

# 不锈钢表面渗铝层/ $\text{ZrO}_2$ 复合涂层残余应力模拟

董健<sup>1</sup>, 窦炳胜<sup>1</sup>, 贺飞羽<sup>1</sup>, 孙彦辉<sup>1</sup>, 黄洪涛<sup>2</sup>, 郑剑平<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** **目的** 研究不同制备工艺参数对渗铝层/ $\text{ZrO}_2$  复合涂层残余应力的影响。**方法** 采用 ANSYS 18.1 软件中的 Workbench 模块, 采用热力耦合的方法, 对沉积过程中不同制备工艺参数下产生的残余应力进行数值模拟。**结果** 保温时间由 2 h 增长至 5 h, 等效应力由 895 MPa 减小至 862 MPa。沉积温度由 400 °C 升高至 700 °C, 等效应力由 541 MPa 增加至 999 MPa。 $\text{ZrO}_2$  层厚度从 2  $\mu\text{m}$  增加至 14  $\mu\text{m}$ , 等效应力由 925 MPa 减小至 835 MPa, 但是渗铝层-氧化锆层界面的剪切应力由 59 MPa 增加至 101 MPa。基体厚度的变化对基体及渗铝层内的热应力影响不大, 但对  $\text{ZrO}_2$  层有较大的影响, 基体厚度由 0.3 mm 增加至 0.8 mm, 等效应力由 745 MPa 增加至 850 MPa。渗铝层使等效应力由 877 MPa 减小至 745 MPa, 径向应力由 -1235 MPa 减小至 -1072 MPa, 剪切应力由 105 MPa 降低到 89 MPa, 轴向应力由 -375 MPa 减小至 -312 MPa, 其中  $\text{ZrO}_2$  层中的轴向应力改变明显, 由 -128 MPa 减小至 -39 MPa。**结论** 增加渗铝保温时间, 整个复合涂层的应力降低。沉积温度与室温相差越大, 热匹配失衡越严重。 $\text{ZrO}_2$  层厚度增加, 基体和渗铝层的应力均有升高,  $\text{ZrO}_2$  层内部除剪切应力稍增加外, 其余应力均减小。基体厚度增加,  $\text{ZrO}_2$  层等效应力和径向应力均明显增大, 因此应降低基体的厚度。渗铝层起到很好的缓冲作用。

**关键词:** 复合涂层; 残余热应力; 有限元分析; 氧化锆; 阻氢涂层

**中图分类号:** TG156.8+6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)06-0221-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.06.026

## Residual Stress Simulation of Aluminized Layer/ $\text{ZrO}_2$ Composite Coating on Stainless Steel

DONG Jian<sup>1</sup>, DOU Bing-sheng<sup>1</sup>, HE Fei-yu<sup>1</sup>, SUN Yan-hui<sup>1</sup>, HUANG Hong-tao<sup>2</sup>, ZHENG Jian-ping<sup>2</sup>

(1. Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the influence of different preparation parameters on the residual stress of aluminized layer/ $\text{ZrO}_2$  composite coating. Workbench module in ANSYS 18.1 software was used to generate residual stress under different preparation parameters in the deposition process with thermal mechanical coupling. As the holding time increased from 2 h to 5 h, the equivalent stress decreased from 895 MPa to 862 MPa; As the deposition temperature increased from 400 °C to 700 °C, the equivalent stress is increased from 541 MPa to 999 MPa; As the thickness of  $\text{ZrO}_2$  layer increased from 2  $\mu\text{m}$  to 14  $\mu\text{m}$ , the equivalent stress decreased from 925 MPa to 835 MPa, but the shear stress at the interface of aluminized layer and zirconia layer increased from 59 MPa to 101 MPa. The change of the thickness of the substrate had little effect on the thermal stress in the sub-

收稿日期: 2018-10-12; 修订日期: 2018-12-24

Received: 2018-10-12; Revised: 2018-12-24

作者简介: 董健 (1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为涂层制备及模拟。

**Biography:** DONG Jian (1989—), Male, Doctor, Research focus: preparation and simulation of coatings.

通讯作者: 孙彦辉 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为质量控制。邮箱: 13683648158@163.com

**Corresponding author:** SUN Yan-hui (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: quality control. E-mail: 13683648158@163.com

substrate and the aluminized layer, but had a great influence on the  $\text{ZrO}_2$  layer. As the thickness of the substrate increased from 0.3 mm to 0.8 mm, the equivalent stress increased from 745 MPa to 850 MPa. The aluminized layer reduced the equivalent stress from 877 MPa to 745 MPa, the radial stress decreased from -1235 MPa to -1022 MPa, the shear stress decreased from 105 MPa to 89 MPa, and the axial stress decreased from -375 MPa to -312 MPa. The axial stress in the  $\text{ZrO}_2$  layer changed significantly from -128 MPa to -39 MPa. Increasing the aluminizing holding time can reduce the stress of the whole composite coating; The greater the difference between the deposition temperature and the room temperature is, the more serious the thermal matching imbalance is; As the thickness of the  $\text{ZrO}_2$  layer increases, the stresses of the matrix and the aluminized layer increase, and the stress in the  $\text{ZrO}_2$  layer decreases slightly except for the shear stress. As the thickness of the substrate increases, the equivalent stress and radial stress of the  $\text{ZrO}_2$  layer increase significantly, and the thickness of the substrate decrease. The aluminized layer plays a good buffering role.

**KEY WORDS:** composite coating; residual thermal stress; finite element analysis; zirconia; hydrogen barrier coating

氢及其同位素在核电、石油、化工、能源等工业方面有着非常重要的地位<sup>[1]</sup>。但氢进入到金属中后,金属材料会产生氢伤,进而导致材料性能恶化。另外,氦、氚具有放射性。为了避免氢损伤等问题的出现,通常在

金属材料表面制备阻氢涂层,研究阻氢涂层的制备和应用具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。316L 不锈钢以其较易热加工、热塑性好、氢渗透率较低等优势成为重要的候选材料。表 1 为国内外 316L 不锈钢表面阻氢涂层的研究结果。

表 1 国内外 316L 不锈钢表面阻氢涂层的研究结果

Tab.1 Research results of hydrogen barrier coating on 316L stainless steel surface at home and abroad

Coating structure	Coating type	Coating main phase	Base material	Hydrogen barrier factor (PRF)
Multi-layer composite	Oxide compound	$\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	SS316	60
	Oxide phosphate complex	$\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2/\text{CrPO}_4$	SS316, F82H	3 orders of magnitude
	Oxide phosphate complex	$\text{ZrO}_2(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2/\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2)$	SS430	3 orders of magnitude
	Oxide phosphate complex	$\text{ZrO}_2(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2/\text{AlPO}_4)$	SS430	3 orders of magnitude
	Titanium compound	TiN-TiC-TiN	SS316	4~5 orders of magnitude
		TiN-TiC-SiO <sub>2</sub>	SS316	4~6 orders of magnitude

氧化锆具有热导率低、断裂韧性高、比强度高、耐高温性能好、良好的塑性以及与氦和水等冷却介质相容性好等优点。因此本课题选用 316L 不锈钢为基体,表面制备氧化锆层作为阻氢涂层。但氧化锆的热膨胀系数与 316L 基体存在较大失配,热冲击后,涂层与基体之间产生较大的热应力,引起涂层与基体分离,因此制备过渡层以提高氧化锆和基体的粘结能力,提高复合涂层的抗热冲击性能<sup>[4]</sup>。本文采用渗铝层作为过渡层,同时渗铝层本身就有很好的阻氢效果,有利于提高复合涂层的阻氢能力。

陶杰等<sup>[5]</sup>应用 MAC 软件模拟了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  单层阻氢涂层的应力,分析了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的孔隙率、厚度和弹性模量等因素对应力的影响。谢玲玲等<sup>[6]</sup>研究了 C/C 材料表面  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$  功能梯度涂层中的残余应力,另外还对梯度涂层厚度和分布指数对 FGM 涂层残余应力的影响进行分析。本文有关制备参数及模拟方案参考相关文献<sup>[7-8]</sup>。降低复合阻氢涂层的残余应力能有效提高涂层的性能,但现有的研究方法难以测出涂层在冷却过程中残余应力的变化,难以实现对复合涂层残余应力的研究,而采用数值模拟方法能实现对复合阻氢涂层残余应力的研究。因此本文通过有限元分析软

件 ANSYS 18,模拟涂层沉积过程中的保温时间、沉积温度、涂层厚度和基体厚度对涂层中残余热应力的影响,以获得最优的工艺参数指导实验。

## 1 复合涂层的建模分析

### 1.1 建立复合涂层模型

在本文中,根据阻氢涂层性能实验过程中常用的圆片试样,建立如图 1 所示的圆柱形模型。根据本文所研究渗铝层/氧化锆复合阻氢涂层系统的实际构成,本模型主要由三部分构成,从上至下依次为  $\text{ZrO}_2$  层、渗铝层和 316L 不锈钢基体,其中渗铝层由  $\text{FeAl}_3$  层、 $\text{Fe}_2\text{Al}_3$  层、 $\text{FeAl}$  层和  $\text{Fe}_3\text{Al}$  层组成<sup>[9]</sup>。在计算涂层的残余热应力时,保持不锈钢基体直径为 25 mm,计算渗铝保温时间、 $\text{ZrO}_2$  沉积温度、 $\text{ZrO}_2$  层厚度和不锈钢基体厚度对残余热应力的影响。保温时间直接影响渗铝层中各层厚度及成分的分布,进而影响到应力的变化。

本文的计算采用大型商用有限元软件 ANSYS18.1 进行模拟,首先采用 Transient thermal 传热模块计算温度的变化,然后将温度结果传递给 Transient structural

结构力学进行热力耦合，计算出涂层因温度变化导致的应力。由于圆柱形模型的对称性，为加快计算速度，在计算过程中将圆柱形模型沿半径及中心对称轴分

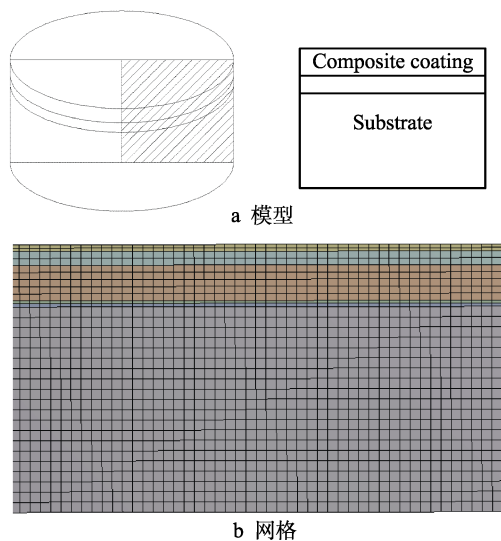


图 1 复合涂层模型及网格  
Fig.1 Model (a) and grid (b) of composite coating

割，选取 1/4 截面将其简化为二维问题进行研究。对几何模型进行网格划分，基体进行网格划分时选择高质量的较大网格，涂层部分将网格细化，可以提高计算速度，确保准确性<sup>[10]</sup>。层与层之间的接触选择 Workbench 中默认设置绑定接触 bonded。

1.2 边界条件及物性参数

根据复合涂层的实际冷却条件，在残余热应力计算过程中，复合涂层的上下两个端面及右侧面与周围空气发生对流换热，而左侧面则作绝热处理，并对问题进行如下简化<sup>[11,14]</sup>：

- 1) 将计算中所用的比热、弹性模量、热导率、热膨胀系数等参数视为与温度无关的常数（见表 2）。
- 2) 假设模型中各材料为完全弹性和各向同性，且不考虑微观缺陷的干扰。
- 3) 涂层中不锈钢与渗铝层之间界面、渗铝层与氧化锆之间界面结合牢固。
- 4) 复合阻氢涂层产生的热应力为试样从 600 ℃冷却到室温 25 ℃所引起的热应力，整个复合涂层试样在沉积温度 600 ℃时为无应力。

表 2 复合涂层与不锈钢基体的物性参数  
Tab.2 Physical properties of composite coating and stainless steel matrix

Substance	$\alpha/(\times 10^{-6} \text{ K}^{-1})$	$E/\text{GPa}$	$K/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\mu$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C_p/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
316L	19	148	15	0.328	7.98	0.502
Fe <sub>3</sub> Al	11.5	140	117.5	0.25	6.72	0.498
FeAl	20	259	158.5	0.21	5.56	0.59
Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	17.4	207	192	0.18	4.067	0.7
FeAl <sub>3</sub>	16.7	100	198	0.150	3.653	0.72
ZrO <sub>2</sub>	10.8	220	1.67	0.3	5.85	0.4

2 结果及分析

2.1 应力分布

图 2 显示瞬态分析后复合涂层应力分布云图。从图 2 中可以看出，复合阻氢涂层中各层材料由沉积温度冷却至室温时均收缩且阻碍临近层的变形，而涂层的热膨胀系数小于不锈钢基体的热膨胀系数，其收缩小于不锈钢，所以复合涂层受压应力，不锈钢基体受拉应力。复合涂层整体比基体所受的应力较大，界面处应力突变现象比较严重，在涂层的外边缘有较大的应力集中现象。涂层在苛刻的服役条件下，表面层承受过大的应力，容易产生层间裂纹或剥落，这是设计涂层时首先应当避免的。各个应力云图趋势大致相同，只是数值变化。

在涂层承受的几种热应力（径向、轴向、切向）中，由图 2 可以看出，径向应力沿对称轴方向变化明显，切向和轴向应力主要集中在径向边缘处，使得涂层在界面附近承受拉应力，径向边界处存在较大的拉

应力，易在弱结合处产生层间剥离。

2.2 渗铝保温时间对涂层热应力的影响

不同保温时间会影响渗铝层中各层厚度的变化，从而引起热应力的改变。以沉积温度 600 ℃、ZrO<sub>2</sub> 层厚度 10 μm、基体厚度 0.8 mm 为例，考察渗铝保温时间对复合涂层热应力大小及分布的影响，图 3 为热应力随渗铝保温时间  $t$ （ $t=2、3、4$  和 5 h）的等效应力、径向应力、剪切应力和轴向应力分布。

从图 3 中可以看出，保温时间的增长对整个复合涂层各个应力的分布趋势改变不大，主要变化体现在应力值的大小。保温 2 h 至 5 h 的最大等效应力分别为 895、869、874 和 862 MPa，随着渗铝保温时间的增加，等效应力逐渐减小。径向应力在基体-合金过渡层和合金过渡层-ZrO<sub>2</sub> 两个界面出现最大压应力，随着保温时间的增长，应力趋势不变，最大压应力减小。剪切应力没有明显变化。轴向应力表现为压应力，主要存在于基体和渗铝层中，并且随着保温时间的增长，压应力减小，ZrO<sub>2</sub> 层中的轴向应力比较小。

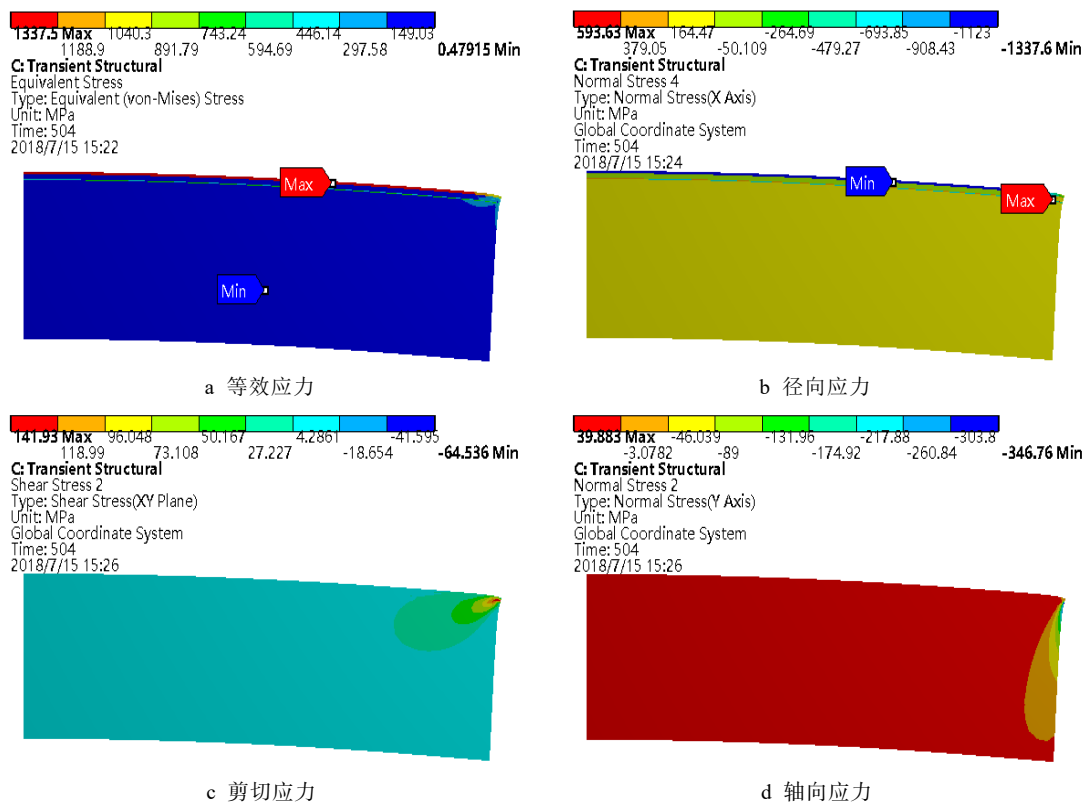


图2 应力分布云图

Fig.2 Stress distribution cloud map: a) equivalent stress; b) radial stress; c) shear stress; d) axial stress

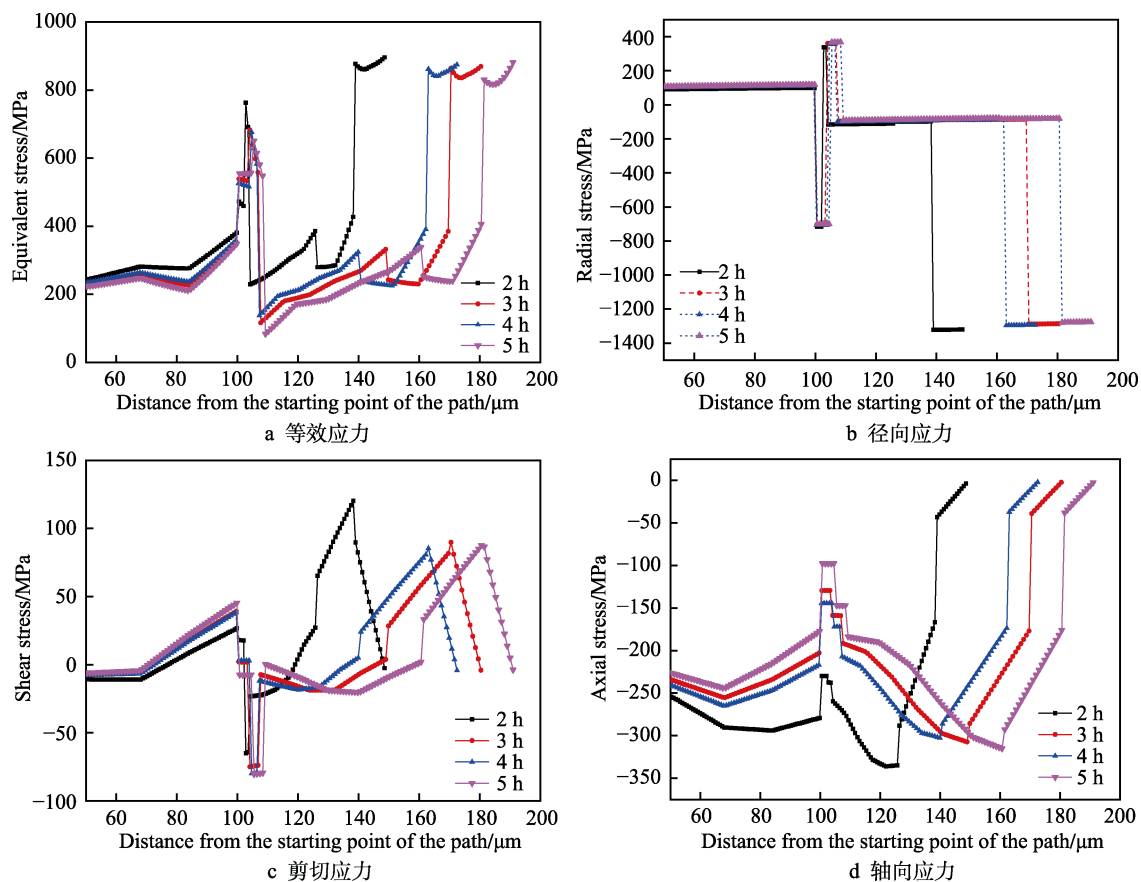


图3 渗铝保温时间对复合涂层热应力的影响

Fig.3 Effect of aluminizing insulation time on thermal stress of composite coatings:

a) equivalent stress; b) radial stress; c) shear stress; d) axial stress

随着保温时间的增长, 渗铝层中各组分有充分的时间去扩散, 使得合金过渡层中的组分分布越来越均匀, 各层之间的物性差异也逐渐减小, 从而减小渗铝层内部各层产生的热应力; 再者随着保温时间的增长, 渗铝层的厚度增加, 更好地起到中间过渡的作用, 从而使整个复合涂层的应力降低。所以保温 5 h, 效果最好。

### 2.3 沉积温度对涂层热应力的影响

热应力的产生主要是由于由沉积温度降低到室温过程中, 复合涂层各层之间的热膨胀系数差异引起的,  $\text{ZrO}_2$  层的沉积温度对膜基间热应力大小有非常重要的影响。以保温时间 5 h、 $\text{ZrO}_2$  层厚度  $10\ \mu\text{m}$ 、基体厚度  $0.8\ \text{mm}$  为例进行沉积温度的模拟, 沉积温度取  $\theta$  ( $\theta=400$ 、 $500$ 、 $600$ 、 $700\ ^\circ\text{C}$ ), 模拟结果如图 4 所示。

与保温时间相似, 沉积温度对应力趋势的改变不大, 但是使应力值的变化很显著。等效应力最大值出

现在渗铝层-氧化锆层界面, 因物性参数不一和温差造成应力在该界面有明显的集中。复合涂层整体表现为拉应力, 随着沉积温度  $400\ ^\circ\text{C}$  升高至  $700\ ^\circ\text{C}$ , 等效应力最大值分别为 541、703、850 和 999 MPa。基体中径向压力为拉应力, 复合涂层中以压应力为主, 压应力促使裂纹的萌生和传播。随着温度的升高, 径向应力的最大值分别为 -834、-1056、-1278、-1500 MPa; 剪切应力和轴向应力的最大值出现在渗铝层, 剪切应力最大值分别为 -50、-73、-80、-100 MPa; 轴向应力的最大值分别是 -205、-260、-243、-370 MPa。

以上看出沉积温度对复合涂层的应力值大小影响很大, 沉积温度与室温相差越大, 基体与涂层的收缩程度越大, 导致涂层间的热匹配失衡越严重, 因此在涂层的制备过程中, 在保证阻氢效果的情况下要降低沉积温度, 减小热应力。通过实验知, 复合涂层在  $600\ ^\circ\text{C}$  时能够形成连续良好的涂层, 低于  $600\ ^\circ\text{C}$  时效果不理想, 所以选取  $600\ ^\circ\text{C}$  为最佳温度<sup>[15]</sup>。

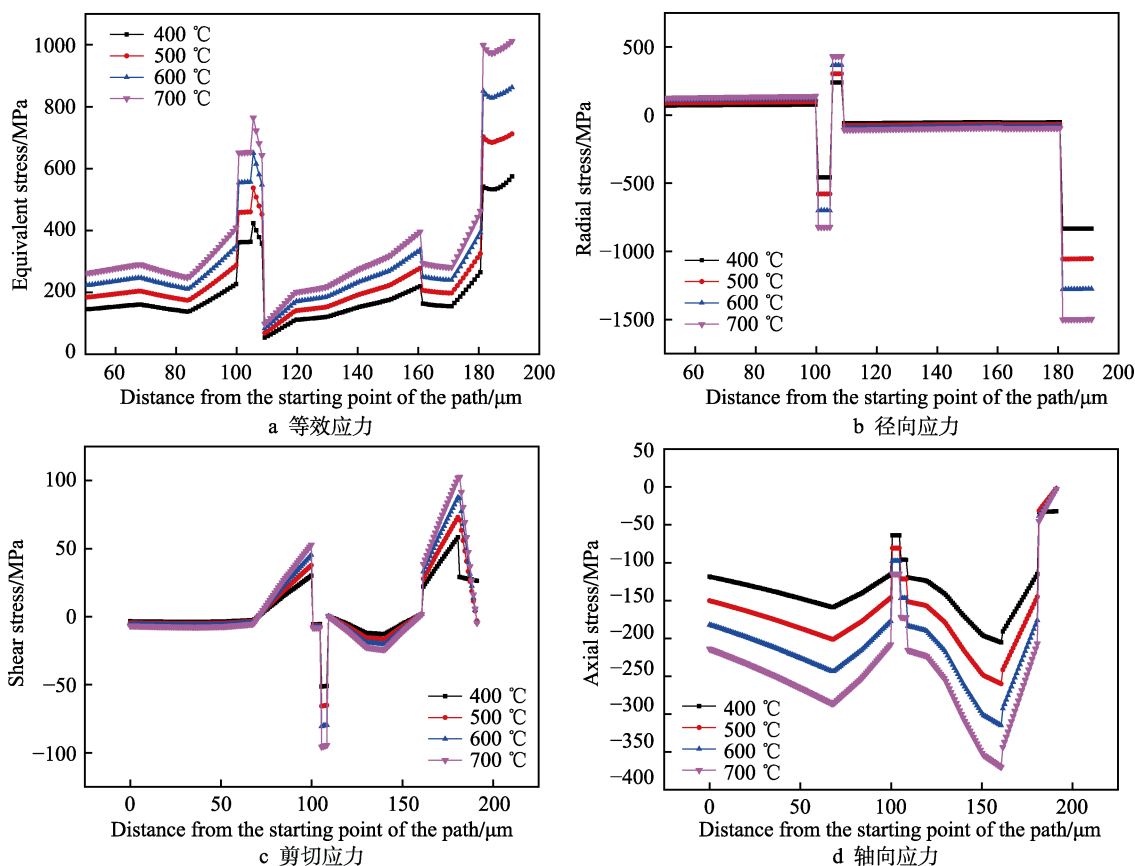


图 4  $\text{ZrO}_2$  沉积温度对复合涂层热应力的影响

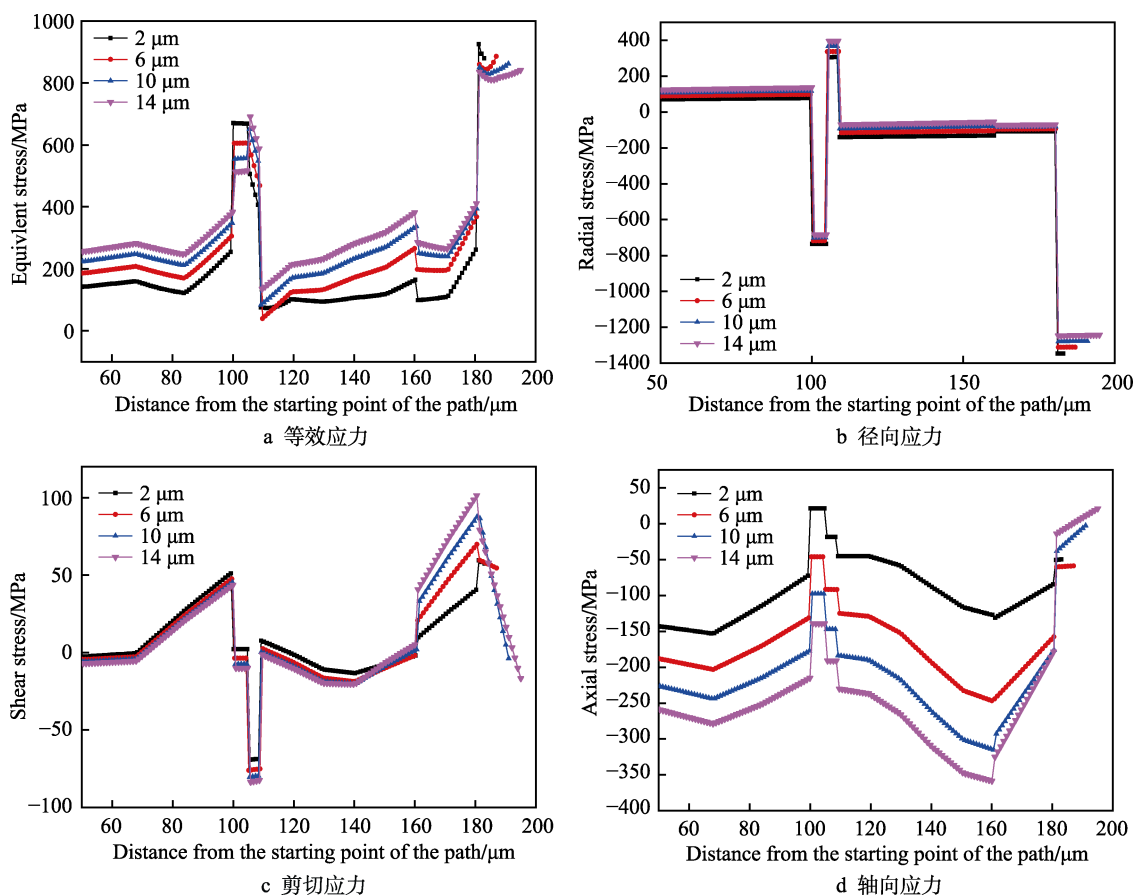
Fig.4 Effect of  $\text{ZrO}_2$  deposition temperature on thermal stress of composite coatings:  
a) equivalent stress; b) radial stress; c) shear stress; d) axial stress

### 2.4 $\text{ZrO}_2$ 层厚度对涂层热应力的影响

以保温时间 5 h、沉积温度  $600\ ^\circ\text{C}$ 、基体厚度  $0.8\ \text{mm}$  为例, 选取  $\text{ZrO}_2$  层厚度  $H$  ( $H=2$ 、 $6$ 、 $10$ 、 $14\ \mu\text{m}$ ) 进行模拟, 模拟结果如图 5 所示。通过图 5 可以看出,

随  $\text{ZrO}_2$  层厚度从  $2\ \mu\text{m}$  增加至  $14\ \mu\text{m}$ , 等效应力的最大值分别为 925、860、850、835 MPa, 径向应力最大值分别为 -1346.5、-1311、-1278、-1246 MPa。剪切应力在基体-渗铝层界面和渗铝层-氧化锆层出现应力集中, 前者出现在  $\text{Fe}_3\text{Al}$  层内, 最大值依次是 -69、



图5  $\text{ZrO}_2$  层厚度对复合涂层热应力的影响Fig.5 Effect of  $\text{ZrO}_2$  layer thickness on thermal stress of composite coatings:  
a) equivalent stress; b) radial stress; c) shear stress; d) axial stress

-76、-80、-82 MPa, 后者主要在  $\text{FeAl}_3$  层内, 依次为 59、69、87、101 MPa。轴向拉应力主要在  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  层内, 依次为 -130、-247、-315、-358 MPa。剪切应力和轴向应力均随厚度的增加而增大。

随着  $\text{ZrO}_2$  层厚度的增加, 基体和渗铝层的等效应力、径向应力、剪切应力和轴向应力均有升高。相反,  $\text{ZrO}_2$  层内部除剪切应力稍有增大外, 各个应力均减小。在复合涂层制备过程中, 渗铝层-基体的结合强度比渗铝层-氧化锆层的结合强度好, 承受应力能力比较强, 复合阻氢涂层中  $\text{ZrO}_2$  层起到关键作用, 是研究的重点。

复合涂层的失效模式主要取决于涂层中的应力状态, 与界面垂直的残余拉应力可能导致涂层断裂, 压应力的存在可以促使裂纹的萌生和传播, 所以要尽量减小涂层中的各个应力<sup>[16]</sup>。 $\text{ZrO}_2$  层厚度的增加会使  $\text{ZrO}_2$  层应力通过变形得到释放, 从而使径向应力和等效应力减小, 同时也使得涂层系统弯曲变形减小, 但弯曲减小将不利于剪切应力的释放, 使得渗铝层-氧化锆层界面存在较高的剪切拉应力, 易导致界面剥离等问题引起涂层失效。再者随着厚度的增加, 等效应力的减小越来越慢, 反而剪切应力增长明显, 所以选择 10  $\mu\text{m}$  进行下一步计算。

## 2.5 基体厚度对涂层热应力的影响

以保温时间 5 h、沉积温度 600  $^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{ZrO}_2$  层厚度 10  $\mu\text{m}$  为例, 选取基体厚度  $h$  ( $h=0.3$ 、0.5、0.8 mm) 进行模拟, 模拟结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, 改变基体厚度对基体及渗铝层的热应力影响不大, 但对  $\text{ZrO}_2$  层有较大的影响, 随着基体厚度的增加, 等效应力和径向应力都增加, 等效应力分别为 745、803、850 MPa, 径向应力分别为 -1072、-1187、-1278 MPa。基体厚度较低时, 基体变形使涂层的应力松弛, 而基体越厚, 弯曲越大,  $\text{ZrO}_2$  层中的残余应力越大。故选择 0.3 mm 厚基体进行试验。

## 2.6 有无渗铝层对热应力的影响

在以上的热应力模拟结果中, 选取最优的实验参数, 对比有无渗铝层对复合涂层热应力的影响。由图 7 中可以看出, 渗铝层的存在使各个应力均减小, 等效应力由 877 MPa 减小至 745 MPa, 径向应力由 -1235 MPa 减小至 -1072 MPa, 剪切应力由 105 MPa 降低到 89 MPa, 整个涂层的轴向应力最大值由 -375 MPa 减小至 -312 MPa, 其中  $\text{ZrO}_2$  层中的轴向应力改变明显, 由 -128 MPa 减小至 -39 MPa。

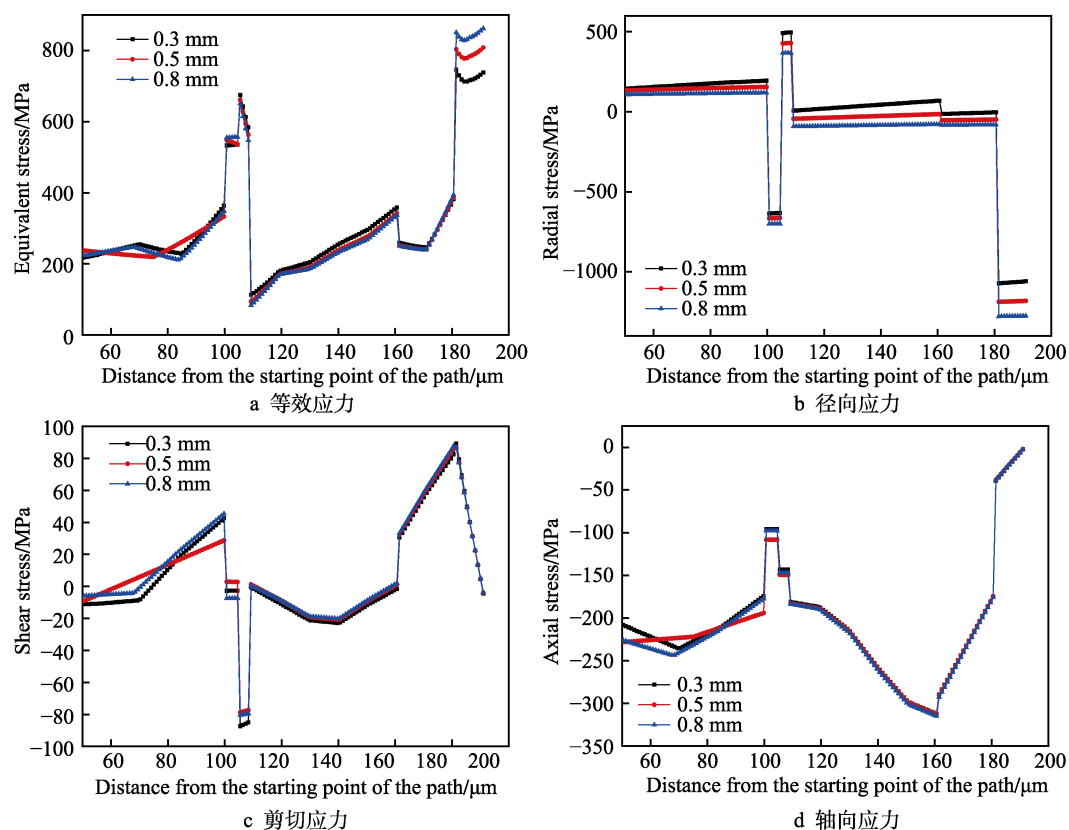


图 6 基体厚度对复合涂层热应力的影响

Fig.6 Effect of substrate thickness on thermal stress of composite coating:

a) equivalent stress; b) radial stress; c) shear stress; d) axial stress

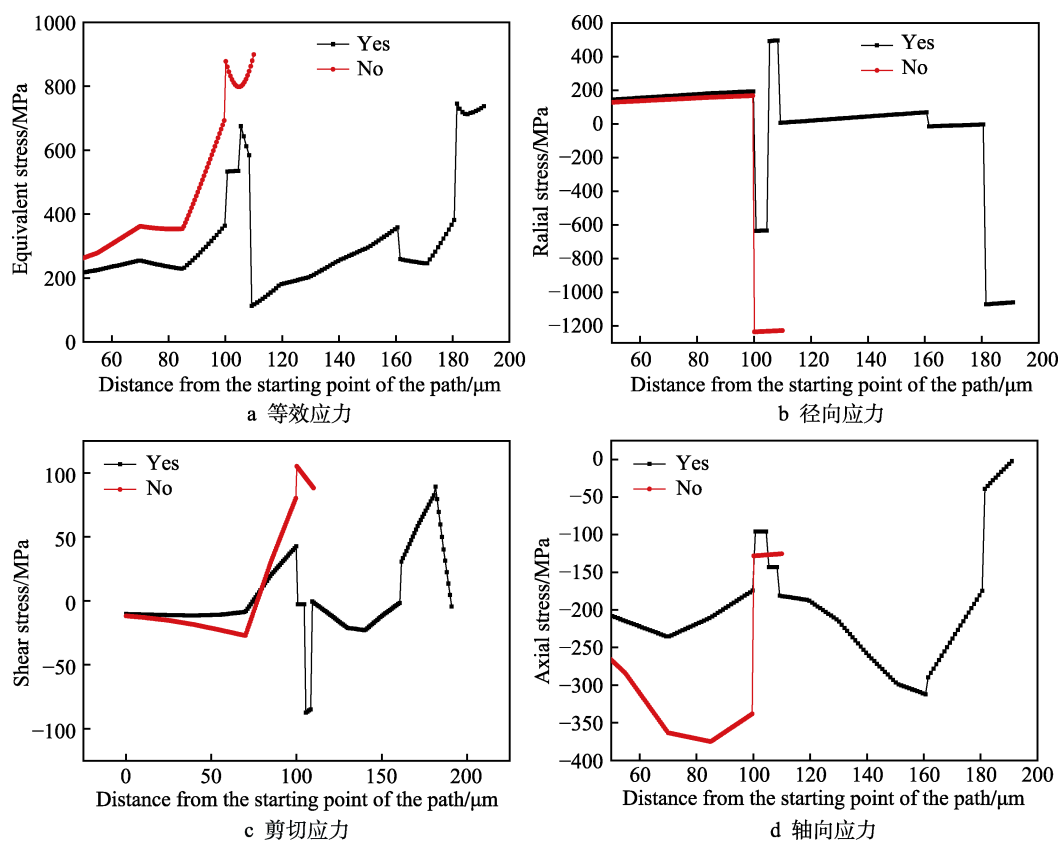


图 7 有无渗铝层对热应力的影响

Fig.7 Influence of aluminum layer on thermal stress: a) equivalent stress; b) radial stress; c) shear stress; d) axial stress

渗铝层位于基体和  $\text{ZrO}_2$  层之间, 热膨胀系数差异较大的渗铝层在  $\text{ZrO}_2$  和不锈钢基体中间起到很好的缓冲作用, 减小热应力, 延长涂层的使用寿命。渗铝层也是获得良好阻氢涂层的基础, 同时为涂层的自修复能力提供活性元素, 延长涂层的使用寿命。

### 3 结论

1) 随着渗铝保温时间的增加, 合金过渡层中的组分分布越来越均匀, 并且渗铝层增厚能更好地起到中间过渡层的作用, 从而使整个复合涂层的应力降低, 保温 5 h, 效果最好, 等效应力为 862 MPa。

2) 沉积温度与室温相差越大, 降温后基体与复合涂层的热匹配失衡越严重, 在保证工艺效果的情况下, 要尽量降低沉积温度来减小应力。结合实验室实验, 在 600 °C 时复合涂层性能良好, 等效应力为 850 MPa。

3) 随着  $\text{ZrO}_2$  层厚度的增加, 基体和渗铝层的各个应力均增加。相反,  $\text{ZrO}_2$  层内部除剪切应力稍增加外, 其余应力均减小。厚度增加引起较大的剪切应力, 容易造成涂层剥离, 选择 10  $\mu\text{m}$  为佳, 等效应力为 850 MPa。

4) 改变基体厚度对基体及渗铝层内的热应力影响不大, 但随着基体厚度的增加,  $\text{ZrO}_2$  层等效应力和径向应力均明显增大, 基体厚度越高, 弯曲越大,  $\text{ZrO}_2$  层中残余应力越大。选 0.3mm 厚基体为佳, 等效应力为 745 MPa。

5) 渗铝层位于基体和  $\text{ZrO}_2$  层之间, 起到很好的缓冲作用, 有利于减小热应力, 延长涂层的使用寿命。

### 参考文献:

- [1] 蔡丽安, 刘红先, 张文静. 阻氢渗透涂层的研究现状及进展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(22): 9-13.
- [2] CAI Li-an, LIU Hong-xian, ZHANG Wen-jing. An overview on hydrogen permeation barrier development[J]. Hot working technology, 2014, 43(22): 9-13.
- [3] 虞勇, 李威龙, 张建辉. 低温各向同性热解炭涂层热应力有限元分析[J]. 杭州电子科技大学学报, 2018, 38(2): 73-77.
- [4] YU Yong, LI Wei-long, ZHANG Jian-hui. Finite element analysis of thermal stress of low temperature Isotropic pyrolytic carbon coating[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University(natural Sciences), 2018, 38(2): 73-77.
- [5] 郜健. 氧化铝/氧化锆复合涂层的制备及其氢渗透性能研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2014.
- [6] GAO Jian. Investigation of preparation and hydrogen permeation properties of alumina/zirconia composite coating[D]. Beijing: General Research Institute for Non-ferrous Metals, 2014.
- [7] 谢华, 陈东, 黄健萌. 双涂层界面接触应力分析[J]. 表面技术, 2014, 42(2): 1-5.
- [8] XIE Hua, CHEN Dong, HUANG Jian-meng. Analysis of the contact stress at interface of double coatings[J]. Surface technology, 2014, 42(2): 1-5.
- [9] 刘红兵, 陶杰, 张平则, 等. 316L 不锈钢基材防氟渗透  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层残余热应力分析[J]. 核科学与工程, 2007, 27(2): 126-132.
- [10] LIU Hong-bing, TAO Jie, ZHANG Ping-ze, et al. Residual stresses of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tritium penetration barrier on 316L stainless steel substrate[J]. Chinese journal of nuclear science and engineering, 2007, 27(2): 126-132.
- [11] 谢玲玲, 陈文亮, 牛亚然, 等. C/C 材料表面  $\text{ZrB}_2$ -SiC 功能梯度涂层残余应力分析[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 97-102.
- [12] XIE Ling-ling, CHEN Wen-liang, NIU Ya-ran, et al. Residual stress in  $\text{ZrB}_2$ -SiC functionally graded coating on C/C substrate[J]. Surface technology, 2016, 45(12): 97-102.
- [13] DONG J, SUN Y H, DOU B S, et al. Preparation and characterization of aluminide/zirconia composite coatings by a three-step combined process[J]. Surface and coatings technology, 2018, 354: 184-193.
- [14] HAIDER J, RAHMAN M, CORCORAN B, et al. Simulation of thermal stress in magnetron sputtered thin coating by finite element analysis[J]. Journal of materials processing technology, 2005, 168(1): 36-41.
- [15] ABBAS M, GUO H B, RAMZAN S M. Comparative study on effect of oxide thickness on stress distribution of traditional and nanostructured zirconia coating systems[J]. Ceramics international, 2013, 39(1): 475-481.
- [16] 文政颖, 时蕾, 陈晓鸽, 等.  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{8YSZ}$  层残余热应力及隔热性能计算机模拟[J]. 表面技术, 2015, 51(8): 23-28.
- [17] WEN Zheng-ying, SHI Lei, CHEN Xiao-ge, et al. Computer simulation of residual stresses and thermal insulation property of  $\text{Sm}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\text{8YSZ}$  thermal barrier coatings[J]. Surface technology, 2015, 51(8): 23-28.
- [18] 陈泉, 纪岗昌, 王洪涛. MoB/CoCr 梯度涂层残余热应力 ANSYS 模拟分析[J]. 材料热处理技术, 2012, 41(10): 146-148.
- [19] CHEN Xiao, JI Gang-chang, WANG Hong-tao. Simulation and analysis of residual thermal stress of MoB/CoCr gradient coating[J]. Material & heat treatment, 2012, 41(10): 146-148.
- [20] 龙芬. Mo 箔基体上金刚石薄膜的制备及残余应力的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [21] LONG Fen. Study of preparation and residual stress of diamond films on Mo foil[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 范世通, 汤海波, 张述泉, 等. 梯度复合材料热应力影响因素正交有限元分析[J]. 材料工程, 2012(8): 1-4.
- [25] FAN Shi-tong, TANG Hai-bo, ZHANG Shu-quan, et al. Finite element analysis of factors to thermal stress in gradient composite with orthogonal method[J]. Journal of materials engineering, 2012(8): 1-4.
- [26] SUN Y H, DONG J, ZHAO P Z, et al. Formation and phase transformation of aluminide coating prepared by low-temperature aluminizing process[J]. Surface and coatings technology, 2017, 330: 234-240.
- [27] ZHANG X C, XU B S, WANG H D, et al. Modeling of the residual stresses in plasma-spraying functionally graded  $\text{ZrO}_2/\text{NiCoCrAlY}$  coatings using finite element method[J]. Materials & design, 2006, 27(4): 308-315.