

# 基于涂层显微组织图片的拉伸实验有限元数值模拟

沈伟, 范群波, 王富耻, 马壮

(北京理工大学 材料学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对热障涂层, 利用数字图像处理技术与有限元网格模型生成原理相结合的方法, 生成与实际  $ZrO_2$  陶瓷层显微组织图片一致的介观尺度的有限元网格模型. 利用 LS-DYNA 有限元方法进行  $ZrO_2$  陶瓷层在不同拉应力作用下的裂纹扩展模拟. 数值模拟结果表明: 在考虑了  $ZrO_2$  陶瓷层所包含的孔洞、微裂纹等缺陷的基础上, 裂纹从已有缺陷处开始迅速扩展, 并最终导致  $ZrO_2$  陶瓷层断裂失效. 数值模拟结果与实验结果吻合良好.

**关键词:** 数字图像处理; 有限元网格模型; 拉应力; 裂纹扩展

**中图分类号:** TG 174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2010)02-0231-04

## Finite Element Simulation of Virtual Tensile Experiment Based on Microstructural Images of Coating

SHEN Wei, FAN Qun-bo, WANG Fu-chi, MA Zhuang

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

**Abstract:** Based on digital image processing theory and finite element mesh generation principle, a methodology to generate the finite element grid model according to the microstructural image of  $ZrO_2$  ceramic coatings is proposed to study thermal barrier coatings. LS-DYNA finite element method is employed to model the crack growth of  $ZrO_2$  ceramic coatings under different tensile stresses. Numerical simulation results showed that based on the true microstructure of  $ZrO_2$  ceramic coatings including defects of voids and micro-cracks, crack grows quickly from the existing defects, leading to the failure of  $ZrO_2$  ceramic coatings. Numerical simulation results agree well with the experimental phenomena.

**Key words:** digital image processing; finite element grid model; tensile stresses; crack growth

大量的实验发现, 等离子喷涂热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 在拉伸作用下, 涂层最容易发生断裂失效的部位不在陶瓷层与黏结层之间的界面处, 而在陶瓷层内部. Griffith 关于脆性材料断裂强度的微裂纹理论认为<sup>[1]</sup>: 典型的脆性固体材料内部必然包含着相当数量不同大小的结构缺陷, 这些缺陷都可以近似处理为裂纹, 而裂纹的存在则是导致固体材料在低应力水平下发生断裂的根本原因. 由于 TBCs 中陶瓷层由陶瓷、孔洞、裂纹等组成, 当 TBCs 受到外加应力作用时, 孔洞、裂纹等缺陷对应力的传递与分布有着重要的影响. 因此, 基

于 TBCs 陶瓷层的真实显微组织结构对涂层进行力学性能分析就显得非常重要. 最近, 一些学者开展了基于涂层材料非均质性的热学分析和力学分析<sup>[2-8]</sup>. 然而, 很少有基于 TBCs 显微组织图片进行拉伸实验的数值模拟的报道.

作者以等离子喷涂 TBCs 中的  $ZrO_2$  陶瓷层为研究对象. 基于数字图像处理技术生成与实际  $ZrO_2$  陶瓷层显微组织图片一致的有限元网格模型; 利用有限元方法, 进行基于  $ZrO_2$  陶瓷层显微组织图片的拉伸实验数值模拟; 通过对比实验结果, 分析孔洞和裂纹缺陷对  $ZrO_2$  陶瓷层力学性能的影响.

收稿日期: 2009-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50801005)

作者简介: 沈伟(1983—), 男, 博士生, E-mail: shenwei@bit.edu.cn; 王富耻(1948—), 男, 教授, 博士生导师.

## 1 有限元模型生成

通过扫描电子显微镜 (SEM) 得到放大 1 000 倍的  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层横截面局部位置的物理图像如图 1 所示. 图片的大小为  $120 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$ , 其中黑色部分代表了涂层中的孔洞、裂纹等缺陷. 通过数字图像处理技术, 可以将图 1 由物理图像转换成数字图像.

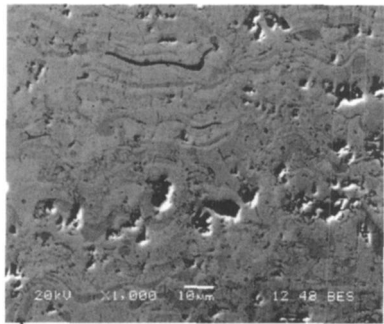


图 1  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层横截面显微组织图像

Fig. 1 Cross-section microstructure of  $\text{ZrO}_2$  coating

数字图像在计算机中是由像素点组成的, 每个像素点有一对应的整数值代表该像素点的灰度. 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成  $M \times N$  像素点单元的数字图像. 整个图像由有着不同灰度的像素点组成, 这些像素点的灰度构成了一个离散的函数  $f(x, y)$  ( $x = 1, 2, \dots, M$ ,  $y = 1, 2, \dots, N$ ):

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

灰度阈值分割是最常见的图像分割处理方法. 在多数情况下, 当图像内部像素点灰度值之间存在较大差异时, 设置一个合适的阈值  $T$  将它们分开. 从图 1 可以看出, 涂层显微组织图片中黑色部分代表了孔洞和裂纹, 黑色的灰度值比较低; 而  $\text{ZrO}_2$  材料呈灰白色, 所属的灰度值比较高. 由于图像只包含两种组元, 所以根据式 (2) 可将整个图像分成两个部分, 转化成一个二值图像.

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) < T \end{cases}. \quad (2)$$

首先将图 1 转换成灰度图像后, 通过设定合适的灰度阈值将灰度图像转换成二值图像; 然后, 根据不同的像素点灰度值对应着不同的材料组元, 将像

素点的集合转换成有限元网格单元的集合; 最后, 在有限元计算中赋予相应的材料组元属性, 从而在  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层力学性能计算中考虑了材料的非均质性. 图 2 为根据实际涂层图像建立网格单元数为  $240 \times 180$  的有限元模型, 尺寸为  $120 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$ .

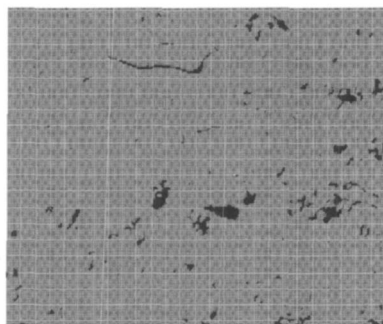


图 2  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层有限元网格模型

Fig. 2 Finite element grid model of  $\text{ZrO}_2$  TBCs

## 2 研究方法

采用轴向拉伸法模拟涂层的裂纹扩展. 在有限元模型下端面施加位移约束, 上端面施加随时间变化线性增加的纵向 (轴向) 拉应力载荷来分析  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层的受力情况, 如图 3 所示.

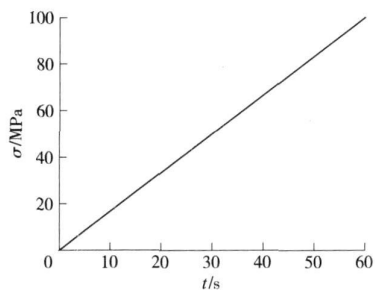


图 3 纵向拉应力载荷-时间关系图

Fig. 3 Axial tensile stress-time histories

在单向拉伸作用下, 物体的最大拉应力方向与最大主应力方向基本一致. 考虑到陶瓷层的失效方式为脆性破坏, 根据断裂的第一强度理论, 对  $\text{ZrO}_2$  材料采用最大主 (拉) 应力作为失效判据<sup>[9]</sup>. 采用线弹性的  $\text{ZrO}_2$  材料模型, 致密  $\text{ZrO}_2$  材料属性参数: 密度为  $6\,300 \text{ kg/m}^3$ ; 杨氏模量为  $210 \text{ GPa}$ ; 泊松比为  $0.3$ . 利用 LS-DYNA 有限元方法模拟陶瓷层中的裂纹扩展, 当有限元模型中的单元应力达到  $\text{ZrO}_2$  失效力  $700 \text{ MPa}$ <sup>[10]</sup> 时, 单元就被从有限元模型中删除, 从而模拟涂层在拉伸作用下的裂纹扩展情况, 并进一步分析涂层的结合情况.

### 3 结果与讨论

纵向拉应力载荷作用时间46.5 s时,  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层内最大主应力分布如图4所示。

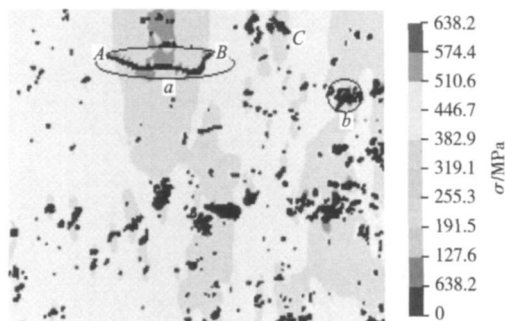


图4 46.5 s时最大主应力分布图

Fig. 4 Maximum principal stress distribution in 46.5 s

在横向主裂纹  $a$  的两端点处应力较为集中, 在

$A$  点处应力值最大, 达到638.2 MPa. 裂纹端点  $A$  处是裂纹最容易扩展的部位。

图5为不同时刻的裂纹扩展图。  $t=46.8$  s时, 裂纹从  $A$  点位置开始扩展, 此时的拉应力载荷为78.0 MPa;  $t=53.1$  s时, 横向裂纹贯穿整个模型, 该区域内的涂层已被拉断, 此时的拉应力载荷为88.5 MPa。图6表明, 随着拉应力载荷不断增加, 应力在裂纹尖端处迅速积累。当涂层内部应力达到失效力时, 首先从  $A$  端点处裂纹开始迅速向左侧扩展; 然后  $B$  点和  $C$  点处裂纹开始向右侧扩展, 同时孔隙  $b$  处裂纹开始向上纵向扩展; 最终横向裂纹贯穿整个涂层, 涂层被拉断。裂纹的扩展方式以横向扩展为主, 涂层最终断裂方式为层裂。裂纹扩展导致涂层失效的过程中, 横向主裂纹  $a$  起了主导作用, 而纵向裂纹和孔洞的贡献很小。

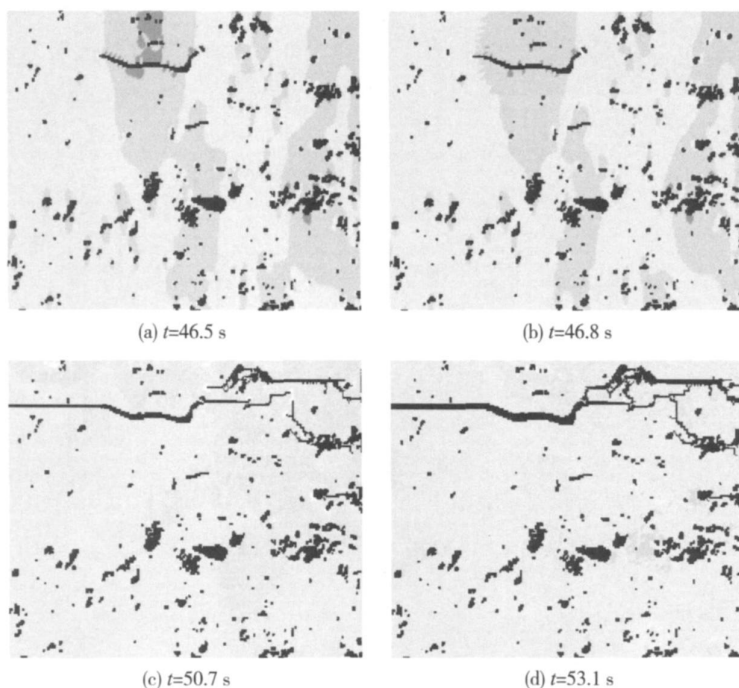


图5 不同时刻裂纹扩展图

Fig. 5 Crack growth in different times

图6为涂层上端面位移与时间关系曲线。在46.5~51.6 s内, 位移增加, 裂纹迅速扩展; 从51.6 s时刻开始, 位移增加速度陡然增大, 涂层完全断裂。计算表明, 49.5 s时刻的拉应力载荷77.5 MPa即为该区域涂层的许用拉应力载荷, 在小于77.5 MPa的拉应力作用下, 该区域涂层不会发生断裂失效; 51.6 s时刻的拉应力载荷86.0 MPa, 即为该区域涂层的失效拉应力载荷, 一旦拉应力值达到86.0 MPa, 涂层立即发生断裂失效。

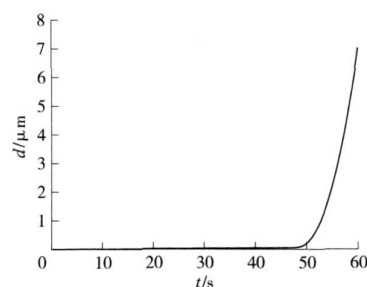


图6 涂层上端面位移-时间关系图

Fig. 6 Top of coating displacement-time histories

采用轴向拉伸法研究相同喷涂工艺得到 TBCs 的失效形式. 图 7 为拉伸断裂  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层断口形貌图, 在断口面上微裂纹较多, 喷涂过程中形成的横向微裂纹是导致涂层失效的主要原因. 实验表明, 断裂发生在陶瓷层内部, 断裂形式为层裂. 实验结果与模拟结果基本一致. 值得说明的是, 由于实际涂层的拉伸断裂失效因素很多, 除了  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层的显微组织形貌外, 还受到涂层内部界面结合状态等因素的影响. 作者提出的方法为进一步研究该类更复杂的问题提供了一种有效途径.

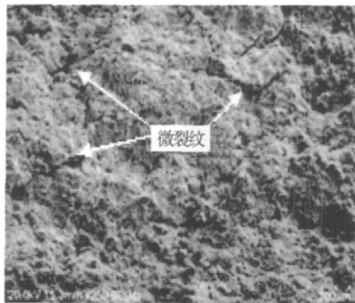


图 7 拉伸断裂  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层断口形貌图

Fig. 7 Tensile fracture fractograph of  $\text{ZrO}_2$  coating

## 4 结 论

综合数字图像处理技术和有限元网格生成原理, 提出了基于涂层显微组织图片的有限元网格模型生成方法. 采用 LS-DYNA 有限元方法模拟 TBCs 中  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层的裂纹扩展失效. 数值模拟结果表明, 在拉伸载荷作用下,  $\text{ZrO}_2$  陶瓷层中的横向微裂纹的存在促进了裂纹的横向扩展, 并最终导致涂层断裂失效. 数值模拟结果与实验结果吻合良好.

参考文献:

[1] 龚江宏. 陶瓷材料断裂力学[M]. 北京: 清华大学出版

社, 2001.

Gong Jianghong. Fracture mechanics of cermaics[ M] . Beijing: Tsinghua University Press, 2001. ( in Chinese)

- [2] Langer S A, Carter W C, Fuller E R. Object oriented finite element analysis for materials science[ M] . New York: National Institute of Standards and Technology, 1998.
- [3] Hsueh C H, Fuller E R. Analytical and numerical analyses for two-dimensional stress transfer[ J] . Materials Science and Engineering, 1999, A268: 1-7.
- [4] Hsueh C H, Fuller E R. Residual stresses in thermal barrier coatings: effects of interface asperity curvature/ height and oxide thickness[ J] . Materials Science and Engineering, 2000, A283: 46-55.
- [5] Nakamura T, Qian G, Berndt C C. Effects of pores on mechanical properties of plasma-sprayed ceramic coating [ J] . Journal of the American Ceramic Society, 2000, 83( 3): 578-584.
- [6] Zimmermann A, Carter W C, Fuller E R. Damage evolution during microcracking of brittle solids[ J] . Acta Material, 2001, 49: 127-137.
- [7] Wang Z, Kulkarni A, Deshpande S, et al. Effects of pores and interfaces on effective properties of plasma sprayed zirconia coatings[ J] . Acta Material, 2003, 51: 5319-5334.
- [8] Michlik P, Berndt C. Image-based extended finite element modeling of thermal barrier coatings[ J] . Surface and Coatings Technology, 2006, 201: 2369-2380.
- [9] 范天佑. 断裂理论基础[ M] . 北京: 科学出版社, 2003. Fan Tianyou. Fracture theory[ M] . Beijing: Science Press, 2003. ( in Chinese)
- [10] Fujisawa Y, Matsusue K, Takahara K. Tensile strength of engineering ceramics[ J] . Journal of the Society of Materials Science, 1986, 35: 1112-1117.

(责任编辑: 赵业玲)