

# 等离子喷涂 $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{NiCoCrAlY}$ 功能梯度热障涂层的热冲击性能

陈晓鸽<sup>1</sup>, 张天彤<sup>2</sup>, 张红松<sup>1</sup>

(1. 河南工程学院, 郑州 451191; 2. 郑州铁路职业技术学院, 郑州 450052)

**[摘要]** 采用有限元法计算了涂层结构、材料成分等对等离子喷涂  $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{NiCoCrAlY}$  功能梯度热障涂层热冲击性能的影响。结果表明: 径向热应力在试样边沿急剧降低, 而轴向热应力在边沿处发生从压应力向拉应力的突变; 从基体至涂层表面, 涂层中的径向冲击热应力逐渐增大, 增加涂层层数可缓解热应力; 材料组成对涂层的冲击热应力影响不明显。所研究的 1357 功能梯度热障涂层具有最好的抗热冲击性能。

**[关键词]** 稀土锆酸盐; 热障涂层; 有限元法; 热应力

**[中图分类号]** TG174.453

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2012)02-0086-04

## Thermal Shocking Property of Plasma-sprayed $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{NiCoCrAlY}$ Functional Graded Thermal Barrier Coatings

CHEN Xiao-ge<sup>1</sup>, ZHANG Tian-tong<sup>2</sup>, ZHANG Hong-song<sup>1</sup>

(1. Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

2. Zhengzhou Railway Vocation Technical College, Zhengzhou 450052, China)

**[Abstract]** The effect of coating structure, material composition on thermal shocking property of plasma sprayed  $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{NiCoCrAlY}$  functional graded thermal barrier coatings were researched by finite element method. Results show that radial thermal shocking stresses decrease suddenly and axial thermal shocking stresses transform from compressive-stress to that of pulling-stress at the edge of sample; Radial thermal-shocking stresses increase gradually from bottom to surface of the coating, and they decrease gradually with increasing of coating layers; Material compositions have almost no effect on thermal-shocking property, the 1357 coating has the most excellent thermal-resistance.

**[Key words]** rare earth zirconate; thermal barrier coatings; finite element method; thermal stress

在先进航空发动机的发展过程中, 以氧化钇部分稳定氧化锆 ( $\text{Y}_2\text{O}_3$  stabilized zirconate partially, 简称 YSZ) 为表面层的热障涂层一直发挥着重要作用。随着新一代航空发动机的设计和发展, 要求热障涂层的隔热性能必须进一步提高, 但 YSZ 陶瓷由于自身不可避免的高温相变问题, 很难满足热障涂层进一步发展的需求, 为此, 寻求可替代 YSZ 的新型热障涂层用陶瓷材料显得十分必要<sup>[1]</sup>。

从目前的研究现况来看, 选择一种十分理想的新型热障涂层用陶瓷材料还比较困难<sup>[2-3]</sup>, 广大研究者常以热导率、热膨胀系数作为选择的首要标准, 一般要求所选材料的热导率要小于  $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 热膨胀系数要大于  $9 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。根据这个标准, 目前报道最多的热障涂层用陶瓷材料主要有两大类: 一类是以  $\text{ZrO}_2$  为基础, 在其晶格中引入至少两种以上的稀土元素作为稳定剂, 从而形成的稳定的氧化锆陶瓷; 另一类是化

学式为  $\text{Ln}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  ( $\text{Ln}$  代表稀土元素) 的稀土锆酸盐<sup>[4-5]</sup>, 该类材料目前被认为是最具潜力的新一代热障涂层用陶瓷材料。笔者所在课题组前期研究发现, 在一元稀土锆酸盐中,  $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  具有最低的热导率和最高的热膨胀系数, 近两年来, 该材料热物理性能及其对应涂层性能的研究成为了热障涂层技术领域较新的研究方向之一, 但是有关涂层结构及成分对涂层性能影响的报道却比较少。为此, 文中采用有限元法计算了涂层结构、成分等因素对等离子喷涂  $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{NiCoCrAlY}$  功能梯度热障涂层热冲击性能的影响, 以期制备该类涂层提供数据支持。

## 1 数值计算

### 1.1 有限元模型

平常实验中所用涂层样品多为圆柱体, 故此处的

**[收稿日期]** 2011-08-19; **[修回日期]** 2011-12-10

**[作者简介]** 陈晓鸽 (1983—), 女, 河南濮阳人, 助教, 主要研究方向为陶瓷材料热物理性能。

计算模型也取圆柱体。由于涂层试样的对称性,为降低计算成本并节省计算时间,在计算建模时仅取一半,并将其简化为二维问题,计算所用涂层模型见图 1。该功能梯度热障涂层的结构分为两种:一种是三层结构,即除基体和粘结层以外,还包含 3 个梯度层,其中  $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  陶瓷的体积分数包括 50%,70%,100% 和 60%,80%,100% 两种组成,对应的涂层分别简称为 157 涂层和 168 涂层;另一种是五层结构,即除基体和粘结层以外,还包含 5 个梯度层,其中  $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  陶瓷

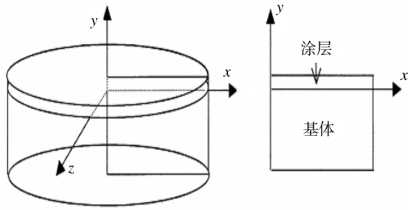


图 1 有限元模型示意图  
Fig. 1 Schematic description of finite element model

表 1 梯度层热物理性能参数

Tab. 1 Thermophysical property parameters of every graded coatings

$\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 体积分数/%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100
$E/\text{GPa}$	214.5	207.3	200.5	194.1	188	182.2	176.7	171.4	166.4	157
$\nu$	0.300	0.299	0.294	0.290	0.287	0.281	0.283	0.280	0.276	0.272
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 320	7 232.7	7 147.1	7 063.2	6 980	6 600.1	6 820.8	6 902.8	6 666.4	6 517.4
$\alpha/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	11.6	11.5	11.3	11.1	10.9	8.6	10.5	10.2	9.9	9.29
$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	16.1	5.2	3.9	3.2	2.6	2.2	1.8	1.4	1.1	0.35
$C_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	501	493.8	486.8	479.6	473.2	466.7	460.3	454	447.9	436

1.2 计算过程

用水淬法考查涂层的热冲击性能时,裂纹主要产生于冷却过程<sup>[9-10]</sup>,故计算时仅考虑涂层的冷却过程。在水淬过程中,涂层表面、底部及右侧面主要与水发生热对流,水的对流系数为  $3\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ,左侧面(即图 1 中  $y$  轴所在面)作绝热处理。实验开始,即时间  $t=0$  时,认为整个试样具有均匀的温度场,初始温度取  $1\,273\text{ K}$ ,然后迅速将试样放入温度为  $293\text{ K}$  的水中,这样整个涂层系统突然受到温差为  $775\text{ K}$  的热冲击。计算时,考查整个涂层系统从冷却开始  $180\text{ s}$  内热冲击应力的变化情况。为系统考查基体材质及尺寸等因素对涂层热冲击应力的影响,计算时先分析涂层中热应力随时间的变化,而后分析涂层不同位置处热应力的分布情况,最后再分别考虑涂层结构及涂层的材料组成对热应力的影响情况。

2 结果与讨论

2.1 位置的影响

图 2 是 157 涂层中任意几个节点的径向冲击热应

的体积分数包括 10%,30%,50%,70%,100% 和 20%,40%,60%,80%,100% 两种组成,对应的涂层分别简称为 1357 涂层和 2468 涂层。

金属粘结层材料为  $\text{NiCoCrAlY}$ ,厚度为  $0.1\text{ mm}$ ,其余每层梯度层厚度均取  $0.2\text{ mm}$ 。采用大型通用有限元软件 ANSYS(版本 10.0)计算涂层的热冲击应力,所用单元为 PLANE13 单元。为减小计算误差,采用直接耦合计算,并对涂层进行较细的网格划分。根据有限元数值模拟中的经验,此处作如下简化:1)认为整个涂层系统处于各向同性的弹性变形状态;2)计算中所用到涂层各部分的物理性能参数与温度无关;3)忽略涂层中气孔、裂纹等显微组织的影响;4)涂层各界面之间结合良好。计算中所用到的热物理性能参数见表 1,其中  $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  层(即表面陶瓷层)的参数由实验测得,各梯度层的热物理性能参数根据文献[6]和[7]中的物理模型计算得出。 $2\text{Cr}13$  钢金属基体的各热物理性能参数参考文献[8]。

力随时间的变化情况。由图 2 可知,随着时间的延长,涂层中的冲击热应力逐渐减小,冷却至  $10\text{ s}$  时的应力最大,因此重点分析  $10\text{ s}$  时涂层的热应力。图 3 和图 4 分别是 157 涂层和 2468 涂层冷却至  $10\text{ s}$  时,涂层中各层界面处径向热应力沿半径(即横向距离)的分布情况。可以看出,这两种涂层的热应力分布情况十分相似,在  $0\sim 12\text{ mm}$  的范围内,各层界面处的径向热应力基本保持不变,但在  $12\sim 18\text{ mm}$  的范围内,径向热应力则逐渐下降;此外,从金属粘结层至表面层,各处的

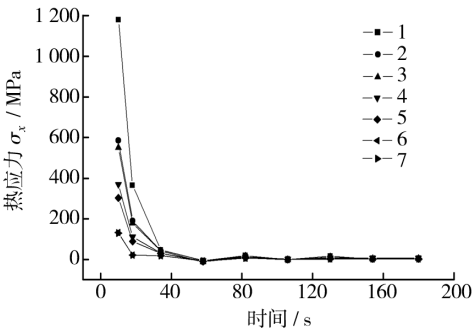


图 2 157 涂层中应力随时间的变化  
Fig. 2 Variation of thermal stresses with time in 157 coatings

径向热应力逐渐增加,至涂层表面处达到最大。除径向热应力以外,轴向应力及剪切应力也是这种情况,但是由于篇幅限制,此处未曾给出。基于这种情况,在分析涂层结构及材料成分的影响时,仅分析涂层表面的热应力分布。

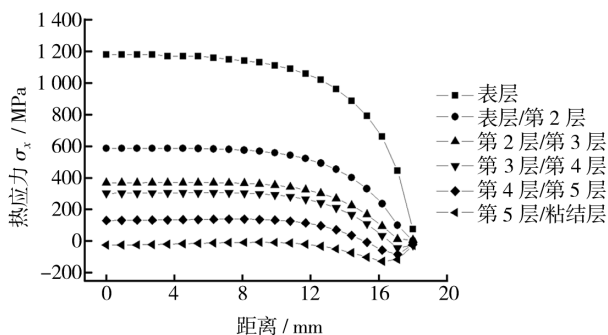


图3 157 涂层不同位置的应力

Fig. 3 Thermal stresses on different locations in 157 coatings

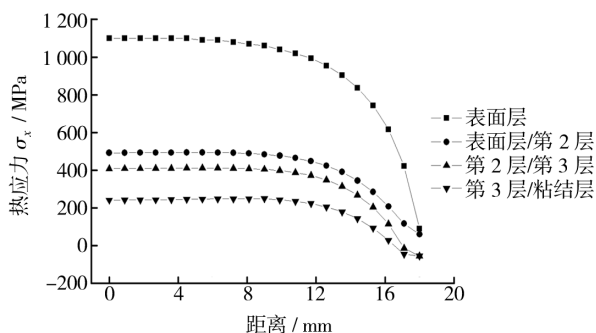


图4 2468 涂层不同位置的应力

Fig. 4 Thermal stresses on different locations in 2468 coatings

## 2.2 结构的影响

在分析涂层结构对热冲击应力的影响时,除前面提到的三层和五层结构外,还考虑了单一陶瓷层的热障涂层(文中简称1涂层)。由图5a可知,从1涂层至2468涂层,随着涂层层数的增加,表面的冲击热应力逐渐减小;其中,1涂层表面的径向热应力从 $x=10\text{ mm}$ 处的1230 MPa逐渐减小至 $x=14\text{ mm}$ 处的87 MPa,168和2468涂层表面的径向热应力分别从 $x=10\text{ mm}$ 处的1090 MPa和1050 MPa逐渐降低至 $x=18\text{ mm}$ 处的76.4 MPa和84 MPa。在图5b中,157和1357涂层表面的径向热应力分别从 $x=10\text{ mm}$ 处的1150 MPa和1100 MPa逐渐降低至 $x=18\text{ mm}$ 处的82.3 MPa和89 MPa。以上分析表明,功能梯度涂层的抗热冲击性能更加优异。

## 2.3 成分的影响

为比较涂层材料成分对热冲击性能的影响,在上述研究的基础上,比较了不同成分涂层的径向冲击热应力和轴向冲击热应力,结果分别如图6和图7所示。

由图6可知,157涂层的表面径向冲击热应力略

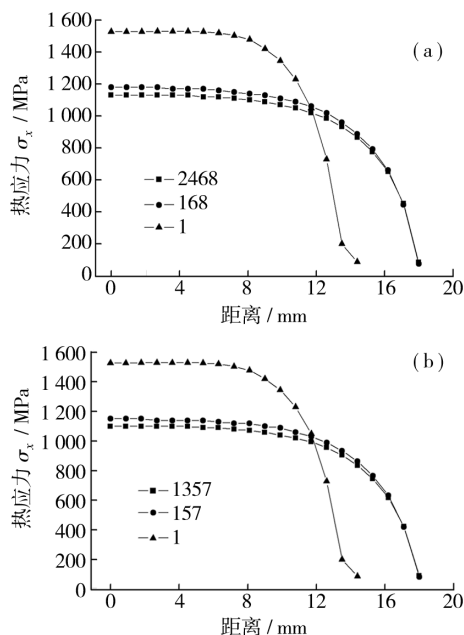


图5 单层、三层和五层涂层热应力对比

Fig. 5 Comparison of Thermal stresses between different coatings

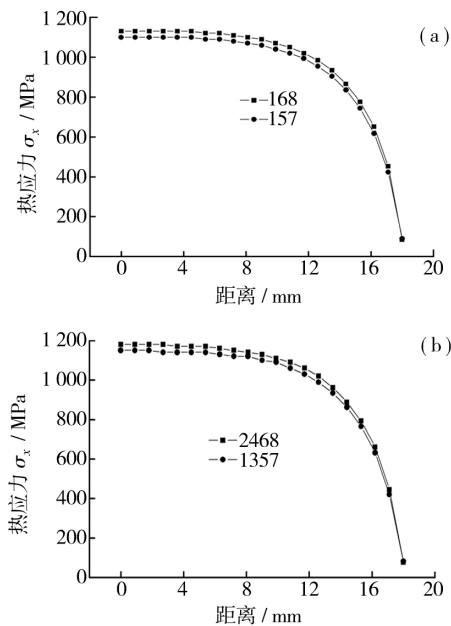


图6 涂层径向热应力

Fig. 6 Radial thermal stresses in coatings

小于168涂层,1357涂层的冲击热应力也略小于2468涂层。在热障涂层的热冲击过程中,较大的表层径向冲击热应力往往会加速涂层中垂直于基体方向的裂纹向下扩展,当垂直的裂纹互相连通后,易造成涂层的剥落失效<sup>[11-12]</sup>。根据这一点可知,157与1357涂层的耐热冲击性能分别略好于168和2468涂层。

从图7a和b可以看出,涂层中轴向冲击热应力沿横向距离的分布趋势与径向应力完全不同。在 $x$ 为0~16 mm范围内,轴向热应力基本保持不变,但在边

沿处却发生从压应力向拉应力的突变。轴向冲击热应力的突变易造成涂层沿边沿处脱落<sup>[13-14]</sup>。157 与 168 涂层的轴向应力大小基本相当,而 1357 与 2468 涂层的轴向应力也无明显区别,表明涂层的材料成分对涂层热冲击时的轴向热应力影响不明显。

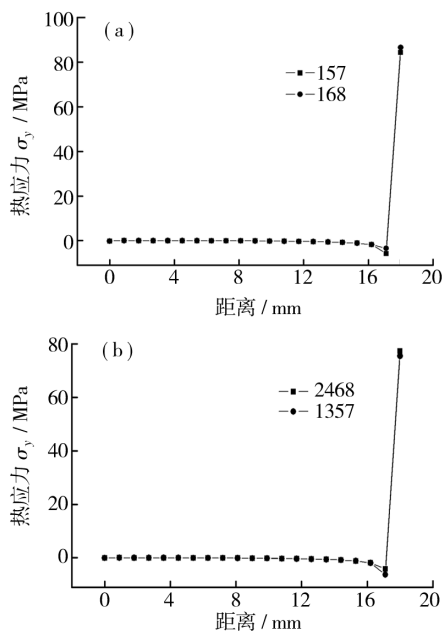


图 7 涂层轴向热应力

Fig. 7 Axial thermal stresses in coatings

根据以上计算结果可知,功能梯度结构涂层的耐热冲击性能较好,尤其是 1357 涂层,应该是文中耐冲击性能最好的涂层。

### 3 结论

1) 涂层中的径向热应力在  $x$  为 0~12 mm 范围内基本稳定,在  $x$  为 12~18 mm 范围内急剧降低;而轴向热应力在 0~16 mm 范围内保持不变,而在边沿处发生从压应力向拉应力的突变。

2) 在整个涂层系统中,从基体至涂层表面,径向冲击热应力逐渐增大,至涂层表面达到最大值。增加涂层的层数有利于缓和涂层中的热应力,而涂层的材料组成对涂层耐冲击热应力的影响不明显。

3) 根据计算结果,文中所研究的 1357 功能梯度热障涂层具有最好的抗热冲击性能。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal Bar-

rier Coatings for Gas-turbine Engine Applications[J]. Science, 2002(4): 280-284.

[2] SHINSUKE Y, TAKANORI T, TAKUJI M, et al. Thermal and Mechanical Properties of  $\text{SrHfO}_3$  [J]. Journal of Alloy and Compounds, 2004, 381: 295-299.

[3] CARLOS G L. Emerging Materials and Processes for Thermal Barrier Systems [J]. Current Opinion in Solid State Mater Science, 2004(8): 77-91.

[4] HONG S Z, KUN S, QIANG X, et al. Thermal Conductivity of  $(\text{Sm}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  ( $x=0, 0.25, 0.5, 0.75$  and 1) Oxides for Advanced Thermal Barrier Coatings [J]. Journal of Rare Earth, 2009(4): 222-226.

[5] ZHAN G L, JIA H O, YU Z. Preparation and Thermophysical Properties of  $(\text{Nd}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  Ceramics [J]. Journal of Material Science, 2008, 43: 3596-3603.

[6] 汪朝霞, 张晓丹, 葛昌纯. 热应力缓和型梯度功能材料设计的分析模型及数值计算 [C] // 94 秋季中国材料研讨会文集. 北京: 化学工业出版社, 1995: 224-229.

[7] ISHIKAWA T. Thermal Deformation & Thermal Stress of FGM Plates under Steadily Gradient Temperature Fields [C] // Proc The Frist International Symp FGM Sendai, 1990: 11-16. (余不详)

[8] 张红松, 张政, 陈晓鸽, 等. 等离子喷涂  $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  热障涂层残余应力 [J]. 中国陶瓷, 2010(4): 38-41.

[9] LIU Y, GAO Y F, TAO S Y, et al.  $\text{La}_2\text{O}_3$ -modified YSZ Coatings: High-temperature Satbility and Improved Thermal Barrier Properties [J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203: 1014-1019.

[10] ZHEN H X, Li M H, REN D M, et al. Double-ceramic-layer Thermal Barrier Coatings of  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /YSZ Deposited by Eletron Beam-physical Vapor Deposition [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 473: 509-515.

[11] 马壮, 王全胜, 王富耻, 等. 涂层基体条件对梯度涂层残余应力影响研究 [J]. 材料工程, 2002(4): 15-19.

[12] BO L C, MIN Z Z, LIANG J X, et al. Composition of Thermal Shock Behaviors between Plasma-sprayed Nanostructured and Conventional Zircnia Thermal Barrier Coatings [J]. Transactions of Nonferrous Metal Society of China, 2009(19): 99-107.

[13] 朱景川, 来忠红, 尹钟大, 等.  $\text{ZrO}_2$ -Ni 功能梯度材料的热冲击与热疲劳行为 [J]. 材料科学与工艺, 2001(12): 387-392.

[14] 赵军, 艾兴, 张建华, 等. 对称型功能梯度陶瓷材料抗热震性的研究 [J]. 中国陶瓷, 2002(4): 1-4.