第 13 卷 第 2 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 13 No. 2
1996 年 5 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA May 1996

金属—陶瓷梯度材料的热弹塑性分析

王继辉 张清杰 吴代华
(武汉工业大学结构工程和工程力学系,武汉 430070)

摘 要 本文对金属-陶瓷梯度材料的稳态热弹塑性行为进行了研究。文中首先采用平均场和自洽弹塑性微观力学方法预测了金属-陶瓷梯度材料的非弹性性能,然后用非线性有限元法计算了材料制备过程中的热弹塑性应力。结果表明,梯度材料的热弹塑性行为对梯度材料的热应力缓和性能有显著影响。

关键词 梯度材料,热弹塑性,热应力缓和,微观力学

金属-陶瓷梯度材料(Functionally gradient materials,简称 FGM)是八十年代中后期发展起来的一种新型复合材料,是一种组分、结构和物性参数都呈连续变化或阶梯变化的高性能材料。由于优异的材料性能和新颖的材料设计思想,受到了世界范围内的广泛重视[1,2]。

由于金属和陶瓷在力学和热膨胀性质上的巨大差异,当采用粉末冶金(P/M)、自漫延高温合成(SHS)和化学沉积(CVD)等技术合成金属-陶瓷梯度材料时,材料内部会产生很高的(残余)热应力,导致金属侧、金属基陶瓷颗粒弥散梯度层和金属-陶瓷渗流梯度层产生塑性变形,从而呈现出非弹性性质。从已合成的金属-陶瓷 FGM 体系(Al_2O_3-Ni,MgO-Ni,ZrO_2-不锈钢等)我们观察到,梯度层的性质对梯度材料的热应力缓和性能、耐热冲击性能和热疲劳性能有明显影响,适当的控制梯度层的非弹性性质可以明显改善材料的高温力学性能。然而,由于金属-陶瓷梯度材料的非线性热应力分析和设计涉及到非线性微观力学和宏观热弹塑性分析,有较大的困难,因此在目前的研究中,大多限于线弹性分析和设计。非线性研究在国际上刚刚开始,涉及金属-陶瓷梯度材料的热弹塑性性质的研究文献极少[3,4]。因此,开展金属-陶瓷梯度材料制备过程中的热弹塑性行为的研究,对合成高性能金属-陶瓷梯度材料的设计、制备具有重要的实际意义和理论价值。

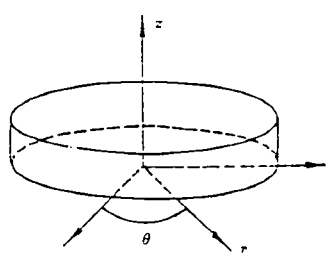


图 1 盘状梯度材料模型

1 热应力分析和设计模型

考虑一盘状金属-陶瓷梯度材料模型(如图 1 所示),其厚度为 6mm,直径为 30mm,共分 11 个梯度层。上面为纯金属层厚度为 0.5mm,下面为纯陶瓷层厚度为 1.0mm,其余各梯度层厚度均为 0.5mm。热载荷取从 1300℃烧结温度冷却至室温(25℃)。中间各梯度层中陶瓷的体积分布规律为[5]

本文于 1995 年 3 月 7 日收到修改稿,1994 年 8 月 5 日收到初稿。国家自然科学基金资助项目

$$c = (x/d)^p \tag{1}$$

式中：c 是任意梯度层中陶瓷的体积分数，x 是相应梯度层的位置，p 是组分分布规律指数。对于不同的 p 值，将有不同的组分分布规律。

用非线性有限元分析梯度材料的热弹塑性行为时，梯度层的热弹塑性应力-应变关系如下：

在弹性区：
$$\Delta\{\sigma\}^i = \{D\}^i(\Delta\{\varepsilon\} - \Delta\{\varepsilon\}_T) \tag{2}$$

在塑性区：
$$\Delta\{\sigma\}^i = \{D\}^i_{ep}(\Delta\{\varepsilon\} - \Delta\{\varepsilon\}_T) \tag{3}$$

式中：$[D]^i$，$[D]^i_{ep}$为第 i 梯度层的宏观弹性和弹塑性刚度矩阵，$\Delta\{\varepsilon\}_T$ 是由温度引起的热应变增量，$\Delta\{\varepsilon\}_T=\{\alpha\}^i\Delta T$，$\{\alpha\}^i$ 为第 i 层的热膨胀列阵。等效节点热载荷为

在弹性区：
$$\Delta T^e = \int [B]^T[D]^i\Delta\{\varepsilon\}_T \mathrm{d}V \tag{4}$$

式中$[B]$为单元应变矩阵；

在塑性区：
$$\Delta T^e = \int [B]^T[D]^i_{ep}\Delta\{\varepsilon\}_T \mathrm{d}V \tag{5}$$

平衡方程式为：
$$[K]\Delta\{\delta\} = \Delta\{T\} \tag{6}$$

式中$[K]$为结构的切线刚度矩阵。

2 梯度材料的弹塑性性能微观力学预测

为了计算梯度材料的热应力，首先需要根据梯度层的微观结构特征用微观力学方法计算梯度层的等效性质。由于梯度材料具有微观结构连续变化（从颗粒弥散结构到渗流结构再到颗粒弥散结构）的特征，梯度材料的热应力计算结果不仅依赖于梯度层的性能而且依赖于微观力学预测方法；不同的预测方法可能导致不同的计算结果。为了评价不同微观力学方法的有效性，本文采用平均场理论和自洽理论预测梯度材料体系的等效弹性和弹塑性性能。

对于颗粒增强弥散型复合材料，Weng 最近发展了一种微观力学理论预测复合材料的宏观弹塑性性质。该理论基于 Mori-Tanka 平均场理论、Eshelby 等效原理和 Hill 的多晶体塑性理论，假定金属基体服从塑性变形理论。该理论给出的金属-陶瓷梯度材料的割线体积模量、割线剪切模量的预测公式如下[6]：

$$\frac{k^{s*}}{k_1} = 1 + \frac{f(k_2 - k_1)}{(1-f)\alpha_1^s(k_2 - k_1) + k_1} \tag{7}$$

$$\frac{\mu^{s*}}{\mu_1^s} = 1 + \frac{f(\mu_2 - \mu_1^s)}{(1-f)\beta_1^s(\mu_2 - \mu_1^s) + \mu_1^s} \tag{8}$$

k^{s*} 和 μ^{s*} 分别为复合材料的割线体积模量和割线剪切模量、k_1 和 k_2 分别为基体和增强相的弹性体积模量；μ_1^s 为基体的割线剪切模量，μ_2 为增强相的弹性剪切模量；α_1^s、β_1^s 为文献[6]定义的参数。

自洽理论采用 Nan 等人最近发展的自洽弹塑性微观力学方法[7]预测金属-陶瓷梯度材料的热弹塑性性能。该理论假定金属基体的弹塑性性能服从塑性变形理论，由此导出的金属-陶瓷梯度材料的割线体积模量、割线剪切模量的预测公式如下：

$$(1-f)\frac{k_1 - k^{s*}}{3k_1 + 4\mu^{s*}} + f\frac{k_2 - k^{s*}}{3k_2 + 4\mu^{s*}} = 0 \tag{9}$$

$$(1-f)\frac{\mu_1^s-\mu^{s*}}{\mu_1^s+y^{s*}}+f\frac{\mu_2-\mu^{s*}}{\mu_2+y^{s*}}=0 \tag{10}$$

式中:$y^{s*}=\frac{\mu^{s*}(9k^{s*}+8\mu^{s*})}{6(k^{s*}+2\mu^{s*})}$,$k^{s*}$ 和 μ^{s*} 分别为复合材料的割线体积模量和割线剪切模量,k_1 和 k_2 分别为基体和增强相的弹性体积模量;μ_1^s 为基体的割线剪切模量,μ_2 为增强相的弹性剪切模量。

金属-陶瓷梯度材料的热膨胀系数按热弹性微观力学理论估计[8]:

$$\alpha^*=\alpha_1+(\alpha_2-\alpha_1)\frac{k^*-k_1}{k_2-k_1}\frac{k_2}{k^*} \tag{11}$$

式中:α^*、α_1 和 α_2 分别为复合材料、基体和增强相的热膨胀系数,k^* 为复合材料弹性体积模量。

3　分析结果与讨论

本文对 Al_2O_3/Ni 梯度材料进行了热弹塑性分析。纯陶瓷和纯金属的材料性能分别取为:

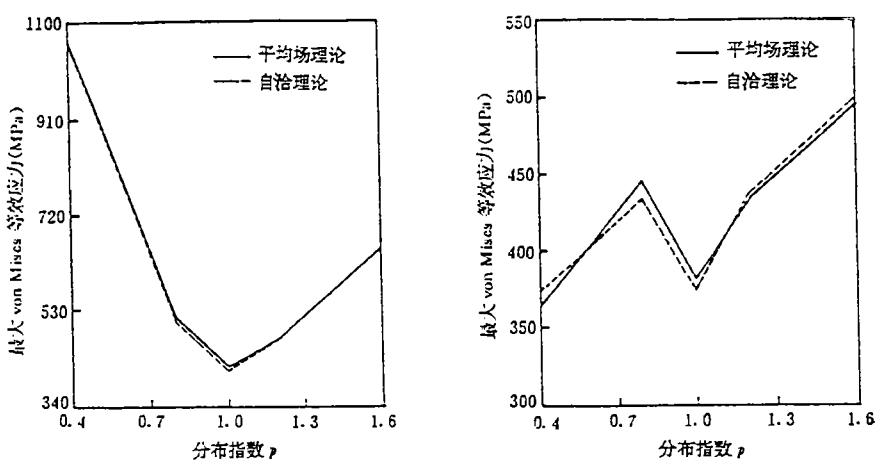
Al_2O_3:　$E=380.0\text{GPa}$,　$\mu=0.25$,　$\alpha=5.40\times10^{-6}\text{K}^{-1}$

Ni:　$E=205.0\text{GPa}$,　$\mu=0.31$,　$\alpha=13.40\times10^{-6}\text{K}^{-1}$,

$\sigma_y=150.0\text{MPa}$,　$H=666.7\text{MPa}$

其中,σ_y 和 H 分别为纯 Ni 的初始屈服极限和线性强化的强化参数。各梯度层的性能参数用第二节所述的弹塑性性能公式预测。

由于所考虑的盘状材料结构对称,载荷也是对称的,因而本文将采用轴对称非线性有限元进行热应力分析。在分析中取柱座标系,坐标原点在陶瓷侧的圆心处,Z 轴取沿厚度方向。节点数为 1525,单元数为 1440,分析结果讨论如下。



(a)　弹性计算　　(b)　弹塑性计算

图 2　两种微观力学方法计算结果的比较

3.1　不同微观力学方法预测结果的比较

图 2(a)和图 2(b)是按平均场理论和自洽理论预测梯度材料体系的等效材料性能,分别考虑弹性和弹塑性二种情况时梯度材料的最大 von Mises 等效应力与分布指数 p 的关系。由图可见,对于不同的分布指数 p,按平均场理论和自洽理论计算的热弹性应力基本一致,热弹塑性应力也基本一致;同时,由两种微观力学方法按最大 von Mises 等效应力所确定的最优分

布指数 p 亦基本一致。

3.2 弹性和弹塑性结果的比较

图 3 是按自洽理论计算梯度材料的最大 von Mises 等效应力与分布指数 p 的关系。由图 3 可见，对于不同的分布指数 p，热弹塑性应力明显低于热弹性应力。如当 $p=0.4$ 时，热弹性最大 von Mises 等效应力为 1053.5MPa，热弹塑性最大 von Mises 等效应力为 384.36MPa，后者比前者降低了 63.51%；当 $p=1.0$ 时，热弹塑性最大 von Mises 等效应力为 408.76MPa，热弹塑性最大 von Mises 等效应力为 372.36MPa，最大 von Mises 等效应力降低了 8.9%。

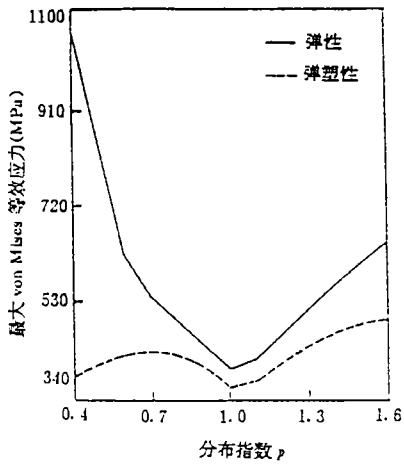
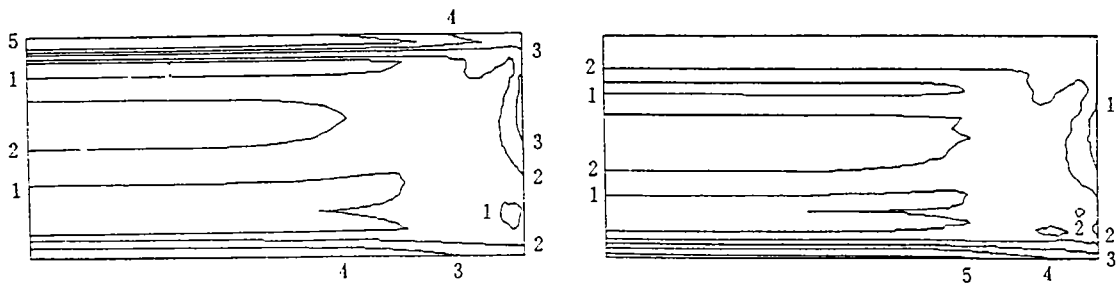


图 3 最大 von Mises 等效应力与分布指数 p 的关系

图 4 是分布指数 $p=0.5$ 时，梯度材料的热弹性与热弹塑性 von Mises 等效应力等值线的比较。由图可以看出，热弹性 von Mises 等效应力的最大值位于金属侧，同时陶瓷侧也有很高的拉应力区域；而热弹塑性 von Mises 等效应力的最大值位于陶瓷侧，而且 von Mises 等效应力的最大值降低了 49.86%；两者对比，可知梯度材料中的热应力分布规律、最大拉应力位置和数值均发生了改变。



(a) 热弹性 von Mises 等效应力等值线 (b) 热弹塑性 von Mises 等效应力等值线

图 4 梯度材料的 von Mises 等效应力等值线

图 5 是分布指数 $p=0.6$ 时，沿模型 $r=7.5$mm 径向剖面处梯度材料的 von Mises 等效应力沿厚度的变化规律。由图可见，热弹性的 von Mises 等效应力沿高度的变化很显著，在金属侧陶瓷侧均有很高的应力峰值；而热弹塑性的 von Mises 等效应力沿高度的变化趋缓，金属侧的应力峰值已经消除，陶瓷侧的应力峰值已经明显降低，热应力得到明显缓和。

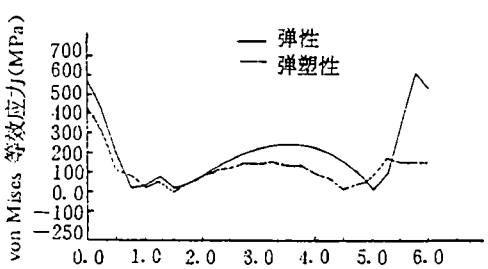


图 5 $r=7.5$mm 处 von Mises 等效应力沿厚度的变化规律

4 结　论

通过 Al_2O_3/Ni 梯度材料的热弹塑性分析,可得如下结论:

(1) 基于平均场理论和自洽理论计算的金属-陶瓷梯度材料的热弹性应力和热弹塑性应力结果基本一致;同时由这两种微观力学理论计算的最大 von Mises 等效应力所确定的梯度材料的最优组成分布也基本一致;

(2) 对于不同的分布指数,金属-陶瓷梯度材料的热弹塑性应力明显低于热弹性应力,即材料的热弹塑性质对梯度材料的热应力有明显的缓和作用;

(3) 梯度材料的热弹塑性质可以改变金属-陶瓷梯度材料中的热应力分布规律和最大拉应力位置,因而可根据热弹塑性能分析结果,合理进行梯度材料设计与制备。

参 考 文 献

1 Yamanouchi M, Koizumi M, Hirai T eds. Proc 1st Int Conf on FGM, Sendai Japan, 1990

2 Holt J B, Munir Z A eds, Proc 2nd Int Conf on FGM, San Francisco, California, 1992

3 Williamson R L, Rabin B H. Numerical modeling of residual stress in Ni-Al_2O_3 gradient materials. Proc 2nd Int Conf on FGM, San Francisco California, 1992. 55～65

4 Pindera M J, Williams T O. Thermoplastic response of metal-matrix composites with homogenized and functionally graded interfaces. Composites Engineering, 1994, 4(1): 129～145

5 王继辉,张清杰,吴代华. 金属-陶瓷梯度材料的优化设计. 见:王震鸣,等主编. 复合材料及其结构的力学进展:第四册. 武汉工业大学出版社,1994,260～270

6 Tandon G P, Weng G J. A theory of particle-reinforced plasticity. ASME Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(3): 126～135

7 Nan C W, *et al*. The elastoplastic behavior of metal/ceramic functionally gradient materials. Ceramic Transactions, 1993, 34: 91～98

8 Wang Jihui, Zhang Qingjie, Deng Jinglan. Micro-macro design of thermal stress of ceramic-metal gradient composite materials. Proc of 9th ICCM: Vol 1. Madria Spain, 1993, 442～447

THERMO-ELASTO-PLASTIC STRESS ANALYSIS OF CERAMIC-METAL GRADIENT MATERIALS

Wang Jihui　　Zhang Qingjie　　Wu Daihua

(Department of Structural Engineering and Engineering Mechanics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract The steady thermo-elasto-plastic behavior of ceramic-metal functionally gradient materials (FGMs) was investigated by considering an Al_2O_3/Ni gradient material. The inelastic properties of the gradient interlayers were first evaluated using mean-field micromechanics and elasto-plastic self-consistent micromechanics method, and then an elastoplastic finite element model was used to calculate the thermal stress in the material. The results show that the thermo - elasto - plastic behavior exerts significant influences on the thermal stress relaxation characteristics of the FGMs.

Key words functionally gradient materials, thermo-elasto-plasticity, thermal stress relaxation, micromechanics