

飞行器用梯度材料的微观结构及热应力分析

何金徕 孙 秦

(西北工业大学航空学院, 西安 710072)

文 摘 采用薄片叠层法制备了 SUS304/ZrO₂ 梯度材料, 观察了梯度为 20% 的梯度材料的微观形貌, 对其截面进行了显微硬度测量, 并进行了残余热应力分析。结果表明: SUS304/ZrO₂ 梯度材料呈阶梯式梯度变化, 成分呈梯度变化过渡良好, 残余热应力远小于 SUS304/ZrO₂ 层状材料, 热应力缓和效果明显, 可以满足飞行器材料的使用要求。

关键词 梯度材料, 薄片叠层法, 带状浇注, 热应力

Microstructure and Thermal-Stress of Function Gradient Materials for Aircraft

He Jinlai Sun Qin

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract SUS304/ZrO₂ function gradient materials (FGM) were fabricated by laminated shim techniques. The microstructure of FGM with 20% graded change was observed. The micro-hardness of FGM was tested, and residual thermal stress was analyzed finally. The result shows that SUS304/ZrO₂ FGM with graded composition are obtained, residual thermal stress of FGM is far less than that of laminated composites since FGM shows the gradient change of components, and better thermal stress relaxation is obtained which can meet the demand for aircraft materials.

Key words Graded materials, Laminated shim techniques, Tape casting, Thermal stress

1 引言

在飞行器用材料方面, 要求材料有较高强度可承受高温, 这使得在材料的内部存在一定温度梯度, 产生的热应力会影响其使用寿命^[1]。一般材料的内部特性都是均匀的, 要适应耐热性和机械特性两方面的要求较困难。在金属表面覆盖陶瓷层^[2]存在异相界面, 在高温情况下由于线胀系数的不同会在界面处产生内应力, 引起脱落、剥离等破坏性问题。而金属/陶瓷功能梯度材料^[3](FGM)中陶瓷和金属的含量沿厚度方向呈连续变化, 其物理性能没有突变, 因而可以较好的避免层间应力问题。

制备金属/陶瓷 FGM 的主要方法^[4~7]很多, 其中薄片叠层法^[8]在制备较大面积以及形状复杂的 FGM 具有独特优势, 可以满足飞行器机身以及端部异形的要求。本文以 SUS304 和 ZrO₂ 为原料采用薄片叠层法制备 FGM, 对 FGM 的微观形貌和显微硬度进行了

表征, 最后与层状复合材料进行了热应力对比分析。

2 实验

2.1 样品制备

采用摩尔分数为 3% 的 Y₂O₃ 稳定的四方相 ZrO₂ 粉和 SUS304 粉, 性能参数见表 1。添加剂为乙醇、三氯乙烯、邻苯二甲酸二丁酯、聚乙二醇和聚乙烯醇缩丁醛(PVB), 以上均为分析纯。

表 1 原料的性能参数

Tab.1 Properties of raw materials

材料	D ₅₀ /μm	熔点 T _s /°C	α/10 ⁻⁶ K ⁻¹
SUS304	28.1	1430	12
ZrO ₂	0.53	2720	10

利用成分分布函数计算得到各梯度层的厚度:

$$V = (x/L)^m \quad (1)$$

收稿日期: 2008-10-31; 修回日期: 2008-12-11

作者简介: 何金徕, 1969 年出生, 博士研究生, 研究方向为飞行器结构及材料设计。E-mail: hejinlai.nwpu@gmail.com

式中, V 为各梯度层中 ZrO_2 的体积分数, L 代表梯度材料的厚度, x 为从 0% ZrO_2 层作为起点到各层之间的距离, m 是分布系数。

ZrO_2 与不锈钢系的梯度界面的残余应力在 $m = 0.7$ 时最小^[9], 所设计的梯度材料由 6 层梯度层组成, 总厚度为 2.6 mm。

将 6 种成分 (ZrO_2 体积分数分别为 0%、20%、40%、60%、80%、100%) 的 SUS304 和 ZrO_2 混合粉料按所需比例加入添加剂, 球磨 24 h 后经过筛、除气得到浆料, 采用浆料浇注法制得 80 ~ 100 μm 的薄片层, 再按所需厚度按顺序叠层, 在 75 $^{\circ}C$ 、100 MPa 压力下进行热合, 最后在 1 360 $^{\circ}C$ 真空下进行烧结, 升温 and 降温速率均小于 5 $^{\circ}C/min$ 。

2.2 性能测试与表征

用 GX71 型金相显微镜观察样品的微观形貌; 根据 GB/T9790—1988^[10] 用 HVT-1000 型显微维氏硬度计采用压痕法, 测量 FGM 的显微硬度, 加载负荷为 500 g, 加载时间为 15 s, 测量间距 200 μm ; 根据 GB/T10700—2006^[11] 在 HT-2402-100KN 材料试验机上用三点弯曲法测量静态弹性模量, 试样尺寸为 3 mm \times 4 mm \times 36 mm, 跨距为 30 mm, 压头移动速率 0.5 mm/min, 每组 3 个试样; 根据 GB/T16535—1996^[12] 用 PCY 热膨胀仪测量线胀系数, 试样尺寸 3 mm \times 4 mm \times 10 mm, 测试温度为 25 ~ 1 300 $^{\circ}C$, 升温速率为 5 $^{\circ}C/min$ 。

3 结果与分析

3.1 微观结构

图 1 为 SUS304/ ZrO_2 梯度材料的金相照片, 图中白色部分为 304 不锈钢, 灰色部分为 ZrO_2 , 阶梯式梯度分布使材料的组织从纯金属 SUS304 侧过渡到纯陶瓷 ZrO_2 , 具有宏观上的不连续性。在金属含量较多的区域, SUS304 为基体, ZrO_2 呈颗粒状分布于其中, 而随着陶瓷含量的增加, ZrO_2 逐渐成为基体, SUS304 则成粒状相散布于其中。SUS304/ ZrO_2 FGM 各层结合紧密, 没有出现裂纹和缺陷。

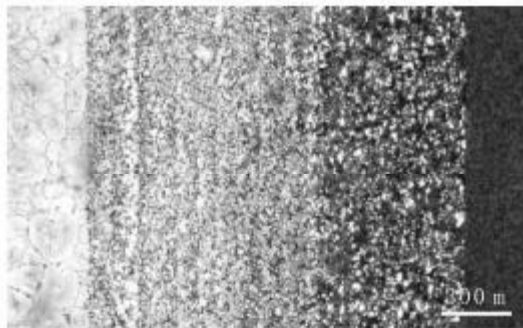
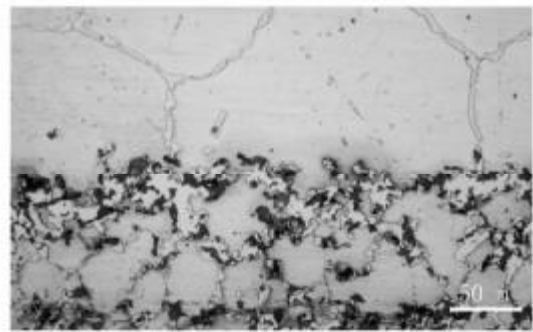
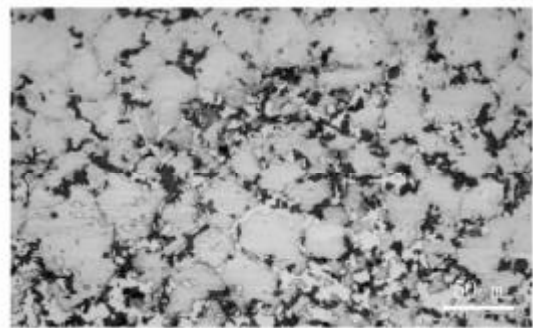


图 1 SUS304/ ZrO_2 FGM 截面的微观形貌
Fig.1 Section of SUS 304/ ZrO_2 FGM

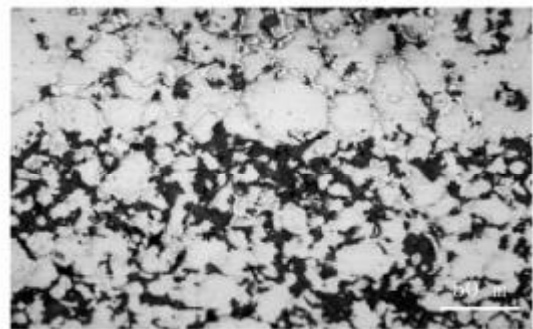
对不同成分相邻层的界面放大观察。图 2 为随着 ZrO_2 增加的相邻层界面处的金相照片, 可以看出不同成分相邻层间的界面结合良好, 在界面两侧显微组织是连续的且具有整体性, 无宏观裂纹和层间裂纹。虽然相邻层两组元的体积分数相差 20%, 但在烧结过程中相邻层界面处两组元由高浓度向低浓度扩散, 使 FGM 的成分在微观结构上呈连续的变化, 这种连续性说明扩散消除了相邻层间由于成分不同造成的突变, SUS304/ ZrO_2 FGM 层界面处过渡良好。



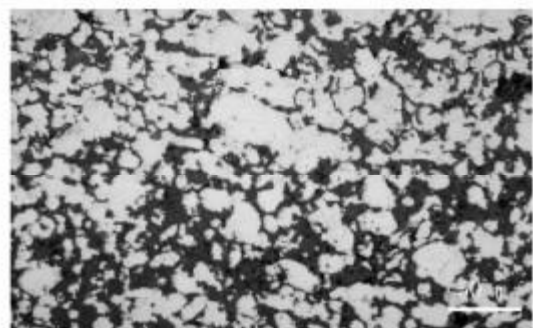
(a) 0% ZrO_2 /20% ZrO_2



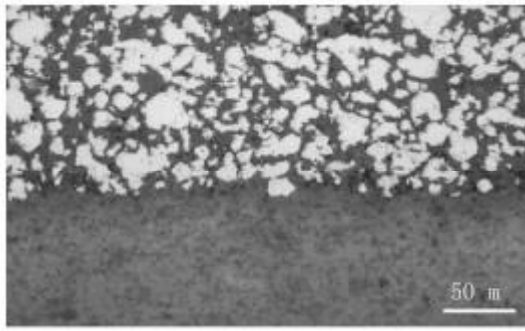
(b) 20% ZrO_2 /40% ZrO_2



(c) 40% ZrO_2 /60% ZrO_2



(d) 60% ZrO_2 /80% ZrO_2



(e) 80% ZrO₂/100% ZrO₂

图2 SUS304/ZrO₂ FGM 各梯度层的界面结构

Fig.2 Interface structure in adjacent layer of SUS304/ZrO₂ FGM

3.2 显微硬度

复合材料中的陶瓷相在硬度测试时,在压头压入区会发生包括压缩剪断等伪塑性变形,不能直接和强度对应,但与耐磨、抗冲刷等性能密切相关。图3为SUS304/ZrO₂FGM的显微硬度分布图。由于ZrO₂的硬度大于SUS304,所以从SUS304层到ZrO₂层,沿着厚度方向显微硬度逐渐增加,基本呈线性变化,没有出现突变的现象,表明FGM的成分过渡良好。

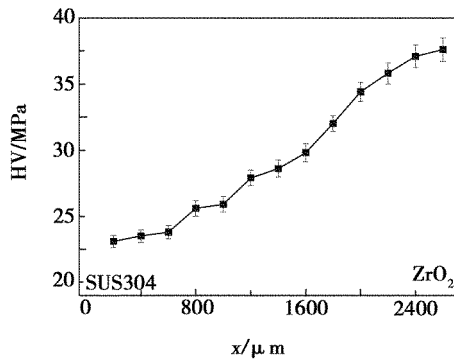


图3 SUS304/ZrO₂梯度材料截面的显微硬度

Fig.3 Micro-hardness of SUS304/ZrO₂ FGM across section

3.3 热应力分析

首先测量SUS304/ZrO₂系复合材料的弹性模量和线胀系数。本实验所用ZrO₂的弹性模量为205 GPa,SUS304的弹性模量为199 GPa,两者的弹性模量相近,可减少FGM在制备的过程中因弹性错配面导致的微裂纹。采用简单混合法则^[13]估算SUS304/ZrO₂系复合材料的弹性模量:

$$E_{\text{SUS-ZrO}_2} = E_{\text{SUS}}(1 - f_{\text{ZrO}_2}) + E_{\text{ZrO}_2}f_{\text{ZrO}_2} \quad (2)$$

式中, f 为体积分。用Turner式^[14]估算不同成分的SUS304/ZrO₂复合材料的理论线胀系数,其表达式为:

$$\alpha_j = \frac{\sum_i \alpha_i E_i V_i}{\sum_i E_i V_i} \quad (3)$$

式中, α_j 为复合材料的线胀系数, α_i 为各组元的线胀系数, E_i 为各组元的弹性模量, V_i 则为各组元体积分

数。理论值与测量值如图4所示。

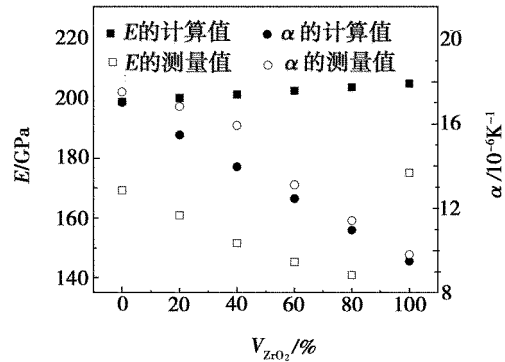


图4 SUS304/ZrO₂复合材料的弹性模量和线胀系数

Fig.4 Young's elastic modulus and thermal expansion coefficient of ZrO₂/stainless steel composite materials

由热弹性理论和经典叠层板理论推导的FGM残余热应变与热应力分布方程^[15]:

$$\begin{cases} \varepsilon_i^k = \varepsilon_i^o + Zk_j - \alpha_j^k \Delta T \\ \sigma_i^k = \sigma_{ij}^k \varepsilon_i^k (i, j = 1, 2, 6, k = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (4)$$

根据测量值计算SUS304/ZrO₂FGM和相同厚度层状复合材料的残余热应力分布,结果如图5所示。

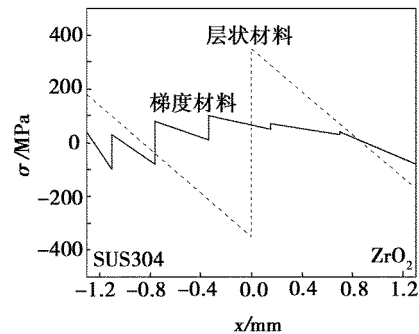


图5 SUS304/ZrO₂FGM与层状复合材料的残余热应力分布

Fig.5 Residual thermal stress of SUS304/ZrO₂ FGM and laminated composites

由图5可以看出,ZrO₂和SUS304的线胀系数相差较大,层状复合时热应力较大,在界面处达到峰值,界面的SUS304侧受到346 MPa的拉应力,ZrO₂侧受到331 MPa的压应力,这足以使得SUS304/ZrO₂界面处ZrO₂陶瓷发生开裂。而FGM由于成分呈梯度变化减小了界面两侧梯度层之间的热膨胀性能的差异,其残余热应力在界面处的变化降低。图5中FGM最大拉应力出现在ZrO₂体积分数为40%与60%的梯度层界面处,为86 MPa,是层状复合材料的1/4,而ZrO₂体积分数为80%与100%的梯度层界面处的ZrO₂陶瓷受到的最大拉应力只有28.7 MPa,显然FGM组成

梯度化具有显著缓和热应力的作用。

4 结论

(1)采用薄片叠层法制备了 SUS304/ZrO₂ FGM, 所得的 FGM 没有宏观缺陷。通过对截面微观形貌的观察和显微硬度的测量,说明该 FGM 过渡良好,各梯度层界面结合紧密。

(2)FGM 由于成分的梯度变化,其最大残余热应力远小于 SUS304/ZrO₂层状复合材料,显著的缓和了热应力,可以满足飞行器材料的使用要求。

参考文献

- 1 李敏,张宝艳. 不对称铺层复合材料制造工艺探讨. 航空材料学报, 2006; 26(3): 349~350
- 2 赵敏,姜龙涛,武高辉. TiB₂/Al 复合材料制备工艺的研究进展. 材料导报, 2008; 22(6): 28~33
- 3 Hsueha C H, Leeb S. Modeling of elastic thermal stresses in two materials joined by a graded layer. Composites: Part B, 2003; 34 (8): 747~752
- 4 Sabatello S, Frage N, Dariel M P. Graded TiC-based cermets. Materials Science and Engineering A, 2000; 288 (1): 12~18
- 5 Ellen M. Heian, Jeffery C G, Zuhair A M. Synthesis and characterization of Nb₅ Si₃/Nb functionally graded composites. Materials Science and Engineering A, 2004; 368 (1-2): 168~174
- 6 Put S, Vleugels J, Biest O V. Microstructural engineering of functionally graded materials by electrophoretic deposition.

Journal of Materials Processing Technology, 2003; 143(1): 572~577

7 Zhua Jingchuan, La Zhonghong. Fabrication of ZrO₂ - NiCr functionally graded material by powder metallurgy. Materials Chemistry and Physics, 2001; 68(2): 130~135

8 Jung Yeon gil, Ha Chang gi, Shin Jong ho et al. Fabrication of functionally graded ZrO₂/NiCrAlY composites by plasma activated sintering using tape casting and it's thermal barrier property. Materials Science and Engineering A, 2002; 323 (1): 110~118

9 Kawasaki A, Watanabe H. Microstructure designing and fabrication of disk-shaped FGM by powder metallurgy. Journal of Japan Society Powder Metallurgy, 1990; 37 (2): 76~81

10 GB/T9790—1988, 金属覆盖层及其他有关覆盖层维氏和努氏显微硬度试验

11 GB/T 10700—2006, 精细陶瓷弹性模量试验方法 弯曲法

12 GB/T16535—1996, 工程陶瓷线胀系数试验方法

13 李荣久. 陶瓷-金属复合材料. 北京: 冶金工业出版社, 2004; 227~231

14 张驰, 校金友. 功能梯度材料的有限元方法研究. 飞行设计, 2007; 27(4): 31~34

15 储成林, 尹钟大, 朱景川等. HA/Ti 生物功能梯度材料微观组织及热应力缓和特性. 无机材料学报, 1999; 14(5): 775~782

(编辑 任涛)

启 事

凡向本刊投稿的作者,关于稿件的撰写格式、要求及《论文著作权转让书》范本请登录网址:<http://yhgc.chinajournal.net.cn> 查看或下载。

· 本刊编辑部 ·