

颗粒增强复合材料的界面效应

解海鸥^{*1}, 魏悦广²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京, 100080; 2. 中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘要: 在颗粒增强金属基复合材料的实验中, 人们发现了比较明显的强度依赖颗粒尺寸的尺度效应, 然而由于传统塑性理论中不包含任何尺度参量, 因此不能解释这种现象。目前比较系统的解释这种尺度效应的理论主要是应变梯度理论, 但是人们在计算中没有考虑界面的损伤及开裂, 理论预测结果与实验结果存在着一定的偏差。本文采用基于 Huang 等人的低阶塑性应变梯度理论发展的有限元方法, 模拟颗粒增强金属基复合材料的力学行为, 在分析中考虑了颗粒与基体间界面的开裂。将有限元结果与实验结果进行了比较, 两者比较符合, 同时也预测了材料的特征尺度参量的取值。

关键词: 尺度效应; 塑性应变梯度理论; 颗粒增强复合材料; 界面开裂

1 问题的描述

本文中, 采用 Huang^[1]等人的低阶塑性应变梯度理论, 利用胞元简化模型^[2], 并采用图(1)中面力与开裂位移之间的粘聚力关系模拟界面开裂过程, 对颗粒增强复合材料的力学行为进行了模拟。计算中采用 Huang 等人的 CMSG (基于机制的应变梯度传统理论)——一种低阶塑性应变梯度理论。分析时首先将基本问题作无量纲化处理, 然后进行数值求解。针对两种颗粒体积百分比, 15%和 50%, 研究其应力应变关系的变化特征, 并将结果应用于预测 Al/SiC_p 复合材料的实验及对实验结果进行解释。

2 低阶塑性应变梯度理论

Huang 等人提出的低阶塑性应变梯度理论的本构关系为:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij} &= \frac{\dot{\sigma}_{kk}}{9K} \delta_{ij} + \frac{\dot{\sigma}_{ij}}{2\mu} + \frac{3\dot{\varepsilon}}{2\sigma_c} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_y \sqrt{f^2(\varepsilon^p) + l\eta^p}} \right)^m \sigma_{ij}' \\ \eta^p &= \sqrt{\frac{1}{4} \eta_{ijk}^p \eta_{ijk}^p} \\ \eta_{ijk}^p &= \varepsilon_{ik,j}^p + \varepsilon_{jk,i}^p - \varepsilon_{ij,k}^p \\ L &= 18\alpha^2 \left(\frac{\mu}{\sigma_y} \right)^2 b \end{aligned} \quad (1)$$

上式中的 m 是率相关指数, 该值为零对应传统弹塑性理论, 计算中 m 取为 20, 类似于粘塑性模型, η^p 是等效塑性应变梯度, L 是材料的特征尺度参量, α 是 Taylor 参数, b 是材料的 Burgers 矢量。有限元变分方程及边界条件与传统弹塑性理论时的情况完全相同。

作者简介: *解海鸥 (1981), 女, 山西人, 学生, 硕士, 固体力学专业 (Email: scagull_122@163.com);

魏悦广 (1960), 男, 陕西人, 研究员, 学位委员会副主任, 固体力学专业。

3 材料模型以及有限元方法

3.1 刻划构元的独立形状参数

构元尺寸可由形状比和无量纲颗粒尺寸两个独立参数刻划^[3]:

$$A = \left(\frac{3k}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{V_p^{1/3}}{L}, B = \frac{A}{k}, R = \left(\frac{k}{2\pi f_p}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{V_p^{1/3}}{L}, H = \frac{R}{k} \quad (2)$$

L 是材料的尺度参数, f_p 是颗粒体积百分比, V_p 是颗粒体积, k 是形状比。其余字母所代表的尺寸, 如图 (2) 所示。本文计算中取 $k=1$, 也就是说颗粒为球状的。

3.2 界面关系

界面的粘聚力刻划关系见图(1), 在计算中, 考虑了如下两种代表性界面情况:

$$\text{体积百分比是 15\% 情况下的界面关系值为: } \sigma_0 = \sigma_y, \delta_1 = 0.033L, \delta_c = 2L \quad (3)$$

$$\text{体积百分比是 50\% 情况下的界面关系值为: } \sigma_0 = 5\sigma_y, \delta_1 = 0.00625L, \delta_c = 0.2L \quad (4)$$

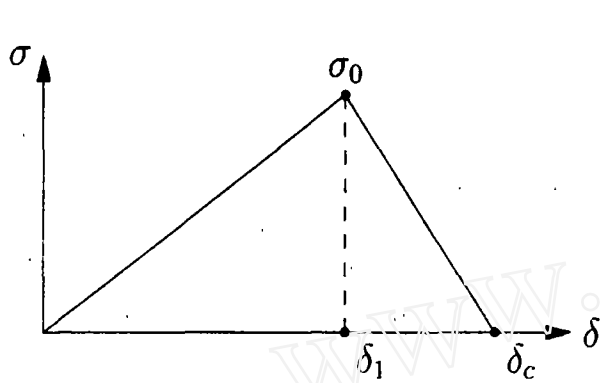


图 1 界面关系

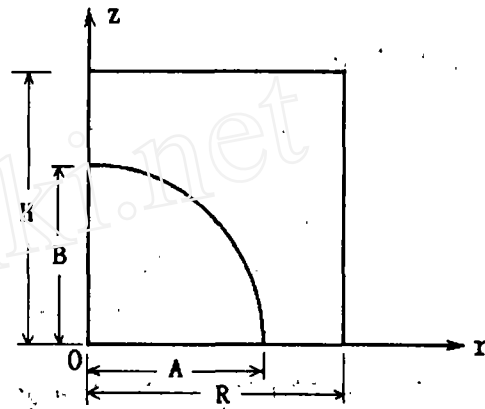


图 2 几何构形

3.3 材料参数

根据本文所考虑的实验材料, Al/SiCp, 在计算时取

$$\begin{aligned} E/\sigma_y &= 365, \nu = 0.33, \nu_p = 0.17 \\ E_p/E &= 5.6 \end{aligned} \quad (5)$$

对于基体, 单向拉伸的应力应变关系可由下式刻划:

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \begin{cases} \frac{E\varepsilon}{\sigma_y} & \varepsilon \leq \frac{\sigma_y}{E} \\ \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_y}\right)^{0.136} & \varepsilon > \frac{\sigma_y}{E} \end{cases} \quad (6)$$

3.4 采用的单元

对于基体以及颗粒材料均采用八节点减缩积分, 为了模拟界面开裂, 界面间用 Cohesive (粘聚力) 单元来模拟界面开裂。

3.5 边界条件

根据构元的对称性和周期性变形协调条件, 采用如下边界条件^[3]:

$$\begin{aligned}
 u_z &= 0 & T_r &= 0 & z &= 0 \\
 u_z &= \text{const} & T_r &= 0 & z &= H \\
 u_r &= \text{const} & T_z &= 0 & \int_0^H T_r dz &= 0 & r &= R \\
 u_r &= 0 & T_z &= 0 & r &= 0
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

4 计算结果

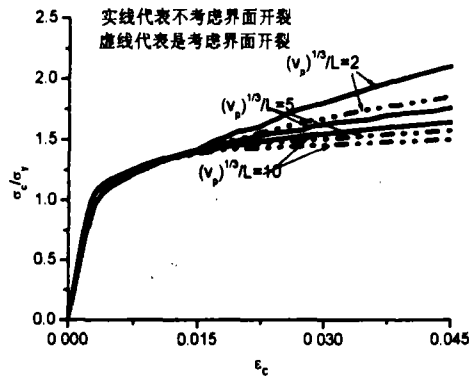


图3 颗粒体积百分比为15%的总体应力应变曲线

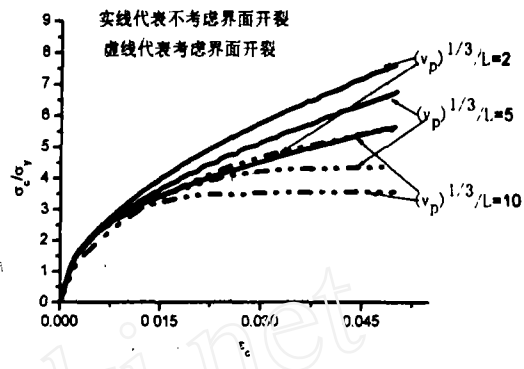


图4 颗粒体积百分比为50%的总体应力应变曲线

图3, 图4分别给出了颗粒体积百分比是15%和50%时, 材料参数相同, 颗粒尺度不同的情况下, 考虑界面开裂, 以及不考虑界面开裂时, 材料的应力应变曲线图。从图中我们可以看到, 尺度越小, 材料的强度越高, 也就是所谓的尺度效应。考虑界面开裂与不考虑界面开裂相比, 在应变比较大的时候, 曲线明显偏低, 比较平缓。

5 计算结果与 Al/SiCp 实验结果的比较

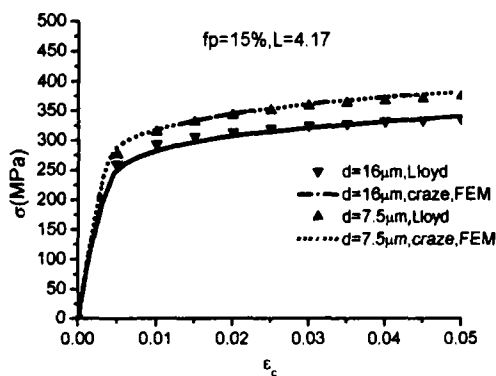


图5 计算得到的应力应变曲线与 Lloyd 实验的比较

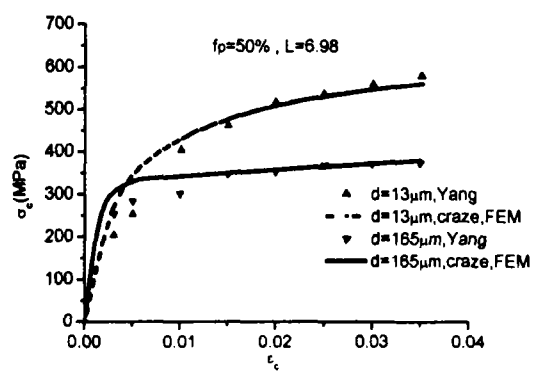


图6 计算得到的应力应变曲线与 Yang 实验的比较

图5和图6分别给出了计算结果与 Lloyd^[4]实验和 Yang 等^[5]人实验结果的比较, 我们可以看到考虑界面开裂以后的计算结果与实验结果吻合的比较好, 说明了在应变比较大的时候, 材料界面出现开裂, 导致材料强度减弱。同时, 通过对比也给出了材料特征尺度参量的取值, 如图中所示。

6 结论

通过本文的计算, 不仅展示出随着颗粒尺度的减小材料强度增大的已有结果, 而且也指出了在应变比较大的时候, 考虑界面开裂的应力应变曲线比理想界面时的应力应变曲线偏低, 符合实际情况。在与实验结果的比较中, 我们发现与以往的理想界面的结果相比, 考虑界面开裂的计算结果与实验结果更加吻合。同时在计算数据与实验结果的比较中, 进一步揭示出材料特征参量 L 的大小依赖于颗粒体积百分比。

参考文献

- [1] Y.Huang, Qu S, Hwang K C, etc. A conventional theory of mechanism-based strain gradient plasticity [J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20: 753~782.
- [2] G BAO. etc . Particle reinforcement of ductile matrices against plastic flow and creep [J]. Acta Metall Mater, 1991, 39(8):1871~1882.
- [3] Wei Yueguang . Particulate size effects in the particle-reinforced metal-matrix composites [J]. Acta Mechanica Sinica , 2001, 17(1):45~58.
- [4] Lloyd D J. Particle-reinforced aluminum and magnesium matrix composites [J] . Int Mater Rev, 1994, 39:1~23.
- [5] Yang J , Cady C , Hu M S, et al. Effects of damage on the flow strength and ductility of a ductile Al-alloy reinforced with SiC particulates[J]. Acta Metall Mater, 1990, 38:2613~1318.