

SiC 颗粒增强铝基复合材料的热变形 本构方程及其优化

张 鹏¹, 李付国¹, 李惠曲²

(1. 西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 通过热压缩试验研究了 SiC 颗粒增强铝基复合材料在应变速率为 $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$, 变形温度为 713~773K 时的热成形性能, 并在试验数据分析的基础上, 引入 Zener-Hollomon 参数建立了用于描述复合材料高温变形行为的本构关系模型, 通过分析比较和对本构方程的进一步优化, 提高了颗粒增强型铝基复合材料本构方程的拟合精度, 使得计算值更接近于试验值。

关键词: SiC 颗粒增强铝基复合材料; 本构方程; 优化

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2009)01-0051-06

颗粒增强铝基复合材料具有高的比强度、比刚度、比硬度, 同时耐高温、耐磨损, 并且具有良好的热传导性能, 所以在航空、航天、汽车等工业领域得到了广泛的应用^[1]。然而由于增强颗粒与基体间性能上的差异, 致使增强颗粒难以均匀分布, 更为重要的是由于这类材料的塑性和韧性差, 从而使其成形困难, 到目前为止, 除美、日、西欧等工业发达国家在航空航天领域得到一定程度的应用以外, 这类材料的应用仍然受到很大的限制。为提高该类材料的工程应用, 有必要研究高温条件下的塑性变形行为^[2,3], 并建立相应的高温成形本构关系, 同时对本构方程进行合理的优化。

本工作在对 SiC 颗粒增强铝基复合材料热成形机理分析的基础上, 基于热压缩试验, 建立了该材料的塑性成形本构方程, 并对本构方程进行了优化。

1 试验方法

试验用材料为粉末冶金法制备的 SiC 颗粒增强铝基复合材料挤压棒材, 其中 SiC 颗粒体积分数为 15%, 基体材料成分如表 1 所示。压缩试验在热模拟试验机上进行, 变形温度分别为 713K, 733K, 753K, 773K, 应变速率分别为 0.001 s^{-1} , 0.01 s^{-1} , 0.1 s^{-1} , 1 s^{-1} , 变形量为 60%。

表 1 SiC 颗粒增强 Al 基复合材料基体化学成分 (质量分数 %)

Table 1 Chemical composition of matrix in SiC particle reinforced Al matrix composites (mass fraction %)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Al
4.1	0.64	0.54	0.37	0.34	0.1	0.019	Bal

2 试验结果及分析

为了研究应变速率和温度对复合材料热成形性能的影响, 本文基于温度建立了不同应变速率下的真应力-真应变曲线。图 1 给出的是温度分别为

713K, 733K, 753K 和 773K 时不同应变速率下的真应力-真应变曲线, 由图可以看出, 变形开始阶段应力随应变增大而增大, 但当应变达到 0.1 左右时, 应变速率为 0.01 s^{-1} , 0.1 s^{-1} 和 1 s^{-1} 这三组曲线都出现了明显的峰值应力, 随后应力降低并保持恒值, 形成稳态流变, 这是典型的动态再结晶类型; 而应变速率为 0.001 s^{-1} 曲线在应变达到 0.1 以后, 就基本上转化为水平, 这是典型的动态回复类型。从应变速率的角度来说, 产生低应变速率下动态回复的主要原因是变形过程中, 材料有足够的时间进行软化, 因此

收稿日期: 2008-04-07; 修订日期: 2008-09-08

作者简介: 张鹏 (1977—), 男, 博士研究生, 主要从事塑性加工工程方面的研究, (E-mail) nsd@mail.nwpu.edu.cn

当变形程度不是太大的情况下,软化效应就能抵消材料中的加工硬化,表现为动态回复,反映在应力-应变关系曲线上,就如同本文获得的试验曲线所示,其流动应力基本保持恒定;而产生高应变速率下动态再结晶现象的主要原因是由于应变速率较高,变形材料软化不够充分,从而引起流动应力升高,当材

料内部由于变形而引起的畸变能达到一定程度时,就会导致再结晶现象的产生,致使流动应力下降,应力-应变关系曲线中就会呈现先升高再下降的规律。增强颗粒的存在加大了应变速率对上述规律的影响程度。

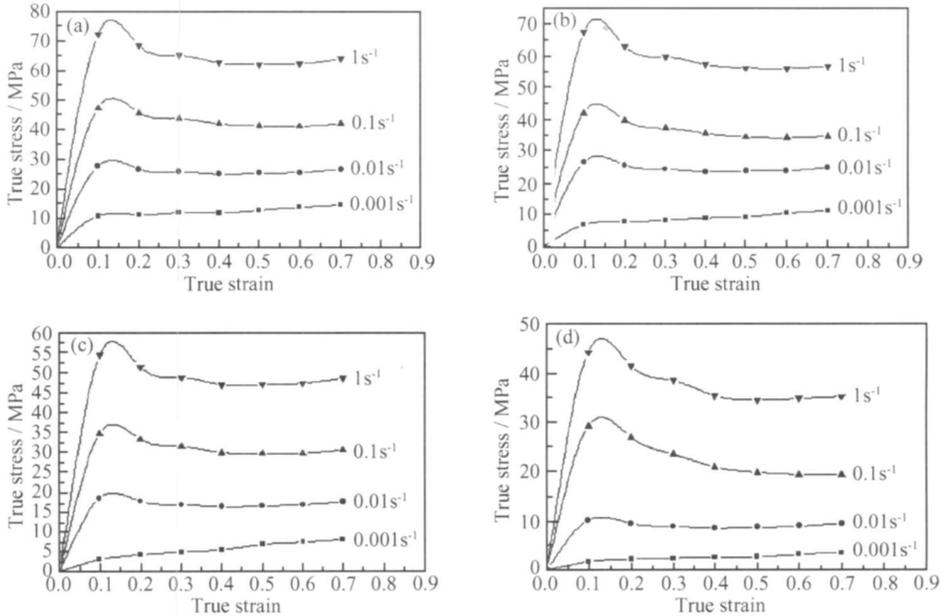


图 1 不同条件下的真应力-真应变曲线

Fig. 1 Flow stress-strain curves for metal matrix composites at different temperatures

(a) 713K; (b) 733K; (c) 753K; (d) 773K

图 2 为原始试样和部分热模拟试样的微观组织。从图 2a 中可以看出,试样变形组织明显,这是由复合材料的制备工艺决定的。图 2b~d 为热模拟后的部分试样,可以看出这些试样的微观组织已变为等轴状,明显为再结晶后的组织晶粒,但是这些晶粒的大小并不均匀,在 SiC 颗粒团聚的位置,再结晶晶粒比较细小,而 SiC 颗粒相对稀疏的位置,再结晶晶粒比较大,这主要是由于再结晶后的晶粒在长大时,晶界迁移在遇到 SiC 颗粒时受阻的缘故,因此 SiC 颗粒分布的均匀性有助于再结晶晶粒分布的均匀性。

3 本构方程的建立

通常情况下,金属的实际屈服强度取决于位错运动受到的各种阻力,而位错运动所受的各种阻力和金属材料的成分及组织结构有关。同时材料的组

织结构将随应变、应变速率和温度而变化,因而以流变曲线上对应的真应力所表示的屈服强度即流变应力应是应变、应变速率和温度的函数,即:

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (1)$$

一般认为:材料的热变形行为是一个热激活过程,其变形温度、应变速率对流变应力的影响可用 Arrhenius 方程^[4]表示:

$$\dot{\varepsilon} = A \phi(\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

其中 $\phi(\sigma)$ 是应力的函数,通常有三种表达式:

$$\phi(\sigma) = A \sigma^n \quad (3)$$

$$\phi(\sigma) = A' \exp(\beta \sigma) \quad (4)$$

$$\phi(\sigma) = A'' [\sinh(\alpha \sigma)]^n \quad (5)$$

式中, $A, n, A', A'', \beta, \alpha$ 均为材料常数,通常情况下,式 (3) 和式 (4) 分别适用于应力较低与较高时的热变形,而式 (5) 是式 (3) 和式 (4) 的更一般形式,所以

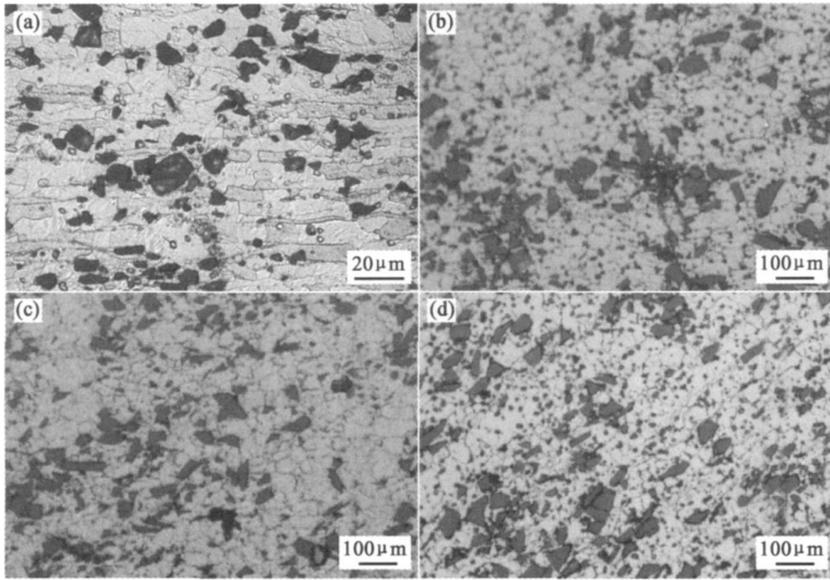


图 2 复合材料变形前后的微观组织

Fig. 2 Microstructure for composites at different parameters (a) initial microstructure; (b) microstructure at $T = 753\text{K}$, $\dot{\epsilon} = 0.01\text{s}^{-1}$; (c) microstructure at $T = 773\text{K}$, $\dot{\epsilon} = 0.01\text{s}^{-1}$; (d) microstructure at $T = 733\text{K}$, $\dot{\epsilon} = 0.01\text{s}^{-1}$

为了研究恒定应变下材料热变形应力与应变速率及变形温度的关系,常采用式(5)。

所以由式(2)和式(5),可得到本构方程的表达式为:

$$A^{-1} \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A'' [\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2} \quad (6)$$

把方程左边的系数 A^{-1} 换成 K , 可得本构方程为:

$$K \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A'' [\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2} \quad (7)$$

对式(7)两边取对数,可得:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{1}{n_2} (\ln K - \ln A'') + \frac{1}{n_2} (\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT}) \quad (8)$$

在此引入一个新的参数 Z 来表示激活能对流变应力的影响, Z 为 Zener-Hollomon 参数 (即温度补偿应变速率参数), 其表达式为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (9)$$

对式(9)两边取对数,可得:

$$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} \quad (10)$$

把式(10)带入式(8),得本构方程的表达式为:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{1}{n_2} (\ln K - \ln A'') + \frac{1}{n_2} \ln Z \quad (11)$$

设 $B = \frac{1}{n_2} (\ln K - \ln A'')$, $D = \frac{1}{n_2}$ 则本构方程可简

化为:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = B + D \ln Z \quad (12)$$

上式的等号左边表示流动应力的函数,等号右边为变形温度和应变速率的表达式,各系数由不同应变下的试验结果获得。

4 相关参数的确定

在求解 Z 的时候,会涉及到变形激活能 Q , Q 可通过下式计算:

$$Q = n_2 R \left[\frac{\partial \ln \sigma}{\partial (\frac{1}{T})} \right]_{\dot{\epsilon}} \quad (13)$$

式中, n_2 是应变速率敏感性指数 m 的倒数, m 值可由式(14)求出:

$$m = \frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\epsilon}} \quad (14)$$

α 值^[5]可通过式(15)求解:

$$\alpha = \left[\frac{2.303}{n_2} \right] \left[\frac{\partial (\log \dot{\epsilon})}{\partial \sigma} \right]_{T, \epsilon} \quad (15)$$

通过对热压缩模拟试验数据的分析,并且以应变为 0.5 举例,做出图 3 图 4 和图 5。由于各条曲线可近似成线性关系,所以分别求出它们的斜率,并带入式(13)、(14)和(15),计算出 n_2 , α , Q 三个参数的值,再根据式(11)和式(12)计算出方程的系数,见表 2。

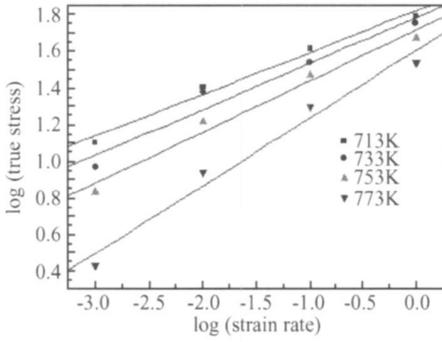


图 3 对数流变应力与对数应变速率

Fig. 3 Relation for flow stress and strain rate ($\epsilon = 0.5$)

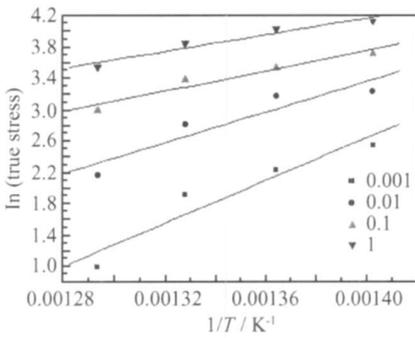


图 4 对数流变应力与温度倒数

Fig. 4 Relation for flow stress and temperature ($\epsilon = 0.5$)

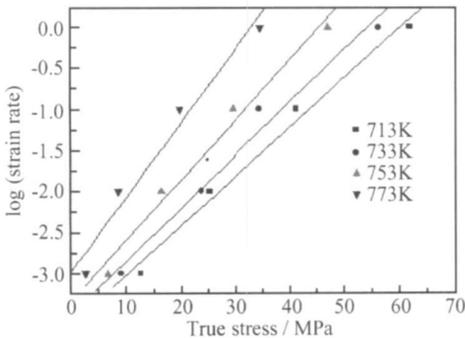


图 5 对数应变速率与流变应力

Fig. 5 Relation for strain rate and flow stress ($\epsilon = 0.5$)

表 2 方程 (12) 中的系数 B 和 D

Table 2 Coefficient B and D for equation (12)

Strain	Coefficient	
	B	D
0.1	- 8. 34098	0. 543784
0.2	- 14. 56705	0. 457553
0.3	- 14. 88277	0. 427927
0.4	- 15. 01592	0. 405463
0.5	- 15. 0414	0. 382879

从表 2 中可以看出, 在不同的应变下, B 和 D 的

数值是不同的, 因此 B 和 D 是应变的函数, 由于其变化并不是简单的线性关系, 所以通过非线性拟合确定 B 和 D 与应变的函数关系, 其表达式为:

$$B = 101.26407 \cdot \exp\left(-\frac{\epsilon}{0.03673}\right) - 14.99363 \quad (16)$$

$$D = 0.31191 \cdot \exp\left(-\frac{\epsilon}{0.16147}\right) + 0.37414 \quad (17)$$

于是所研究材料的本构关系模型由式 (12)、(16) 和 (17) 共同描述。

为了验证本构方程与试验数据的吻合度, 分别以应变速率为 0.001s^{-1} 和 1s^{-1} 下的数据进行比较, 如图 6 和图 7 所示。图中线条代表本构方程计算值, 点代表试验测量数据。

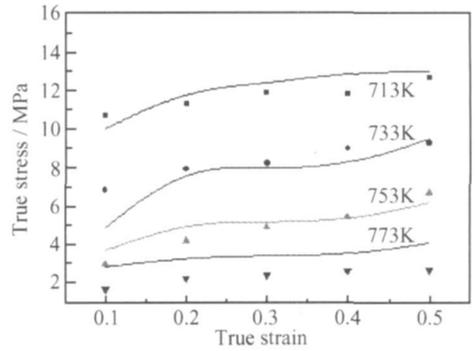


图 6 应变速率为 0.001s^{-1}

Fig. 6 Comparison of the calculated with the experimental flow stress at strain rate 0.001s^{-1}

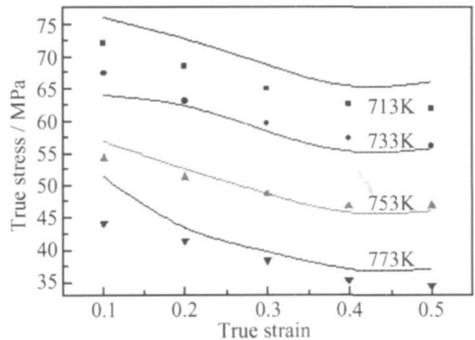


图 7 应变速率为 1s^{-1}

Fig. 7 Comparison of the calculated with the experimental flow stress at strain rate 1s^{-1}

为了进一步分析本构方程与试验数据的误差, 特采用图 8 和图 9 形象地表示出了误差的分布情况, 其中横轴为试验值, 纵轴为本构方程计算值, 当试验值与计算值相等时, 数据点落在与坐标轴成 45° 的线上, 当试验值小于计算值时, 数据点在 45°

线上方,而当试验值大于计算值时,数据点落在 45° 线下方,并且数据点距离 45° 线的远近可以很好地说明误差的大小及吻合程度。通过比对每一组情况下的试验值和计算值,可以发现当应变速率为 0.001 s^{-1} 时,每组数据在小应变时所对应的应力数值误差较大,而大应变时误差有所减小,并且计算值与试验值的相对误差为 15.6%;而当应变速率为 1 s^{-1} 时,可以发现数据点距离 45° 线都较近,并且计算值与试验值相对误差为 4.6%。由此可以看出该本构方程仍存在不完善的地方,需要进一步优化。

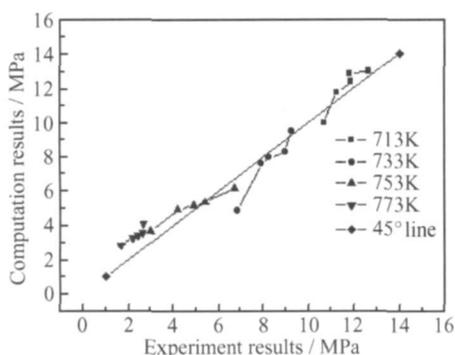


图 8 应变速率为 0.001 s^{-1} 时的误差示意
Fig. 8 Error deviation at strain rate 0.001 s^{-1}

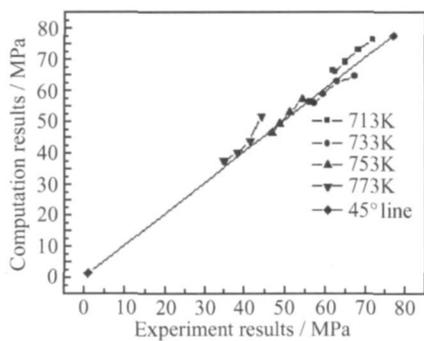


图 9 应变速率为 1 s^{-1} 时的误差示意
Fig. 9 Error deviation at strain rate 1 s^{-1}

5 本构方程的优化

上面所得出的本构方程,由于不带有高次幂项,很难反映出应力应变关系的局部变化规律,如果高次幂项越多,所得结果就越精确。所以借用泰勒展开式的思想,在原本构方程中加入高次幂项,改进后的方程如下:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = B + D_1 \ln Z + D_2 (\ln Z)^2 + D_3 (\ln Z)^3 \quad (18)$$

通过求解,得出式 (18) 中各项系数,见表 3。

表 3 式 (18) 中各项系数值

Strain	Coefficient			
	B	D_1	D_2	D_3
0.1	-70.24193	12.216165	-0.717391	0.0144533
0.2	-151.03423	12.60812	-0.358092	0.003494
0.3	-147.68332	11.309802	-0.295399	0.002657
0.4	-144.3277	10.43925	-0.258203	0.0022039
0.5	-170.4526	11.77267	-0.277148	0.0022384

从表 3 可以看出,随着应变的变化,各项系数也随着变化,并呈现非线性特征,所以通过非线性拟合,各项系数与应变的关系为:

$$B = -166.99923 - 9.03531 \cdot \ln(\varepsilon - 0.09998) \quad (19)$$

$$D_1 = 12.42062 - 2.05518 \cdot \exp(-0.5 \cdot ((\varepsilon - 0.38548) / 0.0735)^2) \quad (20)$$

$$D_2 = -0.19719 + 0.06641 \cdot \ln(\varepsilon - 0.0996) \quad (21)$$

$$D_3 = 0.00231 + 0.12003 \cdot \exp(-\frac{\varepsilon}{0.04365}) \quad (22)$$

优化后的本构关系模型由式 (18), (19), (20), (21) 和 (22) 共同描述。

仍然以应变速率为 0.001 s^{-1} 与 1 s^{-1} 为例,把计算值与试验值进行对比,如图 10 和图 11 所示,图中线条代表计算值,点代表试验值,其误差分布如图 12 和图 13 所示。把两种应变速率下,优化之前与之后的误差模型进行对比,可以发现除了温度为 713K 这一组数据没有达到很好的拟合精度外,其它数据都靠近于 45° 线的附近。当应变速率为 0.001 s^{-1} 时,计算值与实验值相对误差仅为 8.4%,而当应变速率为 1 s^{-1} 时,计算值与实验值相对误差

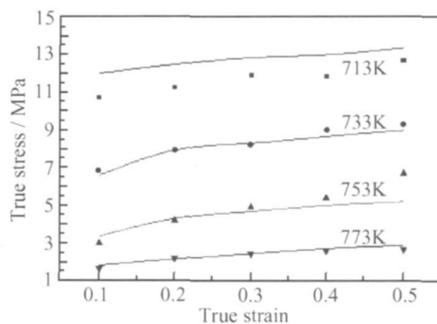
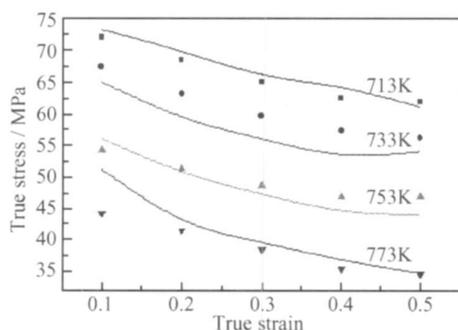
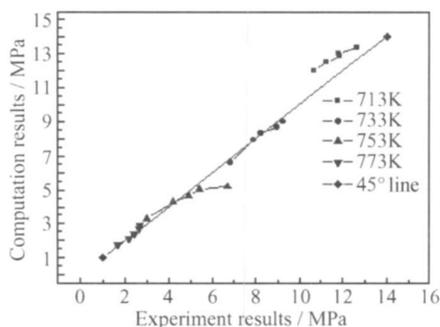


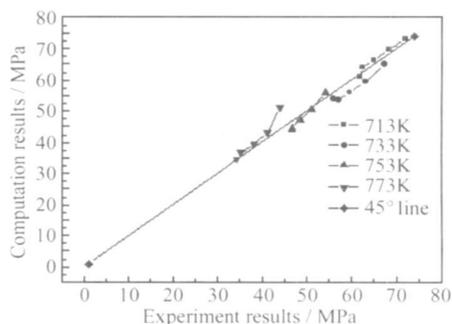
图 10 应变速率为 0.001 s^{-1}
Fig. 10 Comparison of the calculated with the experimental flow stress at strain rate 0.001 s^{-1}

图 11 应变速率为 1s^{-1} Fig. 11 Comparison of the calculated with the experimental flow stress at strain rate 1s^{-1} 图 12 应变速率为 0.001s^{-1} 时优化后的误差示意Fig. 12 Error deviation at strain rate 0.001s^{-1}

为 4.1%，可以看出方程优化之后，误差值都明显降低了。

6 结论

根据热压缩试验所得数据建立了 SiC 颗粒增强铝基复合材料的本构方程，并以泰勒展开式的思想

图 13 应变速率为 1s^{-1} 时优化后的误差示意Fig. 13 Error deviation at strain rate 1s^{-1}

对其进行了表达和优化，在此基础上形象地分析了计算结果的误差分布，并且把优化前与优化后的模型进行了对比，发现优化后的模型达到了预期的效果，使方程的计算值更接近于试验值。

参考文献:

- [1] IBRAH M J A, MOHAMED F A, LAVERN I A E J Particle reinforced metal matrix composites-a review [J]. *J Mater Sci* 1991, 26(1): 1137-1156
- [2] RAMANATHAN S, KARTH IKEYAN R. Development of processing maps for Al/SiC_p composite using fuzzy logic [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183: 104-110
- [3] RAMANATHAN S, KARTH IKEYAN R. Development of processing maps for 2124 Al/SiC_p composites [J]. *Materials Science and Engineering (A)*, 2006, 441: 321-325
- [4] 冯亮, 曲恒磊, 赵永庆, 等. TC21 合金的高温变形行为 [J]. *航空材料学报*, 2004, 24(4): 11-13
- [5] BUSCHIS, POGG I D S, QUADR N I F, *et al*. Workability of Ti-6Al-4V alloy at high temperature and strain rates [J], *Materials Letters* 2004, (58): 3622-3629

Optimization of General Constitutive Equation for Hot Deformation of SiC Particle Reinforced Al Matrix Composites

ZHANG Peng¹, LI Fu-guo¹, LI Hui-qu²

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Lab. of Welding and Forging, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract Deformation behavior of SiC particle reinforced Al matrix composites has been investigated through the hot compression test carried out in the temperature 713~773K and strain rate 0.001~1s⁻¹. Based on the experimental data and Zener-Hollomon parameter, the constitutive equation is modeled and discussed. Through the analysis, the constitutive equation is further optimized. As a result, the new optimization equation can improve the validity of application.

Key words SiC particle reinforced Al matrix composites; general constitutive equation; optimization