

# 热障涂层材料系统热失配机理分析\*

马 维

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 本文应用复变函数方法分析热障涂层系统在变温环境下热失配机制。考虑了材料性能的温度效应和 Dundurs 参数的作用。确定了热失配应力和失配应变能随温度变化规律。

**关键词:** 热障涂层系统; Dundurs 参数; 温度效应; 热失配应力; 失配应变能

研究表明<sup>[1-4]</sup>热循环加载条件下热障涂层层裂和剥离破坏行为主要由热失配现象引起。因此正确认识不同相材料间失配机理对改善材料性能和结构优化具有重要意义。He 等人<sup>[5]</sup>和 Evans<sup>[6]</sup>的研究表明热障涂层的失配应力与第一 Dundurs 参数密切相关, 第二 Dundurs 参数的作用并不明显。这些研究没有考虑材料性能的温度效应。本文通过复变函数分析得到温度相关的热失配应力和失配应变能的解析表达式, 研究温度效应对失配机理的影响, 并对结果进行讨论。

热障涂层材料的失配现象由材料热物理性能产生。Dundurs 参数反映了各材料单元间材料性能不同产生的失配机理<sup>[7]</sup>

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\mu}(\kappa_1+1) - (\kappa_2+1)}{\bar{\mu}(\kappa_1+1) + (\kappa_2+1)}; \bar{\beta} = \frac{\bar{\mu}(\kappa_1-1) - (\kappa_2-1)}{\bar{\mu}(\kappa_1+1) + (\kappa_2+1)} \quad (1)$$

其中,  $\bar{\mu} = \mu_i/\mu_i$  是剪切模量之比, 均为温度的函数。平面应力情形  $\kappa_i = 3-4\nu_i$ , 平面应变情形  $\kappa_i = (3-\nu_i)(1-\nu_i)$  ( $i = 1, 2$ ),  $\mu_i$  和  $\nu_i$  分别是剪切模量和泊松比。

按照 Muskhelishvili<sup>[8]</sup>和 Gatewood<sup>[9]</sup>的复变理论可证明两个材料单元间的失配应力存在如下复变函数关系

$$\Sigma^{(1)} = A_1 \Sigma^{(2)} + A_2 \Omega^{(2)} \quad (2)$$

$$\Omega^{(1)} = B_1 \Sigma^{(2)} + B_2 \Omega^{(2)}$$

其中:  $\Sigma^{(i)} = 4 \operatorname{Re}[\varphi^{(i)}(z)] - \omega_i T^{(i)}(z)$  (3)

$$\Omega^{(i)} = 2 \operatorname{Re}[\bar{z}\varphi^{(i)}(z) + \psi^{(i)}(z) - \omega_i \bar{W}^{(i)}(\bar{z})]$$

方程(2)中两式分别表示材料单元(2)的复球应力  $\Sigma^{(2)}$  和复偏应力  $\Omega^{(2)}$  对材料单元(1)的复球应力  $\Sigma^{(1)}$  和复偏应力  $\Omega^{(1)}$  产生的影响, 其中球应力中包含温度项, 偏应力中热函数  $\bar{W}^{(i)}$  项。两式右边项的系数反映了相应各项间的影响程度, 这里称为失配应力影响因子。并有

$$A_1 = \frac{1+\bar{\alpha}-2\bar{\beta}}{1+\bar{\alpha}}; A_2 = \frac{2(\bar{\alpha}-\bar{\beta})}{1+\bar{\alpha}} \quad (4)$$

$$B_1 = \frac{2\bar{\beta}}{1+\bar{\alpha}}; B_2 = \frac{1-\bar{\alpha}+2\bar{\beta}}{1+\bar{\alpha}}$$

利用  $\Sigma$  和  $\Omega$ , 材料单元的应变能可分解成体积应变能和形变应变能两部份, 即

$$U^{(1)} = C_1 \Sigma^{(2)2} + C_2 \Sigma^{(2)} \Omega^{(2)} + C_3 \Omega^{(2)2} \quad (5)$$

其中应变能影响因子为

$$C_1(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\mu}) = \frac{1}{8\mu} \left( \frac{1-\nu}{1+\nu} A_1^2 + B_1^2 \right)$$

$$C_2(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\mu}) = \frac{1}{4\mu} \left( \frac{1-\nu}{1+\nu} A_1 A_2 + B_1 B_2 \right) \quad (6)$$

$$C_3(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\mu}) = \frac{1}{8\mu} \left( \frac{1-\nu}{1+\nu} A_2^2 + B_2^2 \right)$$

图 1 是常温环境下材料单元(2)的球应力和偏应力对材料单元(1)球应力产生的影响。失配应力影响因子

\*国家自然科学基金项目(10672166, 10632100)资助

作者简介: 马维 (1960), 男, 副研究员, 研究方向: 爆炸力学、冲击动力学和材料热力学性能; E-mail: watwm@imech.ac.cn

$A_1$  和  $A_2$  均随第一 Dundurs 参数的变化明显。图中示意给出热障涂层三个界面处失配参数的影响区域。可见材料失配在 Pt-Al 合金与  $Al_2O_3$  氧化层界面产生的影响最为明显。这个结果与通常观察到材料在该界面发生层离和剥离破坏的实际情况相符。图 2 为不同温度环境下失配应变能影响因子  $C_1$  和  $C_2$  随 Dundurs 参数的变化。同样看到第一 Dundurs 参数的作用明显，而且存在明显的温度效应。随温度升高失配现象逐渐减弱。这点与材料制备条件有关。

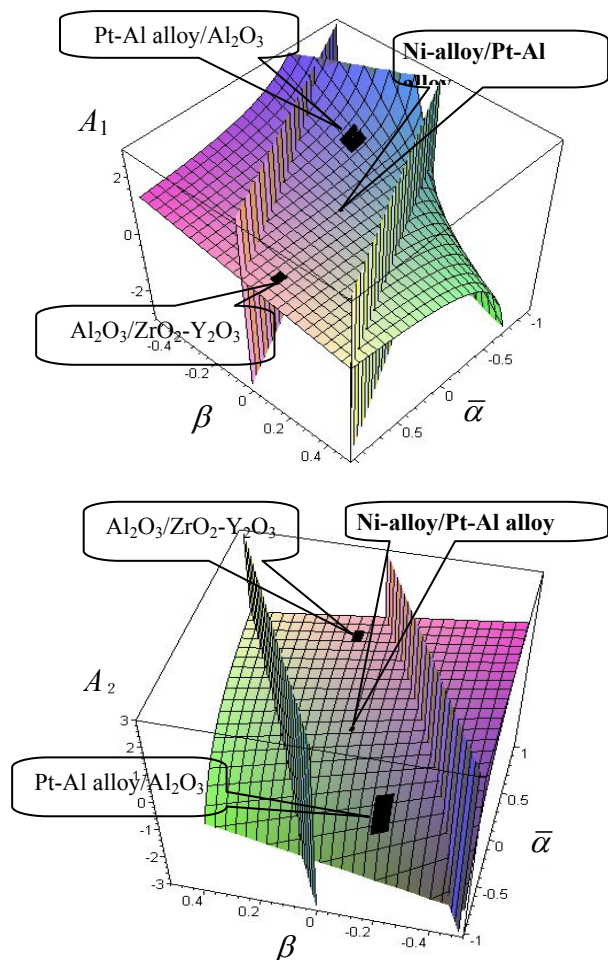


图 1 常温环境下失配应力影响因子  $A_1$  和  $A_2$  随 Dundurs 参数的变化。

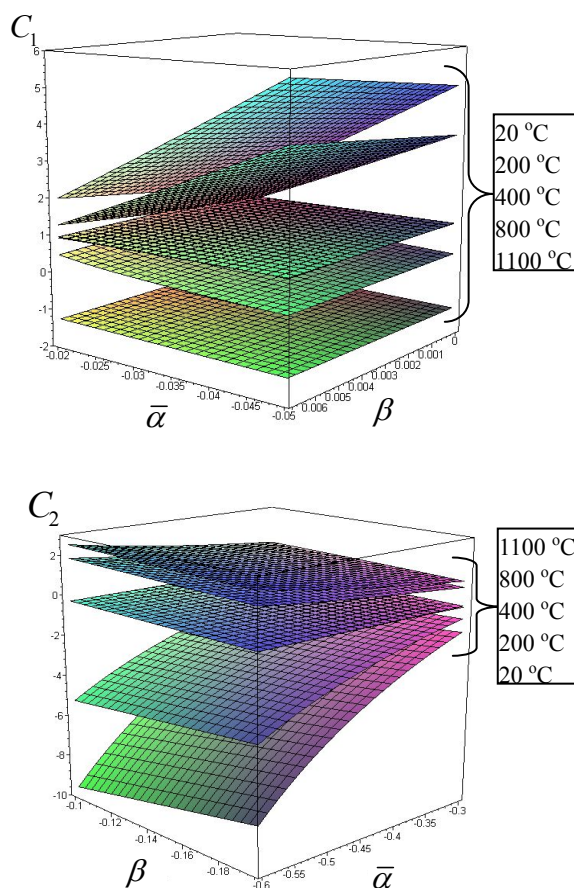


图 2 不同温度环境下失配应变能影响因子  $C_1$  和  $C_2$  随 Dundurs 参数的变化。

### 参考文献

- [1] Howard S.J, Tsui Y.C, Clyne T.W. *Acta. Metall. Mater.* 1994, Vol. 42: 2823-2836
- [2] Suhir E. *J. Appl. Mech.*, 1989, Vol. 56:595-600
- [3] Sou Z. *Appl. Mech. Rev.*, 1990, Vol.43. No.5: S276-S279
- [4] Hutchinson J. W, Suo Z., *Adv. Appl. Mech.*, 1991, Vol. 29: 63-191
- [5] He M. Y, Hutchinson J. W. *J. Appl. Mech.*, 1989: Vol 56: 270-278
- [6] Evans A.G, Hutchinson J. W. *Acta. Metall.*, 1989, Vol. 37: 909-916
- [7] Dundurs, J., *J.Comp. Mater.*, 1967, Vol. 1, 310-322,.
- [8] Muskhelishvili, N. J. P. Noordhoff, Ltd. Groningen, Holland, 1953
- [9] Gatewood, B. E., McGraw Hill Book Co., Inc., New York, 1957