:美国率先将太赫兹技术评为“改变未来世界的十大技术”之一;日本将太赫兹技术列为“国家支柱十大重点战略目标”之首;中国也紧随其后制定了太赫兹国家发展战略计划^[42]。

图2为常用的太赫兹测量装置示意图,黑色粗虚线框中上方的矩形细虚线框为反射式模块,下方为透射式模块,由于太赫兹对非导电介质材料具有很强的穿透性,可以在反射式和透射式模式下提取材料在太赫兹频段的光学参数,如折射率、吸收系数等,并且相较于其他光谱分析技术,太赫兹时域光谱技术无需使用Kramers-Kronig关系即可进行光学参数提取,同

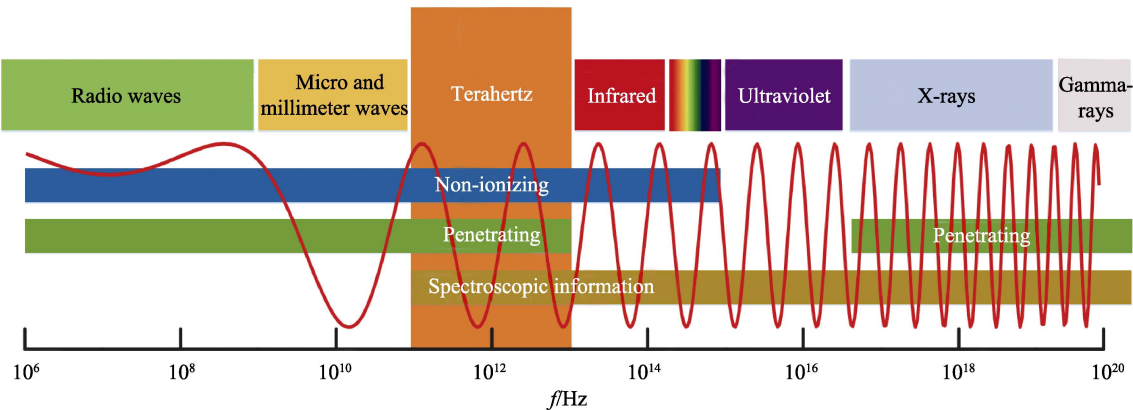


图 1 电磁波谱图分布示意图^[45]
Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic spectrum distribution^[45]

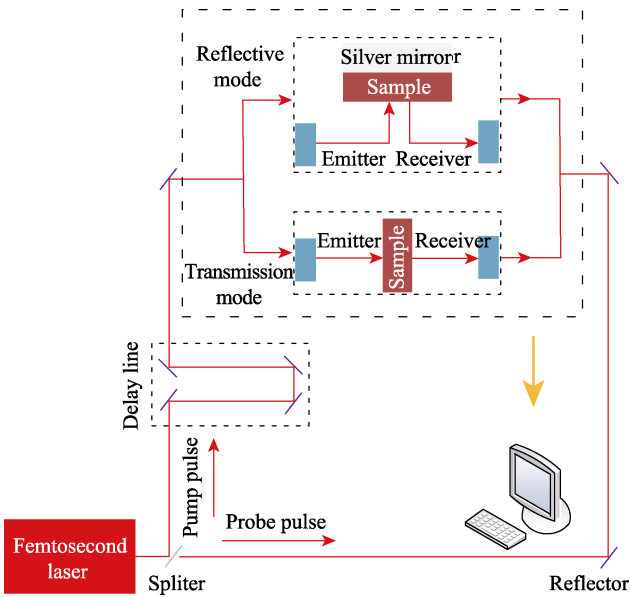


图 2 太赫兹时域光谱系统在反射模式和透射模式下的工作原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of THz time-domain spectroscopy system in reflective mode and transmission mode

时可直接获得的光谱学信息非常丰富,如振幅、相位、峰-峰值、最大值、最小值、半峰宽度等,大大降低了计算工作量且提升了测量精度。这些特征信息都为太赫兹在无损检测领域的应用奠定了坚实的基础,如太赫兹成像技术目前在工业和生物学领域取得了许多令人振奋的成果^[46-50]。

2 太赫兹技术在热障涂层无损检测中的应用

鉴于太赫兹拥有的独特性能(瞬态性、宽带性、相干性、穿透性、低能性以及吸收性等),近年来已逐渐被热障涂层无损检测领域的学者所关注,并且在热障涂层厚度测量, TGO 和冲蚀监测, 孔隙、裂纹及应力状态表征等方面展开了相关研究工作。本部分围绕上述内容综述了近年来国内外学者利用太赫兹

无损检测技术在热障涂层检测方面的最新研究成果,并结合本研究团队的相关研究内容展开讨论。

2.1 陶瓷顶层厚度测量研究

热障涂层系统中陶瓷顶层的厚度直接关系到涂层的热障性能,在服役过程中,沉积在叶片表面的涂层会因烧结和冲蚀等因素而减薄,甚至出现脱落的现象,大大降低了热障涂层的防护作用,严重时更会导致叶片发生报废,所以对涂层厚度的有效监测成为了涂层无损检测的重要研究内容之一。

图 3 为太赫兹波在热障涂层中传播的光路示意图,当太赫兹波在热障涂层上表面入射到涂层内部时,部分太赫兹波在陶瓷层上表面发生反射而返回空气中(1st 反射峰为第一次表面反射),部分透射直接进入陶瓷层内部,在陶瓷层和金属粘结层界面发生反射,从陶瓷层和金属粘结层界面反射回的太赫兹波,部分通过陶瓷顶层表面重新返回空气中(2nd 反射峰

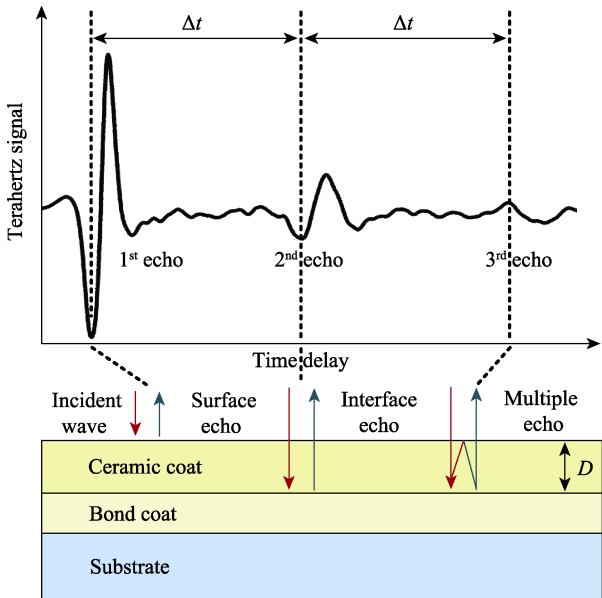


图 3 太赫兹在热障涂层中传播的光路示意图^[51]
Fig.3 Schematic diagram of terahertz waves propagation path in thermal barrier coatings^[51]

为第一次界面反射), 部分又反射回到陶瓷层内部, 继续在陶瓷层内发生多次反射, 系统获取到 3rd 反射峰(二次界面反射)以及第三次、第四次等界面反射峰等, 并且反射峰的强度越来越弱。从光路示意图可知: 1st 反射峰中蕴含着陶瓷顶层上表面的特征信息, 2nd 和 3rd 界面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^[51-52]。

基于此, 2009 年美国学者 White 等人^[53]首次提出利用反射式太赫兹时域光谱系统进行热障涂层的厚度检测。当太赫兹垂直入射时, 陶瓷层顶层厚度计算的数学模型如式(1)所示。

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

结合图 3, 可知式(1)中: D 为陶瓷顶层的厚度, Δt 为相邻两次反射峰的时间延时, n 为陶瓷层的折射率。研究发现, 当折射率取平均值 3.73 时, 所测得样品的厚度误差在 2%以内, 该研究证明了利用太赫兹波进行热障涂层厚度检测的可行性。但是实际陶瓷层为多孔结构, 内部孔隙随着服役时间的增加也会发生改变, 所以仅根据经验采用固定的 $n=3.73$ 来进行厚度建模测量, 并不能满足不同服役工况。

日本学者 Fukuchi 等人^[54-57]提出未知涂层太赫兹频段折射率的情况, 对图 3 分别提取三次反射峰后进行傅里叶变换, 通过菲涅耳方程(Fresnel equations)和朗伯比尔定理(Lambert-Beer law)推导出了计算折射率的公式如式(2)所示。

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

如图 3 所示, F_1 、 F_2 及 F_3 分别为前三次反射峰经傅里叶变换得到频谱图的光谱强度, 考虑到低频散射性, 而高频段蕴含的电磁波能量较弱, 直接利用全频段进行折射率计算时引入的误差较大, 故此处选取 0.3~0.5 THz 频段的数据对 n 进行统计计算。结果表明: 太赫兹测量获取的厚度与扫描电子显微镜 SEM

测量获取的结果相对比, 相对误差在 5.8%以内, 能够满足实际厚度测量的需求。该方法成功实现通过一次检测同时获取折射率 n 和 Δt , 进而可以直接获取涂层厚度。除此之外, Fukuchi 等人的研究结果显示, 不同制备工艺条件的涂层的折射率 n 在 3.7~5.6 范围内, 这说明利用模型(1)进行厚度测量时必须重新测定 n , 且涂层的微观结构对其在太赫兹频段的折射率有较大影响。Fukuchi 等人考虑到修正后的厚度 D 的测量方法忽略了表面粗糙度 σ 对式(2)中 n 测算的影响, 故采用了基尔霍夫方程(Kirchhoff Equation)进行了近似计算, 引入粗糙度的影响将式(2)修正为式(3)。

$$\frac{F_1 F_3}{F_2^2} = e^{-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2} \frac{(n-1)^2}{4n} \quad (3)$$

式中: λ 为检测时所使用的太赫兹波的波长。修正后的厚度计算模型进一步提高了测量精度。

德国学者 Krimi 等人^[58]提出一种高精度的自校准方法也可同时测定折射率和涂层厚度, 测量结果的相对误差约为 1%。中国学者曹丙花等人^[59]通过提取太赫兹时域谱图中的 1st 反射峰的幅值信息, 通过推导入射波能量与反射波能量的比值关系, 同样通过一次检测可以计算得到折射率 n , 然后提取 Δt , 计算得到热障涂层陶瓷层的厚度。

随着航空发动机和燃气轮机技术的不断发展, 单层陶瓷层结构的热障涂层的性能已经无法满足高温严苛服役环境的性能需求, 所以各种新型多层功能梯度陶瓷层热障涂层也不断被开发^[60], 所以以上针对单层陶瓷涂层厚度的检测方法就不能完全满足多层陶瓷层厚度的监测需要。曹丙花等人^[61-62]根据太赫兹波在多层陶瓷层中的传播规律, 如图 4 所示的太赫兹波在任意第 L 层陶瓷涂层中的传播规律示意图, 建立等效反射系数模型, 通过不断改变各层陶瓷层的厚度, 带入多层反射理论模型进行计算, 获取不同厚度层样品的理论频谱信号, 再进行傅里叶逆变换获得不同厚度层样品的理论时域信号, 将其跟实验时域信号进行

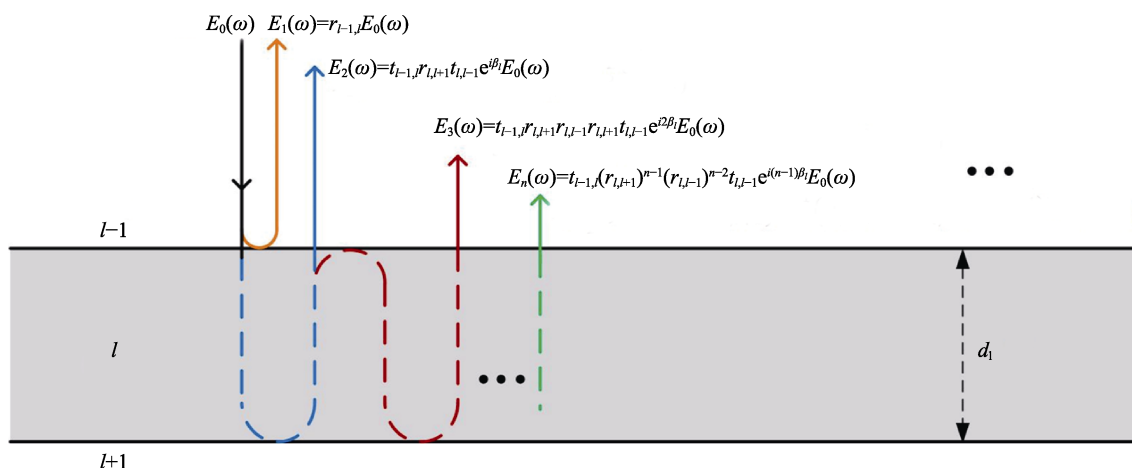


图 4 太赫兹波在垂直入射到第 L 层涂层的传播规律示意图^[61]

Fig.4 Schematic diagram of THz wave interaction with the layer L at the normal incidence^[61]

对比, 结合优化算法进行寻优处理, 等到寻找到理论计算结果与实验测量结果一致时, 此时输出结果即为各层厚度值。该方法考虑了表面和各层界面的粗糙度的影响, 且可用于单层和多层厚度的检测, 输出结果的可靠性和精度较高, 有望进一步应用于实际热障涂层厚度的工业检测中。

2.2 TGO 和冲蚀监测研究

TGO 在生长初期以 Al_2O_3 为主, 随着温度的不断升高和氧化时间的不断增加, TGO 层变得越来越厚, $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 朝 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 转变, 并且会在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 中产生拉应力引起氧化膜开裂和脱落。随着尖晶石的不形成且消耗了 Al_2O_3 , TGO 的结构也不断转变, 随着致密的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 不断被消耗, TGO 快速生长, 研究发现当厚度大于 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 时, 陶瓷顶层开始剥落, 目前学界普遍认为 TGO 的增厚是影响热障涂层寿命最显著的因素, 并且是导致涂层失效的最重要原因, 所以对 TGO 厚度的有效监测成为热障涂层寿命监测研究的重中之重^[6,63]。而作为紧随 TGO 之后第二个影响热障涂层寿命的最关键因素, 冲蚀一般是在带硬质颗粒的气流不断作用下, 陶瓷层顶层出现厚度减薄、裂纹形成甚至发生脱落的现象。例如在 CMAS 腐蚀作用下, 由于 CMAS 的热膨胀系数要低于涂层本身, CMAS 渗透的区域会在冷却时产生较大的压应力, 进而导致裂纹萌生扩展引起涂层剥落, 同时涂层内部会形成三斜结构的玻璃相钙长石 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, 它会极大降低热障涂层的应变容限, 严重影响热障涂层的服役寿命, 所以对冲蚀引起的厚度减薄和剩余涂层内部微结构及渗入成分的监测, 也是热障涂层寿命监测研究的重要内容。

基于此, 2008 年美国学者 Jackson 等人^[64]首次尝试了利用太赫兹进行 TGO 厚度表征。如图 5 所示, 通过三次热循环氧化 (每次时间间隔为 100 h), 获得不同 TGO 厚度的热障涂层样品, 分别进行测试获取太赫兹时域光谱图, 并提取前两次反射峰的时间差进行分析, TGO 的太赫兹频段折射率取 3.1, 结合 SEM 下观察得到的热循环 300 h 生成的 TGO 厚度约为 $(4.1\pm 0.6)\ \mu\text{m}$, 反推得到对应的时间延时应约为 84 fs, 但是测试所用太赫兹系统的测量误差为 100 fs, 对应的厚度测量误差应约为 $5\ \mu\text{m}$, 所以如果使用时域延时法测定 TGO 厚度, 所使用的太赫兹时域光谱系统的性能还有待提升。Jackson 等人又尝试提取反射峰时域的振幅变化情况来表征 TGO 厚度, 研究表明: 随着氧化时间的不断增加, 第二次反射峰的振幅不断降低, 原因在于不断生长的 TGO 具有比粘结层更低的折射率, 且 TGO 的厚度不足以在时域图中形成其自身专属的反射峰, 难以将其与陶瓷层-粘结层界面的反射峰分开, 但是可以等效认为 TGO 的不断变厚导致陶瓷顶层和粘结层界面发生重叠并出现过渡区域, 该过渡区域的出现导致原本界面的有效反射率不

断降低, 根据这一结论, Jackson 等人指出随着进一步氧化的进行, 这种方法有可能实现 TGO 厚度的估算和局部开裂的识别。

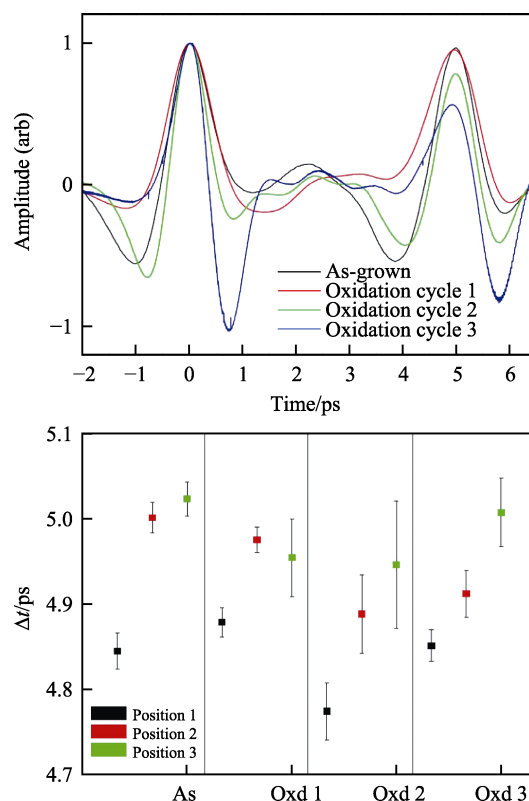


图 5 三次氧化后的不同 TGO 厚度样品引起的太赫兹时域光谱图变化^[64]

Fig.5 Terahertz time-domain spectral changes caused by different TGO thickness samples obtained by three oxidation cycles^[64]

韩国学者 Chen 等人^[65-66]在 Jackson 等人基础上增加热循环的时间, 进一步研究了在 $1100\ ^\circ\text{C}$ 环境下 $0\sim 1350\ \text{h}$ 生成的不同 TGO 厚度试样引起的太赫兹时域光谱图中的第一次反射脉冲和第二次反射脉冲的变化情况, 如图 6a 所示, 所有样品所对应的第一次反射脉冲波峰和波谷的到达时间都几乎完全重合, 而由图 6b 和 6c 可知随着热循环时间的延长, TGO 的厚度也不断增加, 第二次反射脉冲的波峰和波谷与 0 h 试样的波峰和波谷的时间差值都在不断增加, 图 6c 更进一步直观地表明了 TGO 的厚度增加量与脉冲延时的增长二者呈正相关关系。Chen 等人的研究进一步说明太赫兹时域光谱有望应用于 TGO 的监测。

但是需要说明的是, 上述利用太赫兹时域光谱进行 TGO 厚度监测时, 将第二次反射脉冲的幅值和时间差的变化都归因于 TGO 的生长, 而忽略了在服役过程中在高温热循环长时间作用下涂层内部微孔隙结构的变化, 如孔隙率、孔的大小和孔的形状等, 这些都是影响太赫兹脉冲波形的重要因素, 所以关于利用太赫兹无损技术表征 TGO 还需要进一步探索, 但是无疑第二次反射脉冲的幅值和时间差变化情况是

其中值得关注的 TGO 表征参量。

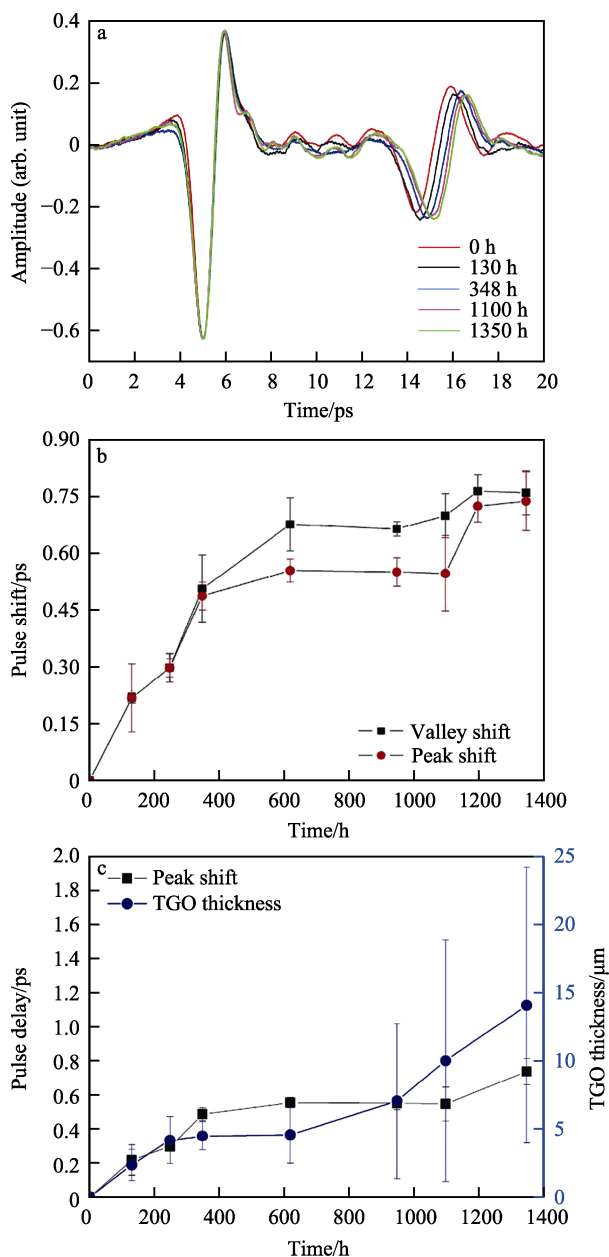


图6 不同热循环时间下生成的TGO引起的太赫兹脉冲延时^[65-66]

Fig.6 Terahertz pulse delay caused by the generated TGO for different thermal cycle time^[65-66]

2019 年笔者等人^[52,67-68]所在的研究团队在前人测量方法的基础上,提出了利用太赫兹对冲蚀条件下厚度减薄的测量以及 CMAS 的检测新方法。其中,针对因冲蚀造成的减薄现象,如图 7 所示为采用冲蚀装置获取的被冲蚀热障涂层试样界面示意图,采用太赫兹反射式时域光谱系统结合手持式粗糙度仪,建立了考虑粗糙度影响的厚度损失 Δd 计算模型,如式(4)所示。

$$\Delta d = \frac{c\Delta t}{2n_{\text{Air}}} \quad (4)$$

式中: Δt 为完整试样和受冲蚀试样的第一次反射

峰的时间差; n_{Air} 为空气的折射率。采用模型(4)对厚度损失进行计算时的优点之一就是不用考虑因为冲蚀导致的剩余涂层内部微结构变化情况,即剩余涂层折射率的变化不影响该模型计算厚度损失的精度。

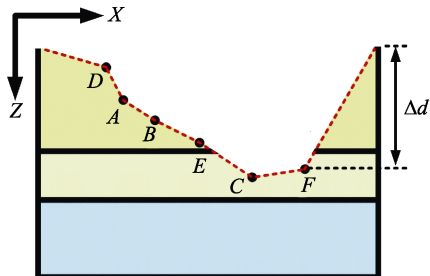


图7 受冲蚀试样界面形貌示意图^[52]

Fig.7 Schematic diagram of interface morphology of erosion sample^[52]

结合时域谱图中的第一次反射脉冲和第二次反射脉冲的振幅和时间差,分别建立引入粗糙度因素的用于计算厚度损失的模型(5)和(6),其中模型(5)用来计算剩余部分陶瓷顶层的表面粗糙度,模型(6)用来计算已冲蚀减薄到粘结层或金属集体层的表面粗糙度。

$$\left(\frac{F_1}{F_r \cdot \frac{n-1}{n+1}} \right)^2 = e^{-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2} \quad (5)$$

$$\left(\frac{F_1}{F_r} \right)^2 = e^{-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2} \quad (6)$$

其中, F_r 为入射信号在标准参考试样表面反射时获取的反射峰经傅里叶变换得到频谱图的光谱强度。结果表明,该方法可以用于定量获得经冲蚀引起的含表面粗糙度的热障涂层厚度损失量。

针对 CMAS 对热障涂层的腐蚀引起的失效,利用太赫兹进行材料光学参数提取时独具的指纹(吸收)图谱的特征峰对 CMAS 进行监测。实验时,对多组样品使用 CMAS,在完全融化温度以上进行腐蚀测试,实验主要分为两组,第一组的腐蚀时间为 0.5 h,第二组的腐蚀时间为 2 h。采用透射式时域光谱系统对被腐蚀后的涂层试样的折射率 n 和吸收系数 α 进行提取,提取的计算模型如式(7)和(8)所示^[67]。

$$n = \frac{c\phi(\omega)}{\omega d} + 1 \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{2}{d} \ln \frac{4n}{\rho(\omega)(n+1)^2} \quad (8)$$

式中: c 为光速, ω 为角频率, $\phi(\omega)$ 为相位差, $\rho(\omega)$ 为试样信号的频域振幅和参考信号的频域振幅比。最终结果表明,受 CMAS 腐蚀的试样的折射率增大,并且在吸收系数的频谱图中,在 1.50 THz 和 1.56 THz 处存在 CMAS 的专属特征吸收峰。

目前针对冲蚀导致的厚度损失问题,太赫兹测量

技术已经可以基本解决, 未来应该朝着更有效率和能可视化的太赫兹成像技术发展, 以便对本部分内容进行进一步改进完善, 以适应和满足未来工业应用的需求。但是针对 CMAS 腐蚀, 由于 CMAS 腐蚀产物复杂, 目前太赫兹方法尚不能定量进行监测, 透射式监测模式在实际应用中还存在一定差距, 需要进一步开展相关研究工作。

2.3 孔隙、裂纹及应力状态表征研究

热障涂层内部的孔隙结构特征, 各类裂纹以及应力状态等都是影响热障涂层服役性能和剩余寿命的重要因素, 例如: 较大的孔隙率会使涂层有更好的热障性能, 但是过高的孔隙率又会降低涂层稳定性, 导致腐蚀作用增强; 在反复高温热震循环作用下, 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, 但是热循环过程中产生的大量垂直裂纹能起到良好的应力缓和作用, 而且会使涂层具有良好的应变容限, 从而提高热障涂层的热循环寿命; 热障涂层服役过程中的失效一般都是应力集中导致的, 但是目前的预测方法主要是围绕有限元分析和解析模型展开。

针对孔隙的检测, 2011 年日本学者 Watanabe 等人^[69-70]在透射式模式下获得不同喷涂工艺参数下具有不同孔隙率的热障涂层试样的介电常数, 分别提取在 0.5 THz 下的介电常数实部数据, 利用 Maxwell-Garnet 和 Bruggeman 有效介质理论(Effective Medium Theory, EMT)模型进行偏心率和孔隙率之间的内在关系研究。如图 8 所示, 基于椭球型孔隙假设, 随着孔隙率的增加, 介电常数实部不断增加, 并且测试样本数据的偏心率值大约落在 0.1 (Maxwell-Garnet 模型) 和 0.075 (Bruggeman 模型) 上。结果说明: 随着光疏介质空气(孔隙)的增加, 导致涂层的介电常数实部数值降低, 这一变化规律让利用介电常数来表征孔隙率大小成为可能。但反推出的偏心率值说明涂层内部微裂纹在利用 EMT 模型对孔隙形状进行监测时会产生非常大的影响, 所以关于如何利用介电常数表征孔隙的特征, 仍然是一项非常困难的工作, 这就需要充分了解涂层的介电性能与微观结构之间的关系, 还需要进一步的研究。

笔者等人^[71]在 Watanabe 等人研究的基础上, 通过调控送粉粒径、喷涂功率和喷涂距离等制备工艺参数, 获取了不同孔隙率的涂层试样, 分别提取折射率和消光系数, 研究了孔隙率变化对热障涂层在太赫兹频段光学参数的影响, 结果表明: 分别提取 1 THz 和 1.5 THz 下不同孔隙率试样的折射率和消光系数, 随着孔隙率的增加, 折射率降低, 消光系数升高, 通过线性拟合对比发现, 消光系数对孔隙率的变化远远比折射率要敏感很多。但是实际工业应用时, 无法直接通过透射式光谱提取涂层的消光系数, 所以笔者等人

提出利用太赫兹时域展宽效应来表征孔隙率的变化, 如图 9 所示, 首先通过蒙特卡罗模拟(Monte Carlo simulation)追踪一千万太赫兹光子在不同消光系数和传输距离下波形的展宽情况, 考虑到孔隙的一般尺度大小, 利用瑞利散射的相函数进行抽样统计, 获取

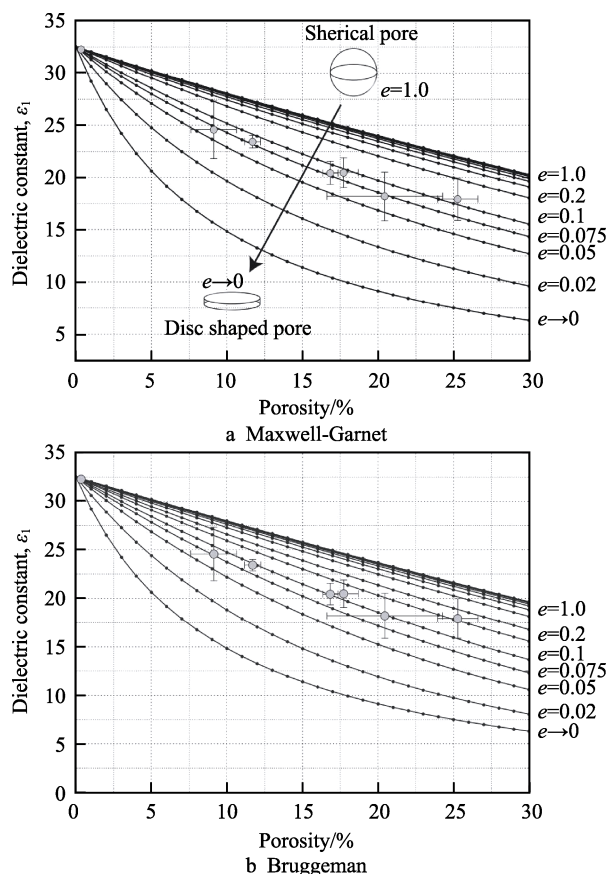


图 8 由 EMT 模型计算不同的偏心率和孔隙率下涂层的介电常数实部值^[69]

Fig.8 Real part of the dielectric constant calculated by the EMT models for pores of varying eccentricities and porosities^[69]

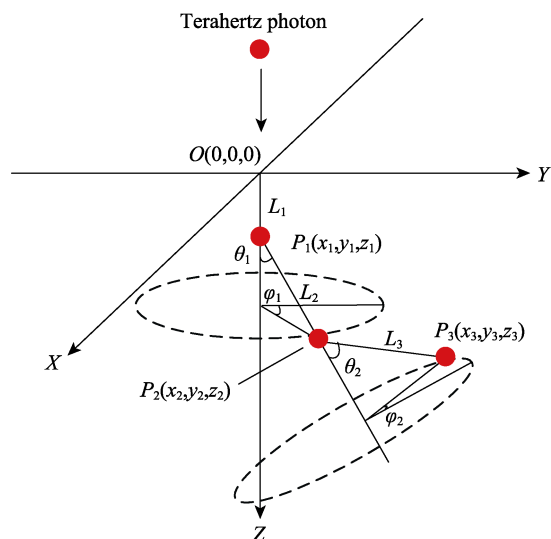


图 9 太赫兹光子传输坐标系^[71]

Fig.9 Terahertz photon transmission coordinate system^[71]

光子的运动规律,统计光子的到达时间,并与理想时间进行对比,进而研究孔隙对时域展宽的影响。结合实验,提取相对展宽比 β (如式(9)所示)来表征孔隙率的大小。

$$\beta_{1,2,3} = \frac{\Delta t_{1,2,3}}{\Delta t_r d} \quad (9)$$

式中: $\beta_{1,2,3}$ 为前三次脉冲的相对展宽比, $\Delta t_{1,2,3}$ 为前三次脉冲的峰峰间的时间差, Δt_r 为参考信号峰峰间的时间差。模拟和实验结果都表明,随着孔隙率的增大,展宽效应增强。研究中提出的相对展宽比,无论是在透射式还是反射式模式下都比较容易提取,且依然保留了消光系数对孔隙率变化的敏感性。但是,目前利用太赫兹技术尚无法对涂层内微孔隙结构特征进行较为全面的表征,如孔的大小和孔的形状等,所以应在之前的研究基础上,进一步探索可用于表征孔隙微结构特征的太赫兹特征,如现有的折射率、消

光系数和相对展宽比等,并结合各类智能优化算法和机器学习的方法,去建立可用于表征孔隙微结构特征的模型。

针对裂纹的检测,笔者等人^[51,72]在平行裂纹监测方面展开了相关探索性工作,如图10所示,首先在热障涂层内部分别预制涂层内部平行裂纹和界面平行裂纹,利用反射式太赫兹时域光谱系统进行测试,结合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,再通过加汉宁窗(Hanning window)函数进行频域反卷积,之后在时域谱图中提取出裂纹的自身特征时间。研究结论显示:该方法可以分辨出平行裂纹的出现位置类型,并能得出裂纹的宽度。但是,目前采用“捡峰法”提取裂纹特征,处理时难度较大,灵活性较高,且对于多条裂纹存在时可能难以识别,特别是对于刚开始萌生的微裂纹,受尺寸规格的影响,还存在检测精度不足等问题需要攻克。

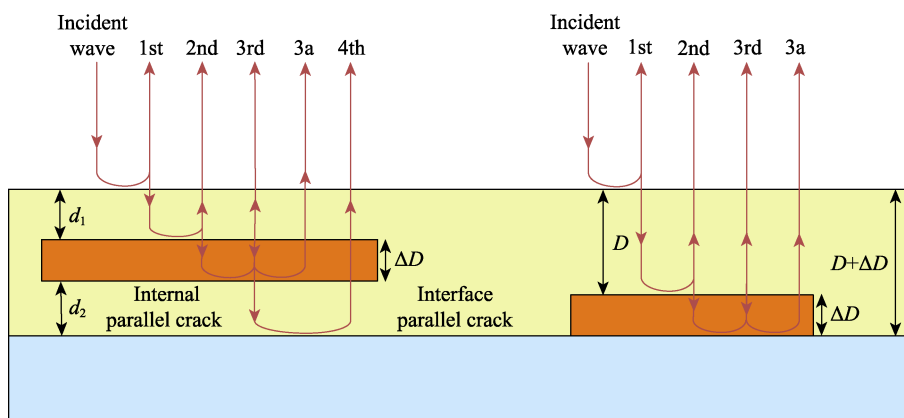


图10 热障涂层内部预制的内部平行裂纹和界面平行裂纹示意图^[51]

Fig.10 Schematic diagram of prefabricated internal parallel and interface parallel cracks inside thermal barrier coatings^[51]

针对应力状态的表征,Schemmel等人^[73]在如图11所示搭建的试样拉伸及检测系统中,选取0.26~0.38 THz频段内对不同厚度的基体上沉积的相同厚度涂层以及不同厚度的热障涂层试样,在0~50 MPa(间距5 MPa)进行重复加载拉伸测试,测量和观察折射率的变化情况,获取陶瓷涂层的光学应变系数。

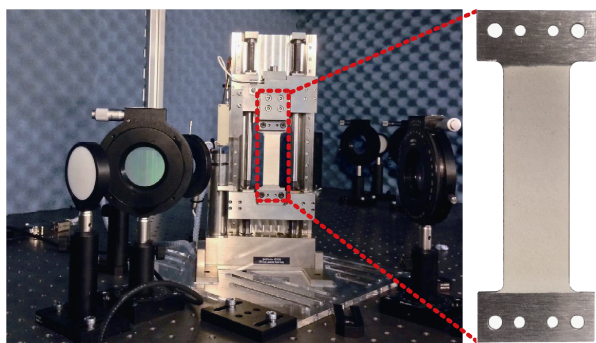


图11 试样拉伸及检测系统^[73]

Fig.11 Sample tensile test and inspection system^[73]

研究发现,折射率的改变和应力变化之间呈线性关系,并首次观测到了YSZ热障涂层中因应力变化引起的双折射现象,这说明热循环和应力状态对热障涂层性能产生了重要影响,这一结果与其团队之前在透射式下对块状陶瓷试样得到的结果相一致^[74]。利用杨氏模量可以将应变光学系数转化为应力,但是目前的反射式系统下,热障涂层的应变光学系数并不容易获得,不过目前该团队表示正在研究可以表征热障涂层在制造后及随时间老化而导致的折射率变化的新一代测试系统。

3 结语与展望

作为热障涂层无损评价技术的最新发展方向之一,太赫兹无损检测技术因具有在线、非接触、无损伤、非电离、可定量等优异特性而被广泛关注。但是由于热障涂层在严苛服役环境下的失效机理异常复杂,失效形式多样,目前现有的无损检测技术包括太

赫兹在内都无法较为全面地评价热障涂层的健康状态和剩余服役寿命。目前太赫兹无损检测技术已经在热障涂层厚度测量, TGO 和冲蚀监测, 孔隙、裂纹及应力状态表征等方面, 取得了一定的进展并展现了一定的优势, 但是目前除了厚度测量方面已经基本达到可以实际工业应用的研究水平, 其余还需要进一步攻克, 且太赫兹无法对金属粘结层服役过程中的内部性能变化进行监测, 所以单纯依靠太赫兹技术来解决热障涂层服役过程的状态监测问题显然并不可行。基于此, 对未来热障涂层太赫兹无损检测发展方向提出展望:

1) 进一步优化和发展先进传感技术, 提高太赫兹时域光谱系统的检测精度和稳定性, 充分研究和挖掘热障涂层缺陷和微结构特征(如: TGO、CAMS、孔隙、裂纹及应力状态)与太赫兹信号之间的关系。

2) 发挥多种无损检测技术的优势, 联合太赫兹技术在内的其他检测方法, 进行热障涂层无损评价研究。由于热障涂层失效机理复杂, 为了保障热障涂层全生命周期的结构安全性和预测剩余寿命, 需要在各个服役阶段对涂层进行不同方面的评估, 但目前来看热障涂层的全面无损评价仅靠任何一种单一的无损检测技术还不够, 需要联合多种检测手段, 充分互相辅助, 以达到能够对各个阶段的状态进行有效监测的目的。例如: 声发射技术对于热障涂层初期的微裂纹萌生和扩展状态能够有效评估, 这对辅助其他无损检测手段(包括太赫兹)进一步监测失效因素(包括裂纹)具有至关重要的指导作用。

3) 建立热障涂层无损评价数据库, 联合信号处理、优化算法和机器学习等数据处理的先进方法, 构建结构-性能-寿命-信号之间的关联模型, 发展可用于实际工业化检测的热障涂层无损评价系统。

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] 王铀. 热喷涂纳米涂层 20 年回顾与展望[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 1-9.
WANG You. Review and prospects for 20-year development of thermal sprayed nanocoatings[J]. Surface technology, 2016, 45(9): 1-9.
- [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] 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 Yi-chun, LIU Qi-xing, YANG Li, et al. Failure mechanisms and life prediction of thermal barrier coatings[J]. Chinese journal of solid mechanics, 2010, 31(5): 504-531.
- [7] 刘小菊, 王腾, 李偲偲, 等. 等离子喷涂热障涂层高温 TGO 的形成与生长研究[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 91-96.
LIU Xiao-ju, WANG Teng, LI Cai-cai, et al. Formation and growth behavior of TGO in air plasma sprayed thermal barrier coatings at high temperature[J]. Surface technology, 2015, 44(11): 91-96.
- [8] RABIEI A, EVANS A G. Failure mechanisms associated with the thermally grown oxide in plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. Acta materialia, 2000, 48(15): 3963-3976.
- [9] 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.
- [10] 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, et al. Study of failure mechanisms of thermal barrier coatings by plasma spraying[J]. Journal of Guangdong non-ferrous metals, 2002, 12(2): 116-119.
- [11] 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.
- [12] 刘洲庠, 于金鑫, 李强. 热障涂层陶瓷层/TGO 界面开裂行为的有限元模拟[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 70-76.
LIU Zhou-xiang, YU Jin-xin, LI Qiang. Finite element simulation of ceramic layer/TGO interfacial crack on thermal barrier coating[J]. Surface technology, 2017, 46(7): 70-76.
- [13] 王卫泽, 方焕杰, 黄继波. 防 CMAS 腐蚀热障涂层开裂的研究现状[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 23-29.
WANG Wei-ze, FANG Huan-jie, HUANG Ji-bo. Research status on cracking of thermal barrier coatings against CMAS corrosion[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 23-29.
- [14] 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, 2012, 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*, 2012, 42(6): 704-721.
- [15] KRAUSE A R, GARCES H F, DWIVEDI G, et al. Calcia-magnesia-alumino-silicate(CMAS)-induced degradation and failure of air plasma sprayed yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings[J]. *Acta materialia*, 2016, 105: 355-366.
- [16] ZHOU Z, GUO H, WANG J, et al. Microstructure of oxides in thermal barrier coatings grown under dry/humid atmosphere[J]. *Corrosion science*, 2011, 53(8): 2630-2635.
- [17] 师俊东, 何箐. 热障涂层服役环境模拟实验方法[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(2): 32-42.
- SHI Jun-dong, HE Jing. Service environment simulation test method of thermal barrier coatings[J]. *Journal of aeronautical materials*, 2018, 38(2): 32-42.
- [18] 杨丽, 罗毅, 朱旺, 等. 一种热障涂层服役工况模拟试验用涡轮模型: 中国, CN109443773A[P]. 2019-03-08.
- YANG Li, LUO Yi, ZHU Wang, et al. Turbine model for thermal barrier coating service simulation test: China, CN109443773A[P]. 2019-03-08.
- [19] 杨丽, 张春兴, 李朝阳, 等. 一种涡轮叶片热障涂层模拟试验过程中损伤实时检测方法: 中国, CN109459286A[P]. 2019-03-12.
- YANG Li, ZHANG Chun-xing, LI Zhao-yang, et al. Real-time damage detection method for thermal barrier coating simulation test of turbine blade: China, CN109459286A[P]. 2019-03-12.
- [20] 杨丽, 周益春, 刘志远, 等. 一种涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统: 中国, CN109682702A[P]. 2019-04-26.
- YANG Li, ZHOU Yi-chun, LIU Zhi-yuan, et al. Turbine blade thermal barrier coating working condition simulation experiment test system: China, CN109682702A[P]. 2019-04-26.
- [21] YONG L, CHEN Z, MAO Y, et al. Quantitative evaluation of thermal barrier coating based on eddy current technique[J]. *Ndt and E international*, 2012, 50: 29-35.
- [22] ZHANG D, YU Y, LAI C, et al. Thickness measurement of multi-layer conductive coatings using multifrequency eddy current techniques[J]. *Nondestructive testing and evaluation*, 2016, 31(3): 191-208.
- [23] CHEN H L R, ZHANG B, ALVIN M A, et al. Ultrasonic detection of delamination and material characterization of thermal barrier coatings[J]. *Journal of thermal spray technology*, 2012, 21(6): 1184-1194.
- [24] MA Z, ZHAO Y, LUO Z, et al. Ultrasonic characterization of thermally grown oxide in thermal barrier coating by reflection coefficient amplitude spectrum[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(4): 1005-1009.
- [25] ZHAO Y, CHEN J, ZHANG Z. Nondestructive characterization of thermal barrier coating by noncontact laser ultrasonic technique[J]. *Optical engineering*, 2015, 54(9): 094104.
- [26] HASLBECK J L, KUEHN N J, LEWIS E G, et al. Cost and performance baseline for fossil energy plants volume 1: Bituminous coal and natural gas to electricity[J]. DOE/NETL, 2010, 128: 201.
- [27] SHIOHARA Y, TANEDA T, YOSHIKUMI M. Overview of materials and power applications of coated conductors project[J]. *Japanese journal of applied physics*, 2011, 51(1R): 010007.
- [28] GUO S Q, MUMM D R, KARLSSON A M, et al. Measurement of interfacial shear mechanical properties in thermal barrier coating systems by a barb pullout method[J]. *Scripta materialia*, 2005, 53(9): 1043-1048.
- [29] SABBAGH H A, SABBAGH E H, MURPHY R K, et al. Assessing thermal barrier coatings by eddy current inversion[J]. *Materials evaluation*, 2001, 59(11): 1307-1312.
- [30] GOLDFINE N, SCHLICKER D, SHEIRETOV Y, et al. Conformable eddy-current sensors and arrays for fleetwide gas turbine component quality assessment[J]. *Journal of engineering for gas turbines and power transactions of the ASME*, 2002, 124(4): 904-909.
- [31] AVDELIDIS N P, ALMOND D P. Transient thermography as a through skin imaging technique for aircraft assembly: Modelling and experimental results[J]. *Infrared physics and technology*, 2004, 45(2): 103-114.
- [32] SHRESTHA R, KIM W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography—Part I: Simulation[J]. *Infrared physics and technology*, 2017, 83: 124-131.
- [33] SHRESTHA R, KIM W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography—Part II: Experimental investigation[J]. *Infrared physics and technology*, 2018, 92: 24-29.
- [34] SUGASAWA A, SHINOB U. Measurements of elastic properties of plasma-sprayed coatings using bulk ultrasonic pulses[J]. *Japanese journal of applied physics*, 2004, 43(5B): 3109-3114.
- [35] 林祺. 涂层性能的超声无损检测与表征技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- LIN Qi. Research on ultrasonic nondestructive testing and characterization of coating properties[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [36] JEFFREY I, ELDRIDGE E. Monitoring delamination progression in thermal barrier coatings by mid-infrared reflectance imaging[J]. *International journal of applied ceramic technology*, 2006, 56: 541.
- [37] WANG W, WEI J, HONG H, et al. Effect of processing and service conditions on the luminescence intensity of plasma sprayed($\text{Tm}^{3+}+\text{Dy}^{3+}$) co-doped YSZ coatings[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2014, 584: 136-141.
- [38] CHRISTENSEN R J, LIPKIN D M, CLARKE D R, et al. Nondestructive evaluation of the oxidation stresses through thermal barrier coatings using Cr^{3+} piezo spectroscopy[J]. *Applied physics letters*, 1996, 69(24): 3754-3756.

- [39] ANDERSON P S, WANG X, XIAO P. Impedance spectroscopy study of plasma sprayed and EB-PVD thermal barrier coatings[J]. *Surface and coatings technology*, 2004, 185(1): 106-119.
- [40] WANG Z, ZHAO M, WU R, et al. Non-destructive evaluation of thermally grown oxides in thermal barrier coatings using impedance spectroscopy[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(15): 5048-5058.
- [41] YANG X, WEI L, LI J, et al. Microstructural evolution of plasma spray physical vapor deposited thermal barrier coatings at 1150 °C studied by impedance spectroscopy[J]. *Ceramics international*, 2018, 44(9): 10797-10805.
- [42] 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 applications[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(natural science edition)*, 2010, 22(6): 703-707.
- [43] ZHONG S. Progress in terahertz nondestructive testing: A review[J]. *Frontiers of mechanical engineering*, 2018(3): 1-9.
- [44] ZANDONELLA C. Terahertz imaging: T-ray specs[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 721-722.
- [45] DONG J. Terahertz imaging for nondestructive evaluation and material characterization[D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2017.
- [46] NAFTALY M, VIEWEG N, DENINGER A. Industrial applications of terahertz sensing: State of play[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4203.
- [47] WIEGAND C, HERRMANN M, BACHTLER S, et al. A pulsed THz imaging system with a line focus and a balanced 1-D detection scheme with two industrial CCD line-scan cameras[J]. *Optics express*, 2010, 18(6): 5595-5601.
- [48] KOWALSKI M, PALKA N, PISZCZEK M, et al. Hidden object detection system based on fusion of THz and VIS images[J]. *Acta physica polonica series A*, 2013, 124(3).
- [49] EADIE L, REID C, FITZGERALD A. Optimizing multi-dimensional terahertz imaging analysis for colon cancer diagnosis[J]. *Expert systems with applications*, 2013, 40(6): 2043-2050.
- [50] AMENABAR I, LOPEZ F, MENDIKUTE A. In introductory review to THz non-destructive testing of composite mater[J]. *Journal of infrared, millimeter, and terahertz waves*, 2013, 34(2): 152-169.
- [51] 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. Study on parallel crack monitoring of thermal barrier coatings based on terahertz technology[J]. *Surface technology*, 2020, 49(5): 91-97.
- [52] 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.
- [53] WHITE J, FICHTER G, CHERNOVSKY A, et al. Time domain terahertz non-destructive evaluation of aeroturbine blade thermal barrier coatings[J]. *American institute of physics*, 2009, 1096(1): 434-439.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] FUKUCHI T, FUSE N, MIZUNO M, et al. Measurement of refractive index of thermal barrier coating using reflection of terahertz waves and variable aperture[J]. *Electronics and communications in Japan*, 2016, 99(5): 54-61.
- [57] FUKUCHI T, OZEKI T, OKADA M, et al. Nondestructive inspection of thermal barrier coating of gas turbine high temperature components[J]. *IEEE transactions on electrical and electronic engineering*, 2016, 11(4): 391-400.
- [58] KRIMI S, Klier J, JONUSCHEIT J, et al. Self-calibrating approach for terahertz thickness measurements of ceramic coatings[C]//2016 41st international conference on infrared, millimeter, and terahertz waves (IRMMW-THz). Pasadena: IEEE, 2016: 1-2.
- [59] 曹丙花, 蔡恩泽, 李素珍, 等. 基于太赫兹技术的热障涂层陶瓷层厚度测量新方法: 中国, CN110081826A[P]. 2019-08-02.
CAO Bing-hua, CAI En-ze, LI Su-zhen, et al. A new method for measuring thickness of thermal barrier coating ceramic layer based on terahertz technology: China, CN110081826A[P]. 2019-08-02.
- [60] YU Z X, HUANG J B, WANG W Z, et al. Deposition and properties of a multilayered thermal barrier coating[J]. *Surface and coatings technology*, 2016, 288: 126-134.
- [61] CAO B, WANG M, LI X, et al. Noncontact thickness measurement of multilayer coatings on metallic substrate using pulsed terahertz technology[J]. *IEEE sensors journal*, 2019, 109: 2958674.
- [62] 曹丙花, 王梦云, 李慧, 等. 基于反射型太赫兹时域光谱技术的热障涂层多层厚度检测方法: 中国, CN108519059B[P]. 2019-06-28.
CAO Bing-hua, WANG Meng-yun, LI Hui, et al. Method for detecting multilayer thickness of thermal barrier coating based on reflection type terahertz time domain spectroscopy: China, CN108519059B[P]. 2019-06-28.
- [63] HE M Y, HUTCHINSON J W, EVANS A G. Simulation of stresses and delamination in a plasma-sprayed thermal barrier system upon thermal cycling[J]. *Materials science and engineering: A*, 2003, 345(1-2): 172-178.

- alloys[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [17] 热焱, 郭雨, 李彦姣, 等. 耐热镁合金及其设计方法[J]. 铸造技术, 2019, 40(2): 170-172.
RE Yan, GUO Yu, LI Yan-jiao, et al. Heat-resistant magnesium alloy and design methods[J]. Foundry technology, 2019, 40(2): 170-172.
- [18] 张娜, 程仁菊, 董含武, 等. Sr 在耐热镁合金中的应用及研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(15): 2565-2571.
ZHANG Na, CHENG Ren-ju, DONG Han-wu, et al. Application and research progress of strontium in heat-resistant magnesium alloy[J]. Materials reports, 2019, 33(15): 2565-2571.
- [19] 陈庆强, 赵志浩, 王高松, 等. Y 含量对 Mg-Al-Zn 堆焊合金摩擦磨损性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(6): 1812-1817.
CHEN Qing-qiang, ZHAO Zhi-hao, WANG Gao-song, et al. Effect of yttrium content on friction and wear resistance of surfacing welding Mg-Al-Zn alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(6): 1812-1817.
- [20] CHEN E, ZHANG K, ZOU J. Laser cladding of a Mg based Mg-Gd-Y-Zr alloy with Al-Si powders[J]. Applied surface science, 2016, 367: 11-18.
- [21] GAO Y, WANG Q, GU J, et al. Behavior of Mg-15Gd-5Y-0.5Zr alloy during solution heat treatment from 500 to 540 °C[J]. Materials science and engineering: A, 2007, 459(1-2): 117-123.
- [22] 杨晓敏, 侯华, 赵宇宏, 等. $Mg_{17}Al_{12}$, Al_2Y and Al_2Ca 相稳定性与弹性性能第一原理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(4): 875-880.
YANG Xiao-min, HOU Hua, ZHAO Yu-hong, et al. First-principles study of structural stabilities and elastic properties of $Mg_{17}Al_{12}$, Al_2Y and Al_2Ca phases[J]. Rare metal materials and engineering, 2014, 43(4): 875-880.
- [23] 陈宏. ZM5 铸造镁合金激光表面修复与强化[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
CHEN Hong. Repairing and strengthening of ZM5 magnesium alloy by laser surface welding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [24] DAI J, ZHU S, EASTON M A, et al. Heat treatment, microstructure and mechanical properties of a Mg-Gd-Y alloy grain-refined by Al additions[J]. Materials science and engineering: A, 2013, 576: 298-305.
- [25] 高菲, 付彭怀, 李应典, 等. 铸造 Mg-Gd-Y-Al 镁合金的拉伸与阻尼性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(4): 440-444.
GAO Fei, FU Peng-huai, LI Ying-dian, et al. Tensile properties and damping capacity of cast Mg-Gd-Y-Zr alloys [J]. Special casting & nonferrous alloys, 2014, 34(4): 440-444.

(上接第 137 页)

- [64] JACKSON J B. Terahertz time-domain reflectometry of multilayered systems[D]. Michigan: The University of Michigan, 2008.
- [65] CHEN C C, LEE D J, POLLOCK T, et al. Terahertz characterization of interfacial oxide layers and voids for health monitoring of ceramic coatings[C]//2009 34th International conference on infrared, millimeter, and terahertz waves. Busan: IEEE, 2009: 1-2.
- [66] 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.
- [67] 王卫泽, 李元军, 叶东东, 等. 一种基于太赫兹光谱技术的热障涂层中 CMAS 的检测方法: 中国, CN110455739A[P]. 2019-11-15.
WANG Wei-ze, LI Yuan-jun, YE Dong-dong, et al. Detection method of CMAS in thermal barrier coating based on terahertz spectroscopy: China, CN110455739A[P]. 2019-11-15.
- [68] 王卫泽, 叶东东, 黄继波, 等. 一种基于太赫兹技术的热障涂层的冲蚀形貌的测试方法: 中国, CN108535212A [P]. 2018-09-14.
WANG Wei-ze, YE Dong-dong, HUANG Ji-bo, et al. Test method for erosion morphology of thermal barrier coating based on terahertz technology: China, CN108535212A[P]. 2018-09-14.
- [69] 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.
- [70] WATANABE M, KURODA S, YAMAWAKI H, et al. Electromagnetic properties of plasma sprayed thermal barrier coatings in terahertz range[C]//2009 34th international conference on infrared, millimeter, and terahertz waves. Busan: IEEE, 2009: 1-2.
- [71] YE D, WANG W, ZHOU H, et al. In-situ evaluation of porosity in thermal barrier coatings based on the broadening of terahertz time-domain pulses: Simulation and experimental investigations[J]. Optics express, 2019, 27(20): 28150-28165.
- [72] 王卫泽, 叶东东, 周海婷, 等. 一种基于太赫兹技术的热障涂层平行裂纹监测方法: 中国, CN109490244A[P]. 2019-03-19.
WANG Wei-ze, YE Dong-dong, ZHOU Hai-ting, et al. Method for monitoring parallel crack of thermal barrier coating based on terahertz technology: China, CN109490244A [P]. 2019-03-19.
- [73] SCHEMMEL P, DIEDERICH G, MOORE A J. Measurement of direct strain optic coefficient of YSZ thermal barrier coatings at GHz frequencies[J]. Optics express, 2017, 25(17): 19968-19980.
- [74] SCHEMMEL P, DIEDERICH G, MOORE A J. Direct stress optic coefficients for YTZP ceramic and PTFE at GHz frequencies[J]. Optics express, 2016, 24(8): 8110-8119.