

引文格式: 赵伟玲, 王亮, 刘楠, 等. 孔隙对热障涂层微压痕响应影响的数值模拟[J]. 航空制造技术, 2023, 66(17): 103-109.

ZHAO Weiling, WANG Liang, LIU Nan, et al. Numerical simulation on effect of pores on micro-compression mechanical response of thermal barrier coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(17): 103-109.

## 孔隙对热障涂层微压痕响应影响的数值模拟\*

赵伟玲<sup>1,2</sup>, 王亮<sup>1,2</sup>, 刘楠<sup>3</sup>, 曹枝军<sup>1</sup>, 苏怀宇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海硅酸盐研究所集成计算材料研究中心, 上海 201899;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 西安理工大学, 西安 710048)

[摘要] 微纳米压痕技术是表征陶瓷涂层系统力学性能和弹性/塑性响应行为的一项重要技术。通过 Python 二次开发在 ABAQUS 软件中建立含随机分布的圆形孔隙的热障涂层模型, 研究孔隙对大气等离子法 (APS) 制备的热障涂层的微纳米压痕响应的影响, 并在含随机圆形孔隙热障涂层模型的基础上, 利用扩展有限元法 (XFEM) 模拟分析微纳米压痕试验过程中陶瓷层内的裂纹扩展, 探究微裂纹和孔隙间的相互影响, 以及涂层内裂纹萌生扩展的规律。模拟结果表明, 孔隙的存在会在加载和卸载过程中释放一定的应力集中, 从而改变涂层应力的分布特征; 孔隙的存在会导致裂纹向孔隙的方向偏移扩展, 并在一定程度上阻止裂纹扩展。将这些工作与微纳米压痕试验的试验数据联系起来, 可以对热障涂层体系的力学性能进行有效预测。

关键词: 孔隙; 热障涂层 (TBCs); 微压痕; 力学行为; 有限元

### Numerical Simulation on Effect of Pores on Micro-Compression Mechanical Response of Thermal Barrier Coatings

ZHAO Weiling<sup>1,2</sup>, WANG Liang<sup>1,2</sup>, LIU Nan<sup>3</sup>, CAO Zhijun<sup>1</sup>, SU Huaiyu<sup>1</sup>

(1. Integrated Computational Materials Research Centre, Shanghai Institute of Ceramics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

[ABSTRACT] Micro/nano-indentation is a very important technique to characterize the mechanical properties and elastic/plastic response behavior of ceramic coatings system. A thermal barrier coating model containing randomly distributed circular pores was developed in ABAQUS using a secondary development plugin Python to investigate the effect of pores on the micro/nano-indentation response of thermal barrier coatings prepared by atmospheric plasma spraying (APS). Based on a finite element model of a thermal barrier coating containing random circular pores, the extended finite element method was used to simulate and analyze the crack propagation within the ceramic layer during the micro/nano-indentation experiments, and to further investigate the interaction between micro-cracks and pores, and the patterns of crack emergence and propagation within the coating. The results show that the distribution characteristic of the residual stress could be changed due to existence of the pores because the pores would release some stress concentration more or less during the loading and unloading processes. The presence of pores in the ceramic layer caused cracks to propagate in the direction of the pores and prevented crack further propagate to some extent. Correlating this work with the experimental results from micro/nano-indentation experiments may help us to predict the actual mechanical properties of thermal barrier coating systems.

Keywords: Pore; Thermal barrier coatings (TBCs); Micro-compression; Mechanical behavior; Finite element

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.17.103

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (91960107); 中国科学院青年创新促进会项目 (2017295); 上海市自然科学基金 (19ZR1479600)。

热障涂层(Thermal barrier coatings, TBCs)作为一种重要的高温热防护材料,广泛应用于航空发动机及燃气轮机涡轮叶片等高温合金部件上,用于提高发动机热端部件服役温度,延长服役寿命。微纳米压痕技术被视为材料的“指纹”,在表征薄膜和涂层的弹性模量和硬度等力学性能方面起着重要的作用。相比于纳米压痕技术,微压痕技术可以在更大尺度上评价薄膜和涂层的力学性能。

Wang 等<sup>[1]</sup>采用有限元方法对  $\text{La}_2\text{ZrO}_2$  (LZ) 热障涂层进行了表面微压痕模拟,特别研究了孔隙对大气等离子喷涂热障涂层表面微压痕力学响应的影响,但是所建立的模型为周期阵列几何模型,没有体现出陶瓷层中孔隙随机分布的特征。Qiao 等<sup>[2]</sup>采用压痕试验得到 YSZ 热障涂层的硬度、弹性模量等力学性能,并通过有限元方法深入分析了涂层的应力分布,在计算时只考虑了陶瓷层。Kaneko 等<sup>[3]</sup>在研究中通过压痕试验的有限元模拟得出多孔热障涂层的弹性模量。热障涂层在制备过程中会不可避免地产生孔隙,且涂层在恶劣的工作环境下也非常容易产生裂纹缺陷,因此研究微压痕下孔隙和裂纹的相互作用对研究热障涂层的真实结构及实际服役状态下的失效机制具有重要意义。

国内外的压痕试验模拟主要集中在简单结构或含简单分布孔隙热障涂层的力学性能上,亟待建立更加能反映热障涂层几何结构的模型。因此,本文通过 Python 二次开发的方法在 ABAQUS 中建立了含随机孔隙的热障涂层模型,并研究了不同孔隙率对压痕响应的影响。又利用 XFEM 法模拟了微纳米压痕试验过程陶瓷层内的裂纹扩展,通过建立两种模型来探究微裂纹和孔隙间的相互影响,以及涂层内裂纹萌生扩展的规律。

## 1 带随机分布孔隙的热障涂层的数值模型建立

### 1.1 随机孔隙模型开发

本研究选取等离子喷涂工艺制备的热障涂层,在热障涂层制备的过程中,涂层中会产生孔隙等缺陷,陶瓷层孔隙率  $f$  一般在 4%~20% 之间<sup>[4]</sup>。孔隙的存在一方面会成为裂纹萌生的源头,导致涂层过早失效;另一方面会增加热流传递的阻力,从而降低涂层的有效热导率。因此,本模拟工作中将热障涂层中的孔隙简化为圆形孔洞,建立含随机分布的圆形孔洞的热障涂层模型,用于模拟微压痕下随机空间位置分布的孔隙及不同孔隙率对热障涂层的动态弹塑性力学行为响应。

图 1 为建立含孔隙材料有限元模型的流程图。通过该流程图建立含不同孔隙率的圆形孔隙随机分布的热障涂层模型,主要分析孔隙率对微压痕下涂层动态响应的影响。

使用 Python 二次开发集成开发环境并利用 Pycharm 软件编写代码,进行随机圆的二维模型构建,具体步骤如下:(1)首先在 ABAQUS 中建立一个 2D 的随机圆形模型,并在工作目录下的 rpy 文件中找到生成单个圆形的代码,基于单个圆形模型的代码来生成多个圆;(2)然后在 ABAQUS 软件中引入相应的 Python 库,便于 Python 调用;(3)进一步定义随机圆的投放区域;(4)再根据设定的孔隙率计算出需要的随机圆的个数,对随机数  $x$  (圆心横坐标)、 $y$  (圆心纵坐标)、 $r$  (半径)进行初始化,并通过随机函数赋值,使圆形可以随机分布在投放区域中;(5)随后进行相交判断,目的是使各个圆不相交,即定义两圆圆心与圆心的距离大于两圆的半径之和;(6)最后基于 ABAQUS 中单个圆形的 rpy 文件编写圆形模型的代码;(7)在 ABAQUS 的图形用户界面输入 Python 代码,运行查看随机分布圆的模型,以此判断程序编写是否无误及模型是否合理。并且因为 Python 编码中包含随机函数,所以运行后得到的随机圆模型有多种结果,其分布并不相同。在得到的某些模型中,部分随机圆可能会分布在靠近涂层边缘的地方(在 ABAQUS 前处理中也可以做移动操作,再判断是否发生干涉),若此时导入到 ABAQUS 中计算,可能会使计算结果不收敛,因此可以多运行几次程序,直至建立相对最合适的模型。得到的含随机圆形孔隙的模型如图 2 所示。

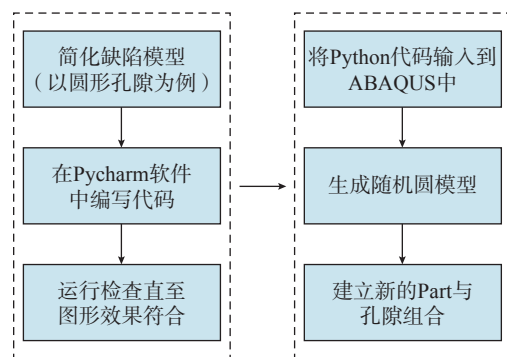


图 1 建立含孔隙材料有限元模型流程图  
Fig.1 Flow chart for building a finite element model of a material containing pores

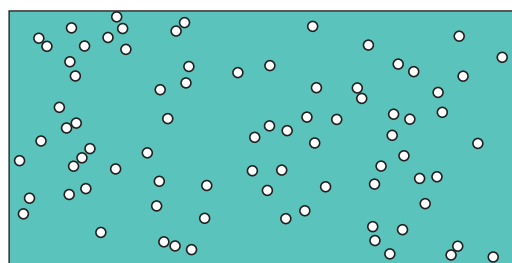


图 2 含随机圆形孔隙的模型  
Fig.2 Model with random circular pores

## 1.2 模型描述及材料属性

在 ABAQUS 中建立热障涂层模型与随机圆进行布尔操作,从而得到含随机孔隙的热障涂层压痕模型,如图 3 所示。其中,涂层从下往上分别为 DZ125 镍基高温合金基体、NiCoCrAlY 粘结层、质量分数 8%  $Y_2O_3$  部分稳定  $ZrO_2$  (8YSZ) 陶瓷层。基体和涂层中各层的性能参数如表 1 所示<sup>[5-7]</sup>。在整个模拟过程中做出以下假设<sup>[8]</sup>: (1) 8YSZ 层材料被认为是线弹性的,而基体和粘结层均包含弹性/塑性响应。假设 Von-Mises 屈服准则和双线性运动硬化用来描述基体和粘结层的应变硬化行为。(2) 虽然涂层在沉积方向和界面方向的性能不同,但孔隙、裂纹等微观缺陷没有明显的方向性,排列不规则,涂层组织不均匀。因此,不同方向的力学性能几乎没有差异,在当前的模拟中,涂层可以被视为具有各向同性。基体也具有各向同性的,因此为多晶材料。并假设所有材料都与温度无关。(3) 由于微压痕试验是在室温条件下进行的,所以模型中不考虑蠕变和氧化行为。(4) 界面为平直的,没有考虑界面的起伏。

在模拟中基体厚度 1.6 mm、粘结层厚度 0.1 mm、陶瓷层厚度 0.3 mm、孔隙半径 8  $\mu m$ 、孔隙率 5%、圆柱试样半径 0.6 mm、半球形压头半径 0.2 mm、压入深度 0.03 mm。

在 ABAQUS 中进行微纳米压痕试验的模拟一共要建立两个部件:压头和热障涂层。压头材料一般选择金刚石材质,其弹性模量为 1060 GPa,泊松比为 0.07。由于压头的弹性模量比热障涂层高出很多,所以在 ABAQUS 建模过程中可以将压头看作理想的刚体,从而有效减少作业计算的时间,提高计算效率,且对模拟计算结果无大的影响。有限元网格的划分要考虑到接触的区域,网格划分采用四边形四节点减缩积分单元,并对靠近压头尖端的地方、接触区域下方及孔隙周围网格进行细化处理。此外,实际的压痕试验过程中大多数时候加载速度比较慢,所以可以看成是一个准静态的加载过程<sup>[9]</sup>。

## 1.3 扩展有限元法模拟裂纹扩展

上述方法虽然在一定程度上可以模拟压头作用在含孔隙的热障涂层的微压痕响应的过程,但是还存在一定的局限性,孔隙在被压实后发生了严重的扭曲变形,相关单元失效,无法探究裂纹的产生与扩展。在上述模型的基础上,进一步采用扩展有限元法(XFEM)来模拟微纳米压痕试验过程陶瓷层内的裂纹扩展。采用基于牵引-分离(Traction-separation)描述的双线性本构模型<sup>[10]</sup>,如图 4 所示,其中横坐标  $\delta$  表示整个过程中材料产生的变形量,纵坐标  $\sigma$  表示最大主应力。当材料受到的最大主应力到达最高点 2 时发生损伤,之后材料沿下

降曲线 2-3-4 发生演化;当材料的变形量  $\delta$  到达  $\delta_{max}$  时,上升段直线 0-1-2 与横坐标形成的面积等于临界释放率,材料被破坏。该模型需要定义两个关键准则。

损伤起始(Damage initiation)选择最大主应力准则(式(1))。

$$\left(\frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_n^0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_s^0}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

式中,  $\sigma_n$  为法向应力;  $\sigma_s$  为剪切应力;  $\sigma_n^0$  和  $\sigma_s^0$  为名义应力的峰值。

损伤演化(Damage evolution)为基于能量的线性软化准则(式(2))。

$$\left(\frac{G_n}{G_{nc}}\right) + \left(\frac{G_s}{G_{sc}}\right) = 1 \quad (2)$$

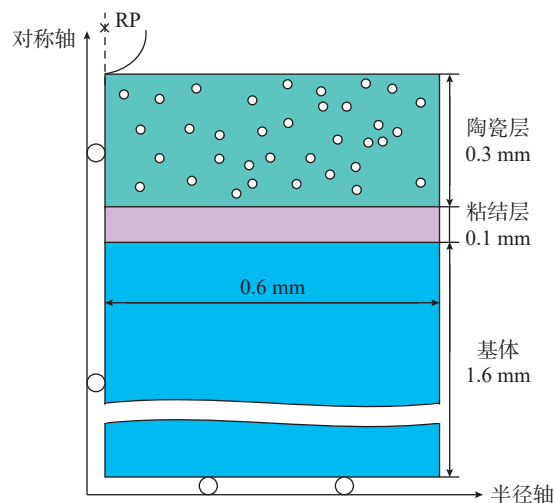


图3 热障涂层压痕模型示意图

Fig.3 Schematic illustration of the indentation model for TBCs

表1 基体和涂层各层的性能参数<sup>[5-7]</sup>

Table 1 Performance parameters of substrate and each layer of coatings<sup>[5-7]</sup>

层	弹性模量 /MPa	泊松比	屈服强度 /MPa
DZ125 镍基合金基体	211000	0.33	408
粘结层	200000	0.3	470
陶瓷层	48000	0.23	500 (断裂强度)

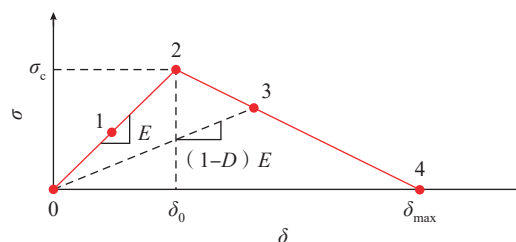


图4 双线性本构模型

Fig.4 Bilinear constitutive model

式中,  $G_n$ 、 $G_s$  分别为法向、剪切方向能量释放率;  $G_{nc}$ 、 $G_{sc}$  分别为法向、剪切方向临界能量释放率。

本模型中取临界最大主应力为 150 MPa, 即当材料受到的最大主应力值达到 150 MPa 时, 材料发生损伤; 临界断裂能量释放率为  $40 \text{ J/m}^{2[11]}$ 。

等离子喷涂 8YSZ 热障涂层的孔径分布服从对数正态分布, 陶瓷层内孔径大小主要集中在  $1\sim 10 \mu\text{m}$  之间。由于热障涂层在等离子喷涂制备过程中会生成平行界面的裂纹, 且在分段的大气等离子喷涂热障涂层的制备过程中在喷涂态的热障涂层表面预制竖直裂纹, 因此通过建立以下 4 种模型来探究微裂纹和孔隙间的相互作用, 并研究涂层内裂纹萌生扩展的规律。模型 1 在不含孔隙的热障涂层 8YSZ 层表面  $0.1 \text{ mm}$  下预制一条长为  $50 \mu\text{m}$  平行于界面的直线裂纹; 模型 2 在含随机分布圆形孔隙的热障涂层 8YSZ 层表面  $0.1 \text{ mm}$  下预制一条长为  $50 \mu\text{m}$  平行于界面的直线裂纹; 模型 3 在不含随机分布圆形孔隙的热障涂层 8YSZ 层表面预制一条长  $50 \mu\text{m}$ 、距离对称轴  $0.1 \text{ mm}$  且平行于对称轴的竖直裂纹; 模型 4 在含随机分布圆形孔隙的热障涂层 8YSZ 层表面预制一条长为  $50 \mu\text{m}$ 、距离对称轴  $0.1 \text{ mm}$  且平行于对称轴的竖直裂纹。

## 2 数值计算结果与分析

### 2.1 孔隙的影响

为了探究孔隙率对压痕响应的影响规律, 控制孔隙率半径大小为  $8 \mu\text{m}$ , 研究了孔隙率分别为 0、5% 和 9% 情况下热障涂层压痕下的弹性塑性力学响应行为。

图 5 为不同孔隙率的 Von-Mises 应力分布图。通过对比可以看出, 在最大载荷下, 具有孔隙的热障涂层发生塑性变形区域的面积小于无孔隙的热障涂层。压头与涂层表面相互作用界面下的接触区域发生塑性变形, 塑性变形同样出现在压头附近孔隙的周围。通过比较图 5 (c) 和 (d) 可以看出, 卸载后, 只有孔隙附近或靠近孔隙的区域以及靠近压头位置的涂层表面以下区域保持塑性变形。图 5 (c) 和 (d) 均显示了孔隙存在时应力分布的不连续性, 且该区域在计算时容易出现应力集中。在压头的作用下, 最大载荷时, 靠近压头接触的附近区域孔隙形状发生了变形或者弥合; 卸载后, 由于孔隙的存在会释放一定的应力集中, 可以看到部分的孔隙变形发生了恢复, 且孔隙周围的应力分布也有所变化。

图 6 为不同孔隙率热障涂层  $S_{11}$  的分布图。  $S_{11}$  代表沿  $x$  轴的正应力, 可以看出, 在最大载荷时压应力位于压头与热障涂层相互作用区域的下方及孔隙的周围; 卸载时, 最大压应力位于压头与热障涂层相互作用区

域的下方、孔隙的周围及靠近 Pile up 位置的涂层区域。对比图 6 (a) 和 (e) 可知, 最大压应力位于孔隙周围, 对比最大载荷时和卸载后发现, 随着孔隙率的增加, 对应的压应力区域的面积增大。

图 7 为不同孔隙率热障涂层  $S_{22}$  的分布图。  $S_{22}$  代表沿  $y$  轴的正应力, 由图 7 (a) 和 (c) 可以看出, 最大压应力区域的面积变宽, 最大拉应力位于孔隙附近, 更靠近接触面。通过对比图 7 (b)、(d) 和 (f) 可知, 孔隙的存在导致应力释放, 最大拉应力区域有所缩小, 且孔隙率越大, 最大压应力区域应该越小。

图 8 为不同孔隙率热障涂层的载荷 - 位移曲线。可以看出, 在相同的压入深度  $0.03 \text{ mm}$  下, 载荷 - 位移曲线具有相似的趋势。无孔隙热障涂层的最大载荷比有孔隙热障涂层的最大载荷高。同样, 无孔隙热障涂

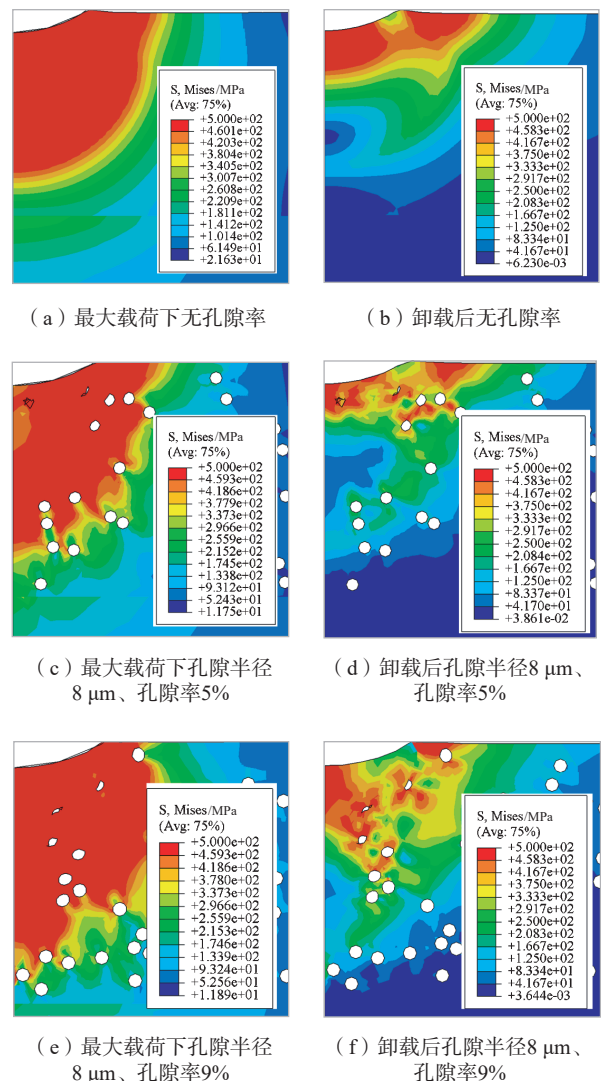


图 5 不同孔隙率的热障涂层 Von-Mises 应力的分布  
Fig.5 Distribution of Von-Mises stresses in thermal barrier coatings with different porosity

层的弹性恢复位移比有孔隙热障涂层的弹性恢复位移大。将无孔隙热障涂层的载荷-位移与有孔隙热障涂层的载荷-位移曲线进行比较,可以看出,在加载的初始阶段,载荷-位移曲线的上升几乎一致。之后有孔隙热障涂层的加载曲线开始偏离,低于无孔隙热障涂层的加载曲线。这种现象可以解释为,当陶瓷层含一定量孔隙时,认为陶瓷层的有效弹性模量降低,因此在塑性变形阶段加载曲线的斜率减小,含孔隙热障涂层的加载曲线不表现为普通材料的典型加载曲线。对比两种孔隙率的载荷-位移曲线可以看出,随着孔隙率的降低,载荷-位移曲线与无孔隙时的载荷-位移曲线趋于接近。

对于含有一定孔隙率的热障涂层,其有效弹性模量与无孔隙热障涂层的弹性模量满足式(3)<sup>[12]</sup>。

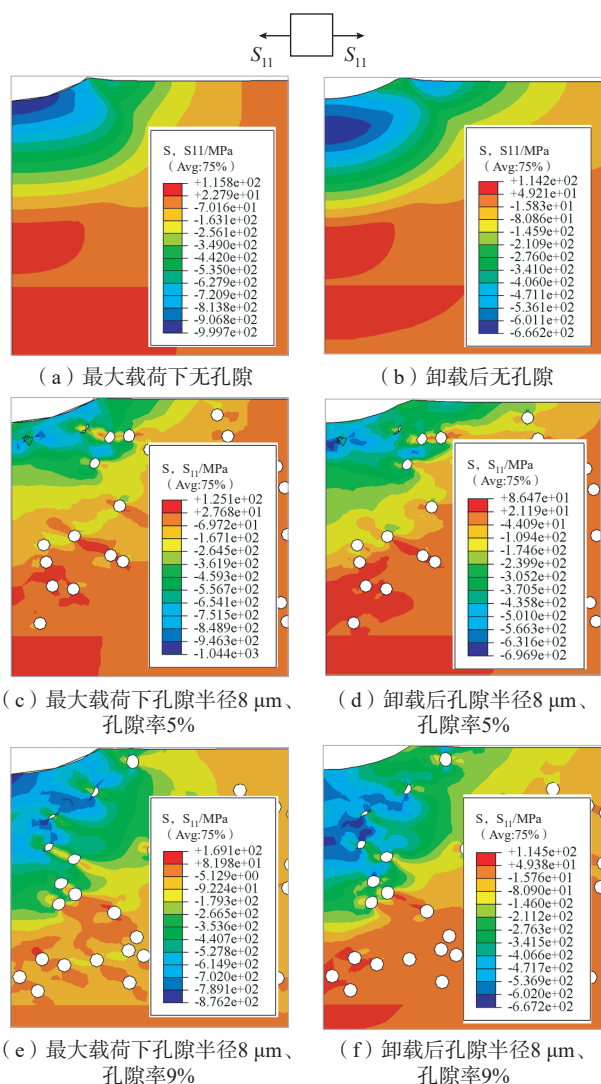


图6 不同孔隙率的热障涂层  $S_{11}$  的分布

Fig.6 Distribution of  $S_{11}$  in thermal barrier coatings with different porosity

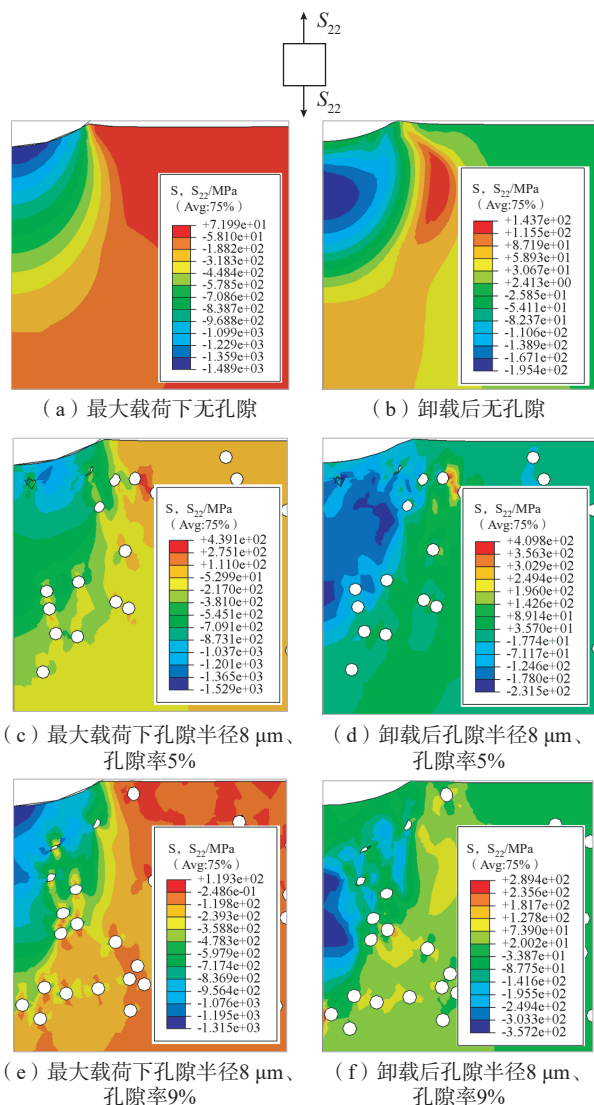


图7 不同孔隙率的热障涂层  $S_{22}$  的分布

Fig.7 Distribution of  $S_{22}$  in thermal barrier coatings with different porosity

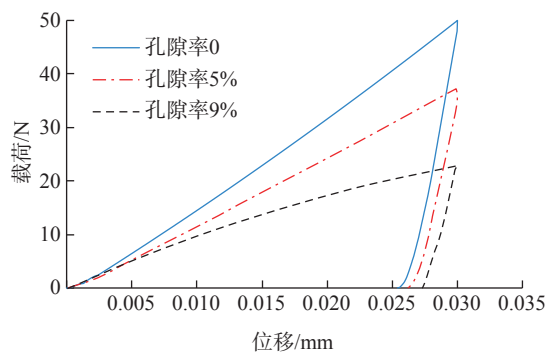


图8 3种不同孔隙率热障涂层的载荷-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curves for TBCs with three different porosities

$$E = E_0 \exp(-B \cdot p) \quad (3)$$

式中,  $E$  为涂层的有效弹性模量;  $E_0$  为无孔隙涂层的弹性模量;  $B$  为与孔隙率无关的常数;  $P$  为涂层的孔隙率, %。

从式(3)中可以看出, 孔隙率会影响热障涂层的有效弹性模量, 并且随着孔隙率的增大, 涂层的有效弹性模量减小。这与图8中的3种不同孔隙率热障涂层的载荷-位移曲线所反映的趋势是一致的。

### 2.2 横向裂纹和竖直裂纹扩展模拟结果

图9(a)和(b)为热障涂层内陶瓷层横向微裂纹扩展模拟结果, 图9(c)和(d)为涂层内陶瓷层竖直微裂纹扩展模拟结果。其中,  $a$  为预制微裂纹长度,  $\Delta a$  为裂纹扩展长度。图9给出的是  $S_{22}$  计算云图, 即  $y$  方向应力云图, 可以看出, 靠近压头的地方存在较大的压应力集中, 远离压头的地方主要是拉应力。孔隙密集处孔隙能够一定程度上释放应力集中, 且孔隙附近同时存在拉应力和压应力, 且裂纹扩展的方向朝向拉应力较大区域方向, 孔隙的尖端存在应力集中, 孔隙能够钝化这种应力集中, 并改变裂纹的扩展方向, 使得孔隙表现出对裂纹的“吸引”或“俘获”效应, 使裂纹扩展方向发生偏折。从图9(a)可以看出, 横向裂纹在  $y$  方向应力的作用下向右下方扩展, 同时微裂纹会偏转向强度比较弱的地方。在这一过程中, 微裂纹会同时出现张开(I型)和错动(II型)扩展。从图9(c)可以看出, 涂层表面的竖直裂纹一开始沿着竖直方向继续扩展, 到达孔隙处后, 裂纹向孔隙的方向偏移扩展。综合对比图9可以得出以下结论。

(1) 孔隙会“吸引”裂纹。微裂纹会偏转向强度比较弱的地方, 从图9(b)可以看出, 由于孔隙的存在, 裂纹向孔隙的方向偏移扩展, 图9(d)中也反映出了相应规律。

(2) 孔隙会在一定程度上阻止裂纹扩展。图9(a)和(b)中  $\Delta a_1 > \Delta a_2$ , 这是由于圆形孔隙的存在会使裂纹尖端的应力集中系数大幅度降低, 从而导致裂纹停止扩展, 即裂纹扩展到孔隙所在的位置时不会穿透孔隙继续扩展。

### 3 结论

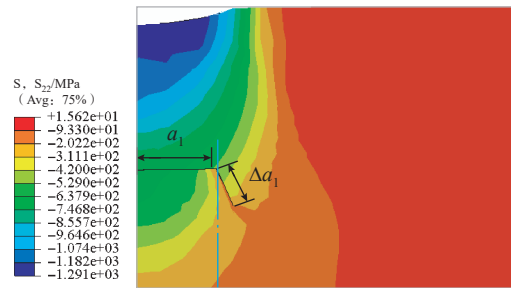
本文采用有限元模拟计算了含随机分布的圆形孔隙的等离子喷涂热障涂层的微纳米压痕响应行为。并利用XFEM模拟分析了微纳米压痕试验过程陶瓷层内的裂纹扩展, 探究微裂纹和孔隙间的相互影响, 以及涂层内裂纹萌生扩展的规律, 得出如下结论。

(1) 陶瓷涂层中存在的孔隙会在加载和卸载过程

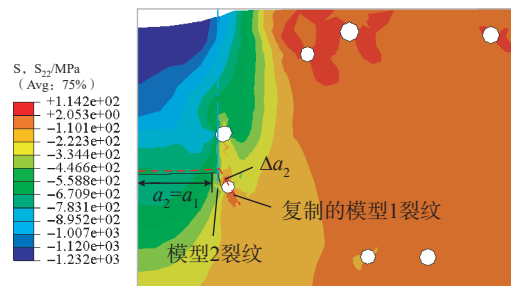
中释放一定的应力集中, 从而改变涂层应力的分布特征。

(2) 在相同压痕深度下, 无孔隙热障涂层的最大载荷比有孔隙热障涂层的最大载荷高。卸载过程中无孔隙热障涂层的弹性恢复位移比有孔隙热障涂层的弹性恢复位移大。

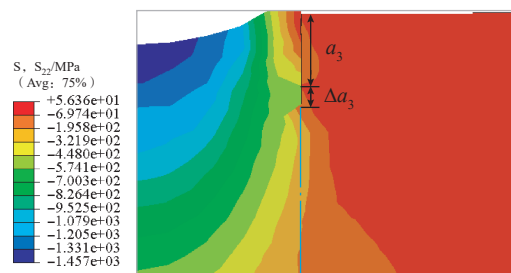
(3) 陶瓷层中孔隙的存在会导致裂纹向孔隙的方向偏移扩展, 并在一定程度上阻止裂纹扩展。



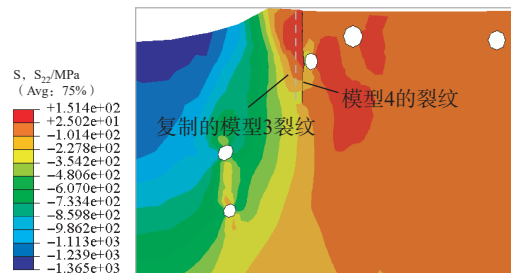
(a) 不含孔隙、含横向预制裂纹(模型1)



(b) 含孔隙、含横向预制裂纹(模型1)



(c) 不含孔隙、含竖直预制裂纹



(d) 含孔隙、含竖直预制裂纹

图9 热障涂层内陶瓷层横向和竖直微裂纹扩展云图

Fig.9 Contour plot of stress of transverse and vertical micro-crack propagation in the ceramic layer within the thermal barrier coating

## 参考文献

- [1] WANG L, WANG Y, SUN X G, et al. Influence of pores on the thermal insulation behavior of thermal barrier coatings prepared by atmospheric plasma spray[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(1): 36–47.
- [2] QIAO X, WANG Y M, WENG W X, et al. Influence of pores on mechanical properties of plasma sprayed coatings: Case study of YSZ thermal barrier coatings[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(17): 21564–21577.
- [3] KANEKO K, ARAI M. Evaluation of shear fatigue delamination strength of porous thermal barrier coatings by torsion pin-test method[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29(5): 1002–1015.
- [4] 邸娟, 陈高飞, 颜晓江, 等. 孔隙结构对大气等离子喷涂热障涂层抗侵蚀性能影响的数值研究[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(1): 113–119.
- DI Juan, CHEN Gaofei, YAN Xiaojiang, et al. Numerical study on effect of pore structure on erosion resistance of atmospheric plasma thermal barrier coating[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(1): 113–119.
- [5] ZHOU C G, WANG N, XU H B. Comparison of thermal cycling behavior of plasma-sprayed nanostructured and traditional thermal barrier coatings[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 452–453: 569–574.
- [6] ZHOU C G, WANG C L, SONG Y X. Evaluation of cyclic oxidation of thermal barrier coatings exposed to NaCl vapor by finite element method[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 490(1–2): 351–358.
- [7] TEIXEIRA V, ANDRITSCHKY M, FISCHER W, et al. Effects of deposition temperature and thermal cycling on residual stress state in zirconia-based thermal barrier coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 120–121: 103–111.
- [8] WANG L, ZHONG X H, YANG J S, et al. Finite element simulation of surface micro-indentation behavior of yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings with microstructural characteristic of columnar grains and sub-grains based on a nonlinear contact model[J]. *Computational Materials Science*, 2014, 82: 244–256.
- [9] 龚江宏. 准静态纳米压痕的理论基础与数据分析[J]. *陶瓷学报*, 2021, 42(2): 181–245.
- GONG Jianghong. Theoretical foundation and data analyses of quasi-static nanoindentation[J]. *Journal of Ceramics*, 2021, 42(2): 181–245.
- [10] XU W, LU T J, WANG F. Effects of interfacial properties on the ductility of polymer-supported metal films for flexible electronics[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(14–15): 1830–1837.
- [11] 齐莎莎. 等离子喷涂热障涂层冲蚀失效的量纲分析及有限元模拟[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- QI Shasha. Dimensional analysis and finite element simulations on the erosion process of plasma sprayed thermal barrier coatings[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [12] KHOR K A, GU Y W, DONG Z L. Mechanical behavior of plasma sprayed functionally graded YSZ/NiCoCrAlY composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 139(2–3): 200–206.
- 通讯作者: 王亮, 研究员, 博士, 研究方向为热障涂层宏观有限元计算。  
(责编 晓月)
- (上接第 88 页)
- [9] DUAN C Z, SUN W, FU C, et al. Modeling and simulation of tool-chip interface friction in cutting Al/SiC<sub>p</sub> composites based on a three-phase friction model[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 142–143: 384–396.
- [10] 王泽亮, 黄树涛, 焦可如, 等. 高速正交切削 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料切削温度仿真研究[J]. *工具技术*, 2014, 48(10): 16–19.
- WANG Zeliang, HUANG Shutao, JIAO Keru, et al. Simulation studies of cutting temperature on high speed orthogonal cutting SiC<sub>p</sub>/Al composites[J]. *Tool Engineering*, 2014, 48(10): 16–19.
- [11] DAVIM P A, BAPTISTA M. Relationship between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103(3): 417–423.
- [12] ZHENG W, WANG Y J, ZHOU M, et al. Material deformation and removal mechanism of SiC<sub>p</sub>/Al composites in ultrasonic vibration assisted scratch test[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(13): 15133–15144.
- [13] XIANG D H, SHI Z L, FENG H R, et al. Finite element analysis of ultrasonic assisted milling of SiC<sub>p</sub>/Al composites[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(7–8): 3477–3488.
- [14] KADIVAR M A, AKBARI J, YOUSEFI R. et al. Investigating the effects of vibration method on ultrasonic-assisted drilling of Al/SiC<sub>p</sub> metal matrix composites[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014, 30(3): 344–350.
- [15] 郭东升, 张敏良, 赵森, 等. 超声振动车削参数对切削力的影响[J]. *轻工机械*, 2019, 37(5): 29–33, 38.
- GUO Dongsheng, ZHANG Minliang, ZHAO Sen, et al. Effect of ultrasonic vibration turning parameters on cutting force[J]. *Light Industry Machinery*, 2019, 37(5): 29–33, 38.
- [16] 何俊, 邓成军. 椭圆轨迹对超声波椭圆振动切削的影响[J]. *制造业自动化*, 2013, 35(2): 43–47.
- HE Jun, DENG Chengjun. Effect of elliptic trajectory on ultrasonically elliptical vibration cutting[J]. *Manufacturing Automation*, 2013, 35(2): 43–47.
- [17] LIU P, WANG A Q, XIE J P, et al. Characterization and evaluation of interface in SiC<sub>p</sub>/2024Al composite[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(5): 1410–1418.
- 通讯作者: 袁松梅, 教授, 研究方向为复合材料加工、绿色加工、航空复杂结构及难加工材料加工、高效绿色数控加工工艺及装备工程技术。  
(责编 晓月)