复 合 材 料 学 报　　第22 卷　第5 期　10 月　2005 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 22　No. 5　October　2005

文章编号: 1000-3851(2005) 05-0016-09

颗粒增强复合材料刚塑性细观损伤本构模型的验证

吴国民, 殷雅俊*
(清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘　要: 验证已建立的刚性颗粒增强复合材料刚塑性细观损伤本构理论的合理性和可靠性。将上述本构理论的数值计算结果与SiC 颗粒增强的铝基复合材料单轴拉伸实验结果进行比较。结果表明: 由此本构模型得到的应力 应变理论曲线与拉伸实验所得的应力 应变曲线基本吻合, 从而验证了该本构模型的合理性和可靠性。因此已建立的刚塑性细观损伤本构模型可用于数值计算, 在一定程度上可预测颗粒增强复合材料的力学特性。在此基础上对大、小颗粒增强复合材料的延展性、空洞和颗粒体积分数演化规律等作了讨论。

关键词: 颗粒增强复合材料; 细观损伤; 刚塑性本构理论; 空洞演化
中图分类号: TB 330. 1; TB 331　　**文献标识码**: A

EXAMINATION ON THE RIGID-PLASTIC MESO-DAMAGE CONSTITUTIVE THEORY FOR PARTICLE REINFORCED COMPOSITES

WU Guomin, YIN Yajun*
(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The reasonability and reliability of a rigid-plastic meso-damage constitutive theory were examined for porous composites reinforced by rigid particles. The numerical calculations based on the constitutive theory were compared with the tensile experiments on Al matrix composites reinforced by SiC particles. The results show that the constitutive theory agrees with the experimental stress-strain curves, so this constitutive theory can be put into numerical simulation and predict the mechanics properties of the composites reinforced by rigid particles. Based on the above, the ductility and evolution law for void and particles were discussed in this paper.

Keywords: particle reinforced composites; meso-damage; rigid plastic constitutive theory; evolution law for void

随着近代科学技术的迅速发展, 各生产应用领域对材料的要求也愈来愈高, 不仅要求重量轻, 还要求比强度、比模量高。传统金属材料难以满足这些要求, 于是复合材料应运而生。与传统金属材料和非金属复合材料相比, 金属基复合材料(简称MMC) 具有很多优点: 高比强、高比模、耐高温、导热、导电、热膨胀系数小、尺寸稳定性好。这些优异的综合性能使其在航天、航空、先进武器系统、汽车等领域中有着广阔的应用前景, 并已开始具体应用[1~3]。

金属基体复合材料分为连续纤维增强和非连续增强两大类。后者主要有SiC 晶须(W)、SiC 颗粒(P) 和Al_2O_3 晶须几种增强体, 而且普遍采用铝合金作为金属基体。由于非连续增强的金属基体复合材料具有一系列特点, 因而受到人们更多的重视。

对于颗粒增强金属基体复合材料, 一个关键性的问题就是如何确定所加颗粒的尺寸大小以及体积分数使增强后的复合材料达到最佳的材料特性。因为一方面所加颗粒极大地提高了材料的杨氏模量、屈服强度等参数; 另一方面所加颗粒充当了材料中空洞成核的中心, 在材料变形过程中极大地加速了材料的损伤演化, 从而又降低了材料的延展性和断裂韧度。因此建立一个合理可靠而又实用的本构模型对于颗粒增强复合材料的发展和应用意义重大。

在文献[4~6] 中, Grjue 和Suquet 等人提出了颗粒增强复合材料的屈服函数, 也写出了颗粒增

收稿日期: 2004-11-01; 收修改稿日期: 2004-12-29
基金项目: 教育部归国留学人员基金
通讯作者: 殷雅俊, 教授, 主要从事金属复合材料和生物力学方面的研究　E-mail: yinyj@tsinghua.edu.cn

强复合材料的本构模型，但是由于本构框架中应力和应变率耦合在一起而不便应用于实际工程的数值分析。而在文献[7]中，本文作者以颗粒增强复合材料的屈服函数、塑性流动理论（正交流动法则）、功共轭关系三个支柱推导出了颗粒增强复合材料的刚塑性细观损伤本构模型，该本构理论中通过定义名义等效应力以及名义等效应变率，很巧妙地将本构模型中所有在应力空间表示的物理量均表示在应变率空间中，这样，如果塑性流动的应变场已知，便可立即计算出应力场，刚塑性数值分析即可方便地实现。

在塑性变形占总变形量绝大部分的成形工艺中，忽略弹性变形可简化模型同时保证精度。另外经典的塑性增量理论就以刚塑性的形式出现，所以刚塑性模型具有广泛的应用基础。因此文献[7]中建立的可用于数值计算的颗粒增强复合材料刚塑性细观损伤本构模型有着很重要的实际工程应用意义，但是该本构模型没有经过实验的验证，本文作者的工作即是用一组SiC颗粒增强铝基复合材料的拉伸实验结果[8]来验证此本构模型的合理性和可靠性。

1 两类颗粒增强复合材料的本构理论

文献[7]中的颗粒增强复合材料本构理论分为大颗粒增强本构理论和小颗粒增强本构理论。所谓大颗粒增强是指添加的颗粒粒径比基体晶粒的粒径大，小颗粒增强是指添加的颗粒粒径比基体晶粒的粒径小，两类颗粒增强复合材料的本构模型具体如下。

1.1 屈服函数

在文献[7]中已给出了大颗粒和小颗粒两种类型的颗粒增强复合材料的本构理论，其中，大颗粒增强复合材料的屈服函数[4]为：

$$F^{*}\left(\Sigma_{ij},\sigma_M,f_v,f_P\right)=J_2+\frac{2}{3}(1+cf_P)\,q_1 f_v\,\sigma_M^2\cdot\cosh\frac{q_2}{2}\frac{1+cf_P q_1 f_v}{\sigma_M}\Sigma_{kk}-\frac{1}{3}(1+cf_P)\left[1+(q_1 f_v)^2\right]\sigma_M^2=0 \qquad (1)$$

小颗粒增强复合材料的屈服函数[4]为：

$$F^{*}\left(\Sigma_{ij},\sigma_M,f_V,f_P\right)=J_2+\frac{2}{3}(1+cf_P)\,q_1 f_v\,\sigma_M^2\cdot\cosh\frac{q_2}{2}\frac{1+cf_P}{\sigma_M}\Sigma_{kk}-\frac{1}{3}(1+cf_P)\left[1+(q_1 f_v)^2\right]\sigma_M^2=0 \qquad (2)$$

上述屈服函数中，σ_M为基体微观流动应力；Σ_{ij}是体胞单元所受的宏观Cauchy应力；q_1、q_2和c均为材料常数，其中q_1、q_2反映空洞间相互作用，c用来估算局部流应力。式(1)、式(2)中的颗粒和空洞体积分数分别定义如下：

$$f_v=\frac{V_{Void}}{V_{Matrix}+V_{Void}},\ f_P=\frac{V_{Particle}}{V} \qquad (3)$$

$$f_p=\frac{V_{Particle}}{V_{Matrix}+V_{Particle}},\ f_V=\frac{V_{Void}}{V} \qquad (4)$$

V为体胞单元体积；V_{Matrix}、$V_{Particle}$、V_{Void}分别为基体、颗粒和空洞所占的体积分数，且满足$V=V_{Matrix}+V_{Particle}+V_{Void}$。$f_v$是基体-空洞相的局部空洞体积比；$f_P$是体胞单元的整体颗粒体积比；$f_p$是基体-颗粒相的局部颗粒体积比；$f_V$是体胞单元的整体空洞体积比。由于式(1)、式(2)的屈服函数中同时用到局部体积比和整体体积比，因此在后面的推导和计算中需要用到局部体积比与整体体积比的对应关系：

$$f_v=\frac{f_V}{1-f_P},\quad f_P=\frac{f_P}{1-f_V} \qquad (5)$$

1.2 大颗粒增强复合材料本构模型

在式(1)的基础上，文献[7]中给出了整个大颗粒增强复合材料本构模型的理论框架，其主要的控制方程如下：

$$\dot{E}_{kk}=\frac{3\dot{\bar{\varepsilon}}}{2\bar{\Sigma}_0}\frac{(1+cf_P)\,q_1 f_v q_2}{1+cf_P q_1 f_v}\cdot\sigma_M\sinh\frac{q_2}{2}\frac{1+cf_P q_1 f_v}{\sigma_M}\Sigma_{kk} \qquad (6)$$

$$\dot{E}'_{ij}=\frac{3\dot{\bar{\varepsilon}}}{2\bar{\Sigma}_0}\Sigma'_{ij} \qquad (7)$$

$$\bar{\Sigma}_0=\eta_\sigma\sigma_M,\ \eta_\sigma=\sqrt{1+cf_P\left[1+(q_1 f_v)^2-2q_1 f_v\chi\right]} \qquad (8)$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}}=\eta_\varepsilon\dot{\varepsilon}_M,\ \eta_\varepsilon=\frac{(1-f_V-f_P)\,\eta_\sigma}{\eta_\sigma^2+(1+cf_P)\,q_1 f_v\psi\omega} \qquad (9)$$

对于大颗粒增强复合材料，应力空间和应变率

空间之间的数学变换为:

$$\chi = \cosh\omega = -\ \beta + \quad \beta + \frac{1}{q_1 f_v}\ (\beta + q_1 f_v) \tag{10}$$

$$\psi = \sinh\omega = \pm\ \chi^2 - 1$$

$$= \pm\ \beta \quad \beta + \frac{1}{q_1 f_v} - \quad \beta + q_1 f_v \tag{11}$$

$$\omega = \frac{q_2}{2\ \ 1 + cf_p q_1 f_v} \frac{\sum_{kk}}{\sigma_M} = \ln(\ \chi + \ \psi$$

$$= \ln\ -\ \beta + \quad \beta + \frac{1}{q_1 f_v}\ (\beta + q_1 f_v)$$

$$\pm\ \beta \quad \beta + \frac{1}{q_1 f_v} - \quad \beta + q_1 f_v \tag{12}$$

上式中 $\overline{\sum}_0$、$\dot{\bar{\varepsilon}}$ 分别为名义有效应力和名义有效应变率，其定义式如下:

$$\overline{\sum}_0^2 = \frac{3}{2}\sum_{ij}'\sum_{ij}',\quad \dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{2}{3}\dot{E}_{ij}'\dot{E}_{ij}' \tag{13}$$

其中: $\dot{E}_{ij}$ 为体胞单元的整体应变率; ε_M 为基体应变率; β为广义三轴度函数，其表达式为

$$\beta = \frac{4}{9}\frac{1 + cf_p q_1 f_v}{(1 + cf_p)\ q_1 f_v q_2^2}\frac{\dot{E}_{kk}}{\dot{\bar{\varepsilon}}}^2$$

$$= \frac{1}{4}\frac{(1 + cf_p)\ q_1 f_v q_2^2}{1 + cf_p q_1 f_v} r^2 \tag{14}$$

r 为广义三轴度，其表达式如下:

$$r = \frac{2\ \ 1 + cf_p q_1 f_v}{q_2}\frac{\sinh\omega}{\overline{\sum}_0 / \sigma_M}$$

$$= \frac{4}{3}\frac{1 + cf_p q_1 f_v}{(1 + cf_p)\ q_1 f_v q_2^2}\frac{\dot{E}_{kk}}{\dot{\bar{\varepsilon}}} \tag{15}$$

对于式(11)、式(12)，当 $\sum_{kk} \geq 0$ 时，取“+”; 当 $\sum_{kk} < 0$ 时，取“-”。

1.3　小颗粒增强复合材料本构模型

在式(2)的基础上，文献[7]给出了小颗粒增强复合材料本构模型的理论框架，其主要的控制方程如下:

$$\dot{E}_{kk} = \frac{3\dot{\bar{\varepsilon}}}{2\overline{\sum}_0}\ 1 + cf_p q_1 f_V q_2\ \sigma_M \cdot$$

$$\sinh\frac{q_2}{2\ \ 1 + cf_p}\frac{\sum_{kk}}{\sigma_M} \tag{16}$$

$$\dot{E}_{ij}' = \frac{3\dot{\bar{\varepsilon}}}{2\overline{\sum}_0}\sum_{ij}' \tag{17}$$

$$\overline{\sum}_0 = \eta_\sigma \sigma_M,$$

$$\eta_\sigma = \quad 1 + cf_p \quad 1 + (q_1 f_V)^2 - 2q_1 f_V \chi \tag{18}$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \eta_\varepsilon \dot{\varepsilon}_M,\ \eta_\varepsilon = \frac{(1 - f_V - f_P)\ \eta_\sigma}{\eta_\sigma^2 + (1 + cf_p)\ q_1 f_V \psi\omega} \tag{19}$$

应力空间与应变率空间之间的数学变换为:

$$\chi = \cosh\omega$$

$$= -\ \beta + \quad \beta + \frac{1}{q_1 f_V}\ (\beta + q_1 f_V) \tag{20}$$

$$\psi = \sinh\omega = \pm\ \chi^2 - 1$$

$$= \pm\ \beta \quad \beta + \frac{1}{q_1 f_V} - \quad \beta + q_1 f_V \tag{21}$$

$$\omega = \frac{q_2}{2\ \ 1 + cf_p}\frac{\sum_{kk}}{\sigma_M} = \ln(\ \chi + \ \psi$$

$$= \ln\ -\ \beta + \quad \beta + \frac{1}{q_1 f_V}\ (\beta + q_1 f_V)$$

$$\pm\ \beta \quad \beta + \frac{1}{q_1 f_V} - \quad \beta + q_1 f_V \tag{22}$$

$$\beta = \frac{4}{9}\frac{1}{q_1 f_V q_2^2}\frac{\dot{E}_{kk}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}^2 = \frac{1}{4} q_1 f_V q_2^2 r^2 \tag{23}$$

$$r = \frac{2\ \ 1 + cf_p}{q_2}\frac{\sinh\omega}{\overline{\sum}_0 / \sigma_M}$$

$$= \frac{4}{3}\frac{1}{q_1 f_V q_2^2}\frac{\dot{E}_{kk}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \tag{24}$$

1.4　颗粒和空洞体积分数的演化规律

在本模型中，颗粒体积分数是指嵌在基体材料中未完全脱离基体且还能发挥作用的颗粒所占的体积分数。颗粒和空洞体积分数的演化均由长大和成核两部分组成[7]:

$$\dot{f}_P = (\dot{f}_P)_{Nucleation} + (\dot{f}_P)_{Growth} \tag{25}$$

$$\dot{f}_V = (\dot{f}_V)_{Nucleation} + (\dot{f}_V)_{Growth} \tag{26}$$

且成核项满足:

$$(\dot{f}_P)_{Nucleation} = -\ (\dot{f}_V)_{Nucleation} \tag{27}$$

文中空洞成核采用塑性应变控制成核理论[9]，即:

$$(\dot{f}_V)_{Nucleation} = A\dot{\varepsilon}_M \tag{28}$$

式(28)中的 A 是一个随机变量[10]，可定义如下[11,12]:

$$A = \frac{f_N}{S_N\ \ 2\pi}\exp\ -\ \frac{1}{2}\ \frac{\varepsilon_M - \ \varepsilon_N}{S_N}^2 \tag{29}$$

式中的 f_N 为应变成核的空洞体积分数；ε_N 为成核应变均值；S_N 为标准差。

考虑基体不可压缩，且所加颗粒为刚性微粒，故对于颗粒和空洞的长大项可用下式描述：

$$(\dot{f}_P)_{Growth} = -f_P\dot{E}_{kk} \tag{30}$$

$$(\dot{f}_V)_{Growth} = (1-f_V)\dot{E}_{kk} \tag{31}$$

2 单轴应力下的本构模型

假定颗粒增强复合材料在沿 z 轴方向的单轴拉伸应力作用下，则有：

$$\sum_x = 0,\ \sum_y = 0,\ \sum_z \geq 0,$$

$$\sum_{kk} = \sum_z,\ \overline{\sum}_0 = \sum_z \tag{32}$$

$$\dot{E}_x = \dot{E}_y = \dot{E}_r \leq 0,\ \dot{E}_z \geq 0,$$

$$\dot{E}_{kk} = \dot{E}_z + 2\dot{E}_r,\ \dot{\varepsilon}_M = \frac{2}{3}(\dot{E}_z - \dot{E}_r) \tag{33}$$

2.1 单轴应力下大颗粒增强复合材料本构理论的表达式

根据式(32)、式(33)可得单轴应力作用下大颗粒增强复合材料的本构理论为：

$$\sum_z = \eta_\sigma\sigma_M =$$

$$1+cf_P \quad 1+(q_1 f_v)^2 - 2q_1 f_v \cosh\omega\sigma_M \tag{34}$$

$$\dot{E}_z = \frac{3}{2}\frac{1}{1+\mu\eta_\sigma^2+(1+cf_P)q_1 f_v\omega\sinh\omega}\frac{(1-f_V-f_P)\eta_\sigma}{}\dot{\varepsilon}_M \tag{35}$$

$$\eta_\sigma = \frac{2\quad 1+cf_P q_1 f_v}{q_2}\omega \tag{36}$$

$$\mu = -\frac{\dot{E}_r}{\dot{E}_z} = \frac{1-\frac{1}{2}\frac{(1+cf_P)q_1 f_v q_2^2}{1+cf_P q_1 f_v}r}{2+\frac{1}{2}\frac{(1+cf_P)q_1 f_v q_2^2}{1+cf_P q_1 f_v}r} \tag{37}$$

$$\beta = \frac{1}{4}\frac{(1+cf_P)q_1 f_v q_2^2}{1+cf_P q_1 f_v}r^2 \tag{38}$$

$$r = \frac{\sinh\omega}{\omega} \tag{39}$$

空洞及颗粒体积分数演化规律变为：

$$(\dot{f}_V)_{Nucleation} =$$

$$\frac{f_N}{S_N\ 2\pi}\exp -\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_M-\varepsilon_N}{S_N}^2\dot{\varepsilon}_M \tag{40}$$

$$(\dot{f}_P)_{Growth} = -f_P(1-2\mu)\dot{E}_z \tag{41}$$

$$(\dot{f}_V)_{Growth} = (1-f_V)(1-2\mu)\dot{E}_z \tag{42}$$

式(37)中的 μ 为大颗粒增强复合材料的泊松比；f_v 和 f_V 由式(5)确定。这样，只要基体材料的 σ_M-ε_M 关系式已知，单轴应力作用下的大颗粒增强复合材料的应力-应变特性便可由式(34)～式(42)唯一确定。

2.2 单轴应力下小颗粒增强复合材料本构理论的表达式

根据式(32)、式(33)可得单轴应力作用下小颗粒增强复合材料的本构理论为：

$$\sum_z = \eta_\sigma\sigma_M =$$

$$1+cf_P \quad 1+(q_1 f_V)^2 - 2q_1 f_V \cosh\omega\sigma_M \tag{43}$$

$$\dot{E}_z = \frac{3}{2}\frac{1}{1+\mu\eta_\sigma^2+(1+cf_P)q_1 f_V\omega\sinh\omega}\frac{(1-f_V-f_P)\eta_\sigma}{}\dot{\varepsilon}_M \tag{44}$$

$$\eta_\sigma = \frac{2\quad 1+cf_P}{q_2}\omega \tag{45}$$

$$\mu = -\frac{\dot{E}_r}{\dot{E}_z} = \frac{1-\frac{1}{2}q_1 f_V q_2^2 r}{2+\frac{1}{2}q_1 f_V q_2^2 r} \tag{46}$$

$$\beta = \frac{1}{4}q_1 f_V q_2^2 r^2 \tag{47}$$

$$r = \frac{\sinh\omega}{\omega} \tag{48}$$

$$(\dot{f}_V)_{Nucleation} =$$

$$\frac{f_N}{S_N\ 2\pi}\exp -\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_M-\varepsilon_N}{S_N}^2\dot{\varepsilon}_M \tag{49}$$

$$(\dot{f}_P)_{Growth} = -f_P(1-2\mu)\dot{E}_z \tag{50}$$

$$(\dot{f}_V)_{Growth} = (1-f_V)(1-2\mu)\dot{E}_z \tag{51}$$

f_p 和 f_P 由式(5)确定，同样由式(43)～式(51)可唯一确定单轴应力作用下的小颗粒增强复合材料的应力-应变特性。

3 数值计算结果以及与实验结果的对比

文献[8]中提供了SiC颗粒增强的7075铝合金材料的拉伸实验结果，实验中用于添加的SiC颗粒粒径分别为5 μm、13 μm和60 μm(铝晶粒的粒径为18.3 μm)，各颗粒体积分数见表1。拉伸实验按实

表1 颗粒体积分数

Table 1 The volume fractions of particles

Particle size/ μm	Volume fractions of particles/ %
5 (Small particles)	11
13 (Small particles)	13
60 (Large particles)	17

验试件热处理过程中时效作用的不同被分为三组，分别为峰值时效（即：使得试件屈服应力值最高的时效处理）、过时效（时效处理时间高于峰值时效）和欠时效（时效处理时间低于峰值时效）。为了结果对比更为全面，本文中将三组实验结果分别都与数值计算结果进行了对比。

在数值计算过程中，作为基体的7075 铝合金的应力-应变曲线 $\sigma_M - \varepsilon_M$ 由式(52) 拟合[13]：

$$\sigma_M = \sigma_Y \left(1 + \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_Y}\right)^n + a\varepsilon_M^2 + b\varepsilon_M \qquad (52)$$

上式中的 σ_Y 为基体的屈服应力；ε_Y 为屈服应变；n、a 和b 为可调常数。三组实验结果的拟合参数取值见表2。其他参数 q_1、q_2、c、f_N、ε_N、S_N 参照了文献[4,5,12]中的取值，具体数值见图中标识。

表2　材料参数取值

Table 2　The values of material parameters

Ageing condition	σ_Y/ MPa	ε_Y	n	a/ MPa	b/ MPa
Overaged	458	0.02	0.18	-1250	-350
Peak aged	545	0.026	0.18	-400	-350
Underaged	480	0.017	0.175	-40	-200

三种时效作用下基于本构理论[7]的数值计算所得的应力-应变曲线与实验所得的应力-应变曲线对比结果分别如图1～图3 所示。由图可知，如果材料参数取值合适，基于本构理论[7]的数值计算结果可与大、小颗粒增强的7075 铝合金的拉伸实验结果很好地吻合。因此大颗粒、小颗粒增强复合材料刚塑性细观本构理论得到了很好的验证，即此本构理论可以合理地预测金属基颗粒增强复合材料的力学特性。

另外，一般的材料性能实验只能得到材料变形过程中的应力-应变关系曲线，而基于该本构理论的数值计算除预测颗粒增强复合材料的应力-应变曲线以外还可以得到复合材料在变形过程中的其他有用信息，如空洞和颗粒体积分数、广义三轴度函数以及泊松比等参数的变化曲线，并且由于此本构模型为刚塑性本构模型，因此可以给出较大应变范围里的变化规律。

(1) 图4 给出的分别是三种时效作用下不同粒径的SiC 颗粒增强的7075 铝合金复合材料的空洞体积分数演化曲线。图5 所示的分别是各时效作用下的颗粒体积分数演化曲线。从图4 可以看出，由于空洞的成核和长大，总的空洞体积率随着塑性变形逐步增加。而从图5 可以得知，由于刚性颗粒边界处空洞成核并且颗粒脱离基体形成空洞，残留的颗粒体积率随着塑性变形逐步减少，当塑性

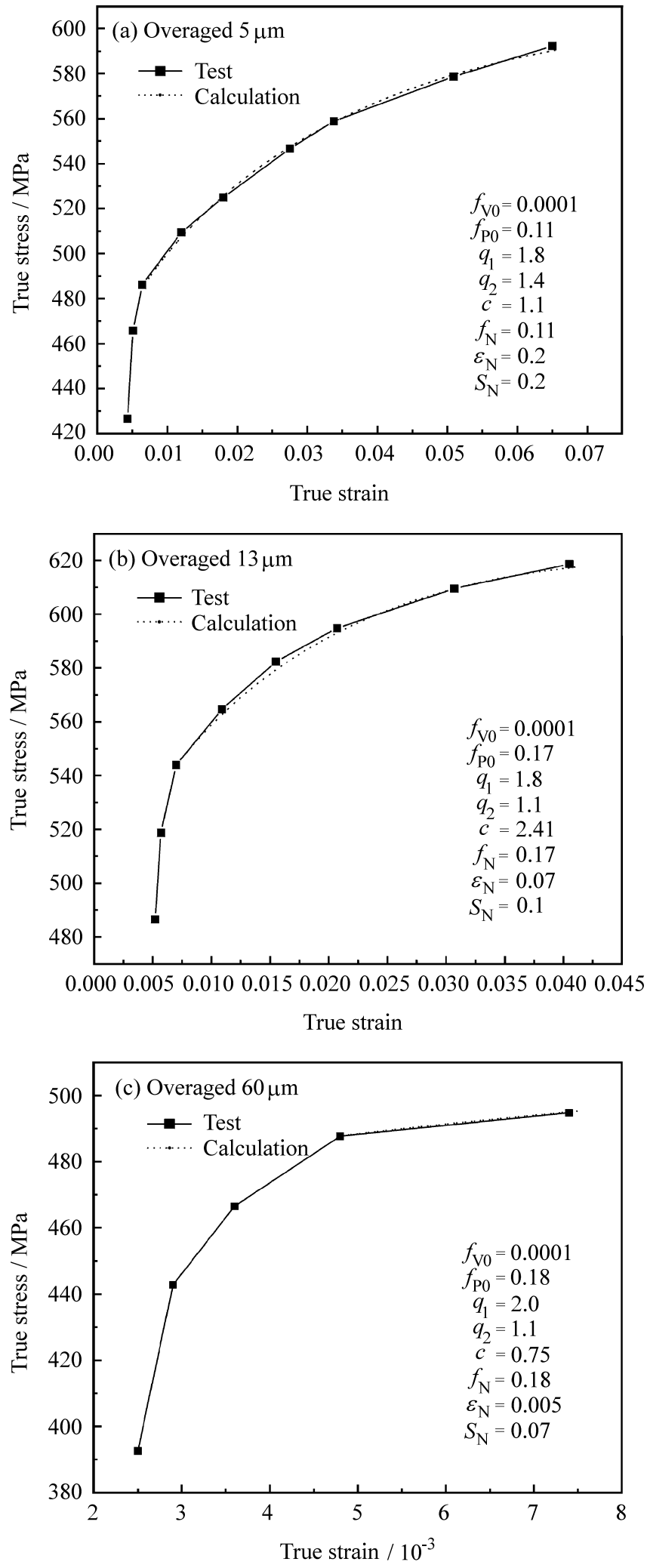

图1　过时效作用下分别由(a) 5 μm、(b) 13 μm 和(c) 60 μm SiC 颗粒增强的7075 铝合金数值计算及实验的应力-应变曲线

Fig. 1　Numerical and experimental stress-strain curves for overaged Al alloy 7075 reinforced by (a) 5 μm, (b) 13 μm and (c) 60 μm SiC particles

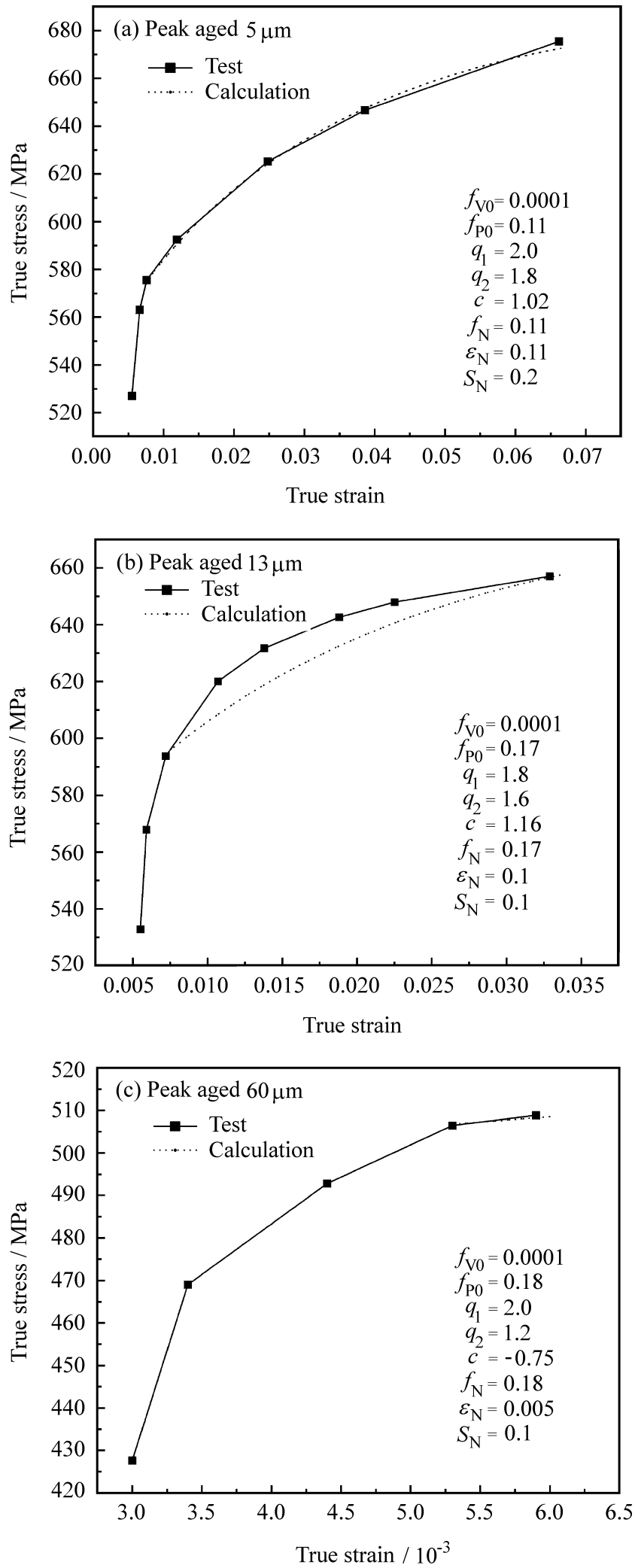

图2　峰值时效作用下分别由(a) 5 μm、(b) 13 μm 和(c) 60 μm SiC 颗粒增强的7075 铝合金数值计算及实验的应力-应变曲线

Fig. 2　Numerical and experimental stress-strain curves for peak aged Al alloy 7075 reinforced by (a) 5 μm, (b) 13 μm and (c) 60 μm SiC particles

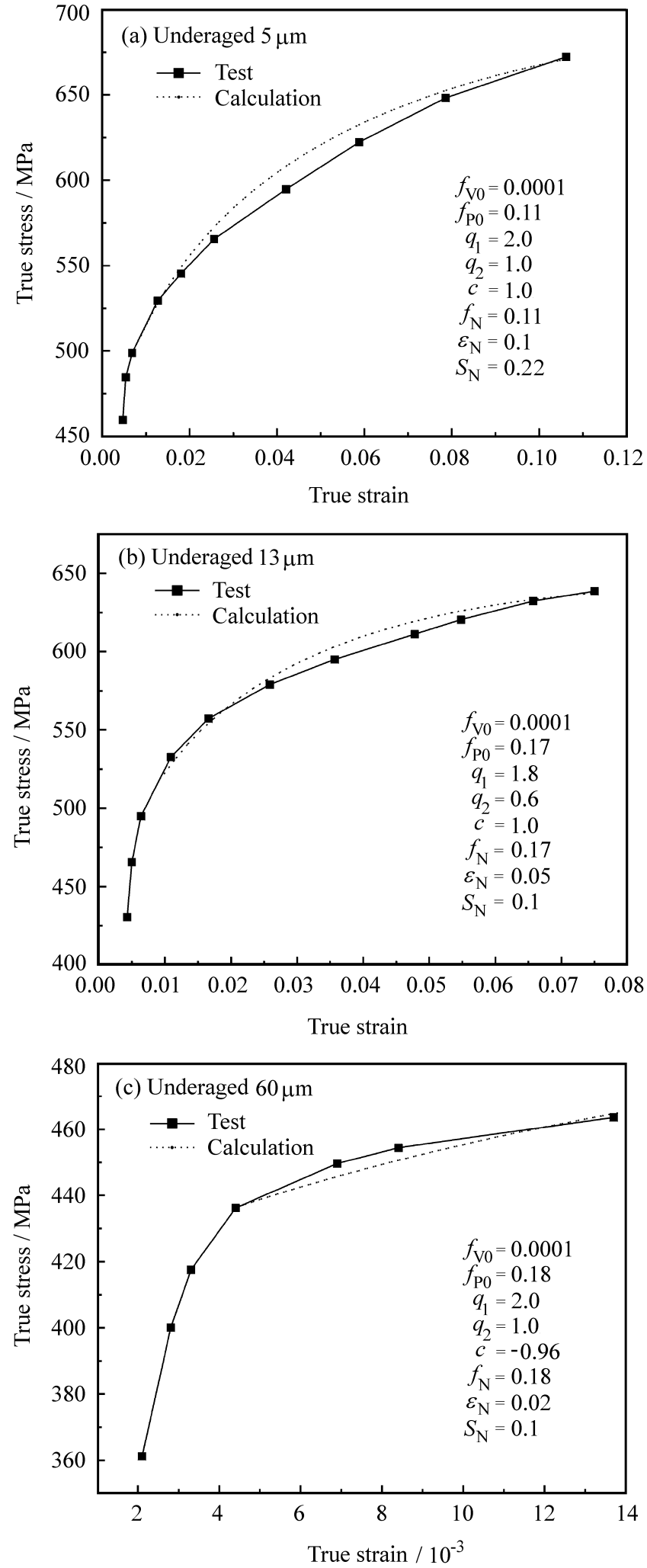

图3　欠时效作用下分别由(a) 5 μm、(b) 13 μm 和(c) 60 μm SiC 颗粒增强的7075 铝合金数值计算及实验的应力-应变曲线

Fig. 3　Numerical and experimental stress-strain curves for underaged Al alloy 7075 reinforced by (a) 5 μm, (b) 13 μm and (c) 60 μm SiC particles

变形足够大时，残留的颗粒体积率将趋向于一稳定值。

(2) 图6 给出的是含有不同颗粒体积分数(5 %、10 %、15 %) 的颗粒增强复合材料单轴拉伸状态下的广义三轴度函数变化曲线。在前面的研究[7] 中，广义三轴度函数被当作是描述多孔材料延展性的物

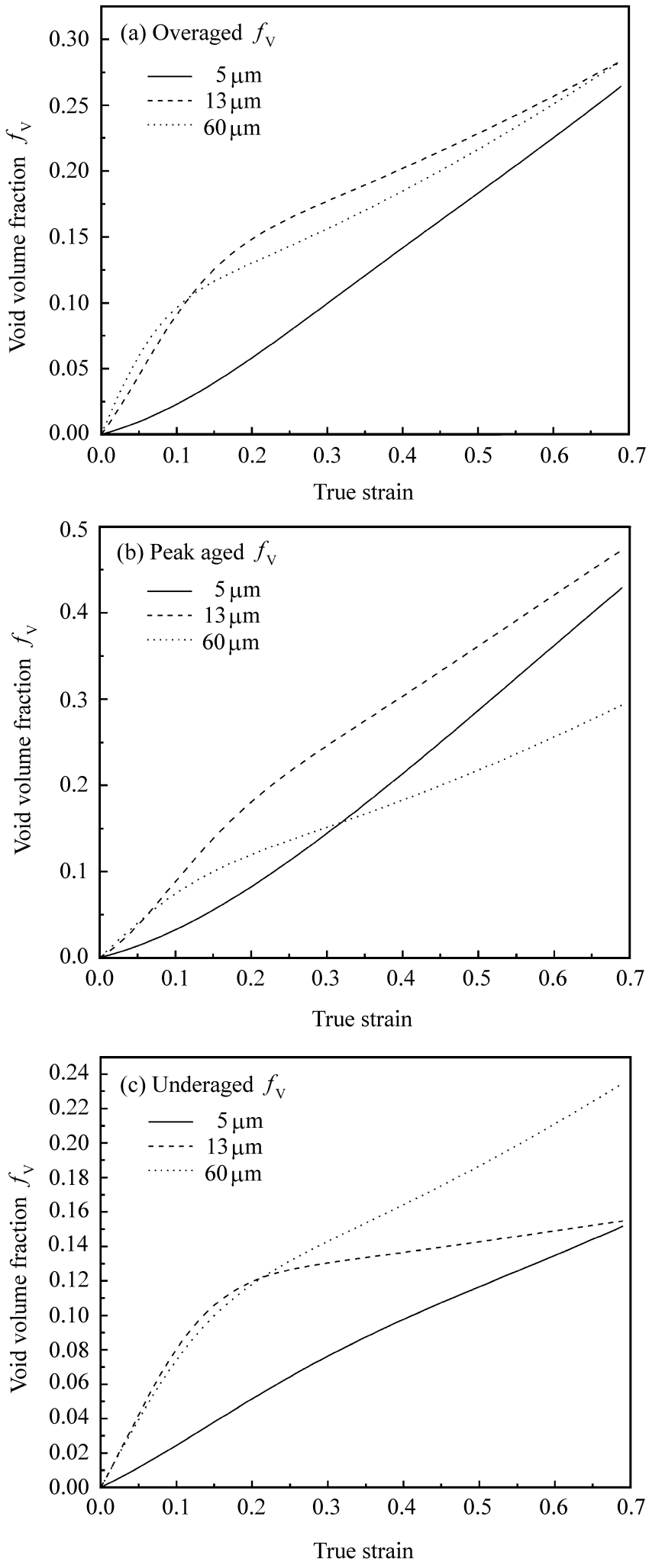

图4　(a) 过时效、(b) 峰值时效、(c) 欠时效作用下分别由5 μm、13 μm 和60 μm SiC 颗粒增强的7075 铝合金空洞体积分数演化曲线

Fig. 4　Simulated void evolution curves for (a) overaged, (b) peak aged and (c) underaged Al alloy 7075 reinforced by 5 μm, 13 μm and 60 μm SiC particles

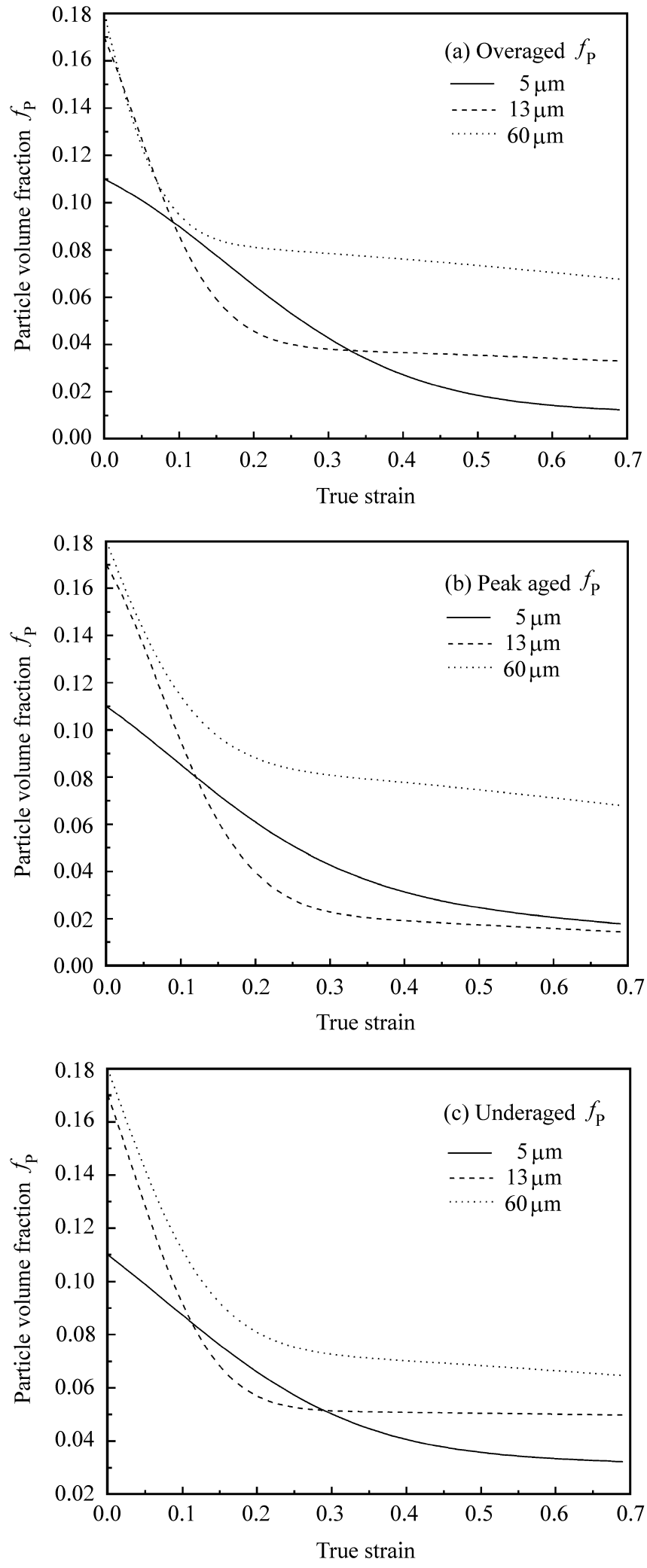

图5　(a) 过时效、(b) 峰值时效、(c) 欠时效作用下分别由5 μm、13 μm 和60 μm SiC 颗粒增强的7075 铝合金颗粒体积分数演化曲线

Fig. 5　Simulated particle evolution curves for (a) overaged, (b) peak aged and (c) underaged Al alloy 7075 reinforced by 5 μm, 13 μm and 60 μm SiC particles

理量，广义三轴度函数越大，材料的延展性越差。从图6 中可以看出，在某一给定的初始空洞体积分数和颗粒体积分数下，小颗粒增强复合材料的延展性明显要优于大颗粒增强复合材料。无论是大颗粒

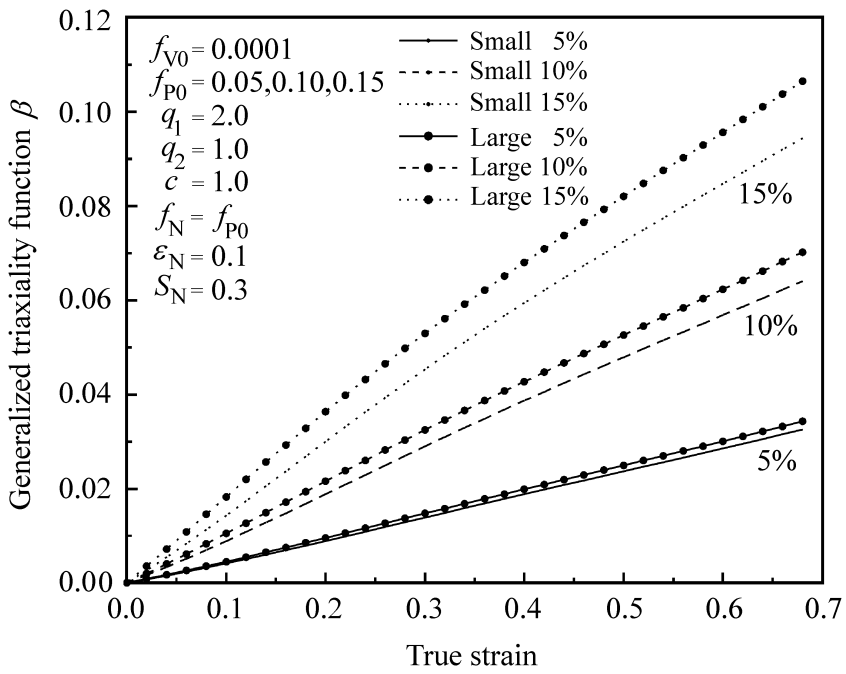

图6 广义三轴度函数变化曲线

Fig. 6 Evolution process of generalized triaxiality functions

增强还是小颗粒增强，初始的颗粒体积率越大，材料的延展性越差。

(3) 图7 给出的是不同颗粒体积含量(5%、10%、15%)的颗粒增强复合材料单轴拉伸状态下的泊松比变化曲线。对于多孔材料，泊松比可以当作是描述材料可压缩性的物理量，泊松比越小，可压缩性越强。从图7 中可以得出以下结论：在某一给定的初始空洞体积率和颗粒体积率下，大颗粒增强材料比小颗粒增强材料可压缩性更强。无论是大颗粒增强还是小颗粒增强，初始颗粒体积率越大，可压缩性越强。

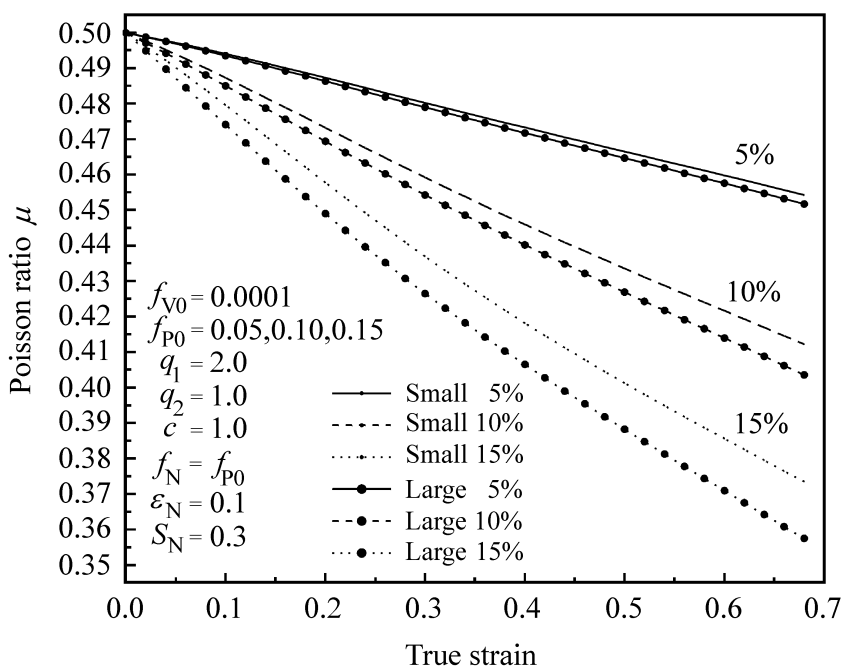

图7 泊松比变化曲线

Fig. 7 Evolution process of Poisson's ratios

4 结 论

由上述数值计算结果以及与实验结果的对比可知，在材料参数取值合适的情况下，建立在此本构理论上的数值计算结果能够与实验结果很好地吻合，并且通过基于该本构理论的数值计算，可以预测出实验难以测量的如空洞体积分数演化、颗粒体积分数演化以及材料延展性和可压缩性等物理特性。另外该本构理论的形式相对简单实用，易于与有限元程序结合，因此，本文中的颗粒增强复合材料刚塑性细观损伤本构模型可以在实际工程中得到相关应用。

参考文献:

[1] Ibrahim I A. Particulate reinforced metal matrix composites ——A review [J]. J Mater Sci, 1991, 26(1): 1137-1156.

[2] 桂满昌，王殿斌，张 洪. 颗粒增强铝基复合材料在汽车工业上的应用[J]. 机械工程材料, 1996, 20(5): 30-33.
Gui Manchang, Wang Dianbin, Zhang Hong. Application of particle-reinforced aluminum composites in automotive industry [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1996, 20(5): 30-33.

[3] 王文明，潘复生，Lu Yun，等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料开发与应用的研究现状[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(3): 61-67.
Wang Wenming, Pan Fusheng, Lu Yun, et al. Current status of development and application in SiC_p/Al composites [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27(3): 61-67.

[4] Garajue M, Suquet P. Effective properties of porous ideally plastic or viscoplastic materials containing rigid particles [J]. J Mech Phys Solids, 1997, 45(6): 873-902.

[5] Suquet P. Overall potentials and extremal surface of power law or ideally plastic composites [J]. J Mech Phys Solids, 1993, 41(6): 981-1002.

[6] Zhang K, Zheng C. Microvoid multistage nucleating model and its application in analysis of micro damage and fracture [J]. Engng Fract Mech, 1990, 37(3): 621-629.

[7] Yin Yajun, Takemasa Fumio, Hu Ning, et al. Rigid-plastic meso-damage constitutive theory for porous composites reinforced by particles [J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(5): 697-708.

[8] Doel T J A, Bowen P. Tensile properties of particulate-reinforced metal matrix composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1996, 27(8): 655-666.

[9] Goods S H, Brown L M. The nucleation of cavities by plastic deformation[J]. Acta Metall, 1979, 27(1): 1-15.

[10] Chu C C, Needleman A. Trans ASME J Eng Mat Tech, 1980, 102(2): 249-256.

[11] 黄筑平，杨黎明，潘客麟. 材料的动态损伤与失效[J]. 力学进展, 1993, 23(4): 433-467.

Huang Zhuping, Yang Liming, Pan Kelin. Dynamic damage and failure of materials [J]. Advances in Mechanics, 1993, 23(4): 433-467.

[12] 王自强, 段祝平. 塑性细观力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995. 242-292.

Wang Ziqiang, Duan Zhuping. Plasticity Meso-Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1995. 242-292.

[13] i Guoji, Kobayashi S. Rigid-plastic finite-element analysis of plane strain rolling [J]. Journal of Engineering for Industry, 1982, 104(1): 55-64.

关于出版中国科协英文论文集的启事

发布时间: 2005. 08. 30　09 :23 :19

为了扩大学术论文的国际影响, 培养和推动科技工作者的学术论文进入国际科技界的交流之中, 经研究决定, 中国科协将出版英文论文集, 即"The Proceedings of the China Association for Science and Technology"。已在《复合材料学报》上发表的论文译成英文后可再投到中国科协英文论文集, 由中国科协送交国内科技界比较熟悉的国际科技文献检索系统, 即英文《科学引文索引》(SCI) 、《工程索引》(EI) 或《科学技术会议论文索引》(ISTP) 等。以及有关国际组织。注意事项如下:

一、稿件范围

凡是在中国科协所属的167 个学会主办或参与主办的期刊杂志上发表的中文论文, 如作者愿意, 可提交相同题目的英文论文, 以便编辑出版英文论文集。这些期刊的清单见中国科协网站(www.cast.org.cn) 。

二、出版周期

论文集的出版原则上每年一卷, 每卷多册, 以大约150 篇论文为一册。编审一册出版一册。

三、出版费用

英文论文集的出版费用按市场机制由论文作者缴纳版面费解决, 执行不缴费不收录的原则。每篇论文的版面费为800 元, 排版后超过6 页的论文, 每增加一页追加缴费150 元。不向作者提供稿酬。请注意: 凡中国科协所属167 个全国一级学会的个人会员可优惠10%, 即只收720 元。投稿时请出具会员证明(中国科协统一的个人会员登记号* 、会员证复印件、相关学会证明均可) 。

英文论文集出版后, 向作者邮寄一册刊有作者论文的论文集, 不再收费, 但一篇被收录论文只提供一本(册) 论文集。额外需要者, 请另行购买。

四、论文质量

为了保证英文论文集的质量, 承办者将从出版角度审视论文的写作情况, 并负责英文编辑。与中文原论文不一致的, 不能收入。论文质量不能满足要求的, 不能收入。

五、论文排版格式

为了方便作者, 论文格式将在中国科协网站(www.cast.org.cn) 上发布。

六、论文集的出版

2005 年, 论文集将由科学出版社出版。

请愿意投稿者抓紧英文论文的组织和写作。文末请注明: (1) 论文所属一级二级学科(中国科协的学科分类执行国家标准GB/T 13745-92, 此标准在www.wuma.com.cn 上可查); (2) 作者信息(中文姓名、作者个人会员登记号、所加入的全国一级学会名称、通信地址、电话、E-mail); (3) 论文原发表期刊的刊名(中、英文) 、年、卷、期, 以及起止页码。

请将英文全文通过电子邮件发送到aqyhjxb@bit.edu.cn, 联系电话: 010-68913997　黄先生

* 注: 中国科协所属167 个全国性学会实行统一的个人会员登记号制度, 个人会员登记号相当于中国科学技术工作者个人的学术号, 如你目前尚无, 可通过加入相应的学会得到。已是会员的, 可向学会索要。这167 个学会的联系方法请上中国科协网站找有关167 个学会的名单。