

表面强化及功能化

C/C 材料表面 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 功能梯度涂层残余应力分析

谢玲玲^{1,2,3}, 陈文亮¹, 牛亚然², 郑学斌², 黄贞益³

(1.南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2.中国科学院上海硅酸盐研究所 特种无机涂层重点实验室, 上海 200050; 3.安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 目的 以 C/C 复合材料为基体, 设计 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 功能梯度材料。方法 利用 Ansys 软件对等离子喷涂 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 功能梯度涂层在沉积过程中产生的残余应力进行数值模拟, 分析成分分布指数 p 和梯度层厚度 t 对梯度涂层残余应力的影响; 并通过基于悬臂梁理论的热应力解析, 计算与基体接触的涂层在涂层与基体厚度比 λ 不同时的残余应力值。结果 模拟分析结果表明, 在涂层与基体的界面, 梯度层的厚度对轴向压应力影响不大, 径向压应力和切向应力均随厚度的增加而增大, 在边缘区域应力集中较为严重, 易产生层间破坏; 纯 ZrB_2 层为表面层, 其应力主要为径向压应力, 且沿径向逐渐减小至 0, 到边缘处又突变为拉应力, 并随 p 的增大而减小。对比解析法分析可得两者计算的与基体接触的涂层内部的残余应力随 λ 的增大都是逐渐降低的, 这符合涂层内部的应力分布原理。根据优化设计, 获得功能梯度材料在各梯度层厚度 d 为 0.1~0.2 mm, 成分梯度指数为 4 时的热应力变化缓和效果较好。结论 基于悬臂梁理论的解析解可以很好地评估热应力, 并验证了该模拟的正确性。

关键词: 功能梯度涂层; 成分分布指数; 残余热应力; 有限元分析

中图分类号: TG113.25 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)12-0097-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.016

Residual Stress in $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ Functionally Graded Coating on C/C Substrate

XIE Ling-ling^{1,2,3}, CHEN Wen-liang¹, NIU Ya-ran², ZHENG Xue-bin², HUANG Zhen-yi³

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2.Key Laboratory of Inorganic Coating Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 3.Metallurgical Engineering College, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

ABSTRACT: The work aims to design $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ functionally graded materials (FGM) on C/C composite substrate. Numerical simulation was performed to the residual stress of plasma sprayed $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ FGM by virtue of Ansys software so as to analyze the effects of composition distribution exponent p and gradient layer thickness t on the residual stress of gradient coating. Through thermal stress analysis based on cantilever beam theory, residual stress of the coating contacting the substrate when substrate thickness differed from λ was calculated. According to the simulation analysis results, the FGM layer thickness had little effect on the axial compressive stress in the interface between coating and substrate, while radial compressive stress and tan-

收稿日期: 2016-04-17; 修订日期: 2016-05-10

Received: 2016-04-17; Revised: 2016-05-10

基金项目: 中国科学院特种无机涂层重点实验室开放课题基金资助(KLICM-2013-09)

Fund: The Project Was Funded by the Key Laboratory of Inorganic Coating Materials, Chinese Academy of Sciences (KLICM-2013-09)

作者简介: 谢玲玲 (1978—), 女, 博士生, 讲师, 主要研究方向为航空宇航制造及表面工程。

Biography: XIE Ling-ling(1978—), Female, Doctoral candidate, Lecturer, Research focus: manufacturing engineering of aerospace and surface engineering.

gential stress increased as the coating thickness increased. Serious stress concentration was present in the marginal area and might lead to interlaminar failure. On top surface of pure ZrB_2 coating, radial compressive stress was the main stress form, which gradually decreased to zero in the radial direction, suddenly became tensile stress on the edge and decreased as p increased. Compared with analytical method, residual stress of the coating interior contacting the substrate calculated in two methods gradually decreased as λ increased, conforming to the stress distribution principle of coating interior. According to optimization design, optimal thermal stress variation and mitigation effects could be obtained provided that the compositional gradient exponent $p=4$ and the coating thickness $d=0.1 \sim 0.2$ mm. Analytical solutions based on the cantilever beam theory can be used to evaluate thermal stress favorably and verify correctness of the simulation.

KEY WORDS: functionally graded coatings; compositional distribution exponent; residual thermal stresses; finite element analysis

C/C 复合材料具有密度低, 比强度高、韧性好、抗冲击能力强, 具有较强的力学和化学稳定性, 在高温热结构应用领域被广泛采用^[1]。其中碳纤维在高温有氧环境中极易氧化, 其力学性能显著下降^[2], 因此在 C/C 复合材料表面制备高温抗氧化涂层有待解决该问题。

在抗氧化涂层体系中, ZrB_2 是超高温陶瓷材料中具有最小的理论密度、高导率、高熔点和高的抗热冲击性^[3], 特别是通过材料复合化, ZrB_2 基陶瓷材料的致密度、热物理性和力学性能都得到了很大提升, 因此 ZrB_2 是在高于 2000 °C 热冲击环境下应用最具前景的候选材料^[4]。YANG X 获得了 ZrB_2 在 1500 °C 的有氧环境下具有良好的抗氧化性能^[5], 可是, 由于 ZrB_2 的热膨胀系数与 C/C 复合材料相差较大, 导致涂层与基体的界面结合力较弱, 从而使涂层开裂乃至剥落。

SiC 具有高的硬度和强度、良好的导热性和热稳定性等, 且与炭基体有良好的热匹配性和化学相容性^[6], 以及优异的高温抗氧化性能, 常被选为过渡层。因此, 文中在 C/C 复合材料表层制备 ZrB_2 陶瓷涂层时, 加入 SiC 过渡层来减小涂层间的热物性差异^[7]。OPEKA M M 研究表明, ZrB_2 -SiC 复相陶瓷在 2200 °C 以上的大气中具有抗氧化、耐烧蚀性能^[8]。虽然采用等离子喷涂制备 ZrB_2 -SiC 复合涂层有困难, 但是 Yigal Blum 等^[9]采用等离子喷涂法制备出的 ZrB_2 -SiC 涂层在高温下表现出较好的自愈合性能。Tului M 等^[10-11]采用等离子喷涂法在钢和石墨上成功地制备了 ZrB_2 -SiC 涂层, 研究表明涂层具有很好的抗氧化性。

复合材料在制备与服役过程中, 因不协调热变形的相互约束使材料内部产生热应力, 最终导致材

料损伤甚至破坏, 如何在复合材料的界面处逐渐缩小热物性差异引发的残余热应力, 功能梯度材料提供了解决思路。通常采用试验分析功能梯度试样中的残余应力存在困难, 而通过有限元仿真可以考虑材料的多个热物性能参数开展工作。Lee 等^[12]应用有限元程序研究了 FGM 的层数对材料残余应力的影响。程西云等^[13]采用有限元模拟获得了合理的梯度结构能有效减缓陶瓷层与基体结合面上的应力突变。谢华等^[14]采用有限元方法研究了在接触应力作用下, 双涂层的总厚度及厚度比对其界面应力的影响规律。鉴于众多学者的研究成果, 文中将“梯度化”思想运用于材料的结构设计, 通过数值仿真预测涂层在沉积过程中产生的残余热应力, 讨论功能梯度涂层的厚度、材料组成等对残余应力的影响, 优化材料的组成分布, 以降低热应力为目标。

1 ZrB_2 -SiC 梯度功能涂层 (FGM) 的建模分析

1.1 建立 FGM 涂层的几何模型

根据薄板的定义: $1/80 \leq d/L_{\min} \leq 1/5$, 其中 d 为板厚, L_{\min} 为板的最小长度。确定 C/C 基体厚度为 6 mm, 直径为 60 mm; 涂层沉积于基体的上部, 结合工程应用, 把 ZrB_2 -SiC 功能梯度涂层划分为 6 层, 从基体到表面层按体积比依次为 50% ZrB_2 +50% SiC, 60% ZrB_2 +40% SiC, 70% ZrB_2 +30% SiC, 80% ZrB_2 +20% SiC, 90% ZrB_2 +10% SiC, 纯 ZrB_2 为顶层。按照每层厚度 d 分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 和 0.8 mm, 成分分布指数 p 设定为 0.25, 0.5, 1, 2 和 4, 总共 25 个方案进行计算。为了便于分析模

拟结果,把坐标系设置在基体与涂层的界面处, y 轴为中心对称轴。设定整个模型为轴对称,基于 Ansys,利用生死单元技术来计算残余热应力分布。单元类型为二维平面热力耦合单元,并在对称轴线位置与基体底部施加位移约束。为提高模拟精度,对 FGM 涂层以及涂层与基体的界面区域进行网格细化。设置基体的单元尺寸为 0.1 mm,涂层的单元尺寸为 0.01 mm,模型中共有 162 000 个网格单元。对流边界条件设置为:在 FGM 涂层的沉积过程中,基体底部与室温的对流换热系数设为 $8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$,C/C 基体底部和周边环境的热交换温度设为 $25\text{ }^\circ\text{C}$;ZrB₂-SiC 层在等离子喷涂沉积时,把等离子体焰流与涂层表面间的对流换热系数设为 $25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$;纯等离子喷涂 ZrB₂ 陶瓷层结束后,整个 FGM 涂层模型由高温冷却至室温,设定

它与室温环境间的对流换热系数为 $8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$,热交换温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ^[18]。计算所用的涂层模型为圆柱模型,见图 1。

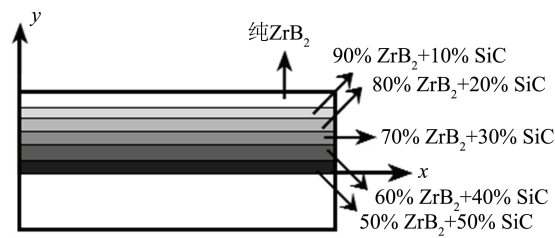


图 1 有限元分析所用的几何模型
Fig.1 Schematic description of the geometry used in the finite element modeling

1.2 FGM 涂层的物理模型的确定

材料的物性参数及力学性能见表 1。

表 1 基体与涂层的物理及力学性能参数^[15—16]
Tab.1 Physical parameter and mechanical properties of the substrate and coatings

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热容 $C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热传导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	制备温度 $T/^\circ\text{C}$	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}\cdot\text{K}^{-1})$	弹性模量 E/GPa	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	泊松比 ν
C/C	1900	800	82.76	25	1	70	53	27	0.28
SiC	3050	670	185	2700	4.3	440	237	185	0.26
ZrB ₂	6085	430	60	3245	5.9	489	302	199	0.23

1) FGM 涂层体系中 SiC 的体积分数根据邓建新等^[15]的研究确定功能梯度涂层中 SiC 的上限体积分数,并结合相关研究结果^[16],SiC 的添加量控制在 5%~50%范围。

2) 梯度层的成分分布采用幂函数模型:

$$\begin{cases} f_{\text{ZrB}_2} = (z/d_{\text{FGM}})^p \\ f_{\text{SiC}} = 1 - f_{\text{ZrB}_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: z 为某 FGM 涂层下表面到某一成分涂层的垂直距离; d_{FGM} 为 FGM 的总厚度; f_{ZrB_2} , f_{SiC} 分别为该层的组分 ZrB₂, SiC 的体积分数; p 为控制梯度层成分分布的指数。根据式(1)计算并绘出了 FGM 中 ZrB₂ 的体积分数变化是组成分布规律,见图 2。

3) 各梯度层复合材料的热膨胀系数 α 采用 Kerner 公式计算。

4) 各梯度层复合材料热导率 λ 的预测采用 Kingery 的公式。

5) 弹性模量 E 、泊松比 ν 按照 α 因子复合材料混合律建立弹性常数的变化规律^[17]。

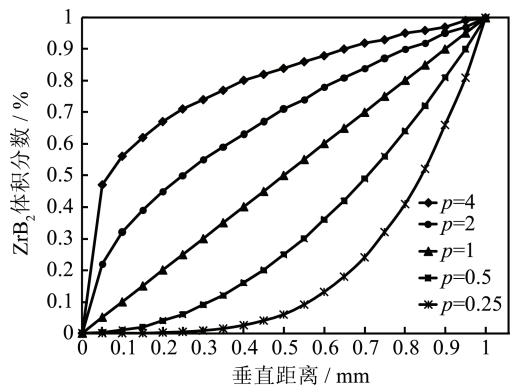


图 2 ZrB₂ 在梯度涂层中的体积分数
Fig.2 Volume fractions of ZrB₂ in coating

1.3 FGM 涂层残余应力分析模型

等离子喷涂 FGM 涂层的沉积过程经历了非稳态的热传导过程,因此在有限元分析时,残余应力的计算采用热-结构间接耦合,将每一涂层沉积终了时刻的温度场作为温度载荷进行应力场的计算,最后可得到涂层的残余应力瞬态变化。为此,从热弹性的角度考虑,做以下基本假设:①涂层在制备温度时处于应力自由状态;②涂层在制备过程中不

产生塑性变形或蠕变,且材料各向同性;③不考虑热辐射以及相变的对残余应力的影响;④不考虑涂层裂纹、气孔等缺陷,视整个涂层系统变形连续;⑤假设涂层之间、涂层和基体之间不产生相对滑动。

2 涂层残余应力分析

2.1 FGM 涂层的各向残余应力分析

以 $p=1$, $t=0.2$ mm 的涂层为例对其残余应力进行分析,见图 3。以梯度涂层边缘处为研究点,此处存在应力集中,尤其在涂层明锐界面特别显著,

这主要是由于涂层边缘处冷却速度较快,涂层表层和边缘处与空气传热时的热量较多,因而在边缘处局部形成了较大的温度梯度。径向应力在梯度中间层内产生较大的压应力,并沿轴向由压应力转变为拉应力,且在梯度涂层内形成的残余压应力,对提高涂层的物理力学性能有利,不易产生垂直界面的裂纹。轴向应力沿厚度方向均为拉应力,但在整个模型的边缘处有应力突变,尤其体现在基体与第一层涂层的界面处,这是因为基体与 FGM 涂层的热膨胀系数差异产生的。剪切应力的分布在涂层边缘处显示为压应力,这对涂层的结合性能是有利的,但在基体与涂层的界面边缘存在较大拉应力集中,容易引起界面开裂。

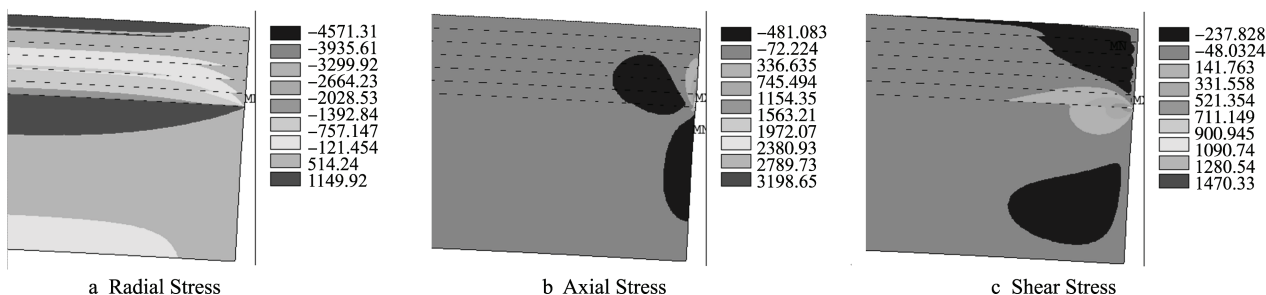


图 3 梯度涂层的应力分布 (MPa)

Fig.3 The stress distribution of the graded coatings

2.2 FGM 涂层沉积残余应力的影响因素分析

2.2.1 梯度涂层厚度的影响

梯度涂层厚度的选择对缓和涂层内部热应力分布很关键。现以分布指数 $p=1$, 梯度层数 $n=6$, 每层厚度分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 和 0.8 mm 的 FGM 涂层为例,分析讨论轴向应力、径向应力、切向应力在基体与涂层界面的变化趋势。

如图 4 所示,梯度层厚度对轴向应力影响不大,主要为压应力,在界面边缘处($28.5 \text{ mm} \leq X \leq 30$

mm)存在较大拉应力集中,且拉应力值也随厚度的增大而增加;在基体与涂层界面的径向应力全为压应力,涂层的厚度没改变应力的状态和趋势,只改变其大小,其压应力值随厚度的增加而增大,相应地在界面边缘处也存在较大的应力集中;切向应力相对较小,在界面中间的应力值几乎为 0,涂层的厚度的增大使切向应力随之增大,且最大值从边缘往内靠近,在界面边缘出现急剧增加,表明层间破坏集中在边缘处,这是界面结合强度的薄弱点。

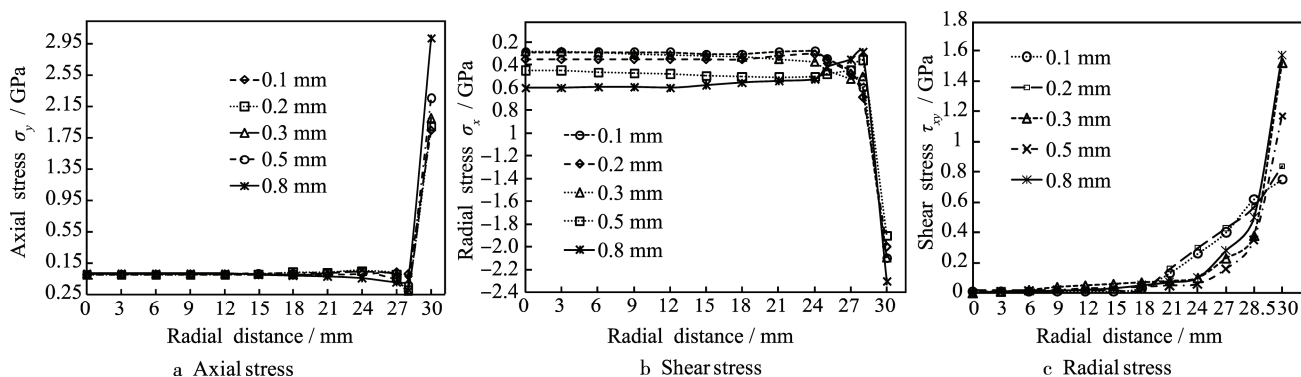


图 4 不同涂层厚度下在基体与涂层界面处的应力

Fig.4 The stress distribution on the interface between substrate and coating at the different coating thickness

通过比较分析 $p=1$, 不同梯度层厚度 d 值下最大等效残余应力, 由图 5 可知, 随着各梯度层的厚度增加, 最大等效残余应力呈递增趋势。这是因为涂层厚度越厚, 涂层与基体或涂层与涂层间的结合强度就越低。当 d 在 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 时, 最大等效残余应力值较低。根据第四强度理论可知, 等效应力值越小越好^[19], 则各梯度层厚度 d 在 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 为佳。

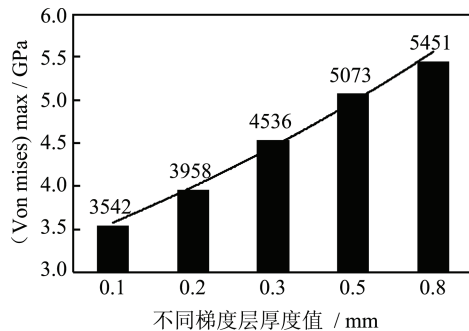


图 5 不同 d 值下最大等效残余应力比较

Fig.5 The comparison of (Von mises)_{max} under different d value

2.2.2 梯度涂层分布指数的影响

FGM 涂层的强度与分布指数 p 有关。当 $p < 1$ 时, 涂层中 ZrB_2 的体积含量大于 SiC, 强度由拉应力决定; 当 $p > 1$ 时, 与之相反, 其强度取决于压应

力。文中针对单层厚度为 0.2 mm 的 FGM 涂层分析了热应力随 p 的影响。在制备与使用陶瓷梯度材料时, 抗拉能力较差的纯陶瓷侧往往是材料最易失效的部位。则以最小热应力为目标, 下面探讨纯 ZrB_2 层的残余热应力的分布具有实际意义。

由图 6 可知当组成分布指数 p 从 $0.25 \sim 4.0$ 变化时, 纯 ZrB_2 涂层的应力分布随组成分布指数 p 的变化关系。从图 6a, b 可以看出, 随 p 值的增加, 纯 ZrB_2 层的各向应力变化趋势并不明显, 轴向应力与剪切应力大都处于较低应力状态, 直到界面边缘处 ($28.5 \text{ mm} \leq X \leq 30 \text{ mm}$) 存在较大拉应力, 在自由端又突变为较大压应力, 总体来看, 应力变化均随 p 的增大越趋平缓。这是由于 p 越大, FGM 涂层的热物性能趋向于 SiC, 因此在涂层的冷却过程中因物性差异引起热失配应力也就越小。从图 6c 可知, 纯 ZrB_2 层的径向应力几乎全为较大的热压应力, 这样容易使涂层发生翘曲而失效。随径向尺寸的增大, 径向压应力逐渐减小至零, 但在边缘处又突变为拉应力, 且径向压应力随着 p 的增大而减小, 但相差不大, 这跟纯陶瓷 ZrB_2 的热膨胀系数小, 体积没有变化有关。较为显著的是当 $p=4$ 时的热应力变化缓和效果较好。

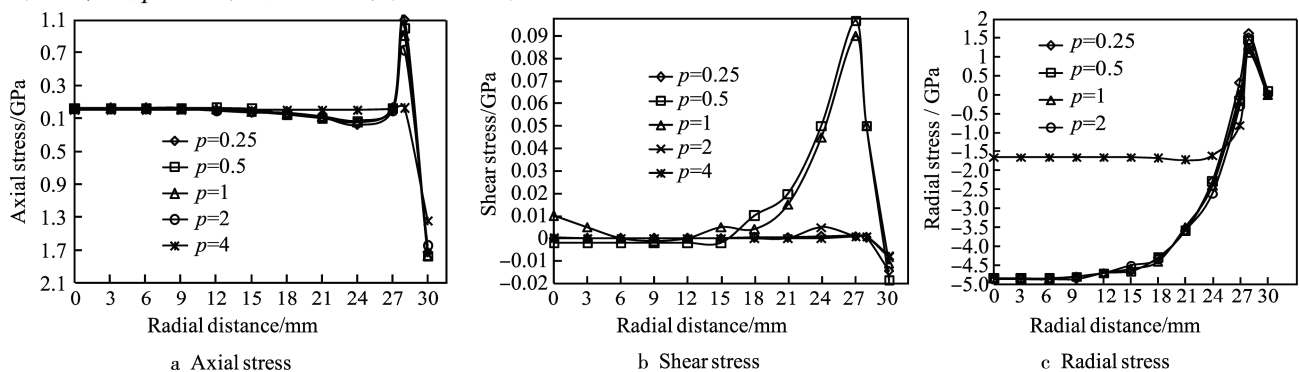


图 6 不同指数 p 下的纯 ZrB_2 层的各向应力分布

Fig.6 The stress distribution of ZrB_2 coating at the different compositional distribution exponent

以各涂层厚度为 0.2 mm , 在不同分布指数 p 下的等效残余应力模拟分析为例。根据图 7 数值模拟结果比较分析, 不同的 p 值, 其最大等效应力值相差较大, 且随着 p 值的增大, 等效应力值呈递减趋势。在 p 在 $2 \sim 4$ 时, 最大等效应力值相对最小, 为 $3213 \sim 3058 \text{ MPa}$ 。综合上述讨论与模拟结果优化, 按照热应力最小即缓和程度最大的设计思想, ZrB_2 -SiC FGM 涂层的热应力缓和设计可选 $p=4$ 较为合理。

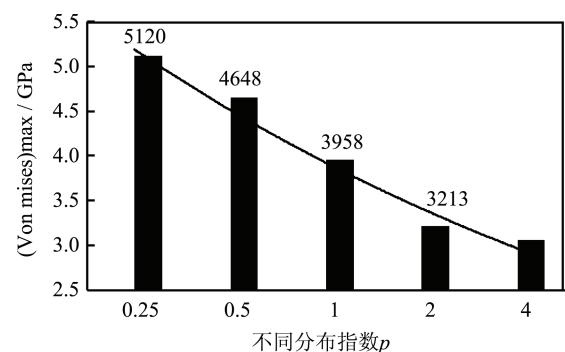


图 7 不同 p 值下最大等效残余应力比较

Fig.7 The comparison of (Von mises)_{max} under different p value

3 基于悬臂梁理论的热应力解析

根据罗瑞强等^[20]研究的基于悬臂梁理论进行修正的涂层应力式(1), 计算了与基体接触的第一涂层在涂层与基体厚度比 d_c/d_s 不同时的残余应力值。

$$\sigma_1^T = (0.998 - 2.9\lambda) E_1 (\alpha_s - \alpha_1) \Delta T \quad (1)$$

式中: σ_1^T 为涂层内部热残余应力通用的理论解; λ 为涂层与基体厚度比; α_s, α_1 分别为基体和与基体接触的涂层的热膨胀系数。 ΔT 为基体与涂层的沉积温度差。

根据图8曲线显示, 随 λ 的增大, 用数值法和有限元模拟计算的与基体接触的涂层内部的残余应力是逐渐降低的, 这符合随涂层厚度的增加, 涂层内部的应力应降低的原理; 并且两者的值相差不大, 由此也验证了模拟的正确性。

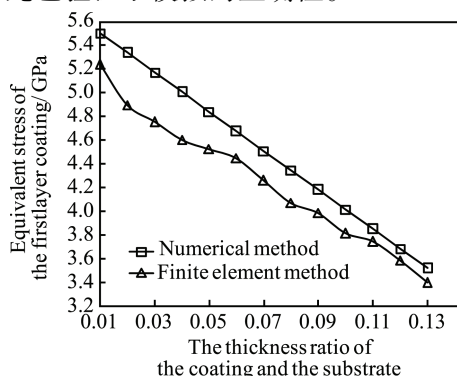


图8 涂层与基体厚度比对涂层内残余应力的影响

Fig.8 The thickness ratio of coating and substrate influence on residual stress

4 结语

1) 梯度单层厚度的变化对 FGM 涂层的轴向应力影响不大, 在轴向上的残余应力主要表现为压应力, 但在界面边缘处存在较大的拉应力集中, 且随厚度的增大而增加; 在基体与涂层界面的应力在径向上全为压应力, 压应力值随涂层厚度的增加而增大, 应力的变化趋势相同, 且在界面边缘处也存在较大的压应力集中; 切向应力相对较小, 也随涂层厚度的增加而增大, 最大值从边缘往内靠近, 在界面边缘出现急剧增加, 体现出层间破坏集中在边缘处, 这是界面结合强度的薄弱点。

2) 随 p 值增加, 纯 ZrB_2 层的各向应力变化趋

势并不明显, 轴向应力与剪切应力大都处于较低应力状态, 直到界面边缘处存在较大拉应力, 在自由端又突变为较大压应力, 总体来看, 应力变化均随 p 的增大越趋平缓; 径向应力几乎全为较大的热压应力, 且沿径向逐渐减小至零, 但在边缘处又突变为拉应力, 并随 p 的增大而减小, 但相差不大。

3) 根据热应力分布和组成参数的优化分析可得梯度单层厚度 d 为 0.1 ~ 0.2 mm, p 为 4 时的热应力变化缓和效果较好。

4) 通过基于悬臂梁理论的修正公式, 验证了该模拟的正确性。

参考文献

- [1] 贺福, 王茂章. 碳纤维及其复合材料[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
HE Fu, WANG Mao-zhang. Carbon Fibre and Composite Material [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [2] 闫志巧, 熊翔, 肖鹏, 等. MSI 工艺制备 C/SiC 复合材料的氧化动力学和机理[J]. 无机材料学报, 2007, 22(6): 1151—1158.
YAN Zhi-qiao, XIONG Xiang, XIAO Peng, et al. Oxidation Kinetics and Mechanism of C/SiC Composites Fabricated by MSI Process[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22(6): 1151—1158.
- [3] GASCH M J, ELLERBY D T, JOHNSON S M. Ultra High Temperature Ceramic Composites[M]. New York: Springer, 2005.
- [4] 刘国玺, 郭在在, 燕东明, 等. 二硼化锆超高温陶瓷的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(1): 102—106.
LIU Guo-xi, GUO Zai-zai, YAN Dong-ming, et al. Research and Development of ZrB_2 Ultra High Temperature Ceramics[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(1): 102—106.
- [5] YANG X, LI W, WANG S, et al. ZrB_2 Coating for the Oxidation Protection of Carbon Fiber Reinforce Silicon Carbide Matrix-composites [J]. Vacuum, 2013, 96(3): 63—68.
- [6] ZENG Y, XIONG X, GUO S. SiC/SiC-YAG-YSZ Oxidation Protective Coatings for Carbon/Carbon Composites[J]. Corrosion Science, 2013, 70(3): 68—73.
- [7] FENG T, LI H J, SHI X W. Oxidation and Ablation Resistance of ZrB_2 -SiC-Si/B-Modified SiC Coating for Carbon/Carbon Composites[J]. Corrosion Science, 2013, 67(97): 292—297.
- [8] OPEKA M M, TALMY G, ZAYKOSKI J A, et al. Mechanical, Thermal and Oxidation Properties of Refractory Hafnium and Zirconium Compounds[J]. Journal of the European Ceramic Society, 1999, 19(2): 405—414.

- [9] BLUM Y, MARSCHALL J, KLEEBE H J. Low Temperature Low Pressure Fabrication of Ultra High Temperature Ceramics(UHTCs)[J]. Sri International Menlo Park CA, 2006.
- [10] BARTULIA C, VALENTEA T, TULUI M. Plasma Spray Deposition and High Temperature Characterization of ZrB₂-SiC Protective Coatings[J]. Surface & Coating Technology, 2002, 155(2/3): 260—273.
- [11] TULUI M, MARINO G, VALENTE T. Plasma Spray Deposition of Ultra High Temperature Ceramics[J]. Surface & Coating Technology, 2006, 201(5): 2103—2108.
- [12] LEE C S, AHN S H, DEJONGHE L C, et al. Effect of Functionally Graded Material(FGM)Layers on the Residual Stress of Poly typoidally Joined Si₃N₄-Al₂O₃[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 434(1/2): 160—165.
- [13] 程西云, 何俊, 肖舒. 梯度结构对陶瓷涂层抗冲击载荷性能影响的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21): 124—130.
- CHENG Xi-yun, HE Jun, XIAO Shu. Influences of Gradient Structure on the Impact Resistance of Al₂O₃ Ceramic Coatings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(21): 124—130.
- [14] 谢华, 陈东, 黄健萌. 双涂层界面接触应力分析[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 1—5.
- XIE Hua, CHEN Dong, HUANG Jian-meng. Analysis of the Contact Stress at Interface of Double Coatings[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 1—5.
- [15] 邓建新, 丁泽良. 陶瓷喷嘴及其冲蚀磨损[J]. 北京: 科学出版社, 2009.
- DENG Jian-xin, DING Ze-liang. Ceramic Nozzle and Erosion Wear[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [16] 王裕. 硼化锆基超高温陶瓷材料的组织结构及热冲击性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- WANG Yu. Microstructure and Thermal-Shock Performance of ZrB₂-Based Ults High Mperature Ceramics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [17] 卢平, 刘佐民. 基于 α 因子的复合材料弹性模量混合律模型[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 9(30): 19—22.
- LU Ping, LIU Zuo-ming. Mixed-mode of Elastic Modulus Composites Based on the α Factor[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 9(30): 19—22.
- [18] 杨加胜, 钟兴华, 赵华玉, 等. 等离子体喷涂涂层应力的仿真计算与实验表征[J]. 材料保护, 2012, 10(10): 56—61.
- YANG Jia-sheng, ZHONG Xing-hua, ZHAO Hua-yu, et al. Experimental and Numerical Residual Stresses in Plasma-Sprayed Coatings[J]. Materials Protection, 2012, 10(10): 56—61.
- [19] 李永, 宋健, 张志民. 梯度功能力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- LI Yong, SONG Jian, ZHANG Zhi-min. Functionally Gradient Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [20] 罗瑞强. 热喷涂涂层中应力研究与分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- LUO Rui-qiang. Research and Analysis of Stress within Thermal Spray Coating[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.