

基于动态材料参数的 5083 铝合金本构模型

戴青松¹, 邓运来¹, 欧世声¹, 付平²

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 广西柳州银海铝业股份有限公司, 广西 柳州, 545006)

摘要: 通过热压缩试验研究 5083 铝合金在应变速率为 0.01~10 s⁻¹、变形温度为 300~500 °C、变形程度为 50% 条件下的流变行为, 根据热模拟数据建立基于动态材料参数的双曲正弦函数本构模型(ZHCM)及幂函数本构模型(ZBCM), 并对这 2 种本构模型的应力预测精确度进行计算。研究表明: ZHCM 与 ZBCM 均有较高的应力预测精度, 应力平均相对误差分别为 5.26% 和 3.92%, 相比之下, ZHCM 在应变速率为 10 s⁻¹、变形温度为 300 °C 的条件下应力精度比 ZBCM 的高, 而当应变速率为 0.01~1 s⁻¹、变形温度为 350~500 °C 时, ZBCM 的应力精度较高。

关键词: 5083 铝合金; 热压缩; 流变应力; 动态材料参数; 本构模型

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)05-1072-08

Constitutive model of 5083 aluminum alloy based on dynamic material parameters

DAI Qingsong¹, DENG Yunlai¹, OU Shisheng¹, FU Ping²

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Guangxi Liuzhou Yin Hai Aluminum Co. Ltd., Liuzhou 545006, China)

Abstract: The flow stress features of 5083 aluminum alloy were investigated by the isothermal compression test at the strain rates of 0.01–10 s⁻¹, the temperatures of 300–500 °C and the deformation degree of 50%. According to the thermal simulation data, the hyperbolic sine constitutive model (ZHCM) and power function constitutive model (ZBCM) were established based on the dynamic material parameters. Furthermore, the stress prediction accuracies of two constitutive models were calculated. The results show that both ZHCM and ZBCM have high stress precision of prediction, and the average relative errors of stress are 5.26% and 3.92%, respectively. By contrast, the ZHCM has higher stress accuracy at the strain rate of 10 s⁻¹ and the deformation temperature of 300 °C, while the stress accuracy of ZBCM predicts more accurately at the strain rate of 0.01–1 s⁻¹ and the deformation temperature of 350–500 °C.

Key words: 5083 aluminum alloy; hot compression; flow stress; dynamic material parameter; constitutive model

在金属热加工过程中, 材料流变应力因微观组织的变化而产生变化, 流变应力将影响加工设备载荷与能耗, 准确的流变应力本构模型(CM)可为加工设备的选型及载荷计算提供参考^[1-6]。目前, 表征金属热变形流变力学规律的本构模型主要有 2 种^[7-9]: 一种是幂函数和指数函数相结合, 并包含了 Zener-Hollomon 参数

的双曲正弦函数(ZH); 另一种是幂函数与指数函数相结合的 Zuzin-Browman 关系式(ZB)。这 2 种模型均涉及到材料参数的求解, 为简化计算, 这些参数通常被当作常数处理^[10-11], 这种方式计算得出的本构模型可对峰值应力进行较精准预测, 但若要建立可对整个变形过程进行精准预测的本构模型, 还需考虑材料参数

收稿日期: 2017-05-15; 修回日期: 2017-07-03

基金项目(Foundation item): 广西科学研究与技术开发计划项目(1598001-2, 14122001-5) (Projects(1598001-2, 14122001-5) supported by the Scientific Research and Technology Development Program of Guangxi)

通信作者: 邓运来, 教授, 博士生导师, 从事有色金属材料加工工程研究; E-mail: luckdeng@csu.edu.cn

与热变形条件间的动态变化关系。一些学者在材料参数的修正与优化方面进行了很多研究, 如: GAN 等^[12]在求解 6063 铝合金 ZHCM 时, 考虑了材料参数与应变的关系; JIA 等^[13]在研究 AZ31B 镁合金本构方程时, 考虑了材料参数的动态变化。本文作者以 5083 铝合金为研究对象, 根据热压缩试验结果建立基于动态材料参数的 ZHCM 和 ZBCM 这 2 种本构模型, 并结合实测数据对 2 种本构模型进行误差分析, 以便为实际生产中设备选取与工艺制定提供参考。

1 试验材料与方法

试验用材料为再结晶态的 5083 铝合金, 其金相组织如图 1 所示, 平均晶粒粒径为 50 μm 。材料的化学成分为 0.3Fe-0.1Si-4.7Mg-0.5Mn-0.1Cr-(bal)Al。制备 20 组直径 \times 高为 10 mm \times 15 mm 的圆柱体试样, 在型号为 Gleeble-3800 的热模拟机上进行等温热压缩试验, 热压缩温度设置 5 组, 分别为 300, 350, 400, 450 和 500 $^{\circ}\text{C}$, 应变速率 $\dot{\epsilon}$ 设置 4 组, 分别为 0.01, 0.1, 1 和 10 s^{-1} , 20 组试样的总变形量均为 50%(真应

变为 0.69)。压缩时试样两端添加石墨片, 并涂有润滑剂, 以降低模具与试样间的摩擦, 减小试验误差。

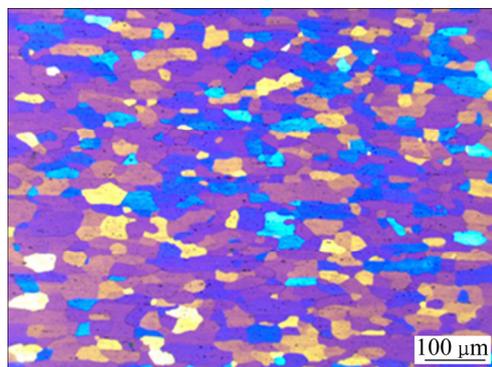
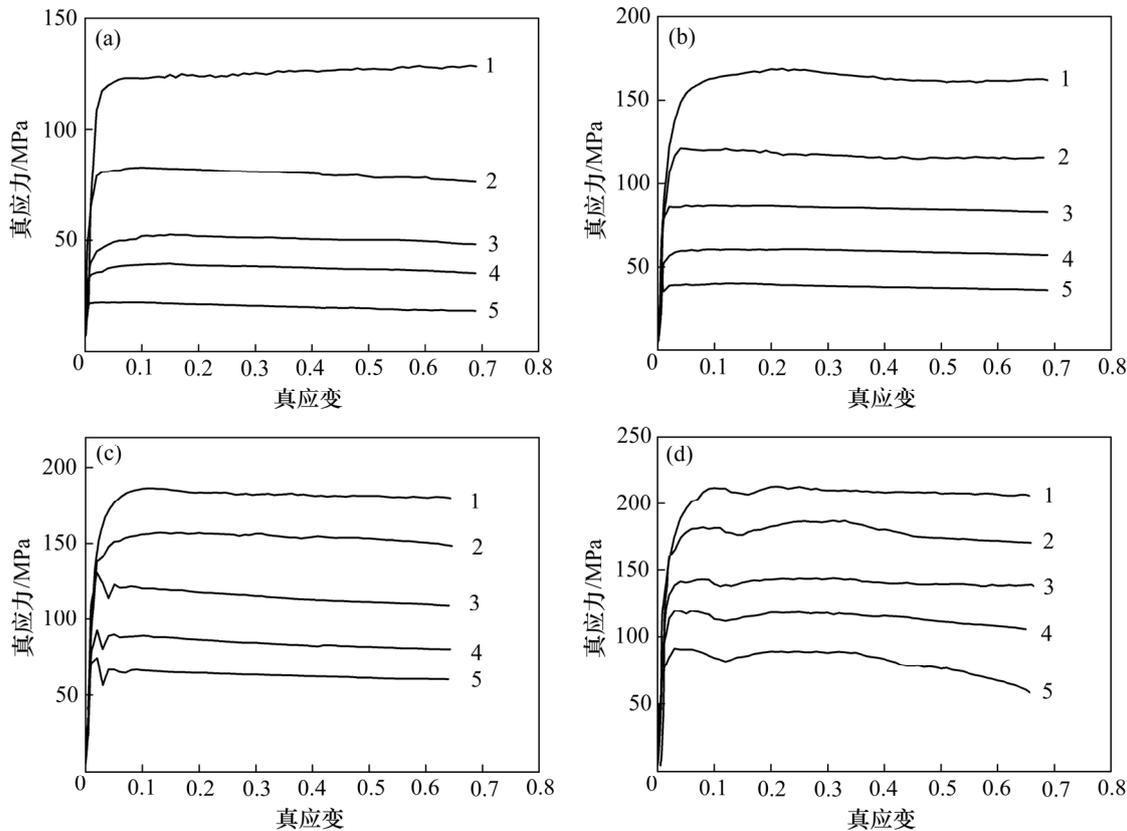


图 1 热压缩试样金相组织

Fig. 1 Metallographic microstructure of hot compression specimen

2 试验结果

图 2 所示为 5083 铝合金在不同变形条件下的真应力-真应变曲线。从图 2 可以看出: 在热变形初期,



应变速率 $\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$: (a) 0.01; (b) 0.1; (c) 1; (d) 10

变形温度/ $^{\circ}\text{C}$: 1—300; 2—350; 3—400; 4—450; 5—500。

图 2 5083 铝合金不同变形条件下的真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of 5083 aluminum alloy under different deformation conditions

5083 铝合金真应力随着应变的增加迅速增大至峰值,当应力达到峰值以后,应变呈现稳态流变特征,甚至应力随应变的增加呈下降趋势。这是因为当应力达到峰值后,5083 铝合金因动态回复、动态再结晶所引起的动态软化与位错引起的加工硬化处于动态平衡,甚至动态软化行为强于加工硬化,使材料呈现稳态流变特征,甚至呈现下降趋势^[14-16]。由图 2 还可看出:在应变速率一定的情况下,5083 铝合金流变应力随着变形温度的升高而明显下降。这是因为随着变形温度的升高,动态回复、动态再结晶引起的软化行为加剧,材料位错密度减小,因此,流变应力降低。而在变形温度一定的情况下,流变应力随着应变速率的增大而明显增大,这是因为当应变速率增大时,变形时间缩短,在较短的时间内动态软化行为来不及完全发生,位错数量明显增大,导致应力增大。

3 分析与讨论

3.1 ZHCM 的优化与求解

描述金属材料高温变形的双曲正弦函数本构模型表达式如下^[17-20]。

当 $\alpha\sigma < 0.8$ 时,即在低水平应力下,

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

当 $\alpha\sigma > 1.2$ 时,即在高水平应力下,

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp[-Q/(RT)] \quad (2)$$

在整个应力范围内,

$$\dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (3)$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp[Q/(RT)] = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

式中: σ , T 和 Z 分别表示真应力、变形温度和 Zener-Hollomon 参数; A_1 , A_2 和 A 为结构因子; α 为应力水平参数, n_1 和 n 为应力指数, β 为与材料状态有关的常数,且 $\alpha = \beta/n$; R 为摩尔气体常数; Q 为热变形激活能。

在一般情况下,将参数 A_1 , A_2 , A , n_1 , n , α 和 β 当作常数处理,采用峰值应力进行拟合计算 A_1 , A_2 , A , n_1 , n , α 和 β 等,进而计算双曲正弦函数本构方程。这种方法并未考虑材料参数与应变的动态关系,将会影响到本构模型的应力精度,为此,本文将建立 α , n , Q 和 A 参数与应变的动态关系来优化 ZHCM。

对式(1)~(3)取对数并求偏微分可得:

$$n_1 = \left(\frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln \sigma} \right)_T \quad (5)$$

$$\beta = \left(\frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \sigma} \right)_T \quad (6)$$

$$n = \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \quad (7)$$

将热压缩试验数据代入式(5)~(7),可求得不同真应变时的 α 和 n ,结果如表 1 所示。

对式(3)和式(4)取自然对数并求偏导可得:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\varepsilon}} \quad (8)$$

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (9)$$

将热压缩试验数据代入式(8)和式(9)可求得不同真应变 ε 时的 Q 和 $\ln A$,结果如表 1 所示。将表 1 中的数据进行数值拟合,拟合曲线如图 3 所示,可分别求得 $\alpha(\varepsilon)$, $n(\varepsilon)$, $Q(\varepsilon)$ 和 $\ln A(\varepsilon)$ 。

表 1 5083 铝合金各参数值

Table 1 Parameter values of 5083 aluminum alloy

ε	α	n	$Q/(kJ \cdot mol^{-1})$	$\ln A$
0.1	0.010 87	5.445 5	173.098	28.746
0.2	0.010 63	5.401 1	170.912	28.527
0.3	0.010 59	5.433 5	172.840	28.967
0.4	0.010 77	5.518 2	178.360	29.953
0.5	0.011 13	5.547 5	185.243	31.043
0.6	0.011 49	5.558 6	193.041	32.312

由图 3 中各参数曲线的拟合结果,可求得基于动态材料参数的 5083 铝合金 ZHCM 为

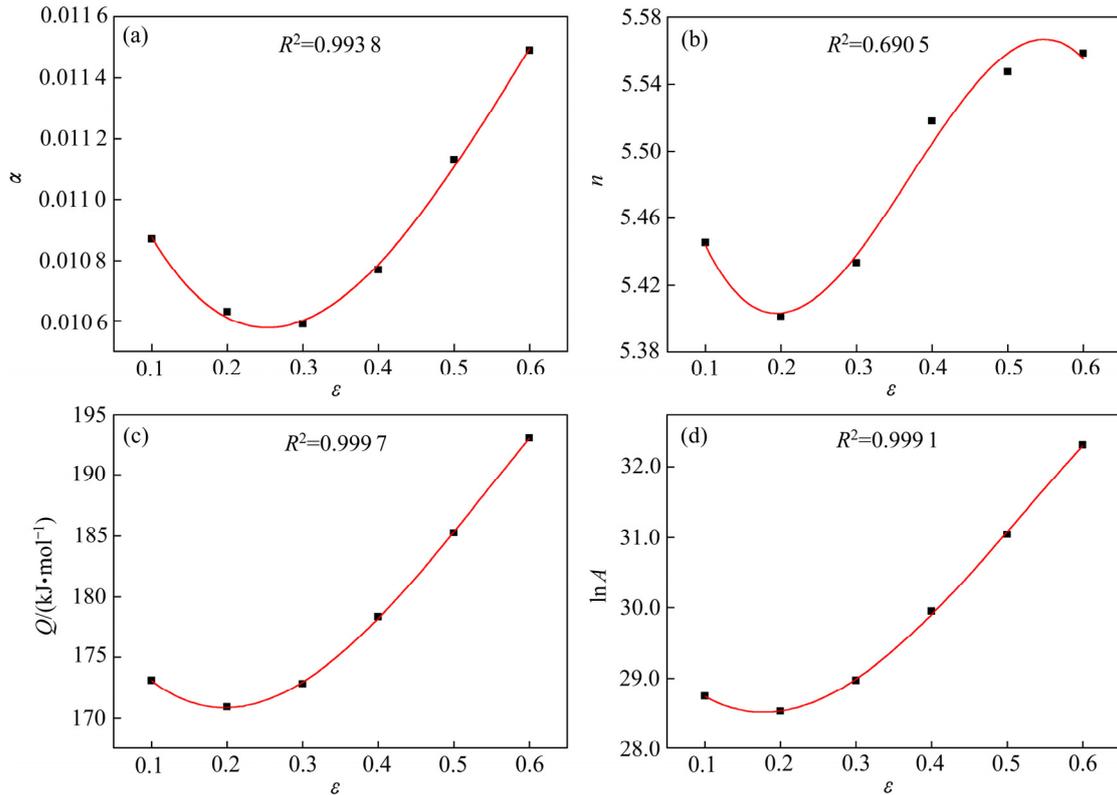
$$\begin{cases} Z = \dot{\varepsilon} \exp[Q(\varepsilon)/(RT)] = A(\varepsilon) \{ \sinh[\alpha(\varepsilon)\sigma] \}^{n(\varepsilon)} \\ \alpha(\varepsilon) = 0.011 5 - 0.007 7\varepsilon + 0.019 1\varepsilon^2 - 0.010 4\varepsilon^3 \\ n(\varepsilon) = 5.605 5 - 2.366 3\varepsilon + 8.232 7\varepsilon^2 - 7.739 0\varepsilon^3 \\ Q(\varepsilon) = 181.008 7 - 111.4\varepsilon + 345.005 2\varepsilon^2 - 210.018 5\varepsilon^3 \\ \ln A(\varepsilon) = 29.831 - 15.953 9\varepsilon + 54.153 6\varepsilon^2 - 34.5\varepsilon^3 \end{cases} \quad (10)$$

3.2 ZBCM 的优化与求解

材料高温流变应力与变形条件间的关系可采用幂函数表示^[7,13]:

$$\sigma = a\varepsilon^p \dot{\varepsilon}^q \exp(-bT) \quad (11)$$

式中: a , p , q 和 b 分别表示材料参数、应变硬化指数、应变速率敏感系数和温度系数。



(a) $\alpha-\varepsilon$; (b) $n-\varepsilon$; (c) $Q-\varepsilon$; (d) $\ln A-\varepsilon$

图 3 材料参数与 ε 的关系

Fig. 3 Relationship between material parameters and ε

对式(11)取自然对数后求偏微分可求得 p , q 和 b 与各变形条件的关系:

$$p = \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \right)_{\varepsilon, T} \quad (12)$$

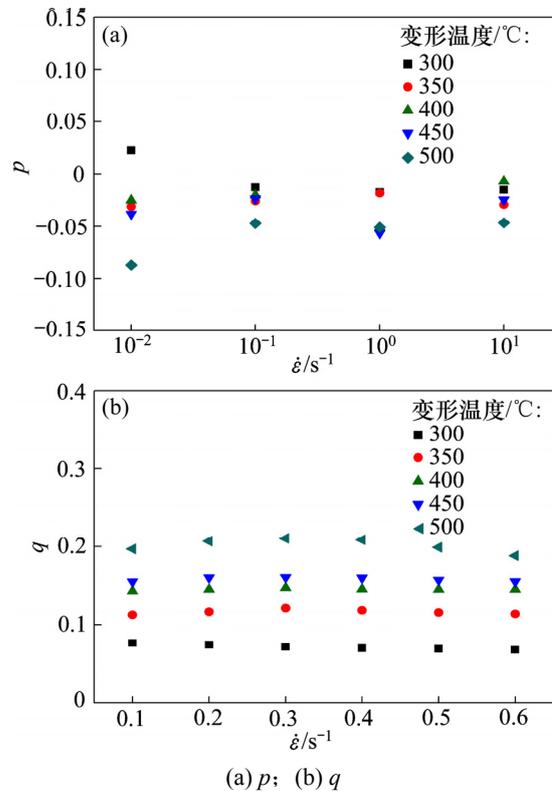
$$q = \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \varepsilon} \right)_{\dot{\varepsilon}, T} \quad (13)$$

$$-b = \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial T} \right)_{\varepsilon, \dot{\varepsilon}} \quad (14)$$

根据热压缩试验数据及式(12)~(14)可分别求得不同应变速率、不同变形温度下的 p , 不同真应变、不同变形温度下的 q , 不同真应变、不同应变速率下的 b 。通过 p , q 和 b 可反求出不同应变速率、不同变形温度下的 a , 计算结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可知: 不同变形条件下的 p 和 q 具有明显收敛至某一常数的特征, 为简化计算, 可认为 p 和 q 为常数, 对其求平均值可得: $p=-0.0331$, $q=-0.1386$ 。

由图 5 可知: 式(11)中的 b 和 a 均随着应变速率的变化而明显变化, 若将 b 和 a 看成常数将影响到本构模型的应力精度, 因此, 建立 b 和 a 与应变速率的动态关系。



(a) p ; (b) q

图 4 不同变形条件下 5083 铝合金的 p 与 q 与 $\dot{\varepsilon}$ 的关系
Fig. 4 Relationship among p and q of 5083 aluminum alloy and $\dot{\varepsilon}$ under different deformation conditions

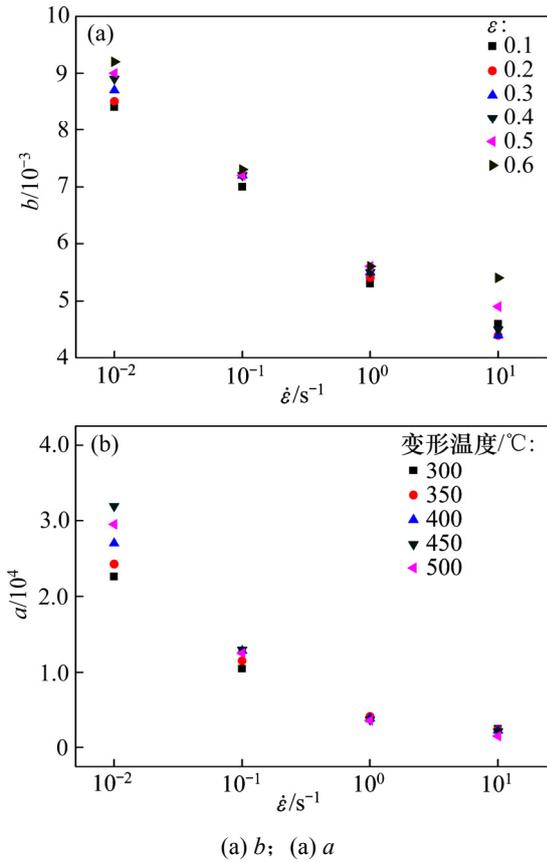


图 5 不同变形条件下 5083 铝合金的 b 与 a 与 $\dot{\epsilon}$ 的关系
 Fig. 5 Relationship among b and a of 5083 aluminum alloy and $\dot{\epsilon}$ under different conditions

取相同应变速率下的 b 的平均值与 $\ln \dot{\epsilon}$ 作图, 结果如图 6 所示。由图 6 可知: b 的平均值与 $\ln \dot{\epsilon}$ 呈良好的线性关系, 根据 $b(\ln \dot{\epsilon})$ 关系式反求得新的 a , 结果如图 7 所示。由图 7 可看出: b 的修正使同一应变速率下 a 趋于某一常数, a 随应变速率变化的趋势

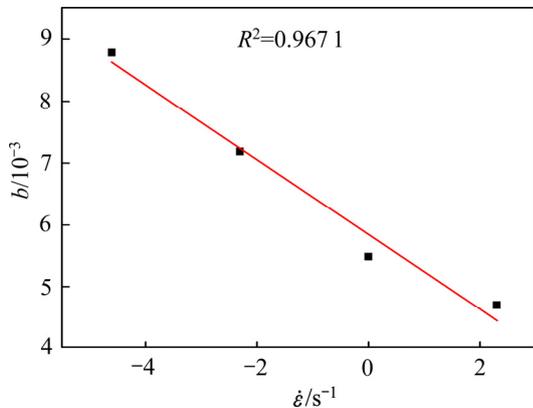


图 6 5083 铝合金的 b 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系
 Fig. 6 Relationship between b and $\ln \dot{\epsilon}$ of 5083 aluminum alloy

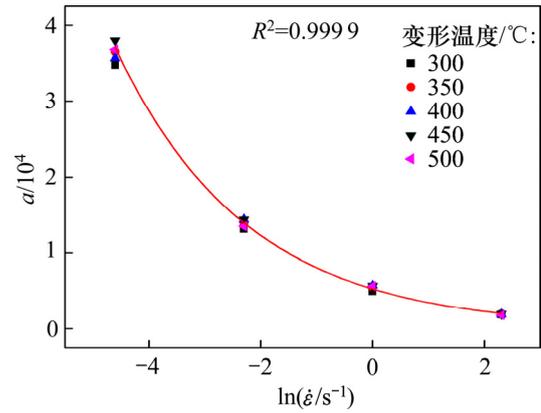


图 7 5083 铝合金的 a 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系
 Fig. 7 Relationship between a and $\ln \dot{\epsilon}$ of 5083 aluminum alloy

更加明显, 计算同一应变速率下的 a 的平均值, 再根据各应变速率下的 a 的平均值拟合得到精度较高的 $a(\ln \dot{\epsilon})$ 。本构模型的应力预测精度将随着 b 和 a 准确度的提高而相应提高。

由以上分析可知, 式(11)可表示为

$$\sigma = a(\ln \dot{\epsilon}) \epsilon^p \dot{\epsilon}^q \exp[-b(\ln \dot{\epsilon})T] \quad (15)$$

根据图 6 和图 7 的曲线拟合结果, 可求得基于动态参数的 5083 铝合金 ZBCM 为

$$\begin{cases} \sigma = a(\ln \dot{\epsilon}) \epsilon^{-0.033} \dot{\epsilon}^{0.139} \exp[-b(\ln \dot{\epsilon})T] \\ b(\ln \dot{\epsilon}) = 10^{-3} \times [-0.6058(\ln \dot{\epsilon}) + 5.84] \\ a(\ln \dot{\epsilon}) = 5210.6 \exp(-\ln \dot{\epsilon} / 2.3477) + 51.2 \end{cases} \quad (16)$$

3.3 误差分析与对比

图 8 所示为不同变形条件下实测流变应力与 2 种优化本构模型计算值的对比情况。由图 8 可以看出: 2 种本构模型应力计算值都与实测值接近, 说明 2 种模型都较准确。为更清晰地评价应力计算值与实测值之间的相对误差, 将图 8 中数据代入式(17)和式(18)进行相对误差计算。通过计算发现, ZHCM 的平均相对误差为 5.26%, ZBCM 的应力平均相对误差为 3.92%, ZBCM 的应力精度度相对更高。

$$R_{err} = (\sigma_E - \sigma_C) / \sigma_E \times 100\% \quad (17)$$

$$R_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_{Ei} - \sigma_{Ci}}{\sigma_{Ei}} \right| \times 100\% \quad (18)$$

式中: R_{err} 为应力相对误差; R_{ave} 为应力平均相对误差; σ_E 为流变应力实测值; σ_C 为本构方程计算值; 下标 i 表示第 i 组数据。

进一步计算同一温度、同一应变变量、不同应变速

率下应力的相对误差平均值, 对比分析各变形温度、应变量下应力的相对误差, 计算结果如图 9(a)所示。由图 9(a)可知: 当变形温度为 300 °C 时, ZHCM 的应力平均相对误差为 3.89%, 整体上小于 ZBCM 的 4.55%; 而当变形温度为 350~500 °C 时, ZHCM 的应

力平均相对误差为 5.66%, 大于 ZBCM 的 3.64%。计算同一应变速率、同一应变量、不同温度下的应力相对误差平均值, 对比分析各应变速率、应变量下的应力相对误差, 计算结果如图 9(b)所示。由图 9(b)可知: 当应变速率为 0.01~1 s⁻¹ 时, ZBCM 的应力相对误差

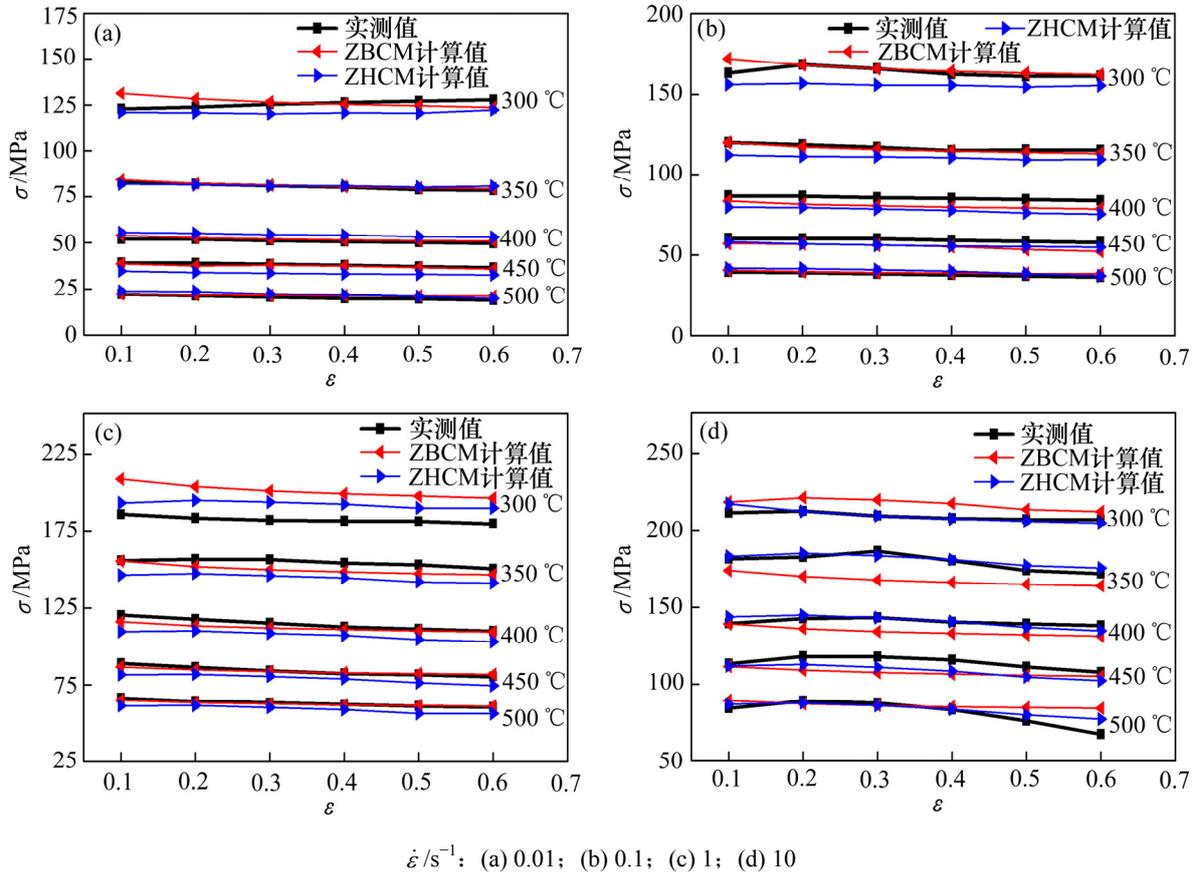


图 8 不同变形条件下 5083 铝合金流变应力实测值与计算值比较

Fig. 8 Comparisons between measured and calculated flow stresses of 5083 aluminum alloy under different deformation conditions

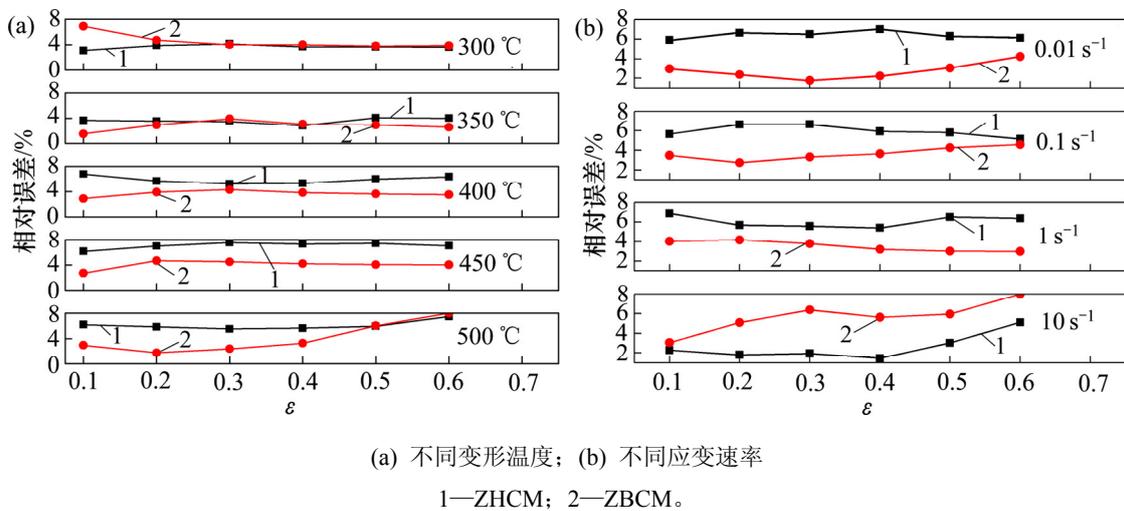


图 9 ZBCM 和 ZHCM 本构模型不同变形条件下的应力相对误差对比

Fig. 9 Relative error of stress comparisons between ZBCM and ZHCM under different deformation conditions

均比 ZHCM 的小, 其应力平均相对误差仅为 3.33%; 而当应变速率为 10 s^{-1} 时, ZHCM 的应力平均相对误差为 2.59%, 小于 ZBCM 的 5.68%。对比分析可知, ZHCM 在低温、较高应变速率下的应力精度比 ZBCM 的高, 而 ZBCM 在较高温度、低应变速率下具有更高的应力精度, 根据图 2 的流变曲线可知, 流变应力随着温度的降低或应变速率的增大而增大, 因此, 说明 ZHCM 更适合高应力条件, ZBCM 更适合低应力条件。本文 ZHCM 方程中建立了材料参数与应变的关系, 而 ZBCM 方程建立了材料参数与应变速率的关系, 材料参数与变形条件的关系可能是造成 2 种方程优选适用范围不同的原因。材料试样平均晶粒粒径为 $50 \mu\text{m}$, 晶粒相对较小, 应力水平较高, ZHCM 方程材料参数随应变变化而变化, 更能对高应力条件进行预测, 因此, ZBCM 在高应力水平条件下的应力预测精度比 ZHCM 的精度低, 而在低水平应力条件下应力预测精度比 ZHCM 的精度高。

4 结论

1) 确定了双曲正弦本构模型中应力水平参数 α 、应力指数 n 、热变形激活能 Q 、结构因子 A 与真应变之间的动态关系, 确定了幂函数本构模型中温度系数 b 、材料参数 a 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 之间的动态关系, 并建立了基于动态材料参数的 5083 铝合金双曲正弦函数本构模型与幂函数本构模型。

2) 基于动态材料参数的 5083 铝合金双曲正弦本构模型与幂函数本构模型均有较高的应力预测精度, 应力平均相对误差分别为 5.26% 和 3.92%, ZHCM 在变形温度为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为 10 s^{-1} 的条件下的应力精度比 ZBCM 的应力精度高, 而当变形温度为 $350\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为 $0.01\sim 1 \text{ s}^{-1}$ 时, ZBCM 的精度更高。

参考文献:

- [1] VILAMOS A V, CLAUSEN A H, BØRVIK T, et al. A physically-based constitutive model applied to AA6082 aluminium alloy at large strains high strain rates and elevated temperatures[J]. *Materials and Design*, 2016, 103: 391–405.
- [2] YANG Qunying, YANG Dong, ZHANG Zhiqing, et al. Flow behavior and microstructure evolution of 6A82 aluminium alloy with high copper content during hot compression deformation at elevated temperatures[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society China*, 2016, 26(3): 649–657.
- [3] WU Hongdan, ZHANG Hui, CHEN Shuang, et al. Flow stress behavior and processing map of extruded 7075AlSiC particle reinforced composite prepared by spray deposition during hot compression[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society China*, 2015, 25(3): 692–698.
- [4] ZHANG Jiangtao, XIA Junkang, ZHANG Mei, et al. Tensile fracture mechanism and constitutive models of V-5Cr-5Ti alloy under different strain rate deformation at room temperature[J]. *Materials Letters*, 2016, 183: 40–43.
- [5] 李军, 于辉, 史庆南, 等. 纯钛高温变形行为及其在精轧板中的应用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(6): 1888–1895.
LI Jun, YU Hui, SHI Qingnan, et al. Hot deformation behavior of pure titanium and its application in hot sheet finish rolling[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(6): 1888–1895.
- [6] 丁汉林, 徐成志, 张晓军, 等. ZX115 镁合金热压缩过程的本构分析及有限元模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(8): 2075–2082.
DING Hanlin, XU Chengzhi, ZHANG Xiaojun, et al. Constitutive analysis and FEM simulation of hot compression of ZX115 magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(8): 2075–2082.
- [7] 于鑫, 孙杰, 熊青春, 等. 7050-T7451 铝合金铣削加工表面材料特性与本构关系模型的建立[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(11): 2982–2989.
YU Xin, SUN Jie, XIONG Qingchun, et al. Milling surface properties of 7050-T7451 aluminum alloy and establishment of constitutive model[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(11): 2982–2989.
- [8] XIAO Gang, YANG Qinwen, LI Luoxing, et al. Modeling constitutive relationship of 6013 aluminum alloy during hot plane strain compression based on Kriging method[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society China*, 2016, 26(4): 1096–1104.
- [9] 邓馗, 李永堂, 付建华, 等. 铸态 P91 耐热合金钢高温流变行为及本构方程[J]. *锻压技术*, 2015, 40(11): 100–106.
DENG Kui, LI Yongtang, FU Jianhua, et al. High temperature rheological behavior and constitutive equation of as-cast heat-resisting alloy steel P91[J]. *Forging Stamping Technology*, 2015, 40(11): 100–106.
- [10] ZHU Ruihua, LIU Qing, LI Jinfeng, et al. Dynamic restoration mechanism and physically based constitutive model of 2050 Al-Li alloy during hot compression[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 650: 75–85.
- [11] 杨春秀, 陈忠平, 李华清, 等. 铝青铜合金热变形流变应力特

- 征[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(Suppl 1): 126–129.
- YANG Chunxiu, CHEN Zhongping, LI Huaqing, et al. Flow stress feature of aluminium bronze alloy under hot deformation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(Suppl 1): 126–129.
- [12] GAN Chunlei, ZHENG Kaihong, QI Wenjun, et al. Constitutive equations for high temperature flow stress prediction of 6063 Al alloy considering compensation of strain[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society China, 2014, 24(11): 3486–3491.
- [13] JIA Weitao, XU Shuang, LE Qichi, et al. Modified Fields-Backofen model for constitutive behavior of as-cast AZ31B magnesium alloy during hot deformation[J]. Materials and Design, 2016, 106: 120–132.
- [14] PARK S Y, KIM W J. Difference in the hot compressive behavior and processing maps between the as-cast and homogenized Al-Zn-Mg-Cu (7075) alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(7): 660–670.
- [15] WU H, WEN S P, HUANG H, et al. Hot deformation behavior and processing map of a new type Al-Zn-Mg-Er-Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 685: 869–880.
- [16] HESAM P, MEHDI P, SOHEIL F, et al. Study on the dynamic and static softening phenomena in Al-6Mg alloy during two-stage deformation through interrupted hot compression test[J]. Measurement, 2016, 77: 50–53.
- [17] 陈宝东, 郭锋, 温静, 等. Mg-Zn-Zr-Y 合金高温塑性变形本构模型及流变行为预测[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(11): 3305–3310.
- CHEN Baodong, GUO Feng, WEN Jing, et al. Constitutive model of hot plastic deformation and flow behavior prediction of Mg-Zn-Zr-Y alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(11): 3305–3310.
- [18] 付平, 刘翔, 戴青松, 等. 5083 铝合金热压缩流变应力曲线修正与本构方程[J]. 材料工程, 2017, 45(8): 76–82.
- FU Ping, LIU Xu, DAI Qingsong, et al. Modification of flow stress curves and constitutive equations during hot compression deformation of 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(8): 76–82.
- [19] ZHU Shaozhen, LUO Tianjiao, ZHANG Tingan, et al. Hot deformation behavior and processing maps of as-cast Mg-8Zn-1Al-0.5Cu-0.5Mn alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society China, 2015, 25(10): 3232–3239.
- [20] XU Zhaohua, LI Miaoquan, LI Hong, et al. Plastic flow behavior of superalloy GH696 during hot deformation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society China, 2016, 26(3): 712–721.

(编辑 刘锦伟)