

# LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 热障涂层退火过程残余热应力分布及涂层热稳定性的数值模拟

胡帅<sup>1</sup>, 冯永军<sup>1</sup>, 李伟汉<sup>1</sup>, 胡素影<sup>1</sup>, 宫雪<sup>2</sup>, 解志文<sup>1</sup>

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051;

2. 沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 沈阳 110136)

**摘要:** **目的** 研究退火过程中 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 热障涂层内部残余热应力的分布情况及其对热障涂层热稳定性的影响机理。**方法** 基于等离子喷涂制备的 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub>/YSZ 双热障涂层物理模型, 采用 Abaqus 建立数值仿真模型, 通过温度位移耦合计算, 系统分析不同退火温度下 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 热障涂层内部残余热应力的分布情况。通过扫描电镜, 观察退火前后涂层表面及断面的微观组织形貌。根据数值模拟结果及涂层 SEM 图像, 分析残余热应力对 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 热障涂层热稳定性的影响, 探究引起涂层裂纹损伤失效的影响因素。**结果** 数值模拟结果显示, LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 热障涂层内部的残余热应力以径向应力为主, 其值远大于轴向应力及剪切应力。退火中, 径向残余热应力在径向距离 0~2.4 mm 内缓慢增长到最大值, 而在  $x=2.4$  mm 至径向边缘范围内急剧降低。退火后, 在涂层径向边缘位置出现应力集中, 在径向距离  $x=2.6$  mm 处达到最大拉应力, 并迅速减小为压应力。900、1 000、1 100、1 200 °C 退火中径向残余热应力梯度分别为 0.334、0.369、0.389、0.391 GPa。退火后径向残余热应力梯度分别为 0.104、0.148、0.203、0.260 MPa。从退火后涂层表面及断面扫描电镜图像观察到, LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 热障涂层内部裂纹损伤以轴向裂纹为主。**结论** LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 热障涂层退火过程中内部径向残余热应力在径向边缘位置存在拉压应力突变, 应力梯度随退火温度的升高而增大。LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 热障涂层在退火过程中存在较大的径向残余热应力, 其应力值占主导地位, 是引起涂层轴向裂纹产生及扩展的主要原因。

**关键词:** 热障涂层; 退火; 残余热应力; 应力梯度; 热稳定性; 数值模拟

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)06-0275-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.025

## Numerical Simulation of Residual Thermal Stress Distribution and Thermal Stability of LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> Thermal Barrier Coating during Annealing

HU Shuai<sup>1</sup>, FENG Yong-jun<sup>1</sup>, LI Wei-han<sup>1</sup>, HU Su-ying<sup>1</sup>, GONG Xue<sup>2</sup>, XIE Zhi-wen<sup>1</sup>

收稿日期: 2021-05-21; 修订日期: 2021-10-03

Received: 2021-05-21; Revised: 2021-10-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52001217); 辽宁省教育厅科学研究经费项目 (JYT19035)

Fund: Youth Science Foundation Project of National Natural Science Foundation of China (52001217); Scientific Research Funding Project of Liaoning Provincial Department of Education (JYT19035)

作者简介: 胡帅 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为涂层仿真。

Biography: HU Shuai (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: coating simulation.

通讯作者: 冯永军 (1967—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为数字化设计。

Corresponding author: FENG Yong-jun (1967-), Male, Master, Associate professor, Research focus: digital design.

引文格式: 胡帅, 冯永军, 李伟汉, 等. LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 热障涂层退火过程残余热应力分布及涂层热稳定性的数值模拟[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 275-282.

HU Shuai, FENG Yong-jun, LI Wei-han, et al. Numerical Simulation of Residual Thermal Stress Distribution and Thermal Stability of LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> Thermal Barrier Coating during Annealing[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 275-282.

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Liaoning Anshan 114051, China; 2. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**ABSTRACT:** This work aims to explore the distribution of residual thermal stress in  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  thermal barrier coating during annealing and its effect on the thermal stability of thermal barrier coating. Based on the physical model of  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ /YSZ double thermal barrier coating prepared by plasma spraying, the numerical simulation model was established by Abaqus. Through the coupled calculation of temperature displacement, the distribution of residual thermal stress in  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  thermal barrier coating at different annealing temperatures was systematically analyzed. The microstructure of the coating surface and section before and after annealing was observed by SEM experiment. According to the results of numerical simulation and SEM image of the coating, the influence of residual thermal stress on the thermal stability of  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  thermal barrier coating was analyzed, and the influencing factors of coating crack damage and failure were explored. The numerical simulation results show that the residual thermal stress in  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  thermal barrier coating is mainly radial stress, which is much larger than the axial stress and shear stress. During annealing, the radial residual thermal stress increases slowly to the maximum in the range of 0~2.4 mm, but decreases sharply in the range of  $x=2.4$  mm to the radial edge. After annealing, the concentrated stress appears at the radial edge of the coating, reaches the maximum tensile stress at the radial distance  $x=2.6$  mm, and decreases rapidly to compressive stress. The radial residual thermal stress gradients are 0.334 GPa, 0.369 GPa, 0.389 GPa and 0.391 GPa at 900 °C, 1 000 °C, 1 100 °C and 1 200 °C, respectively. The radial residual thermal stress gradients are 0.104 MPa, 0.148 MPa, 0.203 MPa and 0.260 MPa after annealing, respectively. From the SEM images of the surface and cross section of the annealed coating, it is found that the main damage of the internal crack of  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  thermal barrier coating is axial crack. During the annealing process, the radial residual thermal stress of  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  thermal barrier coating has a sudden change of tensile and compressive stress at the radial edge, and the stress gradient increases with the increase of annealing temperature. The results show that there is a large radial residual thermal stress in the annealing process of thermal barrier coating, and the stress value is dominant, which is the main reason for the generation and propagation of axial cracks in thermal barrier coating.

**KEY WORDS:** thermal barrier coating; annealing; residual thermal stress; stress gradient; thermal stability; numerical simulation

随着先进航空发动机向高流量比和高推重比方向发展,发动机关键部件尤其是涡轮叶片的工作温度越来越高<sup>[1]</sup>,目前先进发动机压气机段的出口温度已经超过 650 °C,而燃烧室、高压涡轮进口温度超过 1 200 °C<sup>[2]</sup>。常规的镍基高温合金的最高使用温度为 1 080 °C,基体材料所能承受的温度有限,在高温环境下长时间工作,基体耐热腐蚀和抗氧化性能会降低<sup>[3-4]</sup>。为了提高其寿命、抗疲劳性能及发动机的效率,在叶片上使用合适的涂层防护技术便是一种既经济又有效的方式<sup>[5]</sup>。等离子喷涂制备的热障涂层以其优异的隔热、抗氧化腐蚀性能而被广泛地用作航空发动机涡轮叶片高温合金表面的隔热涂层<sup>[6-8]</sup>。大部分热障涂层都是由金属黏结层、表面陶瓷层与高温合金基底构成<sup>[9]</sup>。传统单陶瓷涂层由于所使用材料的热物理性能差异大,界面处存在过大的残余热应力<sup>[10]</sup>。残余热应力是影响涂层与基材结合强度的重要因素之一。在残余热应力的作用下,涂层内部或涂层与基材结合面易萌生微裂纹,随着裂纹扩展,易造成涂层剥离<sup>[11-14]</sup>。

采用等离子喷涂制备的  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ /YSZ 双热障涂层可实现金属和陶瓷组元在涂层厚度方向热物理性能的连续梯度过渡,缓和由于材料热物理性能参数失配所诱发的过大热应力,提升涂层与基材的结合

强度,缓解材料热应力集中,成为克服传统单陶瓷涂层不足的有效途径<sup>[15-16]</sup>。涂层内部的残余热应力分布难以通过试验方法获得<sup>[17-18]</sup>,而有限元法为涂层残余热应力及涂层失效机理的分析研究提供了重要的模拟仿真手段和方法<sup>[19-24]</sup>。王亮<sup>[25]</sup>采用 ANSYS 软件对 YSZ 热障涂层的表层及界面残余应力进行了有限元计算,发现表层残余应力的数值随着陶瓷层厚度的增加而增加,涂层的边缘及界面处应力较大,有明显的应力集中现象。张昊明等<sup>[26]</sup>采用 ANSYS 软件,通过耦合计算系统分析了基体材质、厚度对  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ /YSZ 功能梯度热障涂层残余热应力的影响。肖来荣等<sup>[27]</sup>基于  $\text{MoSi}_2$  涂层退火前后的微观形貌,建立有限元分析模型,计算涂层的残余热应力,研究了残余热应力对涂层结合强度的影响。目前,针对等离子喷涂制备的  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层在高温退火过程中内部残余热应力分布的数值模拟研究暂无文献报道。

综上所述,本文采用有限元模拟软件 Abaqus 对  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层在退火过程中残余热应力的分布进行数值模拟,并结合扫描电镜观察涂层表面及断面形貌,研究退火过程中 GH3536 基体上等离子喷涂制备的  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层的热稳定性及内部残余热应力分布,探究引起涂层裂纹损伤失效的影响因素。

## 1 数值仿真模型与模拟过程

### 1.1 有限元计算模型

LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub>/YSZ 双热障涂层物理模型如图 1 所示,从下至上依次为镍基合金 GH3536 基体、NiCoCrAlY 黏结层、YSZ 层和 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 表面层,其厚度分别为 2.55、0.10、0.15、0.20 mm。为了减小计算量,将三维问题简化为二维问题,并根据涂层模型的对称性,在实际模拟计算时取其一半为研究对象。双热障涂层的二维有限元计算模型如图 2 所示。图中横坐标  $X$  表示从模型中心至边缘的距离,纵坐标  $Y$  表示从基体底部至表面层的距离,规定  $X$  方向为径向, $Y$  方向为轴向。采用 Abaqus 的四结点轴对称温度位移耦合四边形单元 (CAX4T) 进行网格划分并模拟计算。

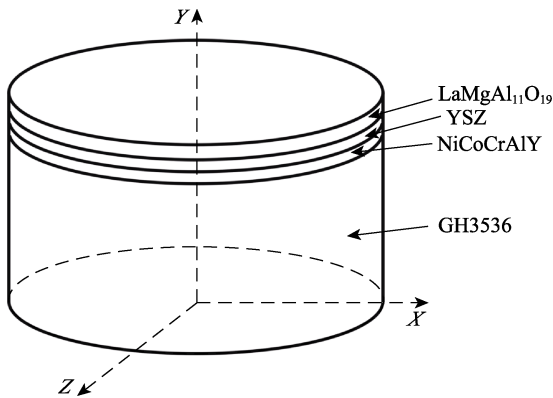


图 1 双热障涂层物理模型  
Fig.1 Physical model of double thermal barrier coating

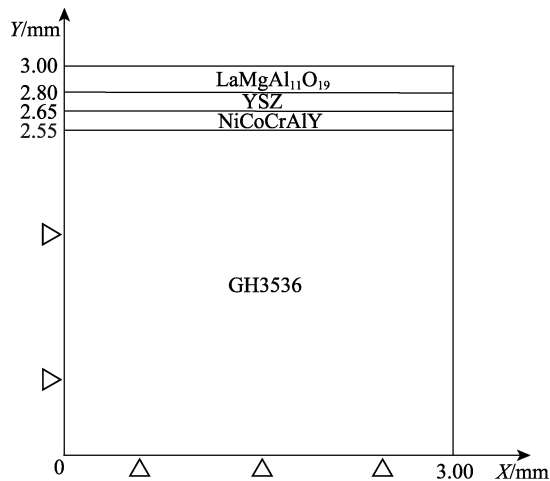


图 2 二维有限元计算模型示意图  
Fig.2 Schematic diagram of two dimensional finite element calculation model

### 1.2 材料参数与基本假设

计算中使用的各层材料性能参数包括密度  $\rho$ 、泊松比  $\nu$ 、弹性模量  $E$ 、热膨胀系数  $\alpha$ 、热导率  $\lambda$ 、比热

容  $C$ 。考虑材料的热物理性能参数随温度的变化,依据经验通过差值及外推法来确定未知温度下的参数值,如表 1、表 2 所示<sup>[28-35]</sup>。为了便于模拟计算,对 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub>/YSZ 双热障涂层有限元计算模型做如下假设:(1)在初始温度下整个涂层体系的残余应力为 0;(2)忽略涂层的微观组织缺陷,整个涂层为各向同性;(3)试样处于弹性变形范围内,且各层之间结合紧密、无相对滑动。

表 1 涂层的材料参数<sup>[28-35]</sup>  
Tab.1 Material parameters of coatings<sup>[28-35]</sup>

Coatings	GH3536	NiCoCrAlY	YSZ	LaMgAl <sub>11</sub> O <sub>19</sub>
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8 260	7 320	5 280	3 321
$\nu$	0.30	0.30	0.10	0.23

表 2 涂层的热物理性能参数<sup>[28-35]</sup>  
Tab.2 Thermophysical parameters of coatings<sup>[28-35]</sup>

Coatings	$\theta/^\circ\text{C}$	$E/\text{GPa}$	$\alpha/(10^{-6}\text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
GH3536	25 205	12.1	13.38	372.6	
	100 203	12.2	13.68	372.8	
	300 193	13.4	20.27	456.4	
	500 180	14.3	24.62	452.2	
	700 166	15.5	29.05	515.0	
	900 149	16.1	33.44	561.0	
	1 000 136	15.4	33.37	581.9	
	1 100 124	14.8	33.30	607.0	
NiCoCrAlY	1 200 112	14.1	33.21	627.9	
	25 225	14	4.3	501	
	400 186	24	6.4	592	
	800 147	47	10.2	781	
YSZ	1 200 90	71	16.1	764	
	20 48	10.4	1.80	450	
	200 47	10.5	1.76	491	
	500 43	10.7	1.75	532	
	700 39	10.8	1.72	573	
	1 100 25	10.9	1.69	615	
LaMgAl <sub>11</sub> O <sub>19</sub>	1 200 22	11.0	1.67	656	
	20 28.83	8.3	1.53	578.4	
	200 25.47	9.5	1.18	805.4	
	400 22.11	10.5	0.82	913.2	
	600 18.75	11.0	0.65	1 007.9	
	800 15.37	11.5	0.52	1 055.3	
	1 000 12.01	12.0	0.41	1 089.6	
	1 200 8.65	13.0	0.32	1 094.5	

### 1.3 边界条件与初始条件

1) 力边界条件:分别约束模型左侧在  $X$  方向上的自由度  $U_1=0$  和底部在  $Y$  方向上的自由度  $U_2=0$ 。

2) 热边界条件: 模型的上端面及右侧面与空气发生对流换热, 对流系数为  $65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 左侧面及下端面进行绝热处理。

3) 初始条件: 整个模型的初始温度与环境温度一致, 为  $25^\circ\text{C}$ , 处于无应力状态。

## 1.4 模拟退火过程

在 Abaqus 数值模拟中, 将整个退火过程划分为升温、退火中、降温、退火后 4 个温度位移耦合分析步, 分别命名为 I、II、III、IV, 运用完全牛顿法求解, 系统分析  $900$ 、 $1000$ 、 $1100$ 、 $1200^\circ\text{C}$  不同退火温度下  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层内部残余热应力的分布情况。通过控制环境温度对涂层模型施加动态温度载荷, 在时间  $t=0$  时, 整个模型处于室温 ( $25^\circ\text{C}$ ), 环境升温速度为  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , 退火时间为  $2 \text{ h}$ , 结束后冷却至室温。 $900^\circ\text{C}$  退火过程中环境温度随时间的变化关系如图 3 所示。

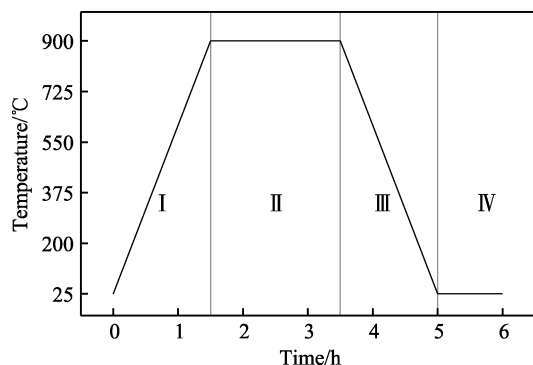


图 3  $900^\circ\text{C}$  退火过程中环境温度随时间的变化关系

Fig.3 Relationship between ambient temperature and time in  $900^\circ\text{C}$  annealing process

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 退火中涂层残余热应力分布

图 4 是  $900^\circ\text{C}$  退火中  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层内部各应力分量沿径向分布的仿真曲线, 正值为拉应力, 负值为压应力。可知, 涂层内部残余热应力以径向应力为主, 其值远大于轴向应力及剪切应力。图 5 是  $900^\circ\text{C}$  退火中  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层内部径向残余热应力分布云图。在径向距离  $0 \sim 2.4 \text{ mm}$  内, 径向残余热应力缓慢增长到最大值; 而在  $x=2.4 \text{ mm}$  至径向边缘范围内急剧降低, 从  $x=2.4 \text{ mm}$  处的  $0.317 \text{ GPa}$  急剧降低至径向边缘处的  $-0.017 \text{ GPa}$ , 将应力差值定义为径向残余热应力的梯度。仿真结果显示,  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层内部存在较大的径向残余热应力, 径向应力在  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层径向边缘位置出现拉应力突变为压应力, 涂层径向残余热应力梯度为  $0.334 \text{ GPa}$ 。

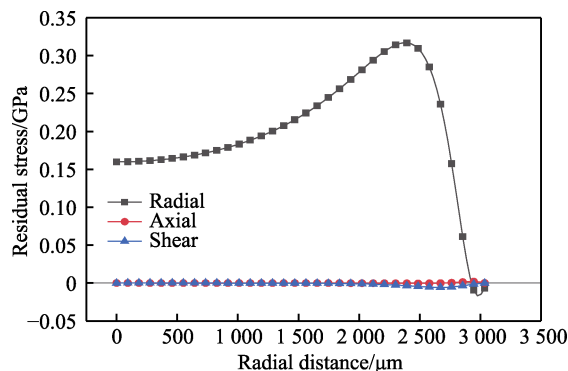


图 4  $900^\circ\text{C}$  退火中  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  涂层的残余热应力分布

Fig.4 Residual thermal stress distribution of  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  coating during annealing at  $900^\circ\text{C}$

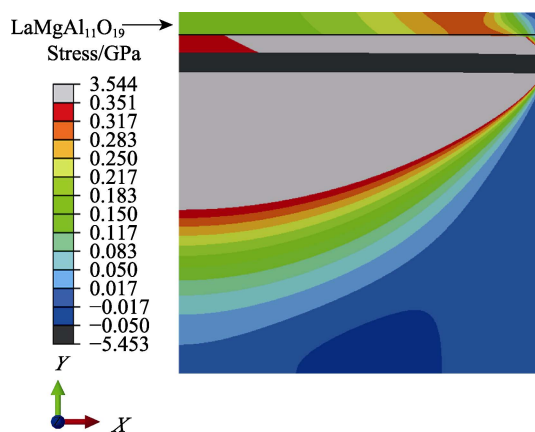


图 5  $900^\circ\text{C}$  退火中  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  涂层的内部径向残余热应力分布云图

Fig.5 Radial residual thermal stress distribution nephogram of  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  coating during annealing at  $900^\circ\text{C}$

### 2.2 退火后涂层残余热应力分布

图 6 是  $900^\circ\text{C}$  退火后  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层内部各应力分量沿径向分布的仿真曲线。可知, 涂层内部残余热应力仍以径向应力为主。图 7 是  $900^\circ\text{C}$  退火后  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层内部径向残余热应力分布云图。在径向边缘位置出现拉压应力交替, 由径向距离  $x=2 \text{ mm}$  处的压应力过渡到径向距离  $x=2.6 \text{ mm}$  处的最大拉应力, 并迅速减小为压应力, 即从  $x=2 \text{ mm}$  处的  $-0.010 \text{ MPa}$  过渡到  $x=2.6 \text{ mm}$  处的  $0.094 \text{ MPa}$ , 然后急剧降低至边缘处的  $-0.006 \text{ MPa}$ 。仿真结果显示, 退火后  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层在径向距离  $x=2.6 \text{ mm}$  处存在径向残余热应力集中, 在径向边缘位置出现拉应力突变为压应力, 涂层的径向残余热应力梯度为  $0.104 \text{ MPa}$ 。

### 2.3 涂层径向残余热应力梯度

为进一步探究  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层内部径向残余热应力梯度与退火温度的关系, 以退火温度为变量进行 3 组对照仿真, 温度分别为  $1000$ 、 $1100$ 、

1 200 ℃。退火中与退火后涂层径向残余热应力分布分别如图 8、图 9 所示。径向残余热应力梯度与温度的关系分别如图 10、图 11 所示。900、1 000、1 100、

1 200 ℃退火中径向残余热应力梯度分别为 0.334、0.369、0.389、0.391 GPa。退火后径向残余热应力梯度分别为 0.104、0.148、0.203、0.260 MPa。结果显示, LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 热障涂层内部径向残余热应力梯度与退火温度成正相关, 应力梯度随退火温度的升高而增大。

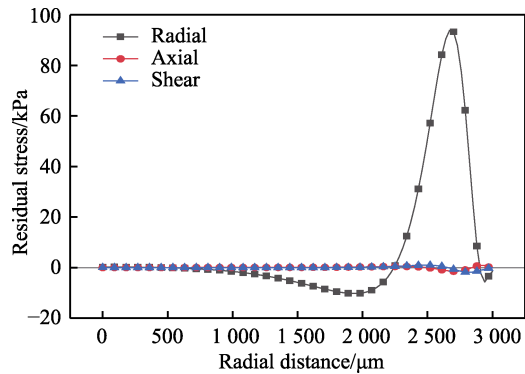


图 6 900 ℃退火后 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 涂层的残余热应力分布  
Fig.6 Residual thermal stress distribution of LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> coating after annealing at 900 ℃

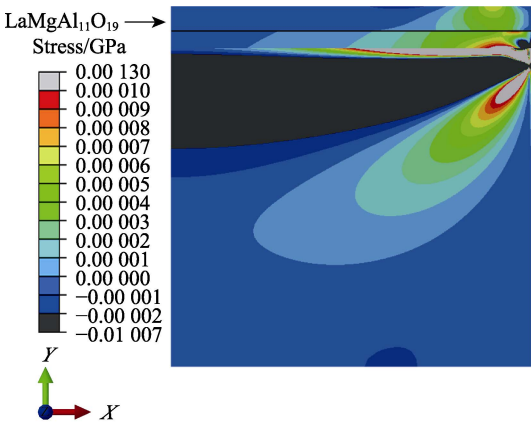


图 7 900 ℃退火后 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 涂层内部的径向残余热应力分布云图  
Fig.7 Radial residual thermal stress distribution nephogram of LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> coating after annealing at 900 ℃

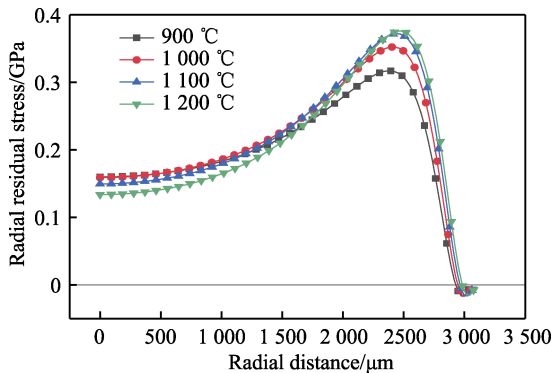


图 8 退火中 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 涂层的径向残余热应力分布  
Fig.8 Radial residual thermal stress distribution of LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> coating during annealing

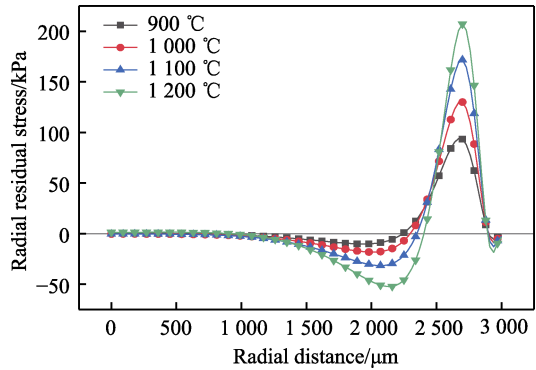


图 9 退火后 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 涂层的径向残余热应力分布  
Fig.9 Radial residual thermal stress distribution of LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> coating after annealing

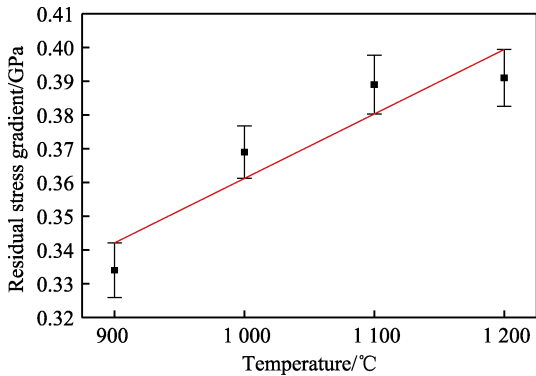


图 10 退火中径向残余热应力梯度随温度的变化关系  
Fig.10 Variation of radial residual thermal stress gradient with temperature during annealing

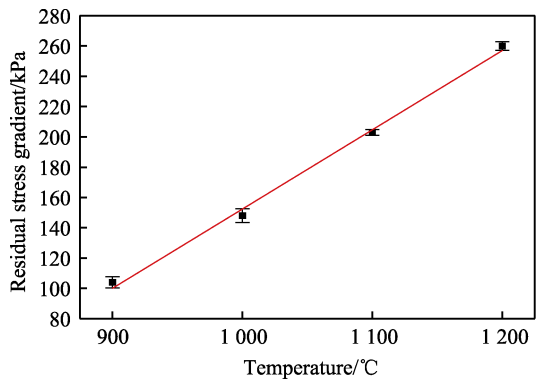


图 11 退火后径向残余热应力梯度随温度的变化关系  
Fig.11 Variation of radial residual thermal stress gradient with temperature after annealing



### 3 试验分析

采用 Quanta 200 FEG 场发射扫描电子显微镜对涂层表面及断面进行观察, 获得涂层厚度及形貌信息。图 12、图 13 分别是 900 °C 退火前后涂层表面 SEM 形貌。图 14 是 900 °C 退火后涂层断面 SEM 形貌。观察发现, 退火前涂层表面有少量初始裂纹, 裂缝长度较短、宽度较小; 退火后涂层表面出现大量裂纹, 裂缝长度较长、宽度较大。结合涂层表面及断面 SEM 形貌, 观察得出退火过程中  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层裂纹损伤以轴向裂纹为主, 裂纹在涂层表面扩展, 裂缝长度变长、宽度变大。试验所得到的涂层裂纹扩展、损伤失效规律可以由模拟结果进行验证说明: 在

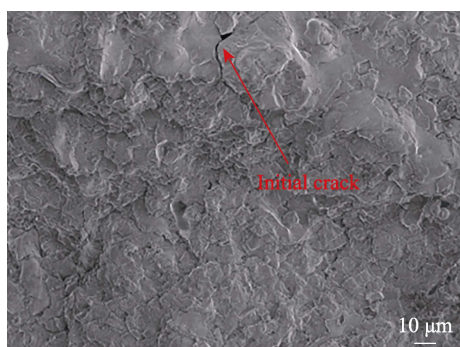


图 12 900 °C 退火前涂层表面 SEM 形貌  
Fig.12 SEM image of coating surface before annealing at 900 °C

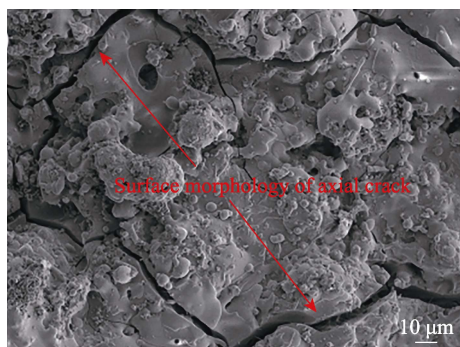


图 13 900 °C 退火后涂层表面 SEM 形貌  
Fig.13 SEM image of the coating surface after annealing at 900 °C

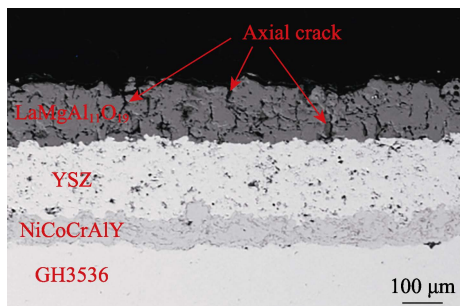


图 14 900 °C 退火后涂层断面 SEM 形貌  
Fig.14 SEM image of coating section after annealing at 900 °C

动态温度载荷下,  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层内部应力以径向残余热应力为主, 且在边缘位置出现拉压应力突变, 存在较大的径向残余热应力梯度, 进而诱发轴向裂纹生成并在涂层表面扩展。

### 4 结论

1) 900 °C 退火中  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层径向残余热应力值在 0~2.4 mm 内缓慢增长到最大值, 在距中心 2.4 mm 处出现应力值急剧减小, 由 0.317 GPa 降至 -0.017 GPa。退火后  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层径向残余热应力在径向距边缘 0.4 mm 处形成应力集中, 达到最大值 0.094 MPa, 并迅速减小为 -0.006 MPa。 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层的径向残余热应力在径向边缘处出现拉应力突变为压应力, 存在较大的径向残余热应力梯度。

2) 900、1 000、1 100、1 200 °C 退火中对应的径向残余热应力梯度分别为 0.334、0.369、0.389、0.391 GPa, 退火后径向残余热应力梯度分别为 0.104、0.148、0.203、0.260 MPa。 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层内部径向残余热应力梯度随退火温度的升高而增大。

3) 数值模拟结果显示, 退火过程中  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层内部残余热应力以径向应力为主, 其值远大于轴向应力及剪切应力。涂层表面及断面扫描电镜 SEM 图像显示, 退火后  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层裂纹以轴向裂纹为主, 并在涂层表面发生扩展。可知, 径向残余热应力是引起  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  热障涂层轴向裂纹生成并在涂层表面扩展的主要因素。

### 参考文献:

- [1] BEELE W, MARIJNISSEN G, VAN LIESHOUT A. The Evolution of Thermal Barrier Coatings—Status and Upcoming Solutions for Today's Key Issues[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 120-121: 61-67.
- [2] 黎明, 索建秦, 吴二平. 国外先进航空发动机技术带给我们的启示[J]. 航空制造技术, 2013, 56(9): 66-71.  
LI Ming, SUO Jian-qin, WU Er-ping. Edification of Advanced Foreign Aeroengine Technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(9): 66-71.
- [3] 李宏然, 武洪臣, 高巍, 等. 电子束物理气相沉积制备 Ni 基高温合金微观组织及力学性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(S1): 84-87.  
LI Hong-ran, WU Hong-chen, GAO Wei, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ni-Based Superalloy Prepared by Electron Beam Physical Vapor Deposition[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(S1): 84-87.
- [4] 王心悦, 辛丽, 韦华, 等. 高温防护涂层研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(3): 175-183.  
WANG Xin-yue, XIN Li, WEI Hua, et al. Progress of

- High-Temperature Protective Coatings[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(3): 175-183.
- [5] 崔慧然, 李宏然, 崔启政, 等. 航空发动机及燃气轮机叶片涂层概述[J]. 热喷涂技术, 2019, 11(1): 82-94.  
CUI Hui-ran, LI Hong-ran, CUI Qi-zheng, et al. Summary of Blade Coatings for Aero-Engine and Gas Turbine[J]. Thermal Spray Technology, 2019, 11(1): 82-94.
- [6] POLAT A, SARIKAYA O, CELIK E. Effects of Porosity on Thermal Loadings of Functionally Graded Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>/NiCoCrAlY Coatings[J]. Materials & Design, 2002, 23(7): 641-644.
- [7] 刘梦飞, 姚志浩, 董建新. 数值模拟在整铸涡轮精密成形中的应用现状[J]. 精密成形工程, 2021, 13(1): 35-43.  
LIU Meng-fei, YAO Zhi-hao, DONG Jian-xin. Application Status of Numerical Simulation in Precision Forming of Block Casting Turbine[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(1): 35-43.
- [8] BUSO E P, EVANS H E, QIAN Z Q, et al. Effects of Breakaway Oxidation on Local Stresses in Thermal Barrier Coatings[J]. Acta Materialia, 2010, 58(4): 1242-1251.
- [9] 胡颂, 李梦启. 烧结温度对冷凝器热障涂层用 LaMg-Al<sub>11</sub>O<sub>19</sub> 前驱粉末结构的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(5): 79-82.  
HU Song, LI Meng-qi. Influence of Sintering Temperature on the Structure of LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> Precursor Powder for Condenser Thermal Barrier Coatings[J]. Materials Protection, 2020, 53(5): 79-82.
- [10] 王亮, 王铀, 田伟, 等. 等离子喷涂纳米结构与传统结构热障涂层的残余应力对比研究[J]. 材料保护, 2009, 42(3): 58-62, 94.  
WANG Liang, WANG You, TIAN Wei, et al. Comparative Study of the Residual Stress in Plasma Sprayed Nanostructure and Conventional Structure Coatings[J]. Materials Protection, 2009, 42(3): 58-62, 94.
- [11] 庞铭, 张啸寒. 结构参数对等离子喷涂 Mo/8YSZ 功能梯度热障涂层残余应力的影响[J]. 航空材料学报, 2020, 40(6): 23-32.  
PANG Ming, ZHANG Xiao-han. Effect of Structural Parameters on the Residual Stress of Mo/8YSZ Functionally Graded Thermal Barrier Coating Prepared by Plasma Spraying[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(6): 23-32.
- [12] RANJBAR-FAR M, ABSI J, MARIAUX G, et al. Crack Propagation Modeling on the Interfaces of Thermal Barrier Coating System with Different Thickness of the Oxide Layer and Different Interface Morphologies[J]. Materials & Design, 2011, 32(10): 4961-4969.
- [13] 李振军, 吴惠云. 基于不同基体材质的 Sm<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/YSZ 热障复合涂层残余热应力的数值仿真[J]. 热加工工艺, 2012, 41(18): 116-120.  
LI Zhen-jun, WU Hui-yun. Numerical Simulation of Residual Thermal Stresses at Interface of Sm<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/YSZ Thermal Barrier Composite Coating Based on Different Matrix Material[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(18): 116-120.
- [14] 李振军, 刘燕明, 张红松, 等. 等离子喷涂 Sm<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 热障涂层的热冲击性能数值模拟[J]. 热加工工艺, 2010, 39(8): 126-129, 133.  
LI Zhen-jun, LIU Yan-ming, ZHANG Hong-song, et al. Numeric Simulation of Thermal Shocking Properties for Sm<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Thermal Barrier Coatings Prepared by Plasma Sprayed[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(8): 126-129, 133.
- [15] 王铀, 王亮, 刘赛月, 等. 热喷涂纳米结构 La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(LZ)/8YSZ 双陶瓷热障涂层[J]. 中国表面工程, 2016, 29(1): 16-24.  
WANG You, WANG Liang, LIU Sai-yue, et al. Nanostructured La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(LZ)/8YSZ Double Ceramic Layer Thermal Barrier Coatings Fabricated by Thermal Spraying[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1): 16-24.
- [16] VABEN R, JARLIGO M O, STEINKE T, et al. Overview on Advanced Thermal Barrier Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(4): 938-942.
- [17] 刘彻. 热障涂层残余应力测定和预处理工艺对热生长氧化物的影响[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
LIU Che. Measurement on Residual Stress of Thermal Barrier Coatings and Effect of Pre-Treatment on Thermal Grown Oxides[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [18] 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.
- [19] SARIKAYA O, CELIK E. Effects of Residual Stress on Thickness and Interlayer of Thermal Barrier Ceramic MgO-ZrO<sub>2</sub> Coatings on Ni and AlSi Substrates Using Finite Element Method[J]. Materials & Design, 2002, 23(7): 645-650.
- [20] 谢玲玲, 牛亚然, 王亮, 等. 等离子喷涂 ZrC 基涂层逐道逐层沉积残余应力模拟与实验验证[J]. 无机材料学报, 2019, 34(7): 768-774.  
XIE Ling-ling, NIU Ya-ran, WANG Liang, et al. Residual Stresses of Plasma Sprayed ZrC-Based Coatings during Path-by-Path and Layer-by-Layer Deposition: Simulation and Experimental Verification[J]. Journal of Inorganic Materials, 2019, 34(7): 768-774.
- [21] WANG L, MING C, ZHONG X H, et al. Prediction of Critical Rupture of Plasma-Sprayed Yttria Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings under Burner Rig Test via Finite Element Simulation and In-Situ Acoustic Emission Technique[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 367: 58-74.
- [22] 王亮, 庄铭翔, 胡忠超, 等. 热喷涂 3D 打印制备孤立纳米 YSZ 厚热障涂层的内应力演化特性的模拟计算研究[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 35-51.  
WANG Liang, ZHUANG Ming-xiang, HU Zhong-chao, et al. Study of Evolution Characteristics of Inner Stress of Thermal Spray 3D Printing Standing Nanostructured YSZ Thick Thermal Barrier Coatings via Modeling and Simu-

- lation[J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2019, 41(6): 35-51.
- [23] 胡忠超, 王亮, 庄铭翔, 等. 热障涂层裂纹扩展的数值模拟研究进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(10): 740-753, 738.
- HU Zhong-chao, WANG Liang, ZHUANG Ming-xiang, et al. Research Progress of Crack Growth of Thermal Barrier Coatings via Numerical Simulation[J]. Materials China, 2020, 39(10): 740-753, 738.
- [24] ASGHARI S, SALIMI M. Finite Element Simulation of Thermal Barrier Coating Performance under Thermal Cycling[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(7): 2042-2050.
- [25] 王亮. 等离子喷涂纳米结构热障涂层组织结构与残余应力分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- WANG Liang. Analysis of Microstructure and Residual Stress of Plasma Sprayed Nano-Structured Thermalbarrier Coatings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [26] 张昊明, 李振军, 桑玮玮, 等.  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$  功能梯度热障涂层的残余热应力[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 1-6.
- ZHANG Hao-ming, LI Zhen-jun, SANG Wei-wei, et al. Residual Thermal Stress of  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$  Functional Graded Thermal Barrier Coatings[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 1-6.
- [27] 肖来荣, 聂艳春, 赵小军, 等.  $\text{MoSi}_2$  涂层残余应力和结合强度的有限元分析[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 203-209.
- XIAO Lai-rong, NIE Yan-chun, ZHAO Xiao-jun, et al. Finite Element Analysis of Residual Stress and Bonding Strength of  $\text{MoSi}_2$  Coating[J]. Surface Technology, 2020, 49(8): 203-209.
- [28] 董翠屏. 无人机主燃烧室火焰筒焊接变形控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- DONG Cui-ping. Welding Deformation Control of Main Combustor Flame Tube of UAV[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [29] KHOR K A, GU Y W. Effects of Residual Stress on the Performance of Plasma Sprayed Functionally Graded  $\text{ZrO}_2/\text{NiCoCrAlY}$  Coatings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 277(1-2): 64-76.
- [30] WANG L, MING C, ZHONG X H, et al. Microstructure and Self-Healing Properties of Multi-Layered  $\text{NiCoCrAlY}/\text{TAZ}/\text{YSZ}$  Thermal Barrier Coatings Fabricated by Atmospheric Plasma Spraying[J]. Applied Surface Science, 2019, 488: 246-260.
- [31] 刘光, 张啸寒, 贾利, 等. 等离子喷涂  $\text{Mo}/8\text{YSZ}$  功能梯度热障涂层结构优化与热力耦合模拟计算[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 213-223.
- LIU Guang, ZHANG Xiao-han, JIA Li, et al. Structural Optimization and Thermo-Mechanical Coupling Simulation of Plasma Sprayed  $\text{Mo}/8\text{YSZ}$  Functionally Graded Thermal Barrier Coating[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 213-223.
- [32] 谢义英, 李强. 等离子喷涂  $8\text{YSZ}$  涂层在铝熔体作用下热冲击行为的数值模拟[J]. 表面技术, 2018, 47(4): 102-108.
- XIE Yi-ying, LI Qiang. Numerical Simulation of Thermal Shock Behavior of Plasma Sprayed  $8\text{YSZ}$  Thermal Barrier Coatings Subjected to Molten Aluminum[J]. Surface Technology, 2018, 47(4): 102-108.
- [33] 李培忠. 镁基铝酸钪热障涂层材料的制备及热物理性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2009.
- LI Pei-zhong. A Study on Preparation and Thermophysical Properties of  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  for Thermal Barrier Coating[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2009.
- [34] KHORRAMIRAD M M, RAHIMIPOUR M R, HADAVI S M M, et al. Preoxidation of Bond Coat in  $\text{IN-738LC}/\text{NiCrAlY}/\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  Thermal Barrier Coating System[J]. Ceramics International, 2018, 44(18): 22080-22091.
- [35] CAO X Q, ZHANG Y F, ZHANG J F, et al. Failure of the Plasma-Sprayed Coating of Lanthanum Hexaluminate[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(10): 1979-1986.

责任编辑: 万长清