

基于数字图像处理技术的等离子喷涂氧化锆涂层热导率影响因素有限元研究

沈 伟, 范群波, 王富耻, 马 壮, 杨学文

(北京理工大学 材料学院, 北京 100081)

摘 要: 利用数字图像处理与有限元网格生成相结合的方法, 生成了与等离子喷涂氧化锆涂层真实显微组织结构相一致的有限元模型. 综合有限元方法与傅立叶热传导方程, 计算了包含孔洞、裂纹等缺陷在内的氧化锆涂层的热导率. 采用激光脉冲法测试并计算了氧化锆涂层的表观热导率. 对比有限元计算结果与实验结果之间的差异, 分析了氧化锆涂层中缺陷与界面对热导率的影响. 研究表明: 在等离子喷涂氧化锆涂层中, 界面对热导率降低的贡献与孔洞、裂纹等缺陷的贡献相当.

关 键 词: 氧化锆涂层; 有限元; 热导率; 界面

中图分类号: TG174

文献标识码: A

Finite Element Study of Influence Factors on Thermal Conductivity of Plasma Sprayed Zirconia Coatings Based on Digital Image Processing

SHEN Wei, FAN Qun-Bo, WANG Fu-Chi, MA Zhuang, YANG Xue-Wen

(School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Combining digital image processing with finite element mesh generation, finite element models based on actual microstructures of plasma sprayed zirconia coatings were built. By employing finite element method in conjunction with Fourier's equation, the apparent thermal conductivity of zirconia coatings affected by defects, including pores and cracks were calculated. For comparison, the coating's thermal conductivity was measured by the laser pulse method. The difference between values of the finite element method and experimental results are told to analyze effects of defects and splat interfaces on the thermal conductivity. The results show that splat interfaces are as equally important as defects in defining the thermal conductivity of plasma sprayed coatings in the spray direction.

Key words: zirconia coatings; finite element method; thermal conductivity; splat interfaces

等离子喷涂热障涂层体系(plasma-sprayed thermal barrier coatings, PS TBCs)一般包括基体、金属粘结层、陶瓷隔热层等^[1]. 其中, 陶瓷层主要是由氧化锆、孔洞、裂纹以及颗粒界面等组成. 当 TBCs 受到外界热载荷作用时, 孔洞、裂纹以及界面对材料的隔热性能有很大影响, 同时, 它们之间的相互作用也非常复杂^[2]. 一方面, 涂层中孔洞、裂纹分布具有不均匀性; 另一方面, 喷涂颗粒之间存在着明显的界面热阻效应. 这就要求在研究涂层隔热性能

时必须兼顾涂层的非均质性与喷涂颗粒间的界面效应.

随着美国国家标准与技术研究院(NIST)开发的面向对象有限元技术^[3](Object Oriented Finite, OOF)的出现, 基于涂层材料非均质性的研究成为可能. 部分学者利用 OOF 软件研究了涂层材料中孔洞、裂纹等缺陷对热导率的影响^[4-5]. 然而, 由于喷涂颗粒界面的性能、分布、形貌等信息很难获得, 使得关于界面对涂层隔热性能影响的研究工作很难展开.

收稿日期: 2010-02-03; 收到修改稿日期: 2010-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(50801005) National Nature Science Foundation of China (50801005)

作者简介: 沈 伟(1983-), 男, 博士研究生. E-mail: shenwei@bit.edu.cn

通讯联系人: 范群波, 副教授. E-mail: fanqunbo@bit.edu.cn

本工作以等离子喷涂氧化锆涂层为研究对象, 利用数字图像处理技术生成与涂层真实显微组织相一致的有限元模型, 结合傅立叶热传导方程系统计算了不含颗粒界面的氧化锆涂层的表观热导率, 分析孔洞、裂纹等缺陷对涂层隔热性能的影响. 同时, 利用激光脉冲法测试并计算了受缺陷与界面共同影响的氧化锆涂层的实际热导率. 通过热导率的计算值与实验值之间的对比, 分析界面对等离子喷涂氧化锆涂层热导率的影响.

1 实验

采用普莱克斯公司生产的 5500 型大气等离子喷涂设备在石墨基体上喷涂得到 $\phi 12.7\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的氧化锆(8%wt YSZ)涂层. 采用激光脉冲法(型号: Antler Flashline5000)测试了 1000°C 时氧化锆涂层的热扩散系数 α . 由于热容的测量值误差较大, 运用 Neumann-Kopp 规则^[6]计算氧化锆陶瓷的比热容 C . 通过排水法测得氧化锆涂层的密度 ρ .

热导率的计算公式为:

$$\lambda_e = \alpha \cdot \rho \cdot C \quad (1)$$

其中, λ_e 为受缺陷和界面共同影响的氧化锆涂层的实际热导率.

2 计算

由于陶瓷涂层材料试样在磨制的过程中极容易引起孔的塌陷, 影响涂层剖面的质量. 所以, 在试样的制备过程中采用真空冷镶嵌(真空度: $\sim 0.08\text{MPa}$)方法. 一方面利用环氧树脂填充样品内的孔洞和裂纹从而避免了孔的坍塌; 另一方面, 冷镶嵌过程不会对涂层内部组织性能产生影响. 首先, 通过扫描电子显微镜(SEM)获取氧化锆涂层横截面的显微组织图像; 然后采用数字图像处理与有限元网格生成相结合的方法生成与涂层真实显微组织图像相一致的有限元模型. 最后, 利用 ANSYS 有限元方法计算涂层的表观热导率.

2.1 有限元模型

图像本身是一个二维连续的函数, 图像的幅值是其位置的连续函数. 对二维图像按照像素点进行均匀采样, 就可以得到一幅离散化的像素点单元的数字图像. 数字图像在计算机中是由一个个像素点组成的, 每个像素点都有一对应的整数值来代表该像素点的灰色度. 整个图像由有着不同灰色度的像素点组成, 这些像素点的灰色度构成了一个离散的

函数 $f(x, y)(x=1 \sim M, y=1 \sim N)$:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \cdots & f(1,N) \\ f(2,1) & f(2,2) & \cdots & f(2,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M,1) & f(M,2) & \cdots & f(M,N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

可通过灰度阈值分割技术识别涂层显微图像内部的陶瓷材料、孔洞及裂纹等. 灰度阈值分割是最常见的图像分割处理方法. 当图像内部像素点灰度之间存在较大的差异时, 设置一个合适的灰度阈值 T 就可以将其分开. 图 1(a)为氧化锆涂层 SEM 照片, 图中暗区代表了孔洞和裂纹, 而亮区则表示陶瓷. 由于图像只包含两种组元, 所以根据灰度值将整个图像分成两个部分, 得到一个二元图像.

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \in [0, T] \\ 2 & f(x, y) \in (T, 255] \end{cases} \quad (3)$$

其中, 1 代表缺陷组元; 2 代表氧化锆材料组元. 阈值 T 一般可以写成如下形式:

$$T = T[(x, y), f(x, y), p(x, y)] \quad (4)$$

式中, $f(x, y)$ 是图像像素点阵中 (x, y) 点的灰度, $p(x, y)$ 是该点邻域某种局部性质. T 在一般情况下可以是 $f(x, y)$, (x, y) , $p(x, y)$ 的函数. 可以根据图像的灰度直方图采用极小值点阈值法、迭代阈值法、最佳阈值搜寻法等方法选取合适的灰度阈值. 图 1(b)为图 1(a)的灰度直方图, 本文采用最佳阈值搜寻法得到其灰度阈值为 153.

然后, 将二元图像转化成矢量化的显微组织结构并导入有限元分析软件中, 生成与涂层显微组织相一致的有限元模型, 如图 1(c)所示, 从而在氧化锆涂层隔热性能计算中考虑了材料的非均质性.

2.2 热导率计算

利用 ANSYS 有限元软件进行涂层表观热导率的计算. 在生成的有限元模型的上下端面分别施加 T 和 $T + \Delta T$ 的温度载荷进行稳态热分析. 致密氧化锆在 1000°C 时的热导率 λ_0 为 $2.3\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. 孔洞和裂纹的主要成分为气体, 其热导率很小基本可以忽略^[7]. 当涂层在 ΔT 温度梯度下达到稳态时, 流入涂层的热量与流出涂层的热量相等. 此时, 涂层的表观热导率可通过傅立叶方程求得.

$$\lambda_c = \frac{h \cdot \int_{\Gamma} K \nabla T d\Gamma}{l \cdot \Delta T} \quad (5)$$

其中, λ_c 为涂层热导率的计算值(表观热导率); h 为涂层的高度; l 为涂层的宽度; ∇T 为温度梯度矢量; Γ 为热流密度的积分路径; $\int_{\Gamma} \lambda \nabla T d\Gamma$ 为流经涂层任一高度的单位厚度的总热流量. 图 1(d)

为图 1(c)中路径 S 的热流密度 q 分布图, 在缺陷处的热流密度为 0, 而在缺陷附近热流密度变化幅度较大.

3 涂层热导率的影响因素

涂层热导率的影响因素主要包括两个方面: 一是孔洞、裂纹等缺陷; 二是喷涂颗粒间的界面.

3.1 缺陷对涂层热导率的影响

根据式(5), 计算得到图 1 所对应的涂层在喷涂方向的热导率为 $1.87\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 而在垂直喷涂方向

的热导率为 $1.98\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. 沿着喷涂方向热导率较低主要是因为喷涂方向存在着更多的横向裂纹.

图 2(a)为涂层的温度梯度 ∇T 分布云图. 缺陷的存在, 一方面改变了温度梯度在涂层中的分布, 使得在缺陷的周围存在明显的温度梯度集中区, 从而有效地降低了涂层的热导率; 另一方面, 高的温度梯度也会导致高的应力区域的出现, 降低了涂层的力学性能. 图 2(b)为涂层中的最大主应力分布图, 深色区域为应力集中区, 是陶瓷层中最薄弱的部分, 当应力积累到一定程度时, 裂纹会由此迅速扩展, 并最终导致涂层失效.

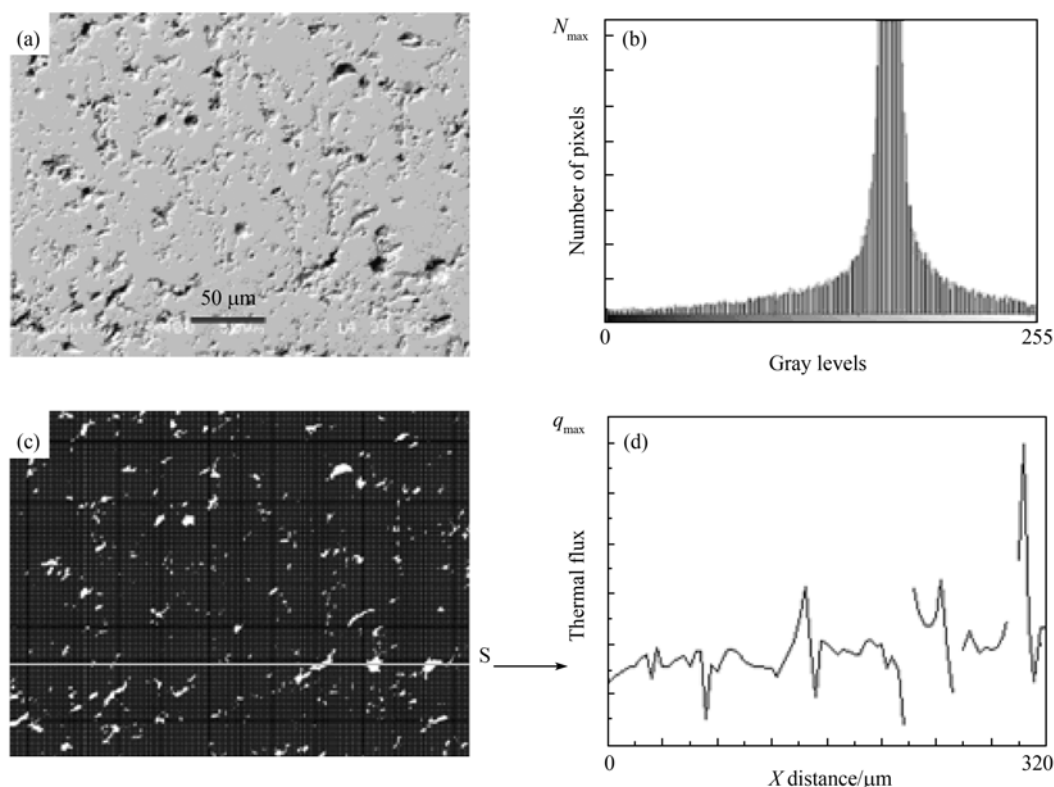


图 1 涂层灰度直方图、有限元网格模型与路径 S 的热流密度分布图

Fig. 1 Histogram of image gray levels, finite element mesh model and thermal flux distribution in S
(a) Cross-section image of coating; (b) Histogram of image gray levels; (c) Finite element mesh model; (d) Thermal flux distribution

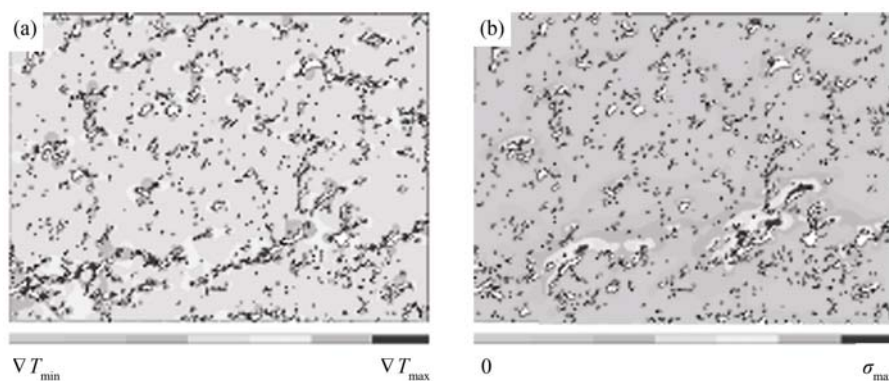


图 2 涂层温度梯度(a)与第一主应力(b)分布图

Fig. 2 Distribution of thermal gradient (a) and maximum principle stress (b)

为了尽可能多的获取涂层的显微组织特征, 随机选取了不同放大倍数的 SEM 照片约 200 张进行热导率的计算. 统计分析结果表明: 陶瓷层在喷涂方向的热导率为 $1.76\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 与致密材料本征热导率 $2.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 相比, 这部分热导率的降低是由孔洞、裂纹等缺陷所致. 有限元结果计算表明孔洞、裂纹等缺陷对涂层热导率降低的贡献为 24%(影响系数).

3.2 界面对涂层热导率的影响

热障涂层中, 陶瓷层的隔热效果不仅受孔洞和裂纹的影响, 同时, 界面的存在也会降低涂层的热导率. 表 1 为热导率的有限元计算结果与实验测试结果的对比. 热导率测试实验结果表明缺陷和界面共同作用对热导率降低的贡献为 46%. 由于缺陷对涂层热导率降低的贡献为 24%, 所以, 界面对涂层热导率降低的贡献为 22%, 基本与缺陷对热导率降低的贡献相当. 界面对于涂层热导率的降低具有非常重要的作用. 由于纳米结构陶瓷层具有更多的界面, 所以纳米结构陶瓷层的隔热效果往往要优于微米结构陶瓷层.

表 1 热导率计算结果与实验结果对比

Table 1 Comparison of thermal conductivity between calculation and experiment values

Values	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$1-\lambda/\lambda_0$
Calculation	1.76	24%
Experiment	1.24	46%

4 结论

1) 综合数字图像处理技术与有限元网格生成方

法, 生成与陶瓷层显微组织相一致的有限元模型, 利用傅立叶热传导方程, 计算了受孔洞、裂纹等缺陷影响的涂层表观热导率;

2) 有限元计算结果表明孔洞、裂纹等缺陷对涂层热导率降低的贡献为 24%;

3) 有限元计算结果与实验结果的差异表明界面对涂层热导率降低的贡献为 22%, 基本与缺陷的贡献相当.

参考文献:

- [1] Padture N P, Gell M, Jordan E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications. *Science*, 2002, **296(5566)**: 280–284.
- [2] Wang Z, Kulkarni A, Deshpande S, *et al.* Effects of pores and interfaces on effective properties of plasma sprayed zirconia coatings. *Acta Materialia*, 2003, **51(18)**: 5319–5334.
- [3] Langer S A, Fuller E R, Carter W C. OOF: an image-based finite-element analysis of material microstructures. *Computer Science & Engineering*, 2001, **3**: 15–23.
- [4] Michlik P, Berndt C. Image-based extended finite element modeling of thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2006, **201(6)**: 2369–2380.
- [5] Jadhav A D, Padture N P, Jordan E H, *et al.* Low-thermal-conductivity plasma-sprayed thermal barrier coatings with engineered microstructures. *Acta Materialia*, 2006, **54(12)**: 3343–3349.
- [6] Leitner J, Chuchvalec P, Sedmidubsk D, *et al.* Estimation of heat capacities of solid mixed oxides. *Thermochimica Acta*, 2002, **395(1/2)**: 27–46.
- [7] Lima J A P, Marin E, da Silva M G, *et al.* Characterization of the thermal properties of gases using a thermal wave interferometer. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12(11)**: 1949–1955.