

# 热障涂层 X 射线显微镜三维成像

敖波, 何深远, 邓翠贞

(南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

**摘要:**以双层结构热障涂层为研究对象, 采用三维 X 射线显微镜、图像处理技术研究了热障涂层的形貌、组成、厚度、孔隙及孔隙率等三维结构特征。采用三维成像方法获得了高分辨率的热障涂层层状结构 CT 图像, 用三维分割与提取得到了陶瓷隔热层、粘结层和基体的三维形貌, 定量分析了厚度、孔隙尺寸、孔隙数量及孔隙率等热障涂层重要表征参数。结果表明, 三维 X 射线显微镜厚度分析结果与扫描电镜分析结果基本一致, 孔隙率受重建精度影响。

**关键词:**热障涂层; X 射线显微镜; 三维分割; 厚度; 孔隙率

中图分类号: TG115

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)12-3306-07

热障涂层 (Thermal Barrier Coatings, TBCs) 技术是先进航空发动机高温防护关键技术之一<sup>[1]</sup>, 涂层由隔热性能优良的陶瓷隔热面层和起粘结作用的抗氧化粘结层组成, 具有典型的层状结构特征<sup>[2]</sup>。

热障涂层制备方法主要有等离子喷涂法、电子束物理气相沉积法、超音速火焰喷涂法等。热障涂层制备与使用过程中存在孔隙与孔隙率、厚度测量、裂纹、开裂、剥落和热生长氧化物等问题, 上述问题涉及热障涂层的组成、结构分布、形貌和缺陷等, 可归结为热障涂层三维层状结构的表征问题。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。因此, 必须对热障涂层的三维结构进行检测与分析。已有的热障涂层质量检测方法有微观结构分析、超声检测、涡流检测、微波检测和 X 射线 CT (Computed tomography) 等, 但上述方法都不能可靠地解决涂层质量检测问题。微观结构分析是目前国内外进行热障涂层分析的常用方法<sup>[3]</sup>, 但微观结构分析法属于破坏性分析方法, 且费时费力。超声、涡流检测方法存在的共同问题是难以得到被测量厚度对应的组成、结构、形貌等信息。

射线 CT 是热障涂层三维结构分析的重要手段, 可以获得热障涂层的组成、结构 (孔隙率、厚度等)、形貌等信息<sup>[4,5]</sup>, 适用于各种制备方法制备的涂层三维结构分析, 国外较早使用射线 CT 对热障涂层结构进行研究分析。传统的显微 CT、纳米 CT 系统局限于几何放大倍率, 粘结层和基体合金之间的对比度不足, 同时受射束硬化影响严重, 图像质量低。由于同步辐

射光源能提供单色射线, 亮度高, 成像质量好, 同步辐射显微 CT 是理想的热障涂层三维结构分析手段。美国 Spanne<sup>[6]</sup>、Kulkarni<sup>[7-10]</sup>和欧洲 Amsellem<sup>[11]</sup>等利用同步辐射显微 CT 对热障涂层的厚度、孔隙进行了三维成像分析研究。文献数据表明, 国外同步辐射显微 CT 的射线能量达到 45 keV, 而目前国内同步辐射显微 CT 的射线能量为 20 keV, 而以 ZrO<sub>2</sub> 为主的陶瓷隔热层密度高达 5.31 g/cm<sup>3</sup>, 厚度约 100 μm, 理论分析表明, 国内同步辐射显微 CT 面临透射率偏低的问题, 还不具备相应的实验条件。

三维 X 射线显微镜 (3D X-ray microscopy, 3D XRM) 是一种基于同步辐射光源先进光学发展起来的新型 CT 成像技术, 融合了传统 CT 技术与光学显微技术的优点, 采用了独特的两级放大成像技术, 具有与同步辐射成像相近水平的分辨率和图像衬度<sup>[12,13]</sup>。Zhao<sup>[14]</sup>采用 Xradia 公司的三维 X 射线显微镜研究了大气等离子喷涂涂层样品在不同热处理时间后显微结构的变化, 得到了涂层双层结构形貌。由于粘结层与基体合金线衰减系数相近, 在 CT 图像上对比度不明显, 研究中并未涉及粘结层与基体的分割。美国普·惠公司的 Anmalian<sup>[15]</sup>采用三维 X 射线显微镜观察到了涂层高温氧化后的热生长氧化物和裂纹。借助先进的 CT 设备, 国外发达国家系统地开展了涡轮叶片热障涂层的高分辨率 CT 成像分析。Zhang<sup>[16]</sup>采用 Xradia 公司的“Versa XRM-500”系统对单层喷涂涂层样品孔隙率进行了量化表征, 孔隙率测量易受涂层厚度影响。本课题组围绕热障涂层三维结构表征开展了 X 射线三维成像研究,

收稿日期: 2015-12-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51561025, 61261031); 航空科学基金 (2014ZF56022)

作者简介: 敖波, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 南昌航空大学, 江西 南昌 330063, 电话: 0791-83953483, E-mail: aobo0328@163.com

取得了有意义的结果<sup>[17]</sup>。

本研究针对双层结构等离子喷涂热障涂层，根据三维 X 射线显微镜成像结果，针对粘结层与基体难以分割的特点，首先搜索粘结层与基体交界面的孔隙，以孔隙中心位置实现热障涂层的三维分割，从而可以准确地对陶瓷隔热层与粘结层进行三维结构分析。

### 1 三维 X 射线显微镜成像原理

传统显微 CT 或纳米 CT 系统使用一个微米或纳米焦点的 X 射线源对样品进行几何放大投影成像，这些传统 CT 系统的高分辨率对几何放大倍率的依赖限制了样品的尺寸。

三维 X 射线显微镜成像与传统 CT 系统不同，其结构上采用两级放大技术，图 1 为三维 X 射线显微镜两级放大技术结构示意图。首先，与传统显微 CT 一样对样品进行几何放大成像，当射线源固定时，几何放大倍数取决于几何参数 Dis1 和 Dis2。然后 X 射线被探测器的闪烁屏接收转换为可见光，再通过光学耦合系统将可见光传送到 CCD (Charge Coupled Device) 芯片进行图像读出，此时，图像被可见光系统进行了光学放大。连续采集多个角度下的投影图像，通过锥束 CT 重建算法得到重建图像。由于 X 射线显微镜采用了两级放大技术，X 射线显微镜的放大倍数是几何投影放大倍数与光学放大倍数的乘积<sup>[13]</sup>，降低了对几何放大的依赖程度。

### 2 实验样品与装置

实验样品由等离子喷涂法制备而成，其中热障涂层由陶瓷隔热层和金属粘结层组成，陶瓷隔热层的主要成分为 ZrO<sub>2</sub>，粘结层的主要成分为 NiCrAlY，基体合金的主要成分为 Fe。

CT 实验前采用美国 FEI 公司的 Nava Nano SEM450 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 对实验样品的表面进行显微结构分析。图 2 为 600 倍时的热障涂层 SEM 照片，通过 SEM 可观察到陶瓷隔热层与粘结

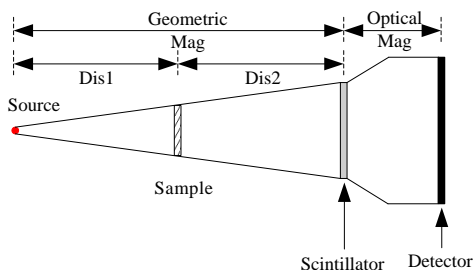


图 1 X 射线显微镜两级放大结构示意图

Fig.1 Two-stage magnification architecture of XRM

层之间存在明显的微观形貌差异，从而可以实现热障涂层的厚度测量。为此，在陶瓷隔热层与粘结层分别选取了 5 处位置进行厚度分析，表 1 为厚度分析统计结果，得到陶瓷隔热层的平均厚度为 116.9 μm，粘结层的平均厚度为 90.6 μm。

按照三维 X 射线显微镜成像的特点，对热障涂层样品进行线切割和细砂纸打磨，砂纸打磨的目的是减薄基体厚度，提高 CT 扫描时 X 射线的透射率，加工后的热障涂层样品尺寸为 0.3 mm×0.3 mm×10 mm，样品中涂层空间分布如图 3 所示，然后采用超声波清洗机对样品清洗 30 min。由于样品尺寸较小，为了防止涂层剥落，保证涂层的原貌，未对有涂层的侧面进行打磨和抛光。

热障涂层样品显微结构分析后采用北京同步辐射装置 X 射线成像站的 Micro XCT-200 (Xradia 公司生产)

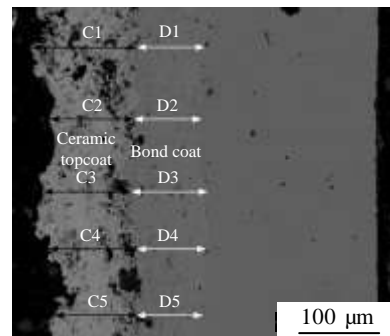


图 2 热障涂层显微结构

Fig.2 Microstructure of TBCs

表 1 热障涂层厚度 SEM 分析

Table 1 Thickness of TBCs by SEM

Ceramic topcoat	$\delta/\mu\text{m}$	Bond coat	$\delta/\mu\text{m}$
C1	136.6	D1	88.1
C2	108.5	D2	88.6
C3	115.7	D3	99.3
C4	115.7	D4	90.1
C5	108.0	D5	86.7
Average	116.9	Average	90.6

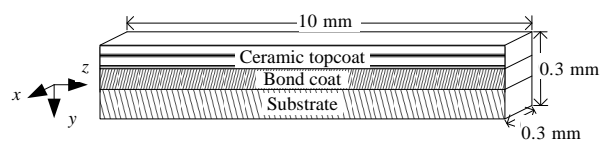


图 3 热障涂层结构示意图

Fig.3 Structure diagram of TBCs specimen

对试样进行三维 X 射线显微镜成像分析, 射线源的焦点尺寸为  $5\ \mu\text{m}$ , CCD 探测器探元尺寸为  $13.5\ \mu\text{m} \times 13.5\ \mu\text{m}$ , A/D 位数为 16 bit, 三维可视化软件为 VGstudio MAX2.2, 实验参数如下: (1) 镜头倍数: 10 倍; (2) 射线源到工件距离: 45 mm; (3) 工件到探测器距离: 30 mm; (4) 管电压: 85 kV; (5) 管电流:  $93\ \mu\text{A}$ ; (6) 投影数量: 1000 幅/ $360^\circ$  (投影图像矩阵为  $994 \times 994$ ); (7) 探测器积分时间: 8 s; (8) 重建方向: z 轴方向; (9) 分辨率:  $1.6\ \mu\text{m}$ 。

根据投影图像进行 CT 重建得到样品的三维结构图像, 共重建了 974 幅图像, 图像矩阵为  $400 \times 400$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 热障涂层三维分割

图 4 为热障涂层样品沿 z 轴方向不同层位置的 CT 重建图像, 每层图像清晰地显示了等离子喷涂涂层的片层状结构分布特征, 由多幅重建图像可完全重构出热障涂层样品的三维模型。由于陶瓷隔热层、粘结层与基体部分的成分不同, 密度和原子序数存在差异, 而 CT 图像可以表征线衰减系数分布。从图 4 可以看出, 陶瓷隔热层的灰度值偏高, 在 CT 重建图像上与其它层存在明显的灰度差异, 表明其线衰减系数高于粘结层和基体。

由于粘结层的主要元素镍、铬的原子序数与铁的原子序数相近, 在 CT 图像上粘结层和基体之间的灰度对比度很小, 表明两者线衰减系数相近, 可能难以通过图像处理的方法直接将粘结层与基体分割开来, 这也是粘结层与基体分割的难点。

从图 4 中可以观察到陶瓷隔热层与粘结层内部存在大量微小孔隙, 孔隙的存在将影响陶瓷隔热层的隔热性能和粘结层的抗氧化性能等。因此, 有必要对孔隙的位置分布、尺寸和数量进行定位和定量分析, 孔隙分析将在 3.3 节进行。

由于基体粗糙的表面状态, 等离子喷涂过程中将在粘结层与基体交界处形成孔隙, 观察图 4 发现虽然粘结层与基体的灰度对比度低, 但部分最靠近基体的孔隙形成了近似分界线, 所有这些孔隙的 y 轴向中心位置可以表征粘结层与基体的分界面, 为提取粘结层与基体的分割面提供了可能。

粘结层与基体之间的逼近分割面提取方法如下:

(1) 将所有重建图像组成三维分割模型, 首先去除陶瓷隔热层, 通过图像阈值分割方法提取粘结层与基体内部所有孔隙, 根据 3 个坐标方向的 CT 图像分析, 估算分界线位置。根据 VGstudio MAX2.2 的孔隙查找表(当用鼠标选择一个孔隙时, 当前孔隙将自动显示在 VGstudio MAX2.2 的 xy、yz 和 xz 3 个坐标平面方向图像的对应位置), 结合 xy、yz 和 xz 3 个坐标平面方向的图像序列, 根据孔隙的位置和灰度(孔隙在灰度图像中一般呈黑色)对所有孔隙一一判断是否位于分界面处, 最后保留位于分界面处的所有孔隙。

(2) 针对提取得到的孔隙, 采用图像细化算法提取所有孔隙的 y 轴向中心坐标分布, 将所有这种孔隙的中心坐标组成离散点云。

(3) 对上述离散点云数据(y 轴向中心坐标表示的高度数据)进行二维数据插值('cubic'-基于三角形的三次插值)得到三维曲面作为逼近的分割曲面, 以此分割曲面来实现粘结层和基体的分割提取, 从而分割得到粘结层与基体。

图 5a 为粘结层和基体之间交界面处的孔隙进行提取后的三维可视化结果。统计得到交界面有 325 个孔隙, 根据文献[10]等离子喷涂涂层内部孔隙呈球形结构及三维可视化结果, 孔隙直径用其外接最小球体直径表示, 最小孔隙直径为  $5.4\ \mu\text{m}$ , 最大孔隙直径为  $143.5\ \mu\text{m}$ , 平均孔隙直径为  $25.2\ \mu\text{m}$ 。进一步统计分析发现直径小于  $20\ \mu\text{m}$  的孔隙占总孔隙数的 59.4%, 直

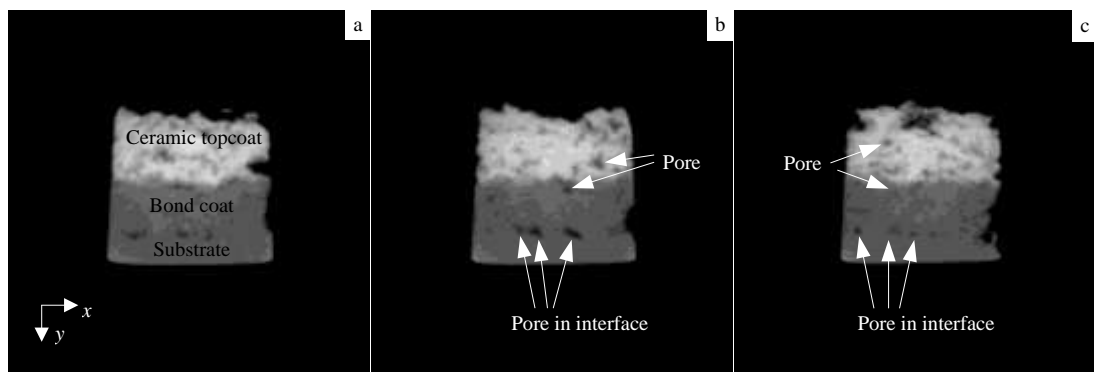


图 4 不同位置的热障涂层重建图像

Fig.4 Reconstructed images of TBCs in different locations: (a) slice 1, (b) slice 350, and (c) slice 700

径小于 46.7  $\mu\text{m}$  的孔隙占总孔隙数的 86.2%，直径大于 100  $\mu\text{m}$  的孔隙仅占总孔隙数的 1.85%。图 5b 为对孔隙 y 轴向中心坐标进行'cubic'插值后得到的分割曲面，该分割曲面表征了粘结层与基体之间的分割位置。

粘结层与基体之间分割面位置提取精度受粘结层与基体之间分界面处孔隙提取精度、孔隙数量、插值方法等影响。孔隙提取精度越高分割面位置越准确，分界面处孔隙数量越多分割面位置越准确。

由于陶瓷隔热层在 CT 图像上的灰度值明显高于粘结层和基体的灰度值，首先通过阈值分割方法提取出陶瓷隔热层。在获得粘结层和基体的分界面后，再分别提取粘结层与基体。将提取结果导入软件 VGStudio MAX 2.2 进行三维可视化，不同组成部分赋以不同颜色表示，陶瓷隔热层、粘结层与基体分别用红色、绿色和蓝色表示，得到热障涂层样品不同组成部分层状结构的三维分布结果如图 6a 所示。图 6b 为陶瓷隔热层的三维分割结果及陶瓷隔热层与粘结层的界面形貌。图 6c 为粘结层的三维分割结果及粘结层与基体的界面形貌。

根据热障涂层的三维分割结果可以分别对陶瓷隔热层、粘结层的结构进行分析。

### 3.2 热障涂层厚度分析

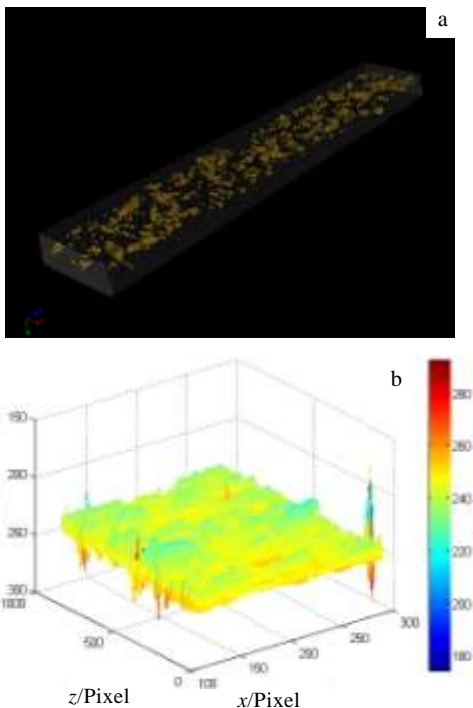


图 5 粘结层和基体合金交界面提取

Fig.5 Interface extraction between bond coat and substrate: (a) 3D visualization of pores in interface of bond coat and substrate and (b) extracted interface

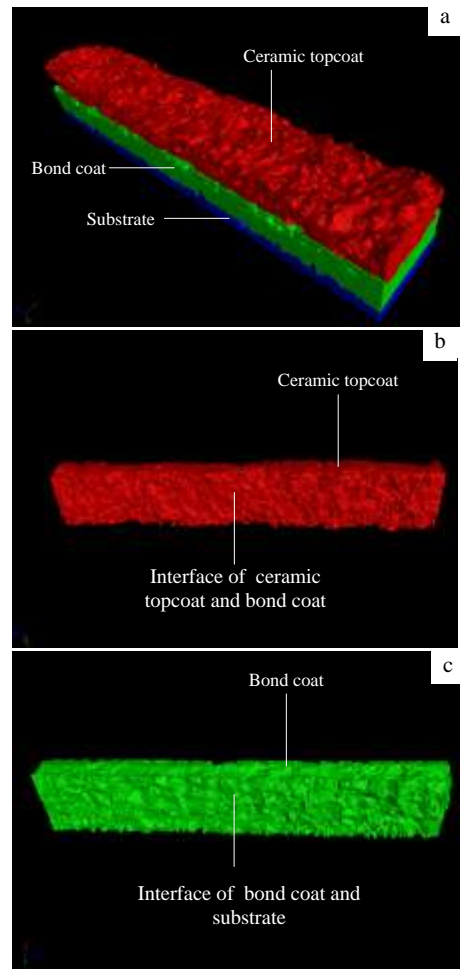


图 6 热障涂层三维分割

Fig.6 Three-dimensional segmentation of TBCs: (a) 3D segmentation and visualization of TBCs, (b) 3D visualization of ceramic topcoat, and (c) 3D visualization of bond coat

热障涂层的厚度一般为几十微米到几百微米，陶瓷隔热层越厚隔热效果越强，但结合强度随厚度增加而下降，涂层与基体合金界面处产生的热应力越大，越容易剥落，而隔热层太薄影响热障涂层的隔热效果。因此，热障涂层的厚度测量及均匀性分析非常重要。

由于加工样品时边缘容易受到厚度减薄（砂纸打磨）的影响，为了更准确地反映热障涂层的厚度分布，对图 6 所得检测样品的三维分割结果，x 轴方向的数据限定在 140~250 列之间（相当于在中间位置取样），对陶瓷隔热层和粘结层分别沿厚度方向（y 轴方向）统计像素个数，根据像素尺寸的校准结果（重建分辨率）进行厚度换算，在三维情形下得到热障涂层每个组成部分的厚度二维统计分布，结果如图 7a 和图 7b

所示, 结果表明陶瓷隔热层与粘结层的厚度分布不均匀。为了更清楚地显示热障涂层厚度数据分布范围, 将厚度二维分布数据转化为一维图形显示, 结果如图 7c 所示。统计得到陶瓷隔热层最小厚度为 42.4  $\mu\text{m}$ , 最大厚度为 160.0  $\mu\text{m}$ , 平均厚度为 117.8  $\mu\text{m}$ , 标准差为 15.35, 由图 7c 中陶瓷隔热层厚度分布发现其厚度近似服从正态分布 (蓝色拟合曲线)。

$$\delta_1 \sim N(117.8, 15.35^2) \quad (1)$$

此外, 统计得到粘结层最小厚度为 58.8  $\mu\text{m}$ , 最大厚度为 143.7  $\mu\text{m}$ , 平均厚度为 93.2  $\mu\text{m}$ , 标准差为 10.23, 其厚度也近似服从正态分布 (红色拟合曲线)。

$$\delta_2 \sim N(93.2, 10.23^2) \quad (2)$$

由 SEM 分析结果得到陶瓷隔热层平均厚度为 116.9  $\mu\text{m}$ , 粘结层的平均厚度为 90.6  $\mu\text{m}$ , CT 分析结果与 SEM 分析结果基本吻合。但 SEM 厚度分析时取点数量有限, 且限于涂层表面, 而 CT 分析时取样为一个区域, 测量结果更可靠。

根据厚度二维分布数据, 表明涂层厚度不均匀, 可以得到厚度偏差较大或较小的位置。研究结果表明三维 X 射线显微镜可以详细地分析热障涂层的厚度。

### 3.3 热障涂层内部孔隙分析

等离子喷涂涂层组织呈片层状, 孔洞较多, 孔隙率高。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粘结层被氧化, 孔隙率是反映热障涂层质量的重要指标之一。SEM 方法是国内进行涂层孔隙率分析的主要方法, 但其结果限于二维尺度 (面积孔隙率), 而热障涂层在结构上呈三维分布。虽然有研究文献提到超声检测、微波检测方法等测量孔隙率, 但其效果还有待验证。孔隙率测量的关键是得到孔隙的体积和测量体的总体积。根据 CT 成像的特

点, 如果提取内部孔隙的同时能精确测定热障涂层的体积, 则可以更精确地测量热障涂层的孔隙率。

由图 6 可得到检测样品的三维分割结果, 三维分割结果限定了陶瓷隔热层与粘结层的体积。由于孔隙与周围区域灰度值存在差异, 在陶瓷隔热层、粘结层分别提取内部的孔隙, 提取方法为阈值处理, 其中陶瓷隔热层的孔隙阈值为 170 (8 位灰度图像), 背景灰度阈值为 20。而粘结层的孔隙阈值为 80 (8 位灰度图像), 背景灰度阈值为 20, 受重建噪声的影响, 孔隙灰度值远大于 0。陶瓷隔热层和粘结层的孔隙阈值设置不同的原因在于陶瓷隔热层灰度值大, 其内部孔隙区域的灰度值大于粘结层孔隙的灰度值, 存在不一致性, 受重建质量影响。

结合三维可视化方法, 陶瓷隔热层、粘结层内部孔隙的三维分布如图 8a 和图 8b 所示, 其中粘结层与基体交界面的孔隙并未计入粘结层内部孔隙范围。图 8a 显示了陶瓷隔热层内部孔隙的位置、形状、分布及密集程度, 在陶瓷隔热层内部共有 1348 个孔隙, 孔隙直径用其外接最小球体直径表示, 最小孔隙直径为 5.2  $\mu\text{m}$ , 最大孔隙直径为 111.7  $\mu\text{m}$ , 平均孔隙直径为 17.7  $\mu\text{m}$ , 孔隙的直径分布统计数据如图 8c 中红色曲线所示, 其中横坐标为孔隙直径, 纵坐标为孔隙数量。进一步统计分析发现直径小于 20  $\mu\text{m}$  的孔隙占总孔隙数的 73.6%, 直径小于 46.7  $\mu\text{m}$  的孔隙占总孔隙数的 96.4%, 直径大于 100  $\mu\text{m}$  的孔隙仅占总孔隙数的 0.15%。图 8b 显示了粘结层内部孔隙的位置、形状、分布及密集程度, 在粘结层内部共有 776 个孔隙, 最小孔隙直径为 5.2  $\mu\text{m}$ , 最大孔隙直径为 114.4  $\mu\text{m}$ , 平均孔隙直径为 15.1  $\mu\text{m}$ , 孔隙的直径分布统计数据如图 8c 中蓝色曲线所示, 其中横坐标为孔隙直径, 纵坐标为孔隙数量。进一步统计分析发现粘结层内部直径小于 20  $\mu\text{m}$  的孔隙占总孔隙数的 82.0%, 直径小于 46.7  $\mu\text{m}$  的孔隙占总孔隙数的 96.8%, 直径大于 100  $\mu\text{m}$  的

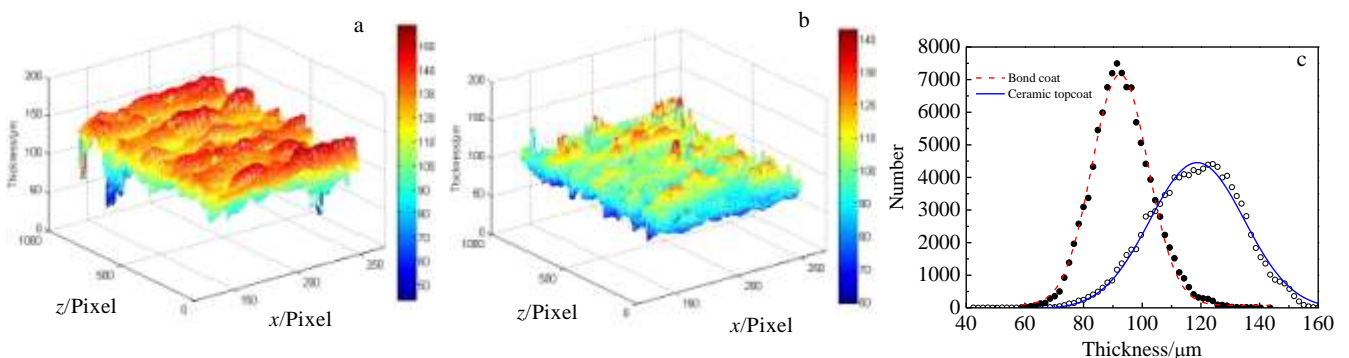


图 7 热障涂层厚度统计分析

Fig.7 Statistical analysis of TBCs thickness: (a) 2D thickness distribution of ceramic topcoat, (b) 2D thickness distribution of bond coat, and (c) 1D thickness distribution of TBCs

孔隙仅占总孔隙数的 0.13%。统计数据表明直径在 46.7 μm 以下的孔隙占绝大多数。

对比结果表明陶瓷隔热层的孔隙平均直径略大于粘结层的孔隙平均直径。

孔隙率是材料内部的孔隙体积占材料总体积的比例，通常用百分号 (%) 表示。孔隙率分为面积孔隙率和体积孔隙率，体积孔隙率的计算公式为：

$$p_v = \frac{V_p}{V} \times 100\% \quad (3)$$

其中  $p_v$  为体积孔隙率， $V_p$  为该组成部分内部孔隙所占的体积， $V$  为该组成部分的总体积，包括孔隙所占的体积。

根据图 8 所示结果，对陶瓷隔热层、粘结层分别计算体积孔隙率，孔隙率计算结果如表 2 所示。陶瓷隔热层有 1348 个内部孔隙，孔隙所占体素为 376 549

个，陶瓷隔热层的孔隙率为 3.46%。粘结层有 776 个内部孔隙（不包括粘结层与基体交界面的孔隙），孔隙所占体素为 124 893，粘结层孔隙率为 1.33%。热障涂层（陶瓷隔热层+粘结层）内部孔隙所占体素为 501 442 个，孔隙率为 2.47%。粘结层与基体交界面有 325 个孔隙，孔隙所占体素为 249 572 个。总体积为体素数量×体素体积。

根据表 2 可知，粘结层的孔隙率低于陶瓷隔热层的孔隙率，热障涂层的体积孔隙率为 2.47%。根据热障涂层体积孔隙率的分析方法可知，孔隙率受孔隙提取阈值选择的影响，阈值选择不同，孔隙体积不同，从而计算得到的孔隙率不同，但阈值最终受 CT 重建精度的影响。

分析结果表明三维 X 射线显微镜可以对热障涂层内部孔隙进行定位、定量分析。

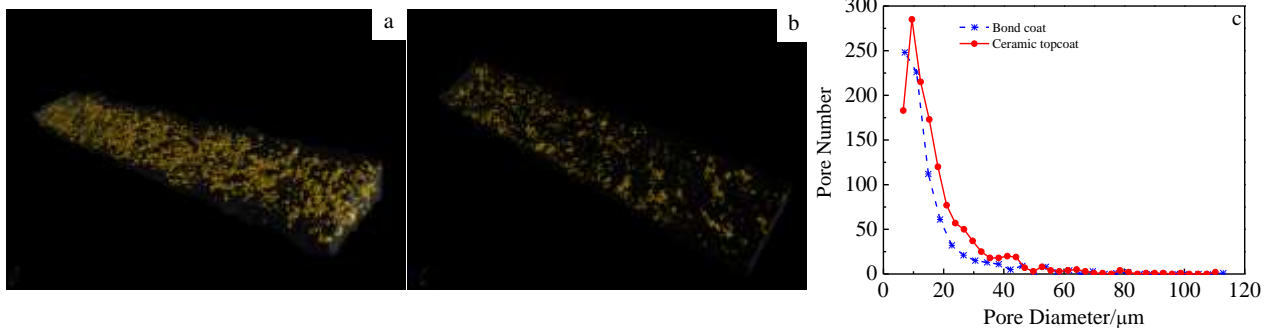


图 8 热障涂层孔隙分析

Fig.8 Analysis of pores in TBCs: (a) 3D visualization of pores in ceramic topcoat, (b) 3D visualization of pores in bond coat, and (c) statistical analysis of pore diameter

表 2 热障涂层孔隙率

Table 2 Porosity of the TBCs

Constituent	Voxel number of pores	$V_p/\mu\text{m}^3$	$V/\mu\text{m}^3$	$p_v/\%$
Ceramic topcoat	376549	1637952.3	47273926.4	3.46
Bond coat	124893	543272.7	40983419.9	1.33
TBCs	501442	2181225	88257346.3	2.47
Interface of bond coat and substrate	249572	1085614.5	—	—

## 4 结 论

1) 通过表面 SEM 分析得到陶瓷隔热层的平均厚度为 116.9 μm，粘结层厚度为 90.6 μm。

2) 采用三维X射线显微镜进行了热障涂层样品三维结构成像，得到了热障涂层层状结构CT图像。通过粘结层和基体之间交界面的孔隙分布得到了粘结层与

基体的逼近分割面，实现了热障涂层的三维分割，得到了陶瓷隔热层、粘结层与基体3个组成部分的三维形貌。

3) 热障涂层厚度 CT 分析结果表明，陶瓷隔热层的平均厚度为 117.8 μm，粘结层的平均厚度为 93.2 μm，两者厚度均近似服从正态分布，分析结果与 SEM 分析结果吻合。

4) 分别提取了陶瓷隔热层、粘结层的内部孔隙三维分布，并对内部孔隙直径进行了统计分析，陶瓷隔热层的孔隙平均直径为 17.7 μm，粘结层的孔隙平均直径为 15.1 μm。计算得到陶瓷隔热层的孔隙率为 3.46%，粘结层的孔隙率 1.33%，热障涂层的孔隙率为 2.47%。

## 参考文献 References

[1] Guo Hongbo(郭洪波), Gong Shengkai(宫声凯), Xu Huibin(徐惠斌). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica(航空学报)*[J].

- 2014, 35(10): 2722
- [2] He Limin(何利民). *High Temperature Protective Coating(高温防护涂层技术)*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012
- [3] Poza P, Gómez G J, Múnez C J. *Acta Materialia*[J], 2012, 60(20): 7197
- [4] Stock S R. *Microcomputed Tomography Methodology and Applications*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009
- [5] Perfetti G, Castele E V D, Rieger B *et al.* *Advanced Powder Technology*[J], 2010, 21(6): 663
- [6] Spanne P, Jones K W, Herman H *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 1993, 2(2): 121
- [7] Kulkarni A, Goland A, Herman H *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 426(1–2): 43
- [8] Kulkarni A, Sampath S, Goland A *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2000, 43(5): 471
- [9] Kulkarni A, Herman H, Decarlo F *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2004, 35(7): 1945
- [10] Kulkarni A, Goland A, Herman H *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2005, 14(2): 239
- [11] Amsellem O, Borit F, Jeulin D *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2012, 21(2): 193
- [12] Stock S R. *International Materials Reviews*[J], 2008, 53(3): 129
- [13] Xu Ying(须颖), Zou Jing(邹晶), Yao Shuyan(姚淑艳). *CT Theory and Applications(CT理论与应用研究)*[J], 2014, 23(6): 967
- [14] Zhao Y, Shinmi A, Zhao X *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2012, 206(23): 4922
- [15] Ahmadian S, Browning A, Jordan E H. *Scripta Materialia*[J], 2015, 97(3): 13
- [16] Zhang S D, Zhang W L, Wang S G *et al.* *Corrosion Science*[J], 2015, 93(4): 211
- [17] Ao Bo(敖波), Wang Chan(王婵), Deng Cuizhen(邓翠贞) *et al.* *Journal of Aerospace Power(航空动力学报)*[J], 2013, 28(8): 1777

## Three-dimensional Imaging of Thermal Barrier Coatings by X-ray Microscopy

Ao Bo, He Shenyuan, Deng Cuizhen

(Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** With double-layer structure thermal barrier coatings (TBCs) as the research object, three dimensional (3D) structure characteristics of TBCs such as morphology, composition, thickness, pores and porosity were investigated by a 3D X-ray microscopy and an image processing technique. High resolution CT (computed tomography) images of layered structure TBCs were reconstructed by a 3D imaging method. 3D morphologies of the ceramic topcoat, the bond coat and the substrate were obtained by 3D segmentation and extraction. The important characterization parameters of TBCs were analyzed quantitatively, including thickness, pore size, pore number and porosity. The results show that the thickness of TBCs by 3D X-ray microscopy is basically consistent with the results of SEM, and the porosity is affected by the accuracy of the reconstruction.

**Key words:** thermal barrier coatings; X-ray microscopy; three dimensional segmentation; thickness; porosity

---

Corresponding author: Ao Bo, Ph. D., Associate Professor, Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83953483, E-mail: aobo0328@163.com