

几何特征对 SiC 颗粒增强 Al 基复合材料力学行为的影响

徐尊平, 程南璞, 强 华, 陈志谦

(西南大学, 重庆 400715)

摘 要: 利用有限元方法建立三维模型分析 SiC 颗粒在不同形状、不同体积分数和不同尺寸时对 Al 基复合材料力学行为的影响, 并进行拉伸试验研究。结果表明, 颗粒形状比颗粒尺寸和颗粒体积分数对材料的应力、应变分布及材料韧性的影响大。颗粒尖角附近有严重的应力集中现象, 在外力方向上颗粒端部附近的基体上的应变也有集中现象。随颗粒角度的减小, 颗粒的应力很快增大而韧性减小, 材料的弹性模量有增大的趋势。随颗粒体积分数的增大, 颗粒的应力有减小趋势, 材料的弹性模量呈增大趋势。颗粒尺寸较小时(平均尺寸为 5 μm), 颗粒尺寸对材料的应力及应变的影响小。

关键词: SiC 颗粒; Al 基复合材料; 三维模型; 力学性能

中图分类号: TG 333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)11-1974-04

颗粒增强金属基复合材料因其优良的综合性能, 而得到广泛关注^[1]。近年来许多研究者致力于寻找改善金属基复合材料的塑性和韧性的途径, 从基体金属、增强体形貌、含量或时效条件等因素入手来分析它们对复合材料力学性能和断裂机制的影响^[2]。研究结果表明, 增强体颗粒尺寸对复合材料的拉伸强度、压缩强度、硬度、韧性、高温蠕变、可压缩性性能均有相当程度的影响^[2,3]。为了了解增强体与基体间的相互作用, 产生了不同的复合材料强度模型, 其中有限元法是其中的一种。文献[4,5]分析了颗粒形状对颗粒增强金属基复合材料热残余应力的影响。本研究采用三维有限元模型分析增强体颗粒形状、体积分数和颗粒尺寸对材料应力和应变分布的影响, 并对复合材料进行了拉伸试验研究。

1 有限元模型

采用三维模型来分析增强体 SiC 颗粒对材料性能的影响。假设增强体颗粒均匀分布在合金基体中, 整个材料是由这样的单胞周期性排列组成。颗粒和基体的界面结合是理想的, 在变形过程中颗粒是完好无损的。由于形状的对称性, 只建 1/8 模型, 颗粒为球形时的模型如图 1 所示。颗粒角度分别取 180°、120°、90° 和 60° 4 种类型, 颗粒粒度取 3~7 μm , 颗粒与基体的体积分数分别取 10%、12%、14%、16% 和 18%。材

料性能参数见表 1 所示。

2 有限元结果与分析

只考虑基体和增强体之间载荷转移引起的强化效应而不考虑颗粒断裂时, 由颗粒增强引起复合材料屈服强度的预估公式^[6]可表示为

$$\sigma_y(f) = (1 + 1.17f + 2.28f^2 + 21.0f^3)\sigma_{yAL} \quad (1)$$

表 1 材料性能参数

Table 1 Parameters of materials

Material	Elastic Modulus/GPa	Poisson's ratio	Yield Strength/MPa	Shear Modulus/GPa
6066Al	70	0.33	315	26.3
SiC	450	0.17		179.5

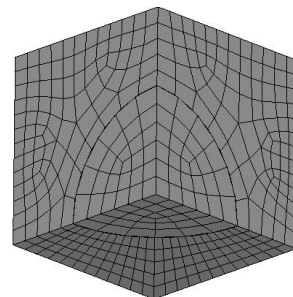


图 1 有限元模型

Fig.1 FEM model of composites

收稿日期: 2008-10-26

基金项目: 西南大学校青年基金资助项目(SWUQ2006002); 西南大学校发展基金资助项目(SWUF2007107)

作者简介: 徐尊平, 男, 1976 年生, 硕士, 讲师, 西南大学材料科学与工程学院, 重庆 400715, 电话: 023-68253204, E-mail: xzpl6213@163.com

式中, $\sigma_y(f)$ 为复合材料的屈服强度, f 为颗粒的体积分数, σ_{yAL} 为基体的屈服强度。

由式(1)计算可得: 体积分数为 10% 时, 复合材料的屈服强度约为 370 MPa。在外力为 400 MPa, 体积分数为 10%, 颗粒形状不同时, 材料的应力分布如图 2 所示。由图 2 可以看出, 在颗粒的尖角附近有严重的应力集中, 尖角度越小, 应力集中程度越大, 即颗粒越易断裂。颗粒角度为 60° 时, 最大应力值达 2760 MPa, 此应力远大于颗粒的抗拉极限应力。随颗粒角度的减小, 在外力方向上颗粒端部附近的基体相应位置的应变值也会增大。

颗粒形状对材料应力和应变有很大的影响。如果材料中有大部分是小角度颗粒并沿某一方向排列, 当外部拉伸力作用在此方向时, 材料的韧性将会大大降低, 甚至在很小的外力下, 在颗粒尖角处会产生开裂^[4]。

文献[7]报道, SiC 颗粒与 Al 合金基体的界面粘结强度达到 1~2 GPa, 远高于 SiC 和 Al 合金自身的强度, 所以室温时 SiC 颗粒与 Al 合金基体的粘结状态很好。在变形过程中由于 SiC 颗粒与 Al 合金基体的弹性和塑性变形性能不同而导致应力在界面集中。

SiC 颗粒的脆性比 Al 合金基体要大, 室温时, 在外力作用下大尺寸和小角度 SiC 颗粒首先发生开裂。在沿变形方向 SiC 颗粒在末端处有着更大的应力集中, 孔洞和裂纹主要产生于此, 然后传播蔓延到基体, 裂纹彼此相连而导致材料的最终断裂。颗粒角度比颗粒尺寸对颗粒断裂的影响更大。文献[8]报道, 基体强度影响复合材料的断裂形式, 基体强度越高, 颗粒越易开裂。体积分数为 10% 时, 颗粒上最大应力值和基体上最大应变值与颗粒角度的关系如图 3 所示。

在外力相同, 颗粒形状不同时, 颗粒的应力值有很大变化, 大角度颗粒的应力分布较均匀, 小角度颗粒的长径比(长度/厚度)较大, 外力方向与颗粒方向平行时, 应力在尖角处严重集中, 应力发生转移。因此, 在实际制作复合材料时, 应把颗粒经钝化处理, 尽量使颗粒成大角度的多角形状, 这利于增强材料的综合力学性能。多角度颗粒比球形颗粒对材料的增强性好^[9]。研究表明, 消除过小的颗粒尖角并没有减小其增强性还增加了材料的韧性。

球形颗粒粒度为 5 μm , 在不同体积分数时, 颗粒上的最大应力值及基体上最大应变值如图 4 所示。

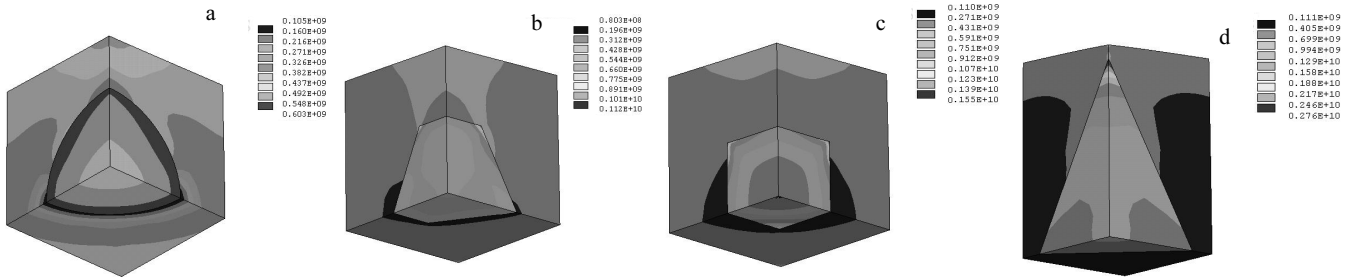


图 2 材料的应力等直线图

Fig.2 Contour of the equivalent stress distribution: (a) 180°, (b) 120°, (c) 90°, and (d) 60°

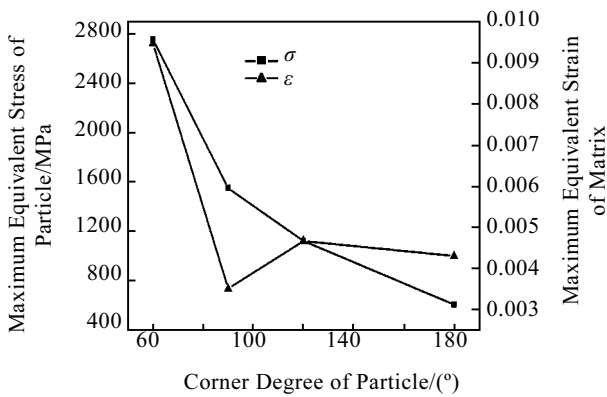


图 3 最大应力和应变与颗粒角度的关系

Fig.3 Variation of equivalent stress of particle and equivalent strain of matrix with corner degree of particle

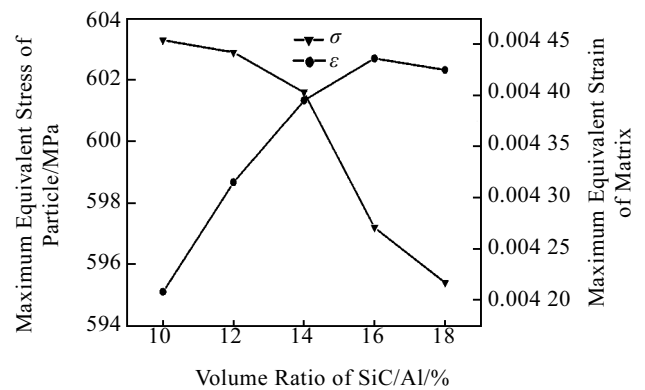


图 4 最大应力和应变与颗粒体积分数的关系

Fig.4 Variation of equivalent stress of particle and equivalent strain of matrix with volume fraction of SiC/Al

随颗粒体积分数的增大，应力有减小的趋势，但变化很小。体积比越大，意味着能分担基体应力的颗粒数量增多，则单个颗粒所承担的应力就越小。体积分数对基体的应变影响也较小。

颗粒尺寸对颗粒的应力及基体应变的影响如图 5 所示。由于颗粒尺寸很小(平均尺寸 5 μm)，颗粒尺寸对颗粒的应力及基体应变的影响均较小。

一般认为颗粒增强复合材料的力学性能随增强体颗粒尺寸的增大而降低^[10-12]。随颗粒体积分数的增加和颗粒尺寸的增大材料的韧性降低，当颗粒尺寸很小时对韧性的影响很小，颗粒的聚集也会减小其韧性。

随颗粒角度的减小，材料的弹性模量有增大趋势(图 6)。这可能是由于小角度颗粒的存在，对复合材料起到增强的原因。随颗粒的体积分数增加，弹性模量有增大趋势。

图 7 为不同含量 SiC/Al 复合材料的拉伸断口。由图 7 可见，基体合金的韧窝较规则，撕裂棱上的韧窝较小。在复合材料的断口中，韧窝大而少，基体撕裂棱上的小韧窝较少，有 SiC 颗粒被拉断痕迹，说明其塑性要比基体合金的低。随颗粒的体积分数增加，拉伸断裂后的塑坑较大，且存在有少量 SiC 颗粒团聚现象，这对材料的韧性不利。

颗粒体积分数为 12%时，复合材料在峰值时效热处理后的力学性能如表 2 所示。从表 2 可见，实测的 12%SiC/6066Al 复合材料的屈服强度远高于式(1)的预测值，式(1)并不能预测增强颗粒粒径的影响，同时也不能解释 SiC 颗粒存在对可热处理强化合金的时效强化影响。6066Al 合金是可热处理强化合金，在复合材料中，由于 SiC 颗粒的存在，基体中的位错密度大大增加，同时基体晶粒细化，界面增强，这为时效沉淀过程提供了大量的非均匀形核场所及形核所需的驱动力。这是表 2 中实验用复合材料的屈服强度远高于式(1)预估的主要原因^[13]。

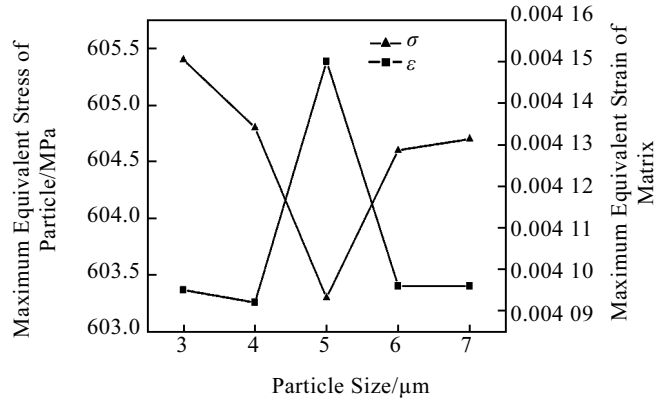


图 5 最大应力及应变与颗粒尺寸的关系

Fig.5 Variation of equivalent stress of particle and equivalent strain of matrix with particle size

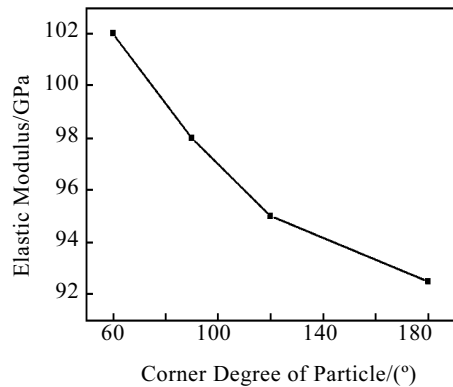


图 6 材料的弹性模量与颗粒角度的关系

Fig.6 Variation of elastic modulus with corner degree of particle

表 2 复合材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of the composites

Elastic Modulus/GPa	Yield Strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation to failure/ %
92.7	425	524	6.5

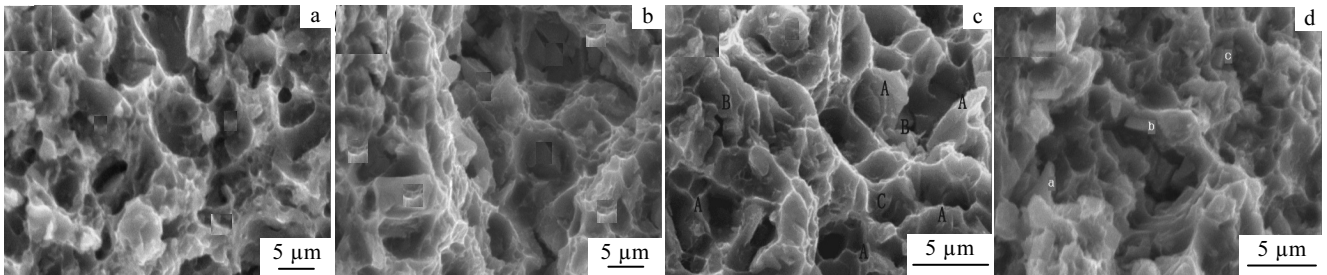


图 7 不同含量 SiC/Al 复合材料的拉伸断口形貌

Fig.7 Fractured surface of composites: (a) Al matrix,(b) 10%SiC/Al, (c) 12%SiC/Al, and (d) 15%SiC/Al

3 结 论

1) 材料的应力及应变对颗粒角度比颗粒尺寸及颗粒体积分数更敏感, 由于尖角的存在, 在颗粒尖角附近存在严重的应力集中现象, 外力方向上颗粒端部附近的基体上存在应变集中现象。

2) 在不大的外力下, 小角度颗粒的应力已非常大, 远大于自身的抗拉强度, 从而降低材料的韧性。颗粒角度越大, 应力及应变的集中程度越小, 材料的性能越好, 但球形颗粒对材料的增强性较差。

3) 实际制作复合材料时应把颗粒经钝化处理, 消除过小的尖角, 同时保留一定角度也是材料增强的因素。随颗粒角度的减小及体积分数的增加, 复合材料的弹性模量有增大的趋势。当颗粒尺寸很小时(平均尺寸为 5 μm), 颗粒尺寸对材料的应力及应变的影响小。

参考文献 References

- [1] Divecha A P, Fishman S G, Karmarkar S D. *Journal of Metals*[J], 1981, 33(9): 12
- [2] Li Dingqiang(酃定强) *et al. Journal of Shanghai Jiaotong University*(上海交通大学学报)[J], 2000, 34(3): 342
- [3] Li Xia(李 侠), Chen Kanghua(陈康华), Huang Dawei(黄大为) *et al. Aluminium Fabrication*(铝加工)[J], 2006(2): 9
- [4] Shuyi Qin, Changrong Chen, Gouding Zhang *et al. Materials Science and Engineering*[J], 1999, 279(2): 363
- [5] Mchuge P E, Connolly P. *Computational Materials Science*[J], 1994(3): 199
- [6] Wo Dingzhu(沃丁柱). *Composite Cyclopedia*(复合材料大全)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000
- [7] Flom Y, Arsenaault R J. *Materials Science Engineering*[J], 1986, 77: 191
- [8] Fan Jianzhong(樊建中), Xiao Bolü(肖伯律), Zuo Tao(左 涛) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报) [J], 2006, 16(2): 228
- [9] Xu Na(徐 娜), Zong Yaping(宗亚平), Zhang Fang(张 芳) *et al. Journal of Northeastern University*(东北大学学报)[J], 2007, 28(2): 213
- [10] Yang J, Cady C, Hu M S *et al. Acta Metallurgica Materialia* [J], 1990, 38: 2613
- [11] Hu M S. *Scripta Metallurgica et Materiala*[J], 1991, 25: 695
- [12] Doel T J A, Bowen P. *Composites Part A*[J], 1996, 27A: 655
- [13] Cheng Nanpu(程南璞). *Ph D Thesis*[D], Changsha: Zhongnan University, 2007

Effect of Geometrical Characteristic on the Mechanical Behavior of SiC Particle Reinforced Aluminum-Matrix Composites

Xu Zunping, Cheng Nanpu, Qiang Hua, Chen Zhiqian
(Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: A three-dimension finite element model (FEM) was used to analyze the effect of particles with different shapes, volume fractions and particle sizes on the mechanical properties of SiC particle reinforced aluminum-matrix composites. The results show that the particle shape has greater effect on the stress of particle, the strain of matrix and the ductility of composites than that of the particle size and volume fraction. There are serious stress concentration round the particle corner and strain concentration in the matrix adjacent to the particle corners along the load. The stress increases quickly, the ductility decreases and the elastic modulus increases with decreasing the particle corner degree. The stress decreases and the elastic modulus increases with increasing the volume fraction of SiC particles. The particle size has little effect on the stress and strain of the composites with small particle size.

Key words: SiC particle; Al aluminum-matrix composites; three-dimension FEM model; mechanical property

Biography: Xu Zunping, Master, Lecturer, School of Materials Science and Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, P. R. China, Tel: 0086-23-68253204, E-mail: xzp16213@163.com