

文章编号: 1000-3851(2010)03-0128-06

# 颗粒性态的随机性对 SiC<sub>p</sub>/6061Al 复合材料棘轮行为影响的有限元分析

邵雪娇<sup>1,2</sup>, 康国政<sup>\*1</sup>, 郭素娟<sup>1</sup>, 张娟<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 力学与工程学院, 成都 610031; 2. 中国核动力研究设计院 反应堆系统设计技术国家重点实验室, 成都 610041)

**摘要:** 采用复合材料细观有限元分析方法, 并借助先进循环塑性本构模型的有限元实现, 对颗粒性态的随机性对 SiC 颗粒增强 6061Al 复合材料棘轮行为的影响进行了有限元数值模拟。采用随机序列吸附方法(RSA)生成各种多颗粒随机分布的模型, 探讨了颗粒分布方式、数目、形状和大小以及各自的随机性对复合材料棘轮行为的影响。研究发现: 颗粒尺寸越小、数目越多、分布在基体表面的比例越大, 颗粒的增强效果越好; 颗粒的大小和空间位置分布越均匀, 复合材料抗循环变形的能力越强; 球形颗粒和均匀分布的假设可以得到很好的模拟结果。

**关键词:** 颗粒增强金属基复合材料; 棘轮行为; 随机性; 有限元分析

**中图分类号:** TB331; O344.1 **文献标志码:** A

## Finite element analysis for effects of stochastic properties of particles on ratcheting of SiC<sub>p</sub>/6061Al composites

SHAO Xuejiao<sup>1,2</sup>, KANG Guozheng<sup>\*1</sup>, GUO Sujuan<sup>1</sup>, ZHANG Juan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Reactor System Design Technology, Design of Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China )

**Abstract:** Based on the mesoscopic finite element model of particle reinforced composites, the effects of stochastic properties of SiC particles on the ratcheting behavior of SiC<sub>p</sub>/6061Al composites were numerically analyzed by employing a 3D multi-particulate unit cell and using an advanced cyclic plastic constitutive model. In the simulation, a 3D multi-particle unit cell containing the stochastic particle properties was first generated by the random sequential adsorption (RSA) method, and then the effects of the number of particles, the particle arrangement, shape, size and their stochastic distributions on the ratcheting of the composites were discussed by the numerical simulations. The results show that the smaller the particulate size and the higher the proportion of the particles distributing near the surface of matrix as well as the more the number of particulates contained in the unit cell, the higher the resistance to the ratcheting deformation. Meanwhile, the modeled composite with uniform distribution of particle size and location presents higher resistance to the ratcheting deformation than that with random distribution. The assumptions of spherical particle and its uniform distributions in size and location in the 3D unit cell can provide a reasonable simulation to the ratcheting of the particle reinforced metal matrix composites.

**Keywords:** particle reinforced metal matrix composite; ratcheting; stochastic property; finite element method

目前颗粒增强金属基复合材料特别是铝合金基体复合材料已广泛应用于汽车活塞、制动部件、连杆等。尽管已有不少文献<sup>[1-5]</sup>对 SiC 颗粒增强铝合金复合材料的单调拉伸行为进行了实验、理论和有限元模拟方面的研究, 但在工程实际中, 上述构件

通常是受循环载荷的作用, 需要对其循环变形行为有所了解。同时, 材料在非对称应力循环下将产生塑性变形的循环累积现象, 即棘轮效应, 其对工程结构的安全性和寿命评价非常重要, 目前已引起人们的广泛重视<sup>[6-9]</sup>。由于复合材料内微观特征的复

收稿日期: 2009-05-30; 收修改稿日期: 2009-9-02

基金项目: 国家自然科学基金(10802069); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET05-0796)

通讯作者: 康国政, 博士, 教授, 博士生导师, 目前从事复合材料细观力学研究 E-mail: guozhengkang@yahoo.com.cn

会员证号: E63220002GJ

杂性, 许多学者借助有限元手段对其力学性能进行了数值模拟<sup>[10-13]</sup>。大部分的研究都局限于二维的轴对称模型或者颗粒规则分布的单颗粒模型, 但单颗粒单胞在复合材料中的尺寸比例太小<sup>[14-15]</sup>, 不能合理地表征复合材料的微观结构特征, 并且实际的颗粒增强复合材料的增强体形状并不是单一的球形, 而是呈现多种颗粒形状, 它们的分布也不是规则排列的, 其位置和取向通常按照正态或均匀随机分布。另外, 已有的对多颗粒模型的有限元分析<sup>[16-18]</sup>主要集中在对单调加载行为的研究, 对循环变形的模拟研究较少, 尤其是应力控制下的棘轮行为的研究。因此, 非常有必要借助颗粒随机分布的单胞模型来讨论微结构特征对复合材料棘轮行为的影响。

本文中借助已有循环棘轮本构关系<sup>[19]</sup>的有限元实现, 基于随机序列吸附方法(RSA: Random Sequential Adsorption)生成了各种多颗粒随机分布的模型<sup>[20-21]</sup>, 进而讨论了微结构特征如颗粒分布方式、数目、形状、大小对其单拉行为和单轴循环变形行为的影响。

## 1 有限元分析模型

本文中采用三维立方体基体中包含 30 个颗粒的有限元模型, 如图 1(a)所示。设立方体边长为  $H$ , 颗粒的半径为  $r$ , 颗粒的体积分数为  $V_p$ , 颗粒球心的坐标在  $(0, 20)$  之间服从均匀分布, 令  $H = 20\text{mm}$ , 则颗粒半径为  $r^3 = 3H^3V_p / (4n\pi)$ ,  $n$  为增强体的数目, 计算中采用修正的二次四面体单元, 如图 1(b)所示。约束和加载条件为: 在平面  $DCGH$  边界上, 施加  $z$  方向约束, 即  $U_z = 0$ ;  $ABCD$ 、 $BCGF$ 、 $FGHE$  和  $EHDA$  为自由边界, 施加耦合位移约束; 载荷应力或应变施加在面  $ABEF$  上。

图 2(a)为相同大小的球形颗粒的位置服从标准正态分布的有限元模型。图 2(b)为 4 种颗粒都均匀分布的混合模型, 其中包含 8 个球体颗粒、8 个立方体颗粒、7 个圆柱体颗粒以及 7 个椭球体颗粒, 其中椭球体的长轴, 圆柱体的中心轴、立方体与加载方向平行的棱边都近似认为与  $z$  轴正向的夹角正切值呈标准正态随机分布, 圆柱体的长径比为  $1:1$ , 椭球体的长轴  $a$  与短轴  $b$  满足:  $a = 4/(3b)$ , 立方体各边长相等。图 2(c)为 30 个颗粒的位置在  $(0, 20)$  之间均匀分布, 大小在  $(0.5 \sim 3)$  之间均匀分布的复合材料有限元模型。

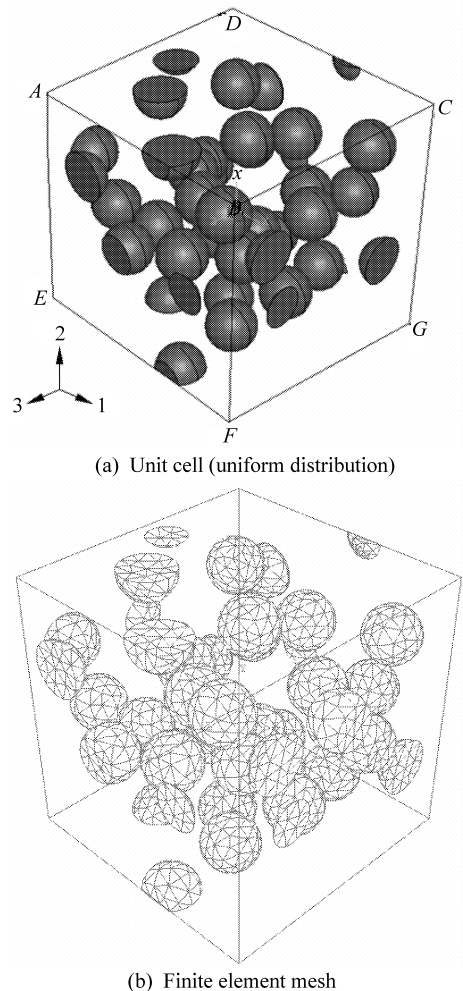


图 1 30 个球形颗粒均匀随机分布的复合材料有限元模型

Fig. 1 Finite element model of composite containing 30 uniform distributed spherical particles

分别对颗粒体积分数为 14% 的 SiC<sub>p</sub>/6061Al 复合材料的单拉行为和循环棘轮行为进行有限元模拟, 该复合材料的微观组织图见文献[22]。模拟中认为: SiC<sub>p</sub> 颗粒为弹性材料, 弹性模量  $E_p = 460\text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.25$ ; 基体为满足文献[19]采用的本构模型和材料参数的弹塑性材料, 且弹性模量  $E_m = 70\text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.31$ , 屈服应力  $206\text{ MPa}$ , 棘轮行为的加载工况:  $25\text{ MPa} \pm 280\text{ MPa}$ , 即轴向平均应力为  $25\text{ MPa}$ 、应力幅值为  $280\text{ MPa}$ 。

## 2 模拟结果和讨论

### 2.1 颗粒分布方式及其随机性的影响

图 3(a)给出了包含 8 个大小相同的颗粒的 3 种有限元模型的单轴棘轮行为模拟结果, 其中 bfe 表示立方体单胞中颗粒分布在体心+面心+边心的规

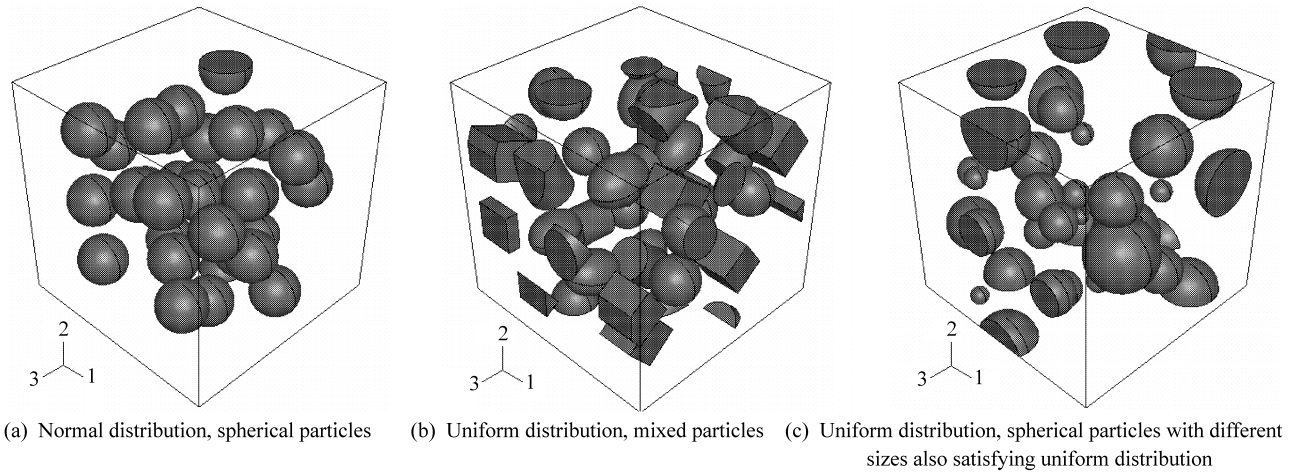


图2 30个不同形状颗粒的复合材料有限元模型

Fig. 2 Finite element model of composite containing 30 particles with different shapes

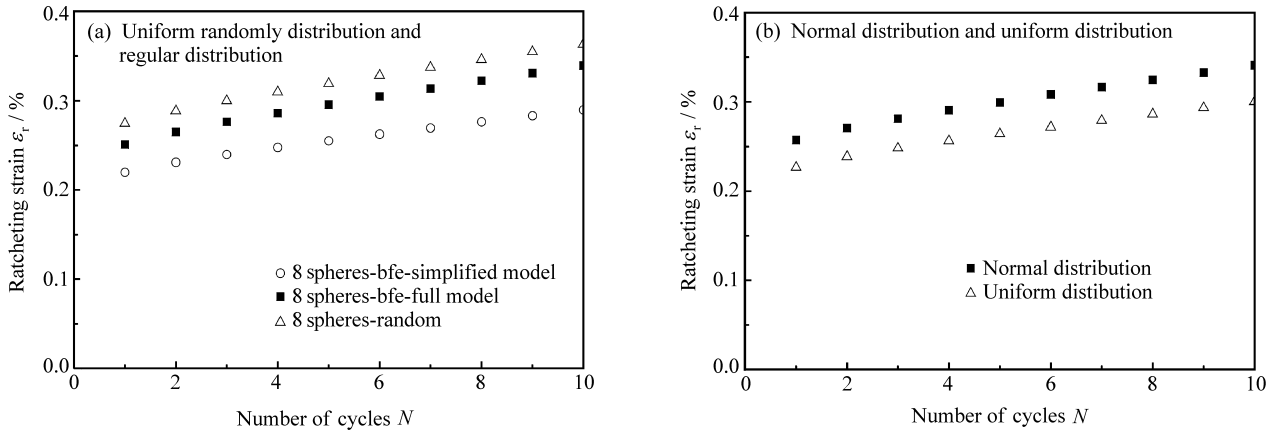


图3 不同分布方式下 SiC<sub>p</sub>/6061Al 复合材料的棘轮行为

Fig. 3 Ratcheting of SiC<sub>p</sub>/6061Al composite with different distributions

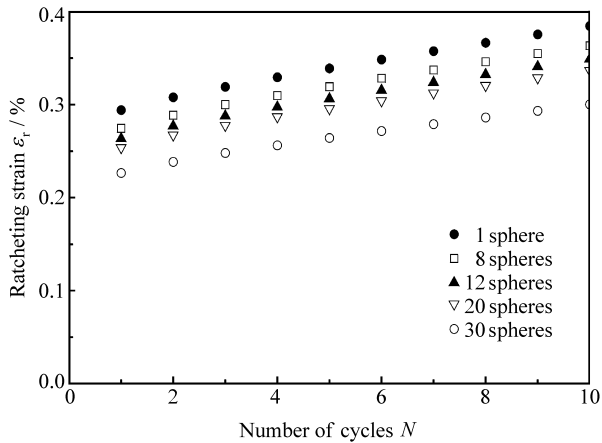
则排列方式<sup>[23]</sup>。可以看出,规则排列的8颗粒模型与其简化模型在棘轮行为上有一定差异,简化模型的棘轮应变要低于全模型。颗粒随机排列模型的棘轮应变值高于规则排列的结果。随机模型中的颗粒大部分聚集在基体内部,少部分与基体相交,而规则排列的简化模型中的颗粒几乎都分布在基体表面,全模型的基体中心包含一个完整的颗粒,其余的也分布在表面,说明分布在基体表面的颗粒越多,棘轮应变越小,复合材料抵抗变形的能力越强。

图3(b)给出了大小相同的颗粒在位置满足2种分布方式(标准正态分布和均匀分布)下棘轮行为的模拟结果。可见,均匀分布的模型抵抗变形的能力要高于正态分布的模型。因为正态分布的模型与均匀分布的模型相比,颗粒出现堆积效应,颗粒密集

地聚集在立方体的中心,致使远离中心位置的基体受到的颗粒增强作用减弱,易产生塑性变形的循环累积,因而体现出更大的棘轮变形。由此可见,颗粒空间位置分布越均匀,其对基体的增强作用越明显。这说明,为了能生产出强度性能好的复合材料,必须注意尽量使增强体分布比较均匀。这与前面分析的颗粒分布在基体表面的比例越大,复合材料抵抗变形能力越强的机制类似。

### 2.2 颗粒数目的影响

图4为颗粒大小相同,颗粒数目依次为1个、8个、12个、20个和30个时模拟的复合材料棘轮行为,该5种有限元模型的颗粒尺寸、颗粒的体积分数、模型的材料参数相同,加载方式和约束方式条件也相同。由模拟结果可见,棘轮应变随着颗粒数目的增加而减小;并且随着循环周次的增加,颗

图4 不同颗粒数目的 SiC<sub>P</sub>/6061Al 复合材料的棘轮行为Fig. 4 Ratcheting of the SiC<sub>P</sub>/6061Al composite with different numbers of particles

粒数目对棘轮行为的影响越明显。这是因为颗粒数目越多, 颗粒间的交互作用效果越能得到充分体现, 颗粒的增强作用越强, 抵抗变形的能力越高。由于 30 个颗粒的模型能较充分地体现复合材料复杂的微观结构特征, 在后续分析中均采用包含 30 个颗粒的有限元模型。

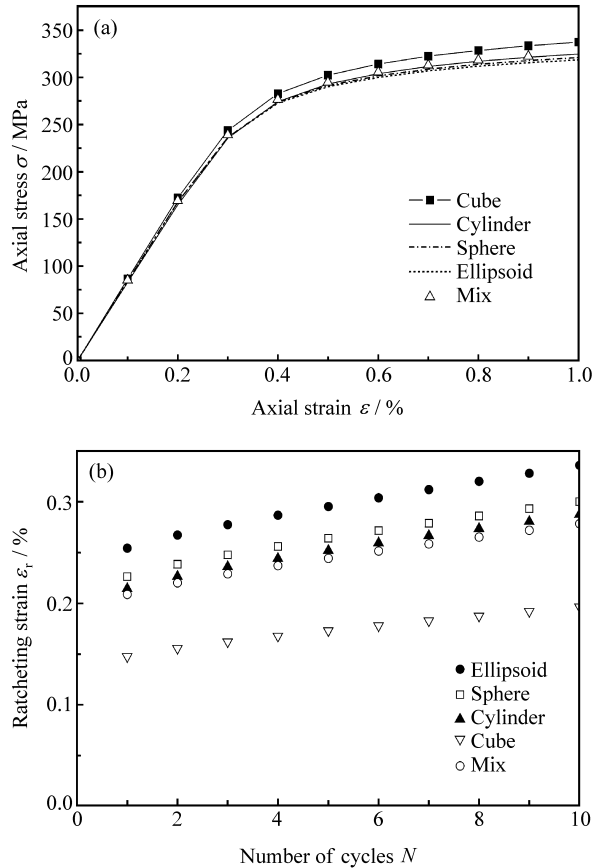
### 2.3 颗粒形状的影响

已有的研究表明<sup>[22]</sup>, 实际的 SiC<sub>P</sub>/6061Al 合金复合材料中 SiC 颗粒的形状并不是单一的球形, 而是呈现多种颗粒形状, 因此, 有必要讨论不同颗粒形状对复合材料力学行为的影响, 特别是对棘轮行为的影响。

图 5 为包含 30 个不同颗粒形状的复合材料的单轴拉伸曲线和棘轮行为模拟结果。由图可见: 椭球颗粒的单轴拉伸应力响应最小, 应力循环下的棘轮应变最大; 其次依次是球形颗粒、圆柱体颗粒(即短纤维)和立方体颗粒, 并且立方体颗粒明显低于其它的颗粒形状。这说明颗粒的边界越尖锐, 其边界附近的局部基体越早发生塑性变形, 颗粒中分担的载荷份额就越大, 其增强作用越明显, 复合材料整体的应变响应越低, 产生的变形量越小。混合形状的多颗粒模型相当于对几种颗粒的增强效果进行平均化, 其棘轮应变与圆柱体和球体颗粒的比较接近。这也就说明球形颗粒具有典型的代表性, 在简化分析中可以直接采用球形颗粒来进行分析。

### 2.4 颗粒大小随机性的影响

图 6 给出了 30 个颗粒的大小有无均匀随机分布变化的复合材料单轴拉伸曲线和棘轮行为模拟结果。由图可见: 考虑颗粒大小随机变化的复合材料

图5 不同颗粒形状的 SiC<sub>P</sub>/6061Al 复合材料的单调拉伸曲线(a)及棘轮演化曲线(b)Fig. 5 Monotonic tensile stress - strain curves (a) and ratcheting evolution (b) of the SiC<sub>P</sub>/6061Al composite with different particle shapes

的棘轮应变相对有所增大。这表明, 颗粒大小的均匀程度直接影响复合材料抵抗变形能力: 均匀度越高, 抵抗棘轮变形的能力越强。对于颗粒增强金属基复合材料, 颗粒的增强作用体现在对载荷的分配上。载荷从基体向颗粒的传递充分与否与颗粒的大小密切相关。也就是说, 有效的应力传递需要一定大小的颗粒尺寸, 颗粒尺寸偏小将影响这一传递过程的充分性, 导致其增强效果下降, 因此, 作为增强体的颗粒尺寸不能偏小。

## 3 结论

(1) 分布在单胞表面的颗粒越多, 复合材料抵抗变形的能力越强, 棘轮应变越小。由于颗粒正态分布的模型中颗粒出现堆积效应, 致使增强作用减弱, 颗粒均匀分布的模型抵抗变形的能力要高于颗粒正态分布的模型。

(2) 由于颗粒数目越多, 颗粒间的交互作用越

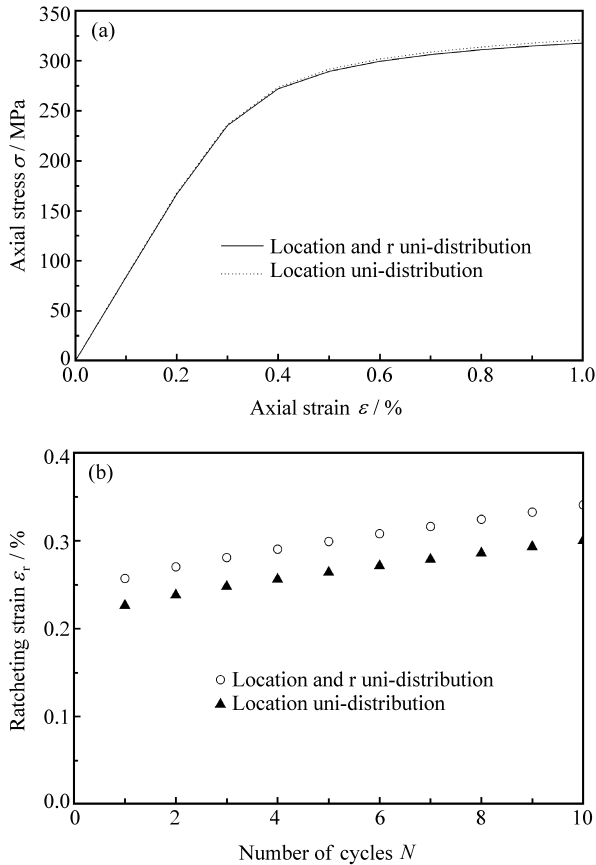


图 6 颗粒大小随机分布的 SiC<sub>p</sub>/6061Al 复合材料的单调拉伸曲线(a)和棘轮演化曲线(b)

Fig. 6 Monotonic tensile stress - strain curves (a) and ratcheting evolution (b) of the SiC<sub>p</sub>/6061Al composite with uniform randomly distributed particle size

有效, 棘轮应变随着颗粒数目的增加而减小; 并随着循环周次的增加, 颗粒数目对棘轮行为的影响越明显。

(3) 多种颗粒形状混合模型的模拟结果与球形颗粒的比较接近, 说明球形颗粒具有典型的代表性, 可以用于简化分析。

(4) 尺寸均匀的颗粒之间的增强效果略高于尺寸变化的颗粒, 因此, 在颗粒复合材料制备过程中应尽可能的保证颗粒大小的一致性。

参考文献:

[1] 袁广江, 章文峰, 王殿斌, 桂满昌, 吴洁君. SiC 颗粒增强铝基复合材料制备及机加工性能研究[J]. 复合材料学报, 2000, 17(2): 38-41.  
Yuan Guangjiang, Zhang Wenfeng, Wang Dianbin, Gui Manchang, Wu Jiejun. Preparation and cutting property of SiC particles reinforced aluminum matrix composite [J]. Acta Mater Comp Sin, 2000, 17(2): 38-41.

[2] 曲寿江, 耿林, 曹国剑, 雷廷权. 挤压铸造法制备可变形 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的组织与性能[J]. 复合材料学报, 2003, 20(3): 69-73.  
Qu Shoujiang, Geng Lin, Cao Guojian, Lei Tingquan. Microstructure and properties of deformable SiC<sub>p</sub>/Al composite fabricated by squeeze casting method [J]. Acta Mater Comp Sin, 2003, 20(3): 69-73.

[3] Masson R, Bornert M, Suquet P, Zaoui A. An affine formulation for the prediction of the effective properties of nonlinear composites and polycrystals [J]. J Mech Phys Solids, 2000, 48(6/7): 1203-1227.

[4] Gonzalez G, Segurado J, Llorca J. Numerical simulation of elasto-plastic deformation of composites; evolution of stress microfields and implications for homogenization models [J]. J Mech Phys Solids, 2004, 52(7): 1573-1593.

[5] Pierard O, Llorca J, Segurado J, Doghri I. Micromechanics of particle - reinforced elasto - viscoplastic composites; Finite element simulations versus affine homogenization [J]. Int J Plasticity, 2007, 23(6): 1041-1060.

[6] Ohno N. Recent progress in constitutive modeling for ratchetting [J]. Mater Sci Res Int, 1997, 3(2): 1-9.

[7] 陈旭, 焦荣, 田涛. 棘轮效应预测及其循环本构模型研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(4): 461-470.  
Chen Xu, Jiao Rong, Tian Tao. Research advances of ratcheting effects and cyclic constitutive models [J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(4): 461-470.

[8] Kang G Z. Ratcheting: Recent progresses in phenomenon observation, constitutive modeling and application [J]. Int J Fatigue, 2008, 30(8): 1448-1472.

[9] Abdel-Karim M. Shakedown of complex structures according to various hardening rules [J]. Int J Press Vessel & Piping, 2005, 82(6): 427-458.

[10] 高庆, 康国政, 杨川, 等. 高温下短纤维增强金属基复合材料界面的微观结构和热残余应力状态研究[J]. 复合材料学报, 2002, 19(4): 46-50.  
Gao Qing, Kang Guozheng, Yang Chuan, et al. Study on the microstructure characteristics and thermal residual stress state of interface in short fiber reinforced composites at elevated temperature [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(4): 46-50.

[11] 柴东朗, 李晓军, 曹利强, 等. 增强相形态对复合材料微区力学状态影响的有限元分析[J]. 应用力学学报, 2004, 21(3): 145-148.  
Chai Donglang, Li Xiaojun, Cao Liqiang, et al. Effect of reinforcement's shape on the local stress field of metal matrix composites [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(3): 145-148.

[12] 邵雪娇, 康国政, 郭素娟. 界面性能对 SiC<sub>p</sub>/6061Al 复合材料棘轮行为的影响[J]. 复合材料学报, 2008, 25(4): 119-125.  
Shao Xuejiao, Kang Guozheng, Guo Sujuan. Effect of interfacial bonding on ratcheting of SiC<sub>p</sub>/6061Al composite

- [J]. *Acta Mater Comp Sin*, 2008, 25(4): 119-125.
- [13] Fleming W J, Temis J M. Numerical simulation of cyclic plasticity and damage of an aluminium metal matrix composite with particulate SiC inclusions [J]. *Int J Fatigue*, 2002, 24(10): 1079-1088.
- [14] Drugan W J, Willis J R. A micromechanics - based nonlocal constitutive equation and estimates of the representative volume element size for elastic composites [J]. *J Mech Phys Solids*, 1996, 44(4): 497-524.
- [15] Drugan W J. Micromechanics-based variational estimates for a higher-order nonlocal constitutive equation and optimal choice of effective moduli of elastic composites [J]. *J Mech Phys Solids*, 2000, 48(6/7): 1359-1387.
- [16] 于敬宇, 李玉龙, 周宏霞, 徐 绯. 颗粒尺寸对颗粒增强型金属基复合材料动态特性的影响 [J]. *复合材料学报*, 2005, 22(5): 31-38.  
Yu Jingyu, Li Yulong, Zhou Hongxia, Xu Fei. Influence of particle size on the dynamic behavior of PMMCs [J]. *Acta Mater Comp Sin*, 2005, 22(5): 31-38.
- [17] Leon L, Mishnaevky J. Three dimensional numerical testing of microstructures of particle reinforced composites [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(14): 4177-4188.
- [18] 金 泉, 覃继宁, 张 荻, 吕维洁. 颗粒和纤维混杂增强复合材料力学性能的三维有限元模拟 [J]. *复合材料学报*, 2006, 23(2): 15-20.  
Jin Quan, Qin Jining, Zhang Di, Lü Weijie. 3-D FEM simulation of mechanical property of composites reinforced by both particles and fibers [J]. *Acta Mater Comp Sin*, 2006, 23(2): 15-20.
- [19] Kang G Z. A visco-plastic constitutive model for ratcheting of cyclically stable materials and its finite element implementation [J]. *Mech Mater*, 2004, 36(4): 299-312.
- [20] Llorca J, Segurado J. Three - dimensional multiparticle cell simulations of deformation and damage in sphere 2reinforced composites [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 365(1/2): 267-274.
- [21] Bohm H J, Eckschlager A, Han W. Multi-inclusion unit cell models for metal matrix composites with randomly oriented discontinuous reinforcements [J]. *Computational Materials Science*, 2002, 25(1/2): 42-53.
- [22] Kang G Z. Uniaxial time-dependent ratcheting of SiC<sub>p</sub>/6061Al alloy composites at room and high temperature [J]. *Comp Sci Tech*, 2006, 66(10): 1418-1430.
- [23] 邵雪娇, 康国政, 郭素娟. 考虑界面结合的 SiC<sub>p</sub>/6061Al 复合材料时间相关棘轮行为的三维有限元分析 [J]. *复合材料学报*, 2009, 26(2): 18-24.  
Shao Xuejiao, Kang Guozheng, Guo Sujuan. 3-D finite element analysis for time-dependent ratcheting of SiC<sub>p</sub>/6061Al composites considering interface bonding [J]. *Acta Mater Comp Sin*, 2009, 26(2): 18-24.