

热障涂层无损检测技术进展

Nondestructive Inspection Technology of Thermal Barrier Coatings

■ 唐诗白 荆甫雷 吴长波 / 中国航空发动机研究院

热障涂层广泛应用于航空发动机涡轮叶片等热端部件的热防护，研发能够表征热障涂层物理特性、缺陷、应力、失效过程、剩余寿命等的无损检测方法，对于发动机热端部件的可靠性、安全性提升具有重要意义。

热障涂层是一种在金属结构表面使用的热防护材料，由隔热的陶瓷层与抗氧化的金属黏结层组成，广泛应用于航空发动机热端部件，如涡轮叶片、燃烧室和尾喷管等，可有效提升上述结构耐温能力，延长部件服役寿命或者提高发动机总体性能和热效率。作为一种功能材料，热障涂层的使用寿命与隔热效果是衡量其服役性能的最关键技术指标，前者与陶瓷层-黏结层界面结合强度、残余应力、缺陷/裂纹分布及其尺寸等密切相关，而后者则取决于陶瓷层厚度和孔隙率。发展面向热障涂层的无损检测技术，一方面可用于涂层出厂质量控制，在装机前筛选出存在缺陷/裂纹或力-热性能异常的零件，有效避免服役过程中的涂层过早剥落及基体超温等现象，从而延长耐温结构的使用寿命；另一方面亦可用于发动机视情维修和寿命管理，通过对带涂层构件的无损检测，识别涂层损伤情况及可能失效区域，为维修保障策略的制定提供关键依据。本文对目前常见的热障涂层无损检测技术进行了探讨，简要阐述了相关技术的检测原理与研究进展，期望能够为涂层检测技术进步，以及带涂层结构寿命设计/寿命管理等提供参考。

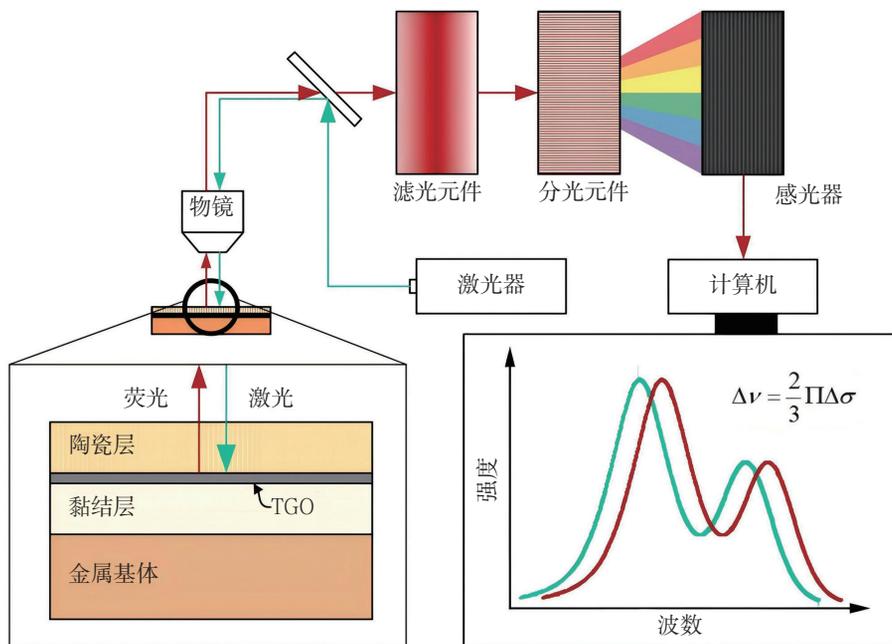


图1 PLPS测试原理

光致荧光光谱法

在高温环境下，黏结层中的Al等元素向外扩散，与透过陶瓷层的氧气发生反应，在陶瓷层与黏结层界面处形成一层薄的热生长氧化物(TGO)，TGO主要成分为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，并含有少量的 Cr_3+ 杂质(来源于黏结层或基体扩散)，在受到绿色或蓝色激光辐照时会发出红色荧光，其光谱的特征峰频移与TGO受力状态相关。光致荧光光谱法(PLPS)就是基于上述原理，根据荧光光谱的R线频移，结合平面应力假设，测定TGO在面内方向的应力(见图

1)。由于激光需要透过陶瓷层照射到TGO上才能有效激发荧光，对于等离子喷涂(APS)热障涂层，陶瓷层中的孔洞和层间边界等缺陷会造成光信号的衰减，PLPS技术局限于涂层厚度小于 $75\mu\text{m}$ 的情形，在应用于更厚的大气APS涂层时，则需要采用与氧化钇稳定氧化锆(YSZ)材料折射率相近的液态介质填充陶瓷层内的孔洞和层间边界。对于电子束物理气相沉积(EB-PVD)热障涂层，具有柱状晶结构的陶瓷层可以起到光波导的作用，从而避免光信号衰减，因此PLPS技术

可用于全厚度的EB-PVD涂层测量 ($\geq 300 \mu\text{m}$)^[1]。该项技术最早是由加州大学克拉克 (Clarke) 团队在20世纪末提出, 经过20多年发展, 目前已成为EB-PVD热障涂层TGO残余应力测量的首选无损检测方法^[2]。

由于热障涂层各层材料热膨胀系数的差异, TGO在冷却过程中承受巨大的平面双轴压缩应力, 常温下达到极值 ($-3 \sim -6\text{GPa}$)^[3], 而TGO局部断裂或者陶瓷层-TGO界面、TGO-黏结层界面分离等界面损伤则会引起TGO室温残余应力的松弛。因此, PLPS技术可用于EB-PVD热障涂层的损伤量化表征。2004年, 美国康涅狄格大学^[4]通过采用激发/接收同轴光纤与高精度拉曼/荧光光谱仪相集成的方式, 研发出一套适用于涡轮叶片热障涂层无损检测与质量控制的便携式PLPS装置, 并对比分析了不同材料体系下TGO残余应力均值、方差以及PLPS信号中无应力强度比等特征参数与涂层剩余寿命间的关联。此后, 意大利CESI公司^[5]对上述装置进行了改进, 重新设计了一种适用于狭小空间的L形孔探光纤探头, 实现了对涡轮叶片热障涂层的原位检测。

红外热像法

红外热像法 (ITT) 是一种基于红外辐射原理, 通过扫描、记录或观察由于缺陷或内部结构不连续所导致的待测对象表面温度场变化, 实现表面及内部缺陷检测或内部结构分析的无损检测方法, 可细分为脉冲热成像 (PT)、锁定热成像 (LIT) 和结构光学扫描热成像 (SOST) 等。

脉冲热成像技术采用光脉冲照射待测对象, 通过红外摄像机采集的热响应信号来确定待测对象内部缺陷、损伤等信息。该技术所涉及的脉冲热光谱作用时间较短, 可用于瞬态测量, 局限性主要在于缺陷检测结果易受涂层厚度变化、表面状态等因素的影响。目前该技术已经实现了对热障涂层平板试样内脱黏缺陷深度和直径的准确识别。

锁定热成像技术是使用周期调制的热激励来加热待测对象, 根据表面温度变化所产生的振幅、相位差异, 分析待测对象内部缺陷信息。目前该技术已成功应用于氧化锆陶瓷涂层厚度的快速检测 (厚度范围 $0.25 \sim 1\text{mm}$)^[6]。

结构光学扫描热成像技术是采用恒定功率、不同形状的热激励来扫描待测对象的表面, 利用红外热

像仪记录温度变化, 再通过图像处理显示缺陷的一种检测技术。激光扫描作为一种新兴的热激发方法, 具有功率密度高、脉冲宽度可调、能量均匀等优点, 常用作SOST技术的热激励。根据扫描方式的不同, 该技术又可细分为线性扫描、点扫描等多种形式。北京理工大学综合考虑线性扫描检测范围/速度大, 以及点扫描灵敏度高的优势, 开发了一种激光多模式扫描热成像技术, 通过理论分析、数值模拟以及试验验证, 总结了两种扫描模式下裂纹的热响应特征, 并基于该特征实现了对热障涂层表面裂纹位置和形状的快速检测, 在线扫描阶段可以快速检测到宽度大于 $20 \mu\text{m}$ 的表面裂纹, 而在点扫描阶段可以准确检测到 $9.5 \mu\text{m}$ 宽的表面裂纹^[7]。

声发射法

材料内部的微观断裂过程伴随着弹性应力波的释放, 即声发射 (AE) 现象 (见图2)。AE法是基于上述原理, 对释放的AE信号进行收集、处理、分析, 从而判断待测对象的损伤、破坏情况。AE法具有连续、实时监测等特点, 并且对材料裂纹萌生和扩展十分敏感, 目前已成为评价热

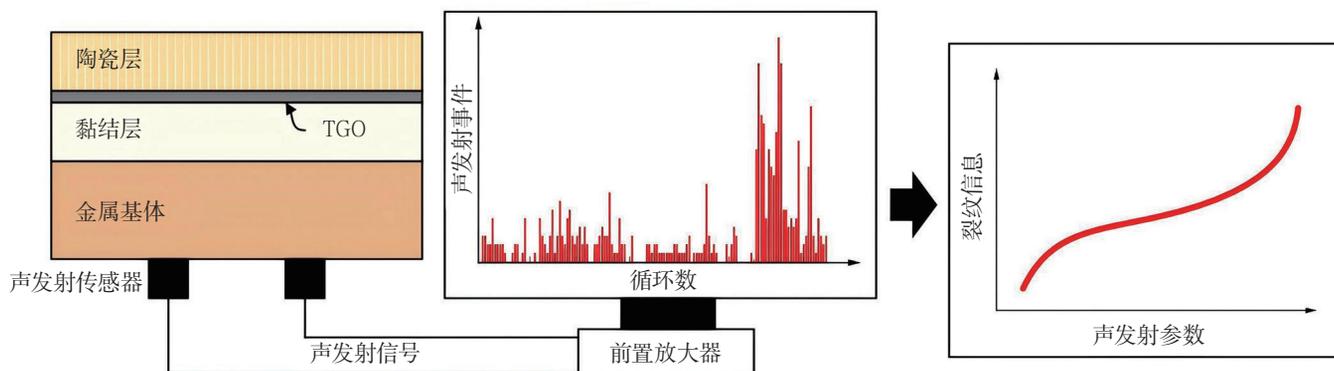


图2 AE测试原理

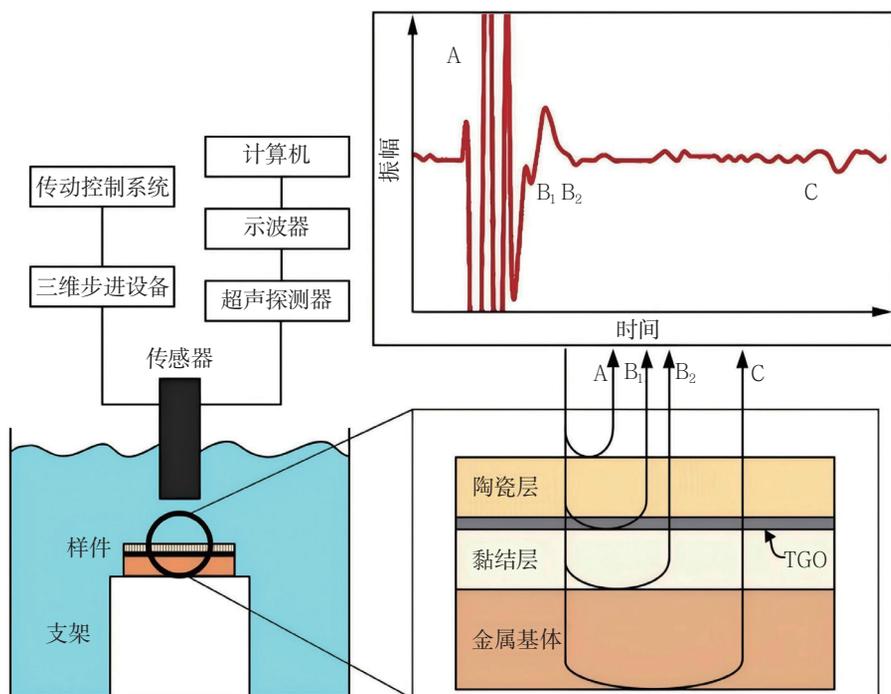


图3 超声法原理

障涂层结构完整性以及分析涂层破坏全过程的重要辅助手段。近期国内外学者分别将AE法引入到热障涂层四点/三点弯曲、压缩剥落等试验中，基于AE信号特征分析涂层断裂行为或识别失效时刻，实现了对涂层断裂韧性、结合强度等关键参数的精准获取^[8]。

AE法也可应用于涂层损伤演化过程的量化监测，通过累积AE信号能量、事件数或幅值等参数评价涂层所产生的损伤。由于累积AE信号的递增特性，该方法可较好地描述涂层损伤随热、力载荷的增长过程；但AE信号易受到陶瓷层内相邻柱状晶的张开、闭合以及基体、黏结层塑性变形等诸多不确定性因素的干扰。

超声法

超声波是频率高于20kHz的机械波，其在材料中以一定的速度和方向传

播，一旦遇到声阻抗不同的异质界面就会发生反射（见图3）。超声检测（UT）就是基于这一原理来实现对热障涂层性能、厚度、内部缺陷等的无损检测。目前UT所使用的超声波频率范围通常在0.5 ~ 5MHz^[9]。该技术已经成功应用于APS与EB-PVD热障涂层材料性能变化检测与层离失效的早期识别。韩国成均馆大学对APS热障涂层试样进行了水浸UT，结合适当的信号处理和分析技术，获得了涂层界面层离的扫描

图像，并利用现有的数学模型对层离程度进行了评价。大连理工大学基于超声波反射系数振幅谱，同时得到了EB-PVD热障涂层试样的涂层厚度及其纵向波速，进而根据超声波反射系数相位谱，实现了对涂层密度的无损检测。此后，采用超声反射系数振幅谱评价EB-PVD热障涂层中TGO的生长情况，发现氧化引起的TGO演化改变了陶瓷层与其相邻介质之间的声阻抗匹配关系，并提出可采用谐振频移确定TGO厚度。

太赫兹时域光谱法

太赫兹波通常是指频率为0.1 ~ 10 THz、波长为0.03 ~ 3 mm的电磁波（见图4），具有相干性、瞬态性和宽频带等突出性能，能够穿透陶瓷等物质，可实现高精度定量检测。太赫兹时域光谱法（THz-TDS）是一种相干探测技术，利用待测对象的太赫兹透射或反射光谱，同时获得太赫兹脉冲的振幅和相位信息，通过对时域波形进行傅里叶变换得到待测对象的吸收系数、折射率以及厚度等参数（见图5）。由于热障涂层的黏结层与基体均为金属材料，THz-TDS在应用于涂层时均采用反射式测量系统。目前美国已将该技术用于涡轮叶片表面热障涂层厚度

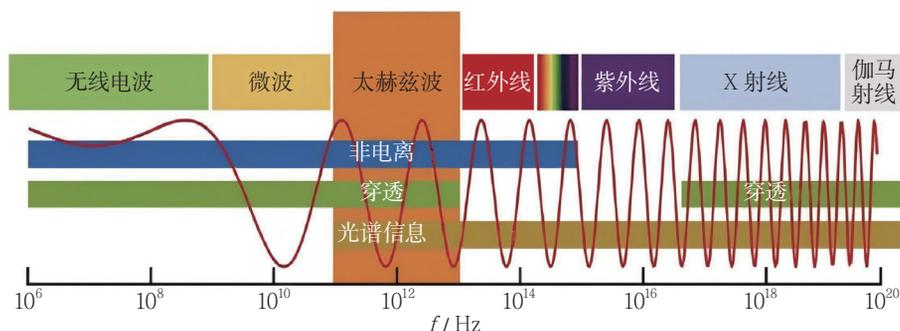


图4 电磁波谱图分布示意

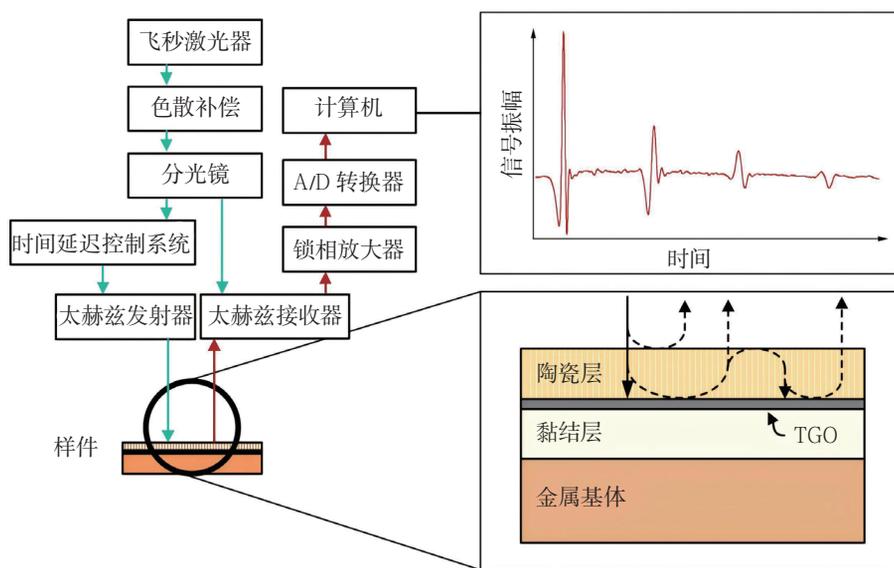


图5 THz-TDS原理示意

的二维成像和均匀性表征^[10]，同时通过延迟太赫兹脉冲到达时间和改变脉冲宽度和形状，实现了对陶瓷-金属界面孔洞与微米级TGO层的演化分析，初步证明了其在涡轮叶片热障涂层失效预警的有效性。此外，日本学者的研究结果表明，在0.1 ~ 6.3THz的频率范围内，APS陶瓷层介电常数的实部与涂层的孔隙率强相关，证明了该技术可用于陶瓷层孔隙率的无损评价^[11]。

涡流法

涡流法是基于电磁感应原理，通过测量线圈阻抗或感应电压的变化来反映待测对象材料属性，主要用于检测热障涂层厚度以及内部缺陷，可细分为脉冲涡流（PEC）检测技术与涡流热成像（ECT）技术。

PEC检测技术也称为暂态涡流检测技术，通过在线圈中通入恒定电流或电压，在待测构件中产生稳定磁场，当断开输入时，线圈周围会产生电磁场，该电磁场由直接从线圈中耦合出的一次电磁场和构件

中感应出的涡流场产生的二次电磁场两部分叠加而成。后者包含了待测构件厚度或缺陷等信息，采取合适的检测元件和方法对二次场进行测量、分析，即可得到待测构件信息。目前该技术已应用于EB-PVD热障涂层陶瓷层厚度和黏结层厚度及电导率等参数的测量^[12]。

ECT技术是一种将电磁感应生热和瞬态红外热成像相结合的混合检测技术，可在相对较大区域内实现快速有效的缺陷检测和材料特征提取。当检测线圈通入高频交变电流时，待测导电材料内产生涡流，而待测材料中的缺陷一般呈现出高阻态，其存在会改变电流分布，在缺陷区域产生焦耳热，通过热像仪捕捉变化的热信号，经采集终端处理后即可实现对表面或近表面缺陷检测。目前该技术已实现对带热障涂层平板/圆片试件中预制黏结层表面脱黏缺陷（ $\varphi 2\text{ mm}$ ）和陶瓷层盲孔缺陷（ $\varphi 0.5\text{ mm}$ ）以及真实涡轮叶片中预制脱黏缺陷（ $\varphi 2\text{ mm}$ 、 $\varphi 3\text{ mm}$ ）的无损检测。

阻抗谱法

阻抗谱（IS）法是通过对待测对象施加交流电压，根据得到的交流阻抗，分析待测对象等效电路中元件参数的变化，由此判断待测对象微观结构的变化。检测时，在热障涂层上表面、基体下表面分别夹持电极，并施加不同频率的电场，涂层中各层材料成分的差异会产生不同的电响应，而微观结构的改变则会引起阻抗谱的变化。目前阻抗谱法主要应用于陶瓷层厚度与微裂纹/烧结/腐蚀情况以及TGO厚度等的无损检测^[13]。

计算机断层成像法

计算机断层成像（CT）法是利用X射线照射待测对象，获得对象在不同角度的X射线吸收衬度，通过反投影重构待测对象的三维形貌（见图6），可以清晰、准确、直观地展示热障涂层内部的结构、组成、材质及缺陷，但检测成本相对较高，并且由于设备空间限制，通常只能采用小型试样。普惠公司、伯明翰大学等研究机构先后将CT技术应用于EB-PVD与APS热障涂层小试件的形貌表征，重建了涂层系统的三维微观模型，识别出陶瓷层、黏结层以及TGO及缺陷等微观结构特征，为各层厚度测量、裂纹/缺陷评价等提供了精准的可视化信息^[14]。

结束语

采用光、声、电等信号对热障涂层进行无损检测是加强涂层出厂质量控制，提升涂层及其下方耐高温结构安全性与可靠性的重要技术手段。其中，光致荧光光谱法适用于EB-PVD热障涂层TGO残余应力与涂层损伤的定量化表征测量；红外热像

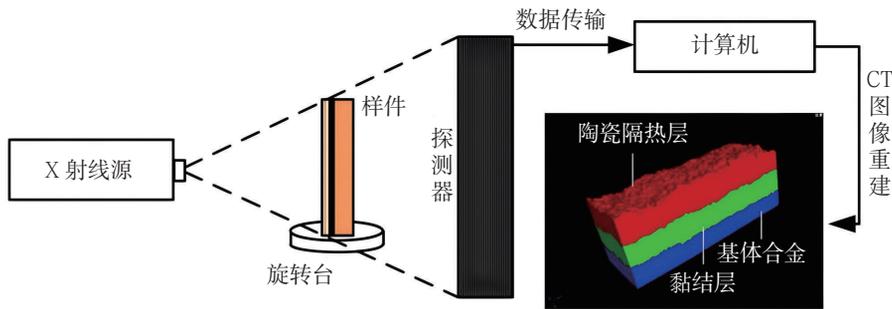


图6 CT原理示意

法可获取关于热障涂层厚度、内部缺陷、裂纹、损伤等重要信息；声发射法在涂层断裂韧性、结合强度等测试时破坏时刻的识别以及检测与涂层损伤演化过程的量化在线监测等方面应用广泛；超声法可实现对热障涂层性能、厚度、内部缺陷等检测；太赫兹时域光谱法主要用于涂层厚度的定量检测，同时在缺陷检测、涂层失效检测方面具有一定潜力；涡流法已成功应用于涂层各层厚度测量以及缺陷检测；阻抗谱法可实现对陶瓷层厚度与微裂纹、烧结、腐蚀情况以及TGO厚度等的无损检测；计算机断层成像法能够清晰、准确、直观地展示热障涂层内部的结构、组成、材质及缺陷，提供热障涂层三维可视化信息。上述无损检测技术在测试原理、对象、结果等方面存在较大差异，在使用时应根据具体的应用场景合理选取，并与其他有损/无损检测结果比对验证，提升检测结果的可信度。

航空动力

(唐诗白, 中国航空发动机研究院, 高级工程师, 主要从事航空发动机结构强度研究)

参考文献

[1] PATON N E, MURPHY K S, CLARKE D R. Thermal barrier coating stress measurement: US6072568[P]. 1998-07-06.

[2] SELCUK A, ATKINSON A. The evolution of residual stress in the thermally grown oxide on Pt diffusion bond coats in TBCs[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51:535-549.

[3] PTASZEK G, CAWLEY P, ALMOND D, et al. Transient thermography testing of unpainted thermal barrier coating (TBC) systems[J]. *NDT&E International*, 2013, 59:48-56.

[4] GELL E H, SRIDHARAN S, WEN M, et al. Photoluminescence piezospectroscopy: a multi-purpose quality control and NDI technique for thermal barrier coatings[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2004, 1(4):316-329.

[5] MARIA D L, RINALDI C, LUPETIN P, et al. Portable optical system for in-situ thermal barrier assessment of service operated blades[J]. *ASME Turbo Expo*, 2006, 3:78-93.

[6] TANG Q, DAI J, LIU J, et al. Quantitative detection of defects based on Markov-PCA-BP algorithm using pulsed infrared thermography technology[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 3:144-148.

[7] JIAO D, SHI W, LIU Z, et al. Laser multi-mode scanning thermography method for fast inspection of micro-

cracks in TBCs surface[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2018, 37:30.

[8] ZHU W, YANG L, GUO J W, et al. Determination of interfacial adhesion energies of thermal barrier coatings by compression test combined with a cohesive zone finite element model[J]. *International Journal of Plasticity*, 2015, 64:76-87.

[9] CHEN H, ZHANG B, ALVIN M, et al. Ultrasonic detection of delamination and material characterization of thermal barrier coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, 21(6):1184-1194.

[10] WHITE J, FICHTER G, CHERNOVSKY A, et al. Time domain terahertz non-destructive evaluation of aeroturbine blade thermal barrier coatings[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009:434-439.

[11] 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.

[12] LI Y, CHEN Z, MAO Y, et al. Quantitative evaluation of thermal barrier coating based on eddy current technique[J]. *NDT&E International*, 2012, 50: 29-35.

[13] CHEN W, LIU M, ZHANG J, et al. High-temperature oxidation behavior and analysis of impedance spectroscopy of 7YSZ thermal barrier coating prepared by plasma spray-physical vapor deposition[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(8):1764-1773.

[14] 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.