复合材料学报 第17卷 第1期 2月 2000年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 17 No. 1 February 2000

文章编号: 1000-3851(2000)01-0086-03

金属陶瓷功能梯度材料的颗粒界面断裂能量释放率与临界颗粒尺寸的研究

王富耻 王 鲁 吕广庶
(北京理工大学 材料科学与工程系, 北京 100081)

摘 要: 研究了功能梯度材料富陶瓷区金属颗粒界面断裂能量释放率。文中采用双层嵌套模型给出了金属颗粒界面的热应力与金属体积浓度的关系, 对于得到的每一梯度层中的颗粒界面热应力, 分析了颗粒界面断裂能量释放率, 并研究了每一梯度层中金属颗粒的临界尺寸变化规律。

关键词: 功能梯度材料; 金属颗粒; 界面; 热应力; 能量释放率; 临界颗粒尺寸
中图分类号: TB333 **文献标识码**: A

STUDY ON THE ENERGY RELEASE RATE FOR THE PARTICLE/MATRIX INTERFACE AND CRITICAL PARTICLE SIZE OF FUNCTIONALLY GRADIENT MATERIALS

WANG Fu-chi WANG Lu LU Guang-shu
(Department of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The study on the energy release rate for cracks propagating of particle and matrix interface in Functionally Gradient Materials (FGM) was carried out. The thermal stress for the matrix-particle interface was calculated using Double-Layer-Embedment model, also the relation between the stress and metal volume fraction was obtained, and then the energy release rate and the change of critical particle size (radius) in the graded layers were given.

Key words: Functionally Gradient Materials (FGM); particle; interface; thermal stress; energy release rate; critical particle size (radius)

功能梯度材料(FGM)是八十年代后期提出的新的材料设计思想, 是一种新型复合材料, 其组分、结构形式和物性参数都呈梯度变化[1,2]。金属陶瓷功能梯度材料的结构特点之一是各梯度层由不同体积浓度的金属和陶瓷组成, 不但材料在升温和降温过程中宏观梯度层间产生热应力, 而且每一梯度层中微观颗粒和基体的热物性失配将产生颗粒界面热应力, 从而导致材料的破坏。目前, 由于在热环境下, 功能梯度材料的断裂机制研究还不深入, 所建立的材料设计准则还有待于进一步完善[3]。功能梯度材料的重要研究内容之一是材料在热过程中的损伤和微观裂纹的形成。其重要起因之一是基体与颗粒的界面热应力[4]。为了研究界面热应力的效应, 必须研究颗粒界面断裂能量释放率和临界颗粒尺寸[5,6]。

本文中把双层嵌套模型[7]引入功能梯度材料的研究中, 以此得到各种体积浓度下的颗粒界面热应力。针对制备的功能梯度材料, 研究了不同梯度层中的基体与颗粒的界面热应力和颗粒界面断裂能量释放率以及临界颗粒尺寸的变化规律。

1 分析模型

本文中研究的功能梯度材料体系是 ZrO_2-NiCrAl。用等离子喷涂法在金属基体上制备出了金属体积浓度 V_f 分别为 100 vol%、80 vol%、60 vol%、

收稿日期: 1998-08-03; 收修改稿日期: 1998-11-05
基金项目: 国防科技九五预研重点项目资助(12.4.3.1)
作者介绍: 王富耻(1948), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为金属陶瓷功能梯度材料.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

40vol%、20vol% 和 0vol% (此层为 ZrO_2) 的六层梯度层的金属陶瓷复合材料。金属相和陶瓷相的物性参数为实测值, 见表 1。功能梯度材料的微观结构采用文献[8]的模型。

表 1 金属和陶瓷物性参数实测值

Table 1 Metal and ceramic measured properties

	E/GPa	ν	$\alpha/10^{-6}$
ZrO_2	40.84	0.28	8.2
NiCrAl	79.95	0.23	13.9

本文中将着重研究富陶瓷区的界面热应力。功能梯度材料每个梯度过渡层中两相材料的体积分数是变化的, 在研究界面热应力时, 必须考虑体积分数的影响。假若用公式[5,6]

$$p = (\alpha_1 - \alpha_2)t/[(1-2\nu_2)/E_2 + (1+\nu_1)/E_1] \quad (1)$$

研究界面热应力, 那么只在 $V_f \leq 4\%$ 的条件下才是有效的[7], 因此式(1)对于功能梯度材料的使用是有限的。

把双层嵌套模型[7]引入功能梯度材料的基体与颗粒的界面热应力的研究中, 针对功能梯度材料每个梯度层的结构特点, 对任何一层材料都可进行分析研究。由双层嵌套模型[7], 基体与颗粒的界面热应力为

$$p = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)t + \dfrac{(1+2\zeta)(\alpha_2 - \alpha_0)t}{4G_1(1-V_f)(1/4G_1 - 1/4G_0)}}{\dfrac{1}{3K_2} + \dfrac{1+2\zeta V_f}{4G_1(1-V_f)} - \dfrac{(1+2\zeta)(1/4G_1 + 1/3K_2)}{4G_1(1-V_f)(1/4G_1 - 1/4G_0)}} \quad (2)$$

对于功能梯度材料的富陶瓷区, 式(2)中的颗粒相可视为金属NiCrAl相; 基体相可视为 ZrO_2; V_f 为金属体积浓度; 式中, E_1、ν_1、α_1 为基体材料的弹性模量、Possion 比和热膨胀系数; E_2、ν_2、α_2 为颗粒材料的弹性模量、Possion 比和热膨胀系数; t 为温度改变; $G_0 = E_0/(2+2\nu_0)$, $G_1 = E_1/(2+2\nu_1)$, $K_2 = E_2/(3-6\nu_2)$ 为相关材料的剪切弹性模量和体积弹性模量; E_0、ν_0、α_0 为两相材料的复合材料物性参数, 其计算公式见文献[7]; 参数 $\zeta = (1-2\nu_1)/(1+\nu_1)$。

粒尺寸的研究

对于由式(2)得到的界面热应力 p, 利用断裂能量释放率理论[5,6], 对功能梯度材料的富陶瓷区($V_f < 50$ vol%)各梯度层材料进行断裂分析。分析模型如图 1 所示。由文献[6], 断裂能量释放率为

$$g = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 C\left(\frac{1}{4}\frac{\pi e^{2\epsilon\phi} p^2 a (A_1^2 + C_1^2)\sin\phi}{[\cosh(\pi\epsilon)]^2}\right) \quad (3)$$

式(3)中 p 为式(2)所得; C 为由两相材料常数确定的参数, 其量纲为 MPa^{-1}; a 为金属颗粒半径, 2ϕ 为颗粒界面裂纹对应的角度, 见模型图 1; 其它参数由

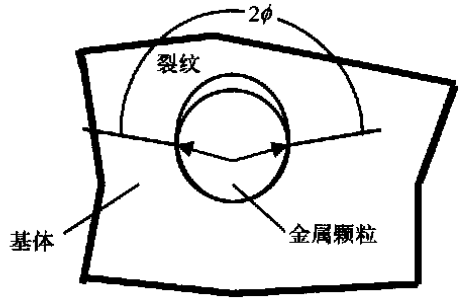

图 1 裂纹模型

Fig. 1 Crack model

基体和颗粒的材料参数决定, 详细表达式见文献[6]。不同梯度层材料的材料参数随金属体积浓度 V_f 的变化由文献[8]的模型确定。

2 结果分析

由式(2)得到的金属颗粒界面热应力 p 如图 2 所示, p 随着金属体积浓度 V_f 的增加而减少, 这与文献[6]对于陶瓷基复合材料 Ni/Al_2O_3 的有限元计算结果有相同的趋势。当 $V_f \to 0$ 时, 式(2)退化为式(1), 此时, 可视为陶瓷基体中含有一个金属颗粒或含有极少量的金属相。图 2 显示了不同梯度层材料的界面热应力状况。

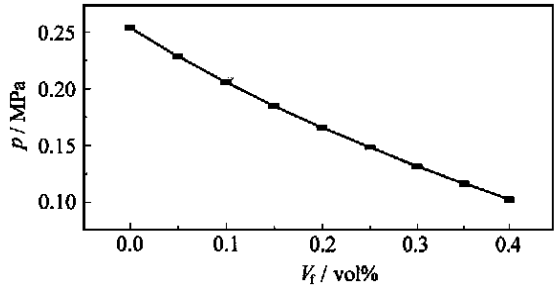

图 2 金属颗粒界面热应力与金属体积浓度 V_f 的关系($t = -1$℃)

Fig. 2 The interface thermal stress as a function of volume fraction V_f of metal($t = -1$℃)

由式(3)得到的能量释放率与颗粒半径比 g_0/a 如图 3 所示, g_0 为 $t = -1$℃时的能量释放率; 若 $t = -T$℃, 则能量释放率与颗粒半径比为 g_0T^2/a。随着金属体积浓度 V_f 的增加, 界面热应力 p 减少, 能量释放率与颗粒半径比 g_0/a (或 g_0T^2/a) 亦下降。

若临界断裂能量释放率为 g_c (此处假定富陶瓷区的各梯度层材料中的金属颗粒周边近处为陶瓷), 由 $g = g_c$ 可以确定临界颗粒尺寸 a_c^{min}。对于金属体积浓度 V_f 为 0vol% (陶瓷基体中含有一个金属颗粒或含有极少量的金属相)、20vol% 和 40vol% 的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

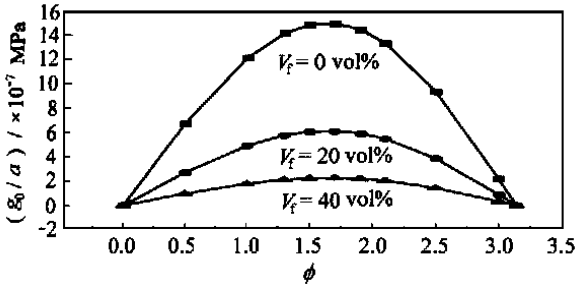

图 3 能量释放率与颗粒半径比 g_0/a 和 ϕ 的关系(t= - 1℃)

Fig. 3 The ratio between energy release rate g_0 and metal particle radius as a function of relative crack size ϕ(t= - 1℃)

梯度层材料, 若 t= - T ℃, 由图 3 可知其临界颗粒尺寸分别为: g_c= 1.49×10$^{-6}T^2$, g_c= 6.09×10$^{-7}T^2$ 和 g_c= 2.26×10$^{-7}T^2$。随着金属体积浓度 V_f 的增加, 临界颗粒尺寸 a_c^{min} 增大。

采用文献[5]、文献[9] 和文献[10] 的理论: 由三点弯曲试验测得所制备的 ZrO_2(基体相) 的 g_c 为 43 J/m^2; 用等离子喷涂法制备 ZrO_2-NiCrAl 系功能梯度材料时, 整个试样制备过程的平均温度约为 600℃左右, 取 t= - 600℃; 由此可得金属体积浓度 V_f 为 0 vol% (陶瓷基体中含有一个金属颗粒或含有极少量的金属相)、20 vol% 和 40 vol% 的梯度层材料的金属临界颗粒尺寸分别为 80、196 和 528 μm。从最严格的意义上讲, 此处的 g_c 应该是界面的能量释放率, 它受到颗粒与界面的粘接(bonding) 状况的影响[5]。

综上所述, 各梯度层材料中, 随着金属体积浓度 V_f 的增加, 能量释放率变小, 而临界颗粒尺寸增大。

3 结 论

研究了功能梯度材料颗粒的界面热应力和颗粒界面断裂能量释放率以及临界颗粒尺寸的变化规律, 得到了一些重要的结论:

(1) 富陶瓷区的各梯度层材料随着金属体积浓度 V_f 的增加, 颗粒的界面热应力在减少。

(2) 富陶瓷区的各梯度层材料随着金属体积浓度 V_f 的增加, 能量释放率变小, 而临界颗粒尺寸增大。

这些结果对于材料的制备和材料的界面断裂机理研究有着重要的理论意义。

参 考 文 献

[1] 沈 强, 涂 溶, 张联盟, 等. TiC/Ni$_3$Al 系梯度材料的残余应力与工作应力计算及结构优化 [J]. 材料研究学报, 1997, 11(1): 97～100.

[2] 郑子樵, 梁叔全. 梯度功能材料的研究与进展 [J]. 材料科学与工程, 1992, 10(1): 1～5.

[3] Kawasaki A, Watanabe R, Yuki M, *et al*. Effect of microstructure on thermal shock cracking of functional graded thermal barrier coating studied by burner heating test [J]. *Materials Transactions JIM*, 1996, 37(4): 788～795.

[4] Matsuzaki Y, Kawamura M, Fujioka J, *et al*. Transient thermal cycle spallation of thermal barrier type functional gradient material [J]. *J Japan Inst Metals*, 1994, 58(6): 697～706.

[5] Ito Y M, Rosenblatt M, Cheng L Y, *et al*. Cracking in particulate composites due to thermalmechanical stress [J]. *International Journal of Fracture*, 1981, 17(5): 483～491.

[6] Kolhe R, Hui C Y, Ustundag E, *et al*. Residual thermal stresses and calculation of the critical metal particle for interfacial crack extension in metal-ceramic matrix composites [J]. *Acta Mater*, 1996, 44(1): 279～287.

[7] 郑茂盛, 金志浩, 浩宏奇. 颗粒增强复合材料热应力分析的双层嵌套模型 [J]. 中国科学(A 辑), 1994, 24(12): 1333～1340.

[8] Miyawaki K, Hashida T, Takahashi H. Study on evaluation of thermal shock fracture and thermal stress relaxation property of FGM by laser local heating technique [J]. *J Japan Soc Powder and Powder Metall*, 1990, 37(7): 957.

[9] Davidge R W, Green T J. The strength of two-phase ceramic/glass materials [J]. *J Mater Sci*, 1968, 3: 629.

[10] Davidge R W, Tappin G. The effective surface energy of brittle materials [J]. *J Mater Sci*, 1968, 3: 165.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net