

引文格式: 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.

AO Bo, WU Guanhua. Research progress on three-dimensional imaging of thermal barrier coatings for turbine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(4): 20-27.

涡轮叶片热障涂层三维成像研究进展*

敖波, 邬冠华

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

[摘要] 热障涂层是涡轮叶片高温防护关键技术, 具有典型的层状结构特征, 且热障涂层服役过程中高温氧化产生热生长氧化物结构, 迫切需要利用三维成像方法无损探知热障涂层内部结构。由于计算机断层成像技术能提供三维立体图像, 准确再现物体内部三维结构, 是热障涂层层状结构最佳分析手段之一, 在热障涂层喷涂质量评价和高温氧化监测方面具有很好的前景。重点介绍了国内外在热障涂层微米 CT 成像、同步辐射 CT 成像、聚焦离子束-扫描电镜(FIB-SEM)三维成像及热应力有限元仿真方面的进展。最后指出了热障涂层无损检测可能的发展方向。

关键词: 热障涂层; 微米 CT; 同步辐射 CT; 聚焦离子束-扫描电镜(FIB-SEM); 涡轮叶片; 无损检测

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.04.020



敖波

教授、博士, 主要研究方向为数字射线成像、工业 CT 成像、先进结构和材料三维成像分析等。先后主持和承担了国家自然科学基金、国防基础科研、航空基金、横向课题等 10 余项科研项目。

热障涂层(Thermal Barrier Coatings, TBCs)是先进航空发动机涡轮叶片高温防护关键技术^[1], 由陶瓷隔热面层和金属黏结底层组成, 具有典型的层状结构特征。热障涂层是美国 NASA-Lewis 研究中心在 20 世纪 50 年代为了提高燃气涡轮叶片、火箭发动机的抗高温和耐腐蚀性能提出的。据报道, 通过使用热障涂层技术, 可使涡轮叶片基体温度降低 100~300℃, 寿命延长 3~5 倍, 美国几乎所有的军用和商用航空发动机采用了热障涂层技术。

热障涂层结构主要有双层、多层和梯度系统 3 种形式^[2-3]。典型双层结构涂层由涂覆在高温合金基体上的陶瓷隔热层和抗氧化黏结层构成, 其中陶瓷隔热层以 ZrO_2 为主要成分, 厚度约 90~300 μm , 起隔热作用; 黏结层为 $MCrAlY$, 厚度约

25~150 μm , 起抗氧化腐蚀作用, 实现隔热层与基体合金热膨胀系数的过渡, 提高热障涂层结合强度。热障涂层制备方法主要有等离子喷涂法、物理气相沉积法等, 图 1 为典型大气等离子喷涂(Atmospheric plasma spraying, APS)和电子束物理气相沉积(Electron beam physical vapor deposition, EB-PVD)热障涂层微观结构形貌。

热障涂层的三维结构对其性能有非常重要的影响, 直接影响热障涂层的使用寿命。热障涂层制备与使用过程中的主要问题有^[4]:

(1) 孔隙的大小、数量、形状和分布对热障涂层的强度、隔热等性能有极大影响, 孔隙的存在容易导致热障涂层服役过程中黏结层被氧化, 孔隙率是反映涂层质量的重要指标之一。

(2) 热障涂层厚度及均匀性分

* 基金项目: 国家自然科学基金(51561025)。

析对喷涂质量表征有重要作用。热障涂层厚度一般几十微米到几百微米,热障涂层厚度偏厚或偏薄都将影响涂层隔热效果及使用性能。

(3)黏结层的组织结构决定了热生长氧化物(Thermally Grown Oxide, TGO)的形成机制、成分和微结构,决定涂层的抗氧化性,黏结层的质量决定了热障涂层与基体的结合强度。

(4)热生长氧化物是陶瓷层与黏结层之间厚度约1~10 μm 的薄层结构,主要成分为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 等,是黏结层高温氧化生成的^[2]。TGO的三维分布及生长行为会显著影响热障涂层的使用寿命。对于APS涂层,氧化膜厚度达到3~5 μm 时,就容易引起陶瓷层的剥落。

(5)热障涂层内部缺陷,如微裂纹、界面分离、组分变化等,涂层内的缺陷使得高温服役环境下易产生局部破坏。

(6)热障涂层的多界面形貌对其结合性能具有重要的影响。

上述问题涉及热障涂层的组成、结构、形貌和缺陷等,可归结为热障涂层的三维层状结构表征。根据美国通用、普惠以及英国罗·罗等国际知名航空发动机公司建立的热喷涂涂层最终质量标准文件,涂层界面形貌、显微结构、结合强度以及涂层厚度等常作为关键质量评定指标,而这些指标受三维结构直接或间接影响。计算机断层成像技术(Computed tomography, CT)能以二维断层图像或三维立体图像的形式,清晰、准确、直观地展现被检测物体内部的结构、组成、材质及缺损状况^[5],在热障涂层三维结构分析上具有潜在的应用前景。

热障涂层微米CT成像

由于CT可以再现热障涂层三维结构的组成和分布等信息,国外较早使用微米CT分析热障涂层的三维结构,设备包括高分辨率的显微

CT、纳米CT、三维X射线显微镜等。2005年,Subramanian等^[6]提出了利用CT对热障涂层内部微结构进行检测的方法。由于热障涂层厚度薄、黏结层与基体合金之间成像对比度小、分割困难,以及TGO厚度仅有几个微米等,需要微米CT具有高成像空间分辨率,同时具有较高的成像衬度。传统的显微CT、纳米焦点CT系统局限于几何放大倍率,黏结层和基体之间成像衬度低,同时射线硬化等伪影影响严重,CT图像质量不高。

传统显微CT包括微焦点X射线源、数字平板探测器、高精度旋转台等部件,它通过微米焦点X射线源发射锥形束射线照射样品,使用数字平板探测器采集几何放大的投影图像,通过精密机械旋转台旋转,并采集多个不同角度的样品投影图像,通过锥束CT重建算法,得到高分辨率断层图像序列,成像过程如图2(a)所示。传统显微CT系统往往需要通过高放大倍数(样品需要靠近射线源)得到高分辨率,但样品的尺

寸受到限制。三维X射线显微镜是一种基于同步辐射光源先进光学发展起来的新型显微CT成像技术,融合了传统显微CT与光学显微镜两种技术的优点,采用了独特的两级放大技术(几何放大和光学放大)^[7]。首先,采用微焦点射线源对样品进行几何放大成像,然后X射线被CCD(Charge coupled device)探测器接收,CCD探测器的闪烁体将入射X射线转换为可见光,并通过光学系统进行光学放大,最后将可见光传送到CCD芯片输出图像。通过精密机械旋转台旋转,并采集多个不同角度的投影图像,通过锥束CT重建算法,得到高分辨率断层图像序列,成像过程如图2(b)所示。由于三维X射线显微镜的放大倍数是几何放大倍数与光学放大倍数的乘积,降低了对几何放大的依赖程度,具有很好的图像衬度。CCD探测器常用物镜有10倍和40倍镜头,对较大尺寸样品也能做到高放大倍数成像。

基于先进的微米CT成像技术,

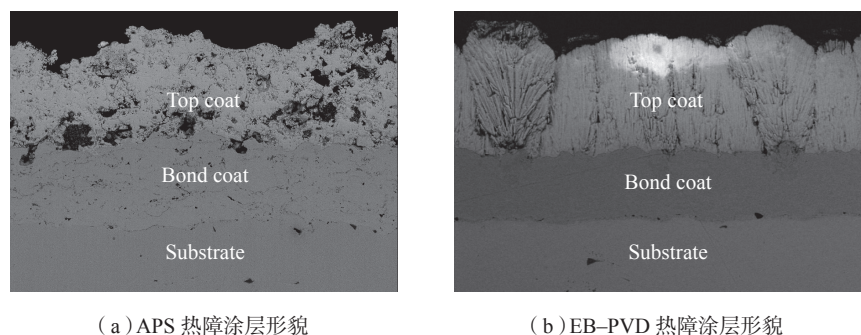


图1 两种典型热障涂层形貌
Fig.1 Two typical morphologies of TBCs

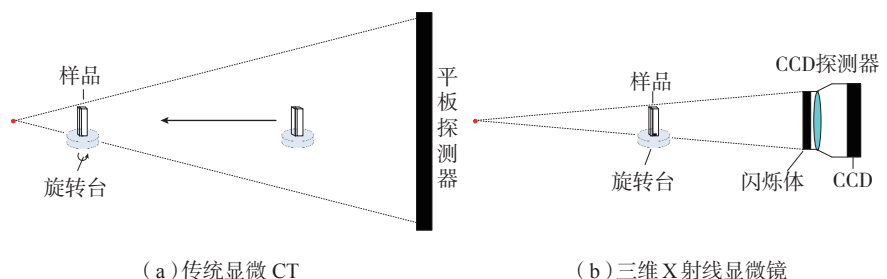


图2 微米CT成像
Fig.2 Micro-CT imaging

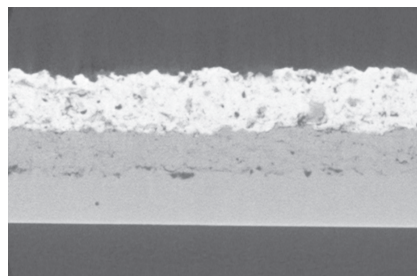
英国曼彻斯特大学 Zhao 等^[8] 针对大气等离子喷涂涂层样品(陶瓷层 200 μm , 黏结层 150 μm , 基体 5mm), 切割样品尺寸为 0.8mm \times 1mm \times 6mm, 采用显微 CT (CCD 探测器) 研究了热障涂层在 1150 $^{\circ}\text{C}$ 不同热处理时间(0h, 20h, 120h) 后同一部位微结构的变化, 首次实现了双层结构涂层形貌三维可视化, 计算得到表面粗糙度为 17.2~17.5 μm 。敖波等^[9] 采用显微 CT (焦点尺寸 4.5 μm) 对厚度 1mm 的单层涂层样品进行了三维重建, 从 CT 图像识别了孔隙。2015 年, 美国普惠公司 Ahmadian 等^[10-11] 采用成像分辨率为 0.76 μm 的三维 X 射线显微镜对热障涂层高温氧化后的热生长氧化物和热障涂层热循环产生的裂纹进行三维结构表征, 提取了陶瓷层中裂纹的三维形貌, 揭示了 APS 热障涂层内部微裂纹三维分布特征, 结果表明微米 CT 对 TGO 和微裂纹三维分析是可行的。借助高分辨率的微米 CT 设备, 国外大量开展了涡轮叶片热障涂层三维结构分析和 TGO 结构分析。Zhang 等^[12] 采用 Xradia 公司 Versa XRM-500 系统对铁基喷涂涂层的孔隙体积、尺寸和分布进行了量化表征, 发现穿透孔隙对涂层厚度敏感。张小锋等^[13] 采用三维 X 射线显微镜对 950 $^{\circ}\text{C}$ 静态氧化不同时间的热障涂层样品中 TGO 厚度进行无损测量, 并对比了场发射扫描电镜二维图像测量的 TGO 厚度, 结果表明, 通过微米 CT 测量热障涂层厚度是可行的。2016 年, 敖波等^[14] 采用北京同步辐射装置 X 射线成像站的微米 CT (Micro XCT-200) 研究了双层结构热障涂层的形貌、组成、厚度、孔隙及孔隙率等三维结构特征, 但黏结层和基体合金部分对比度不明显, 射线束硬化严重, 增加了分割难度, 成像质量有待改进。何深远^[15] 采用纳米 CT 成像技术对 APS 热障涂层分别

进行了分辨率 1.57 μm 和 0.99 μm 的三维成像(图 3 (a)), 通过三维分割技术获得了陶瓷层、黏结层和基体的三维结构及各薄层的厚度分布。钟建兰^[4] 采用微米 CT 对 APS 热障涂层三维成像, 获取了高温氧化 24h 的 TGO 图像(图 3 (b)) 和三维形态, 对 TGO 的厚度进行了定量表征。古玉祺^[16] 采用三维 X 射线显微镜对高温氧化 8h 和 48h 的 EB-PVD 热障涂层进行三维成像, 成像分辨率 0.5 μm , 能清晰观察到 TGO (图 4), 高温氧化 8h 时 TGO 厚度约 1.98 μm , 高温氧化 48h 时 TGO 厚度约 2.45 μm 。

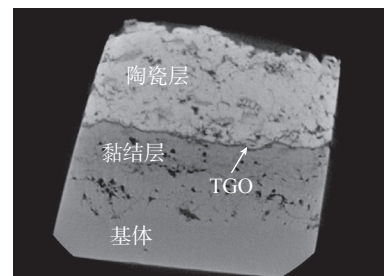
热障涂层同步辐射 CT 成像

计算机断层成像是应用广泛的

无损三维成像方法, 随着同步辐射技术的发展, 具有高度准直性、高强度、高亮度的同步辐射光束经过准直器、单色器等作用可以得到单色光, 是 CT 成像理想光源。同步辐射 CT (Synchrotron radiation computed tomography, SR-CT) 成像原理如下: 同步辐射光源产生的平行光束穿过样品到达 CCD 探测器, 得到投影图像, 通过精密机械旋转台旋转, 采集多个不同角度的样品投影图像, 应用专用 CT 重建算法, 得到高分辨率断层图像序列, 成像过程如图 5 所示。同步辐射成像特点是光源到样品的距离远大于样品到探测器的距离, 由于是平行光束, 几何放大倍数为 1 倍, 需要通过光学镜头实现放大成像, 同时由于是平行光, 旋转角度范



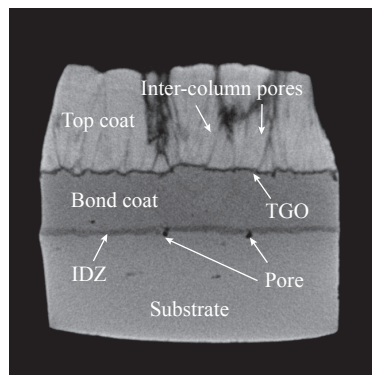
(a) APS 纳米 CT 图像(分辨率 0.99 μm)



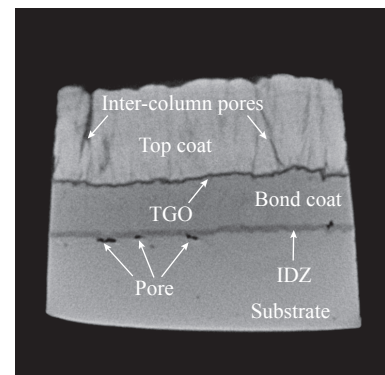
(b) APS 微米 CT 断层图像(分辨率 0.5 μm)

图3 APS热障涂层三维成像

Fig.3 Three dimensional imaging of APS thermal barrier coatings



(a) 高温氧化 8h 的 CT 图像



(b) 高温氧化 48h 的 CT 图像

图4 EB-PVD热障涂层高温氧化后三维成像

Fig.4 Three dimensional imaging of EB-PVD thermal barrier coatings after high temperature oxidation

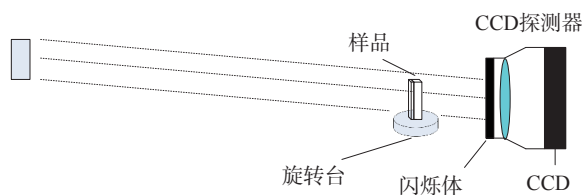


图5 同步辐射CT成像示意图

Fig.5 Schematic of SR-CT

围一般为 180° 。

20世纪90年代, Spanne等^[17-18]利用美国布鲁克海文国家实验室的同步辐射光源 NSLS 第一代显微 CT 研究了等离子喷涂热障涂层的内部缺陷, 基体为钢, 涂层为钴基碳化钨, 样品尺寸小于 0.5mm , 射线束平均能量为 45keV , 光束大小约 $3\sim 4\mu\text{m}$, 空间分辨能力 $2\sim 4\mu\text{m}$, 从 CT 图像上识别了涂层内部裂纹和孔隙, 得出了不同样品(内部送粉和外部送粉制样)的孔隙率不同。布鲁克海文国家实验室的 Jones等^[19]进一步指出了同步辐射装置在涡轮叶片热障涂层微结构分析研究上应用的可行性。Kulkarni等^[20]采用美国 APS 中心的同步辐射显微 CT 对热障涂层(基体为钢, 隔热层厚 $800\mu\text{m}$, 黏结层厚 $50\mu\text{m}$)中孔隙尺寸、形态分布等进行了量化分析, 同年利用 NSLS-X27A 光束线的显微 CT 研究了3种热喷涂氧化铝涂层中的微结构, 成像分辨率达到 $2.7\mu\text{m}$, 并实现了3种涂层(厚度 $130\mu\text{m}$)中的孔隙三维可视化^[21]。2004年, Kulkarni^[22]采用同步辐射显微 CT 对热障涂层中的缺陷进行了定量表征与可视化, 在等温退火下分析了时间与温度对微结构的影响。2005年, Kulkarni等^[23]利用美国 APS 中心的同步辐射 CT 切片图像揭示了等离子喷涂涂层内部的球形孔隙结构。Sun^[24]利用美国 APS 中心 2-BM 光束线站的显微 CT 对陶瓷涂层样品进行三维成像, 射线能量为 24keV , 成像分辨率达到 $1.48\mu\text{m}$, 识别了 $22\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$

的涂层厚度。美国西北大学 Weyant等^[25]利用阿贡国家实验室同步辐射光源 1-ID 光束线的 X 射线衍射装置, 对热障涂层热处理 112h 后的样品进行衍射分析得到 TGO 层的生长正比于热处理温度。Amsellem等^[26]利用 ESRF-ID19 光束线的显微 CT 对氧化铝涂层样品(基体为钢)三维结构进行分析, 识别了样品内部的裂纹和孔隙。由于涂层样品往往呈片状, Maurel等^[27]采用同步辐射 CL 技术(Synchrotron-radiation computed laminography, SR-CL)对热循环(1100°C)氧化后 1h 的薄板状 EB-PVD 热障涂层样品进行三维表征, 观察到 TGO (厚度约 $1.6\mu\text{m}$) 和 IDZ (Interdiffusion Zone) 结构。Khoshkhou等^[28]通过同步辐射 CT 获得了 EB-PVD 热障涂层不同氧化时间下的 TGO 厚度, 并对不同高温氧化时间下的热障涂层三维变形场进行了研究。

近年来, 随着我国同步辐射技术的发展, 国内同步辐射光源有北京同步辐射装置、合肥同步辐射装置和上海同步辐射装置等, 开展热障涂层同步辐射成像的试验条件已经具备。为了验证同步辐射 CT 成像效果, 古玉祺^[16]采用上海光源的 X 射线成像及生物医学应用(BL13W1)光束线站对高温氧化 48h 后的 EB-PVD 热障涂层进行同步辐射 CT 三维成像, 探测器采用日本 Hamamatsu 公司的 sCMOS 探测器, 探测器单元尺寸为 $6.5\mu\text{m}$, 探测器矩阵为 2048×2048 , 光斑出口至样品距离为 1.3m , 将样

品台的旋转中心调整至探测器的中心位置, 并调节样品中心位置至旋转中心, 同步辐射 CT 投影图像采集参数如下: (1) 光束能量为 28keV ; (2) 光源到工件距离为 34m ; (3) 工件到镜头距离为 0.1m ; (4) 光学放大倍数为 20 倍; (5) 视场大小为 0.6mm ; (6) 像素大小为 $0.325\mu\text{m}$; (7) 曝光时间为 3s 。经过 180° 投影采集得到 1080 张投影图像。经过重建后得到切片图像, 图 6 为不同高温氧化时间下的 EB-PVD 热障涂层同步辐射 CT 图像, 可以看到明显的环形伪影, 对于 EB-PVD 热障涂层的各层结构可以区分开, 但陶瓷层的柱状晶不能很好地识别, 由于重建分辨率的缘故, 样品的细节没有很好地呈现。目前国内可实现的单色光能量约为 $45\sim 50\text{keV}$, 对热障涂层等高密度材料穿透力较低。

热障涂层 FIB-SEM 三维成像

聚焦离子束-扫描电镜(Focused ion beam-scanning electron microscopy, FIB-SEM)三维成像是一种有损的成像方式, 通过聚焦离子束对物质进行刻蚀, 并进行 SEM 成像, 通过连续切割成像, 得到一系列 SEM 图像, 通过电子图像的堆叠重构获得物体的三维形貌, FIB-SEM 可以在纳米尺度的分辨率下对材料进行三维、高质量、高稳定性的显微形貌观察与分析。1998年, Sakamoto等^[29]使用 FIB-SEM 成像技术对半导体材料的三维结构进行观察。2001年, Inkson等^[30]通过 FIB-SEM 技术对铁铝基纳米复合材料单晶颗粒进行了成像, 得到了其三维形貌。2004年, Holzer等^[31]采用 FIB-SEM 三维成像技术对陶瓷材料进行了检测, 获得了多孔陶瓷材料中孔隙的三维分布状况。2006年, Bansal等^[32]使用 FIB-SEM 三维成像技术实现了分辨率高达 10nm 的材料三维可视化。2016年, Song

等^[33-34]通过FIB-SEM三维成像获得了APS热障涂层的三维结构,通过分割提取得到了TGO的三维结构、组成及形态,以及陶瓷层中裂纹的形态。敖波等^[35]实现了EB-PVD热障涂层FIB-SEM三维成像,分辨率达到20nm,获得了EB-PVD热障涂层内部TGO形貌和柱间孔隙,并

得到TGO层的平均厚度为2.37 μm ,所得的EB-PVD热障涂层FIB-SEM切片图像和三维图像见图7和图8。

采用微米CT、FIB-SEM和同步辐射CT对EB-PVD热障涂层三维成像对比结果表明,微米CT的单次成像范围比FIB-SEM要大,可以对热障涂层厚度方向完整成像,FIB-

SEM的图像质量比微米CT要高许多,对陶瓷层的柱间空隙观察非常清晰,并且在FIB-SEM的图像中观察到了TGO/黏结层之间的微裂纹。同步辐射CT的成像范围与微米CT相近,但伪影严重,且成像质量不如微米CT。

热障涂层热应力有限元仿真

热障涂层热应力有限元分析模型的准确建立是热应力仿真研究的重要基础,由于热障涂层内部孔隙、微裂纹的分布复杂无规则,且TGO界面形貌非常复杂,给数值仿真建模带来了一定的困难,尤其是采用真实的热障涂层微结构进行建模。

王琳琳^[36]采用CT三维成像技术获得热障涂层真实界面形态,建立了三维有限元应力分析模型,并利用生长曲线模拟TGO生长,计算了真实陶瓷层与黏结层界面对双层结构热障涂层热应力的影响。基于真实三维结构建立有限元应力分析模型的研究有利于三维热障涂层热应力研究的发展。Slámečka等^[37]根据等离子喷涂涂层表面的凹凸形貌,建立了不规则的陶瓷层与黏结层界面的三维热障涂层的有限元仿真模型。Zhu等^[38]建立了多层结构热障涂层的三维仿真模型,研究了三维涡轮叶片失效应力的分布情况。Kyaw等^[39]根据TGO表面的形态及粗糙度等特征进行三维仿真建模,研究正弦、半圆的TGO形貌对热障涂层应力的影

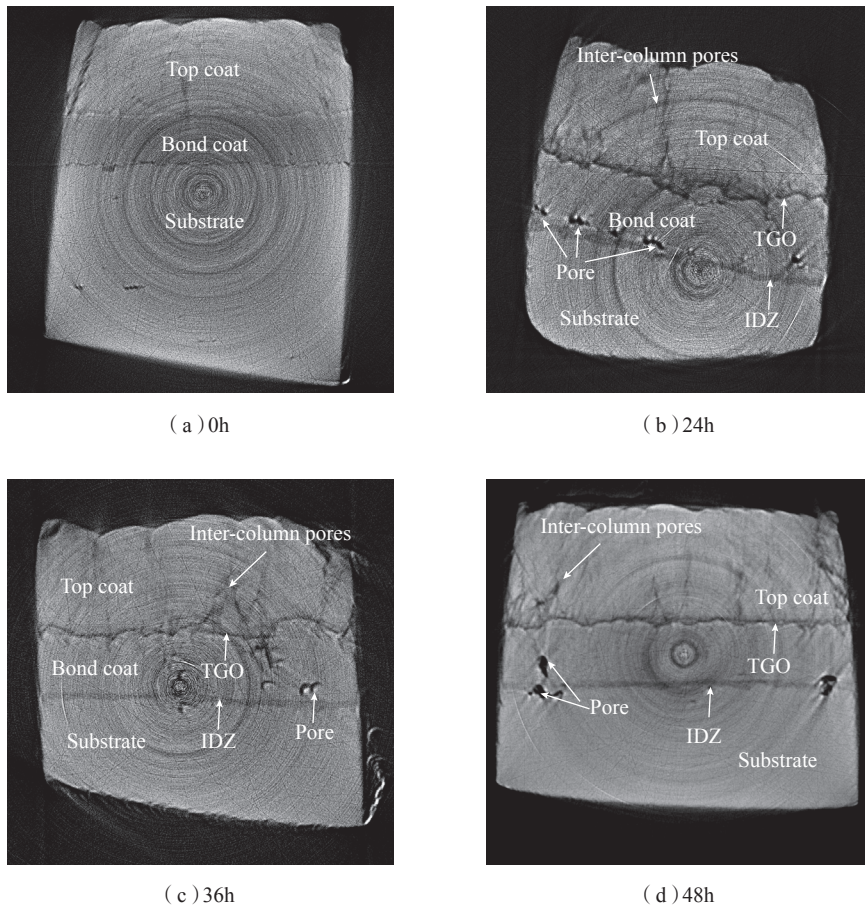


图6 不同氧化时间的EB-PVD热障涂层同步辐射CT图像

Fig.6 SR-CT images of EB-PVD thermal barrier coatings with different oxidation time

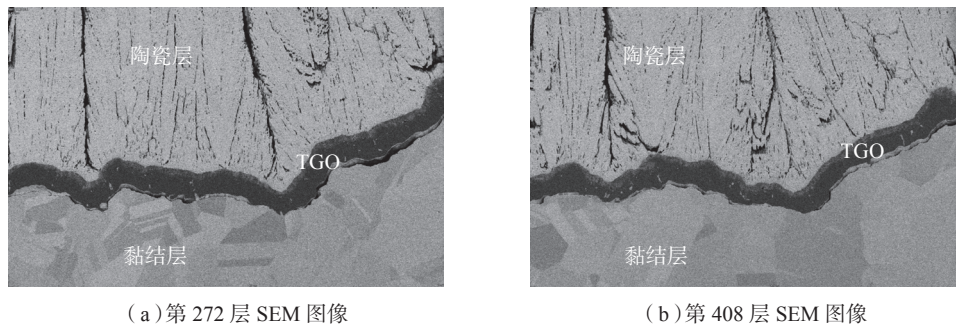


图7 EB-PVD热障涂层FIB-SEM切片图像

Fig.7 Slice images of EB-PVD thermal barrier coatings by FIB-SEM

响。Li 等^[40]研究了应力分布不连续性和褶皱界面对应力的影响,基于 X 射线显微镜三维重建的热障涂层结构仿真来描述热障涂层微结构的应力分布,研究发现陶瓷层中的孔隙对整个热障涂层模型的应力分布没有明显的影响,但褶皱的 TGO 界面对应力的影响较大。钟建兰等^[41]等采用微米 CT 对 APS 热障涂层三维成像获取 TGO 形貌,从而建立有限元模型进行有限元应力分析,仿真发现黏结层/TGO 界面处的应力最大。敖波等^[35]采用 FIB-SEM 三维成像技术获得了 EB-PVD 热障涂层中的真实 TGO 三维结构和柱间孔隙三



图8 EB-PVD热障涂层FIB-SEM三维成像
Fig.8 Three-dimensional imaging of EB-PVD thermal barrier coatings by FIB-SEM

维分布,建立了热障涂层热应力有限元分析模型,分析了 TGO 三维结构和柱间孔隙三维分布对 EB-PVD 热障涂层热应力的影响,仿真结果得到 TGO/黏结层界面的热应力大于陶瓷层/TGO 界面的热应力(图9)。

结论

本文对比了微米 CT、同步辐射 CT、FIB-SEM 这 3 种三维成像技术在热障涂层三维结构分析上的应用,且简要叙述了基于工业 CT 成像结果的热障涂层热应力有限元仿真分析现状,得出以下结论。

(1) 现有结果表明微米 CT 能实现热障涂层高分辨率三维成像,甚至能观察到 TGO 三维结构。

(2) 由于国内同步辐射 CT 最高能量约为 45~50keV,对热障涂层等高密度材料样品穿透力受限,且环形伪影影响严重,需要优化重建效果。

(3) FIB-SEM 虽然能得到超高分辨率切片图像,但属于有损分析,且一次分析范围很小。

(4) 对比同步辐射 CT、FIB-SEM 三维成像结果,微米 CT 是目前非常有效的热障涂层三维成像分析手段。

(5) 基于工业 CT 成像结果重构真实的热障涂层多层结构模型,并由此开展 TGO 引起的热应力有限元仿

真分析,对预测热障涂层失效有重要作用。目前为止,还没有非常合适的热障涂层三维结构模型来描述热障涂层真实 TGO 动态生长的有限元热应力分析,如何获得同一个样品在不同高温氧化时间的 TGO 三维形貌至关重要,且采用无损检测方法实现 TGO 生长过程的有效动态监测是亟须解决的问题,可能是未来热障涂层无损检测的重点研究方向。

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] 何利民. 高温防护涂层技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
HE Limin. High-temperature protective coating[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [3] 曹学强. 热障涂层材料[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
CAO Xueqiang. Thermal barrier coating materials[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [4] 钟建兰. 基于真实 TGO 三维结构的热障涂层热应力分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
ZHONG Jianlan. Thermal stress analysis on thermal barrier coatings based on real three-dimensional structure of thermally grown oxide[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [5] 张朝宗, 郭志平, 张朋. 工业 CT 技术和原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
ZHANG Chaozong, GUO Zhiping, ZHANG Peng. The technology and principle of industrial computed tomography[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [6] SUBRAMANIAN R, KULKARNI A A. Methodologies for non-destructive quantification of thermal barrier coating temperatures on service run parts: US7298818(B2)[P]. 2007-11-20.
- [7] 须颖, 邹晶, 姚淑艳. X 射线三维显微镜及其典型应用[J]. CT 理论与应用研究, 2014, 23(6): 967-977.

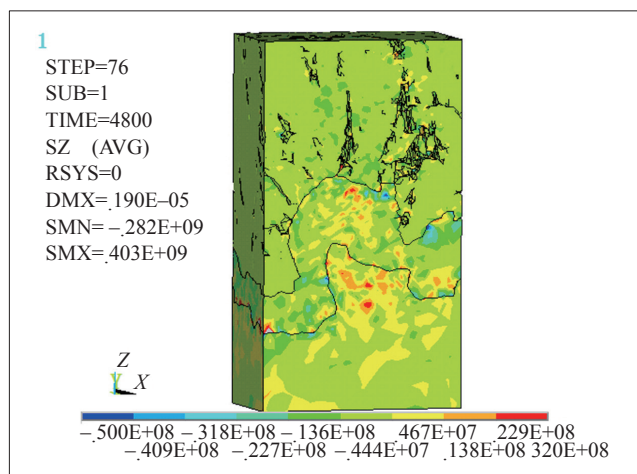


图9 EB-PVD热障涂层热应力分布云图
Fig.9 Thermal stress distribution of EB-PVD thermal barrier coating

XU Ying, ZOU Jing, YAO Shuyan. 3D X-ray microscope and its typical applications[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2014, 23(6): 967-977.

[8] ZHAO Y, SHINMI A, ZHAO X, et al. Investigation of interfacial properties of atmospheric plasma sprayed thermal barrier coatings with four-point bending and computed tomography technique[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(23): 4922-4929.

[9] 敖波, 王婵, 邓翠贞, 等. 热障涂层喷涂质量微焦点 CT 检测[J]. 航空动力学报, 2013, 28(8): 1777-1783.

AO Bo, WANG Chan, DENG Cuizhen, et al. Spraying quality inspection of thermal barrier coating by micro-computed tomography[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(8): 1777-1783.

[10] AHMADIAN S, JORDAN E H. Explanation of the effect of rapid cycling on oxidation, rumpling, microcracking and lifetime of air plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 244: 109-116.

[11] AHMADIAN S, BROWNING A, JORDAN E H. Three-dimensional X-ray micro-computed tomography of cracks in a furnace cycled air plasma sprayed thermal barrier coating[J]. Scripta Materialia, 2015, 97: 13-16.

[12] ZHANG S D, ZHANG W L, WANG S G, et al. Characterisation of three-dimensional porosity in an Fe-based amorphous coating and its correlation with corrosion behaviour[J]. Corrosion Science, 2015, 93: 211-221.

[13] 张小锋, 周克崧, 刘敏, 等. 工业 CT 应用于热障涂层热生长氧化层厚度的测量[C]//第七届全国青年表面工程学术会议论文集. 重庆, 2015.

ZHANG Xiaofeng, ZHOU Kesong, LIU Min, et al. Application of industrial CT in measurement of thermal growth oxide layer thickness of thermal barrier coatings[C]//Proceedings of the 7th National Youth Conference on Surface Engineering. Chongqing, 2015.

[14] 敖波, 何深远, 邓翠贞. 热障涂层 X 射线显微镜三维成像[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(12): 3306-3312.

AO Bo, HE Shenyuan, DENG Cuizhen. Three-dimensional imaging of thermal barrier coatings by X-ray microscopy[J]. Rare Metal

Materials and Engineering, 2016, 45(12): 3306-3312.

[15] 何深远. 热障涂层纳米 CT 三维成像研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.

HE Shenyuan. Three-dimensional imaging of thermal barrier coatings by nano-CT[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.

[16] 古玉祺. EB-PVD 热障涂层三维结构及有限元热应力分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.

GU Yuqi. Three-dimensional structure and finite element thermal stress analysis of EB-PVD thermal barrier coatings[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.

[17] SPANNE P, JONES K W, HERMAN H, et al. Structure determination of thermal-spray materials using synchrotron X-ray microtomography[C]//Symposium on Current Problems and Directions in Plasma-Spray Processing. Upton, NY (United States), 1991.

[18] SPANNE P, JONES K W, HERMAN H, et al. Measurement of imperfections in thermal spray coatings using synchrotron-computed microtomography[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1993, 2(2): 121-124.

[19] JONES K W, FENG H. Microanalysis of materials using synchrotron radiation[EB/OL]. [2020-03-18]. <https://www.bnl.gov/isd/documents/21473.pdf>.

[20] KULKARNI A, GOLAND A, HERMAN H, et al. Advanced neutron and X-ray techniques for insights into the microstructure of EB-PVD thermal barrier coatings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 426(1-2): 43-52.

[21] KULKARNI A, SAMPATH S, GOLAND A, et al. Computed microtomography studies to characterize microstructure-property correlations in thermal sprayed alumina deposits[J]. Scripta Materialia, 2000, 43(5): 471-476.

[22] KULKARNI A, HERMAN H, DECARLO F, et al. Microstructural characterization of electron beam-physical vapor deposition thermal barrier coatings through high-resolution computed microtomography[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(7): 1945-1952.

[23] KULKARNI A A, GOLAND A,

HERMAN H, et al. Advanced microstructural characterization of plasma-sprayed zirconia coatings over extended length scales[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2005, 14(2): 239-250.

[24] SUN J G. Development of nondestructive evaluation methods for ceramic coatings and membranes[C]//Proceedings of 16th Annual Conference on Fossil Energy Materials. Baltimore, MD (US), 2002.

[25] WEYANT C M, ALMER J, FABER K T. Through-thickness determination of phase composition and residual stresses in thermal barrier coatings using high-energy X-rays[J]. Acta Materialia, 2010, 58(3): 943-951.

[26] AMSELLEM O, BORIT F, JEULIN D, et al. Three-dimensional simulation of porosity in plasma-sprayed alumina using microtomography and electrochemical impedance spectrometry for finite element modeling of properties[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(2): 193-201.

[27] MAUREL V, HELFEN L, N' GUYEN F, et al. Three-dimensional investigation of thermal barrier coatings by synchrotron-radiation computed laminography[J]. Scripta Materialia, 2012, 66(7): 471-474.

[28] KHOSHKHOU D, MOSTAFAVI M, REINHARD C, et al. Three-dimensional displacement mapping of diffused Pt thermal barrier coatings via synchrotron X-ray computed tomography and digital volume correlation[J]. Scripta Materialia, 2016, 115: 100-103.

[29] SAKAMOTO T, CHENG Z H, TAKAHASHI M, et al. Development of an ion and electron dual focused beam apparatus for three-dimensional microanalysis[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1998, 37(4): 2051-2056.

[30] INKSON B J, MULVIHILL M, MÖBUS G. 3D determination of grain shape in a FeAl-based nanocomposite by 3D FIB tomography[J]. Scripta Materialia, 2001, 45(7): 753-758.

[31] HOLZER L, INDUTNYI F, GASSER P H, et al. Three-dimensional analysis of porous BaTiO₃ ceramics using FIB nanotomography[J]. Journal of Microscopy, 2004, 216(1): 84-95.

[32] BANSAL R K, KUBIS A, HULL

R, et al. High-resolution three-dimensional reconstruction: a combined scanning electron microscope and focused ion-beam approach[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2006, 24(2): 554–561.

[33] SONG X M, MENG F L, KONG M G, et al. Thickness and microstructure characterization of TGO in thermal barrier coatings by 3D reconstruction[J]. Materials Characterization, 2016, 120: 244–248.

[34] SONG X M, MENG F L, KONG M G, et al. Relationship between cracks and microstructures in APS YSZ coatings at elevated temperatures[J]. Materials Characterization, 2017, 131: 277–284.

[35] 敖波, 钟建兰, 古玉祺. EB-PVD热障涂层 TGO 三维结构分析[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 136–142.

AO Bo, ZHONG Jianlan, GU Yuqi. Three-dimensional structure analysis of TGO in EB-PVD thermal barrier coatings[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8):

136–142.

[36] 王琳琳. 基于三维微观结构模型的热障涂层性能预测及失效机理分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

WANG Linlin. Performance prediction and failure mechanism analysis of thermal barrier coatings based on a 3D micro-structural model[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[37] SLÁMEČKA K, SKALKA P, POKLUDA J, et al. Finite element simulation of stresses in a plasma-sprayed thermal barrier coating with an irregular top-coat/bond-coat interface[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 304: 574–583.

[38] ZHU W, WANG J W, YANG L, et al. Modeling and simulation of the temperature and stress fields in a 3D turbine blade coated with thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 315: 443–453.

[39] KYAW S, JONES A, JEPSON M A E, et al. Effects of three-dimensional coating interfaces on thermo-mechanical

stresses within plasma spray thermal barrier coatings[J]. Materials & Design, 2017, 125: 189–204.

[40] LI C, ZHANG X, CHEN Y, et al. Understanding the residual stress distribution through the thickness of atmosphere plasma sprayed (APS) thermal barrier coatings (TBCs) by high energy synchrotron XRD; digital image correlation (DIC) and image based modelling[J]. Acta Materialia, 2017, 132: 1–12.

[41] 钟建兰, 敖波, 古玉祺. 基于真实 TGO 三维结构的热障涂层热应力分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7): 2100–2106.

ZHONG Jianlan, AO Bo, GU Yuqi. Thermal stress analysis on thermal barrier coatings based on real three-dimensional structure of thermally grown oxide[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(7): 2100–2106.

通讯作者: 敖波, E-mail: aobo0328@nchu.edu.cn.

Research Progress on Three-Dimensional Imaging of Thermal Barrier Coatings for Turbine Blade

AO Bo, WU Guanhua

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of the Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

[ABSTRACT] Thermal barrier coatings (TBCs) is a key technology of high temperature protection of turbine blade, which has typical layered structure characteristics. Thermally grown oxide (TGO) is produced by high temperature oxidation during the service of the thermal barrier coatings, and there is an urgent need for three-dimensional imaging method which will detect the internal structure of thermal barrier coatings nondestructively. Because three-dimensional images can be obtained by computed tomography (CT), and the three-dimensional structure of the object can be reproduced accurately, it is one of the best analysis methods for the layered structure of thermal barrier coatings, and has a good performance in thermal barrier coatings spraying quality evaluation and high temperature oxidation monitoring. In this paper, the development of micro-CT imaging, synchrotron radiation CT imaging, 3D imaging of focused ion beam-scanning electron microscope (FIB-SEM) and thermal stress finite element simulation of thermal barrier coatings in domestic and abroad are mainly introduced. Finally, the possible development direction is pointed out.

Keywords: Thermal barrier coatings; Micro-CT; Synchrotron radiation CT; Focused ion beam-scanning electron microscope (FIB-SEM); Turbine blade; Nondestructive testing

(责编 逸飞)