

2195 铝锂合金的热变形行为及本构方程研究

张义俊¹, 冯亚磊¹, 郭晓光², 卢志安²

(1. 河南农业职业学院 机电工程学院, 河南 郑州 451450; 2. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 采用 Gleeble-3800 型热模拟试验机, 对均匀化态 2195 铝锂合金进行变形温度为 340~500 °C、应变速率为 0.001~10 s⁻¹ 的热压缩变形处理, 考察了摩擦对流变应力的影响并建立了流变应力本构方程, 对比分析了考虑应变补偿的 2195 铝锂合金的流变应力与摩擦修正后的流变应力。结果表明, 均匀化态 2195 铝锂合金中的枝晶偏析明显消除, 晶内和晶界处第二相基本回溶至基体, 晶界处有少量鱼骨状 Al₆(CuFeMn) 相; 摩擦修正后的流变应力要小于实测应力, 不同变形温度和应变速率下的 2195 铝锂合金的应力实测值与流变应力本构方程预测值有较好的相关性 (相关系数 $R^2=0.97$); 考虑应变补偿的 2195 铝锂合金的流变应力预测值与摩擦修正后的流变应力预测值吻合较好, 相关系数 $R^2=0.9913$, 平均相对误差 $\Delta=1.60\%$, 表明基于摩擦修正和应变补偿的流变应力本构方程具有较高的准确性。

关键词: 2195 铝锂合金; 热变形; 流变应力; 摩擦修正; 应变补偿

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.09.030

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 09-0239-09

Study on thermal deformation behavior and constitutive equation of 2195 Al-Li alloy

Zhang Yijun¹, Feng Yalei¹, Guo Xiaoguang², Lu Zhian²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Using thermal simulation testing machine Gleeble-3800, the homogenized 2195 Al-Li alloy was subjected to thermal compression deformation at the deformation temperature of 340–500 °C and the strain rate of 0.001–10 s⁻¹, the influence of friction on the rheological stress was investigated, the rheological stress constitutive equation was established, and the rheological stress of 2195 Al-Li alloy considering strain compensation and the rheological stress after friction correction were compared and analyzed. The results show that the dendrite segregation in the homogenized 2195 Al-Li alloy is obviously eliminated, the second phase in the grain and at the grain boundary is basically dissolved back into the matrix, and there is a small amount of fishbone Al₆(CuFeMn) phase at the grain boundary. The rheological stress after friction correction is smaller than the measured stress, the measured stress values of 2195 Al-Li alloy at different deformation temperatures and strain rates have a good correlation with the predicted values of the rheological stress constitutive equation (correlation coefficient $R^2=0.97$). The predicted values of rheological stress of 2195 Al-Li alloy considering strain compensation is in good agreement with that of rheological stress after friction correction, the correlation coefficient R^2 is 0.9913, and the average relative error Δ is 1.60%, indicating that the rheological stress constitutive equations based on friction correction and strain compensation have high accuracy.

Key words: 2195 Al-Li alloy; thermal deformation; rheological stress; friction correction; strain compensation

铝锂合金由于具有密度低、比强度高、耐腐蚀性能优异等特点, 在现代化军事、航空航天等领域有着广泛的应用前景, 尤其是近年来航空航天技术的进步对铝锂合金带来巨大发展机遇的同时, 对铝

锂合金的综合性能也提出了更高的要求^[1]。我国在“七五”期间就开展了铝锂合金的研发与应用工作, 先后开发出了一系列铝锂合金 (如高强高弹性模量 2090 铝锂合金、中强可焊性 1420 铝锂合金、中强抗损伤 2197 铝锂合金等^[2-4]), 并在实际工业生产中得到了成功应用。其中, 2195 铝锂合金作为 Al-Li 合金中的典型代表, 由于具有疲劳性能、抗应力腐蚀性能优异等特点而在航天航空领域受到了广泛关注^[5]。目前的研究多集中在 2195 铝锂合金的微合

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-08-23

基金项目: 河南省科技攻关项目 (192102310244); 机械工程智能化科研创新团队项目 (HNACKT-2020-04)

作者简介: 张义俊 (1974-), 女, 博士, 副教授

E-mail: yijun7402@sina.com

金化调控、固溶和时效热处理工艺优化等方面^[6-8], 对于热变形过程中的变形参数(变形温度、应变速率等)对流变应力影响方面的系统报道较少。热变形是成品板材加工过程中的基本工艺, 而对于热塑性区间较传统铝合金更窄、变形能力较传统铝合金较差的 2195 铝锂合金而言^[9], 如果变形温度、应变速率等参数控制不当, 容易在热加工过程中产生坯料开裂、局部异常变形等现象^[10], 有必要对 2195 铝锂合金在高温热变形过程中的流变应力与变形参数之间的对应关系进行研究, 结果可为制定 2195 铝锂合金的热加工设备选择、热加工工艺参数选择等提供依据。

1 材料与方 法

以半连续铸造 2195 铝锂合金为试验材料, 主要元素化学成分(%, 质量分数)为: Li 0.89、Cu 3.92、Mn 0.18、Mg 0.49、Zr 0.12、Ag 0.28、Fe 0.05, 余量为 Al。热压缩变形前对合金铸锭进行 $450\text{ }^{\circ}\text{C}\times 18\text{ h}+515\text{ }^{\circ}\text{C}\times 15\text{ h}$ 双级均匀化退火, 以消除枝晶偏析, 使成分和组织均匀化。

从均匀化态 2195 铝锂合金上截取直径为 $\Phi 10\text{ mm}$ 、高度为 15 mm 的圆柱体试样, 表面精磨后在 Gleeble-3800 型热模拟试验机上对均匀化态 2195 铝锂合金进行热压缩变形处理, 选取 5 个变形温度、5 个应变速率进行热压缩, 具体工艺如图 1 所示, 到达预设热压缩变形量(60%)后进行水冷处理, 自动采集热压缩变形过程中的应力、应变等参数。

分别从铸态和均匀化态 2195 铝锂合金上截取块状金相试样, 磨抛和 Keller 试剂($2.5\text{ mL HNO}_3 + 1.5\text{ mL HCl} + 1\text{ mL HF} + 95\text{ mL H}_2\text{O}$)腐蚀后, 在

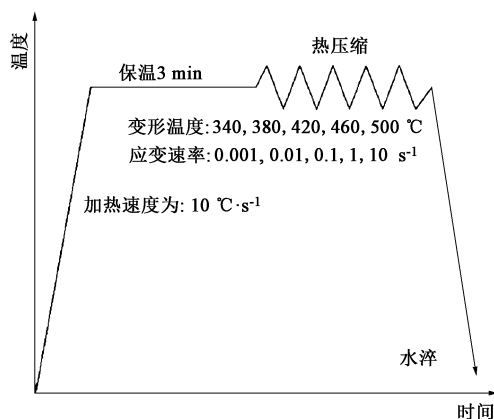


图 1 2195 铝锂合金的热压缩工艺

Fig. 1 Thermal compression process of 2195 Al-Li alloy

Olympus GX51 型光学显微镜上观察金相组织; 透射电镜试样切片后打磨至 $50\text{ }\mu\text{m}$, 冲压为 $\Phi 3\text{ mm}$ 圆片, 在 TenuPol-5 型电解双喷仪上减薄, 电解液为体积比 1:3 的硝酸: 甲醇溶液, 电解温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 将减薄试样置于 TEOL 2100 型透射电子显微镜上观察其微观结构。

2 结果与分析

2.1 显微组织

图 2 为铸态和均匀化态 2195 铝锂合金的金相组织。铸态 2195 铝锂合金中可见明显枝晶和晶界附近的非平衡共晶相, 这主要是因为半连续铸造过程中的冷却速度较快, 非平衡共晶相来不及回溶至基体所致^[11]; 经过均匀化退火处理后, 枝晶偏析明显消除, 晶内和晶界处的第二相基本回溶至基体, 少量晶界处不能回溶的鱼骨状第二相为 $\text{Al}_6(\text{CuFeMn})$ 相^[12]。

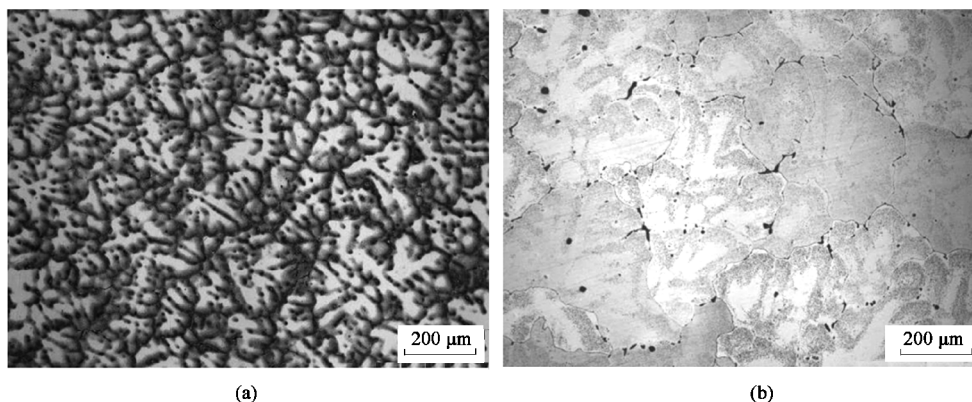


图 2 铸态 (a) 和均匀化态 (b) 2195 铝锂合金的金相组织

Fig. 2 Metallographic structures of as cast (a) and homogenized (b) 2195 Al-Li alloys

图3为均匀化态2195铝锂合金的透射电镜显微组织。可见,均匀化态2195铝锂合金中存在棒状和豆瓣状第二相,观察选区电子衍射花样并结合文献[13]可知,这种在均匀化处理过程中,从过饱和固

溶体中析出的豆瓣状纳米级析出相为 Al_3Zr 相,而尺寸较大的棒状第二相为 $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ 相。2195铝锂合金在均匀化处理过程中弥散析出的第二相,会对后续热变形过程产生一定的影响。

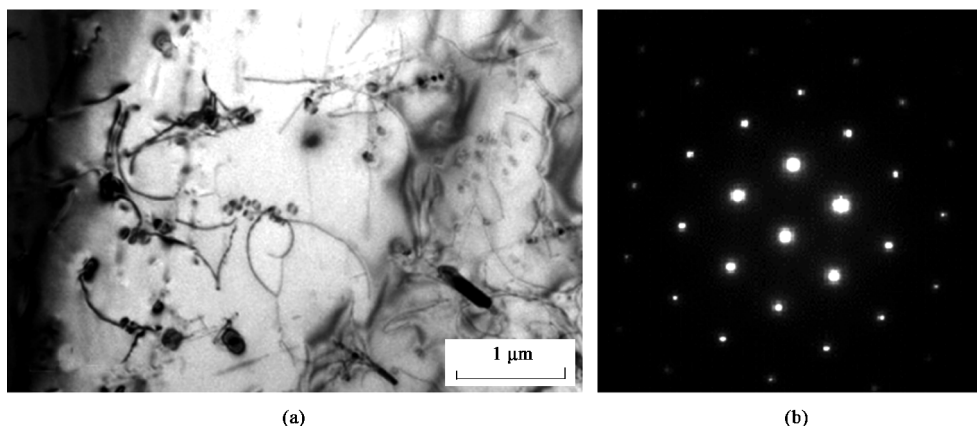


图3 均匀化态2195铝锂合金的透射电镜显微组织

(a) 形貌 (b) 选区电子衍射花样

Fig. 3 TEM microstructures of homogenized 2195 Al-Li alloy

(a) Morphology (b) Selected area electron diffraction pattern

2.2 流变应力本构方程

图4为变形温度为340~500℃、应变速率为 $0.001 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 下的2195铝锂合金应力-应变曲线(其中实线为实测值,虚线为摩擦修正后的流变应力随应变的关系曲线)。对比分析可知,在较低的变形温度下($\leq 380^\circ\text{C}$),应变速率为 $0.001 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 时,2195铝锂合金的应力-应变曲线主要可分为4个阶段^[14]:(1)应变开始增加的阶段,2195铝锂合金的应力会由于加工硬化作用而明显增大,此时对应弹性变形阶段;(2)随着应变的增加,2195铝锂合金内部的位错会发生滑移,回复软化现象会逐渐突出,应力增加速度会变慢,此时对应塑性变形阶段;(3)继续增加应变,2195铝锂合金内部会同时发生动态回复、动态再结晶以及加工硬化,即硬化和软化共同作用,这个阶段的应力基本稳定在相当的水平;(4)到达峰值应力后进一步增加应变,2195铝锂合金内部的动态软化会强于加工硬化作用,应力会逐渐减小,此时对应应力下降阶段。在较高的变形温度下($\geq 420^\circ\text{C}$),应变速率为 $0.001 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 时的2195铝锂合金的峰值应力变化并不明显,这主要是因为较高变形温度下动态软化驱动力增大,加工硬化和动态软化在较短的时间内已经达到了动态平衡。

图5为变形温度为340~500℃、应变速率为 $0.001 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 下的2195铝锂合金峰值应力曲线。在

相同应变速率下,随着变形温度的升高,2195铝锂合金的峰值应力逐渐减小,这主要是因为变形温度越高,热变形过程中的原子动能和扩散能力越大,位错滑移和攀移更加容易^[15],合金在塑性提高的同时,流变应力会降低。在相同的变形温度下,随着应变速率的增加,2195铝锂合金的峰值应力逐渐增大,这主要是因为高应变速率下位错增殖快,动态软化时间短而使得位错密度升高,峰值应力会更大^[16]。

在对2195铝锂合金进行热压缩变形时,试样与模具间难免会由于摩擦而影响对称变形,局部发生的不均匀变形会影响流变应力测试结果,可以用桶形系数 θ 来判定摩擦对2195铝锂合金热压缩变形的影响^[17]:

$$\theta = h_f R_f^2 / h_0 R_0^2 \quad (1)$$

式中: h_0 和 R_0 分别为热压缩变形前的高度和最大直径; h_f 和 R_f 分别为热压缩变形后的试样高度和最大直径。

变形温度为340~500℃、应变速率为 $0.001 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 下的2195铝锂合金的桶形系数计算结果如表1所示。如果桶形系数介于1.0~1.1之间,表明摩擦对流变应力影响不大,无需修正;如果桶形系数大于1.1,表明摩擦对流变应力影响较大,需要修正^[18]。基于摩擦修正的流变应力 σ 可用式(2)~式(5)表示:

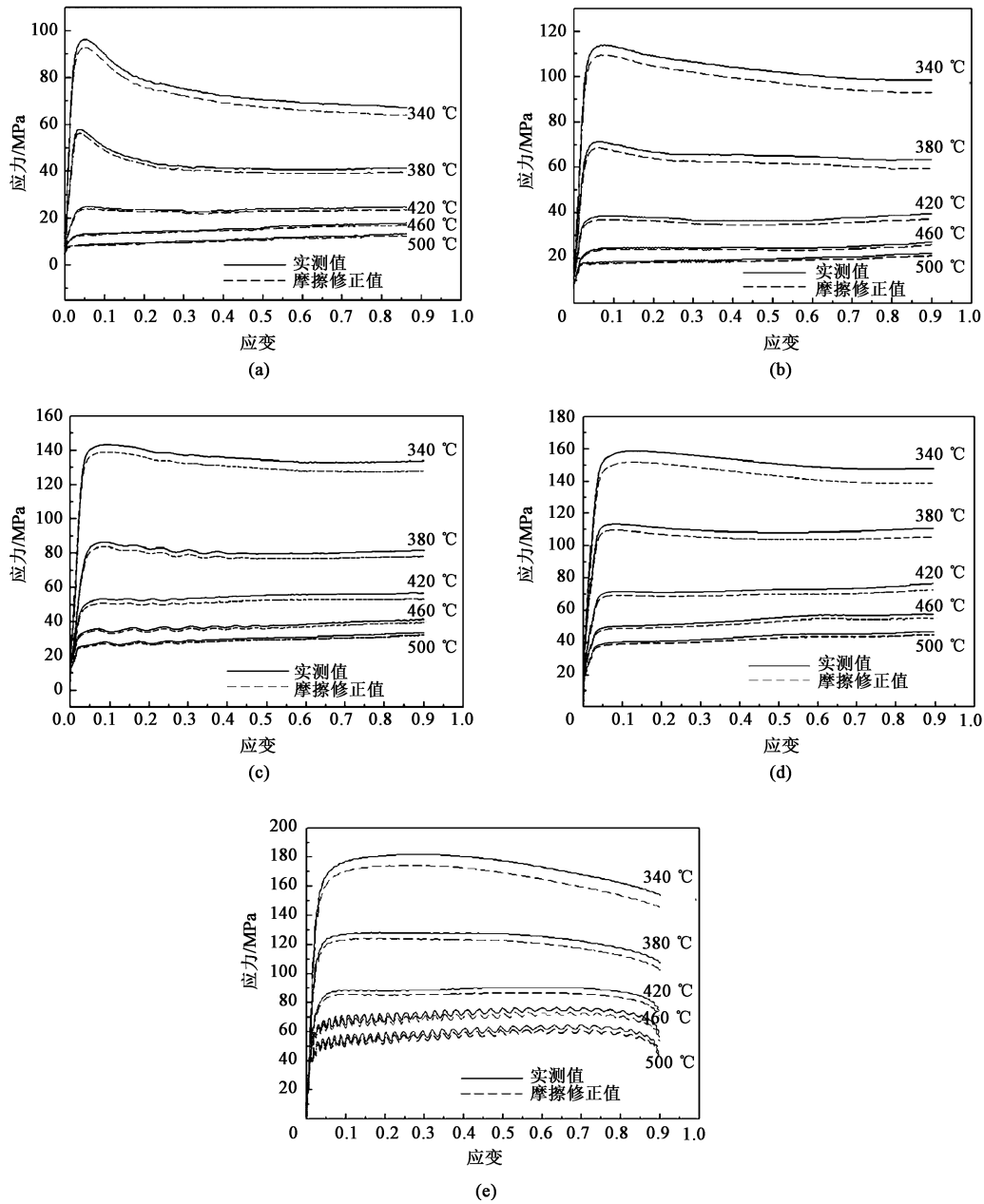


图 4 不同应变速率下的 2195 铝锂合金的应力-应变曲线

(a) 0.001 s^{-1} (b) 0.01 s^{-1} (c) 0.1 s^{-1} (d) 1 s^{-1} (e) 10 s^{-1}

Fig. 4 Stress-strain curves of 2195 Al-Li alloy under different strain rates

$$\frac{P}{\sigma} = \frac{8\theta r}{H} \cdot \left\{ \left[\frac{1}{12} + \left(\frac{H}{r\theta} \right)^3 \right]^{3/2} - \left(\frac{H}{r\theta} \right)^3 - \frac{me^{-\theta/2}}{24\sqrt{3}(e^{-\theta/2} - 1)} \right\} \quad (2)$$

$$m = \frac{(r/h_f)\theta}{(4/\sqrt{3}) - (2\theta/3\sqrt{3})} \quad (3)$$

$$r = R_0 \exp(-\varepsilon/2) \quad (4)$$

$$H = h_0 \exp(-\varepsilon) \quad (5)$$

式中: P 为外部施加荷载; r 为瞬时半径; H 为瞬时

高度; m 为摩擦因数; ε 为应变。

摩擦修正后的流变应力随应变的关系曲线如图 4 中虚线所示, 可见摩擦修正后的流变应力要小于实测应力。较高的变形温度和较低的应变速率下, 二者的差值较小; 较低的变形温度和较高的应变速率下, 二者的差值会愈发受到摩擦的影响而增大。

2195 铝锂合金的流变应力 σ 、变形温度 T 和变形速率 $\dot{\varepsilon}$ 之间的关系可用 Seller C M^[19] 提出的 Arrhenius 本构方程进行分析:

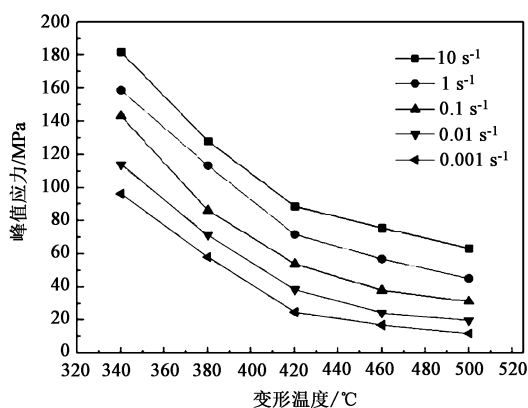


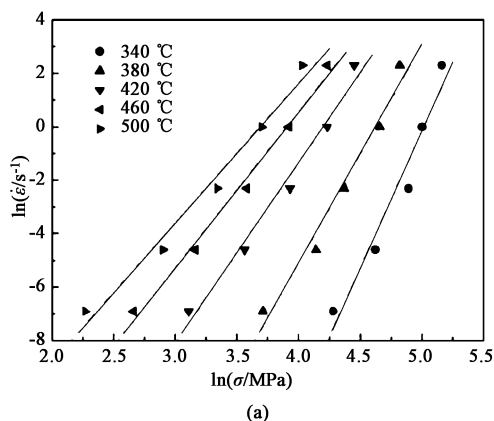
图5 2195 铝锂合金的峰值应力

Fig. 5 Peak stresses of 2195 Al-Li alloy

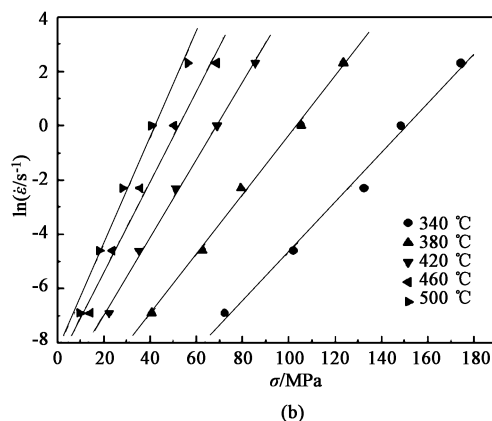
表1 2195 铝锂合金的桶形系数

Table 1 Barrel coefficients of 2195 Al-Li alloy

应变速率/ s ⁻¹	变形温度/°C				
	340	380	420	460	500
0.001	1.1206	1.0999	1.1079	1.1009	1.1091
0.01	1.1289	1.1329	1.1304	1.1011	1.1091
0.1	1.0994	1.0999	1.1406	1.0992	1.0996
1	1.1382	1.1079	1.1083	1.1029	1.1006
10	1.1245	1.1000	1.1077	1.1107	1.1156



(a)



(b)

图6 2195 铝锂合金的 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ (a) 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ (b) 关系曲线Fig. 6 Relationship curves of $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ (a) and $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ (b) for 2195 Al-Li alloy

进一步绘制 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 的关系曲线, 结果见图 7。可见, 变形温度为 340~500 °C、应变速率为 0.001~10 s⁻¹ 时, $\ln \dot{\varepsilon}$ 与 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $1000/T$ 均保持着良好的线性关系。最小二乘法线性回归处理^[20]可得到, 图 6a 和图 6b 的 5 条直线的斜率平均值分别为 $n=5.5223$ 、 $Q=275.13 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

将 Q 、 n 、 α 、 σ 代入式 (11), 结合变形温度

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT), \quad \alpha\sigma < 0.8 \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT), \quad \alpha\sigma > 1.2 \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT), \quad \text{所有 } \sigma \quad (8)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A 、 β 、 n_1 和 n 为与 2195 铝锂合金有关的常数, 其中 $\beta = \alpha n_1$; α 为应力水平参数; Q 为激活能; R 为气体常数, $R=8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

对式 (6)~式 (8) 两边取自然对数:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + (-Q/RT) + n_1 \ln \sigma \quad (9)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + (-Q/RT) + \beta \sigma \quad (10)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + (-Q/RT) + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (11)$$

将摩擦修正后的峰值应力代入式 (9) 和式 (10), 可得到 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 的关系曲线 (图 6)。对比分析可知, 变形温度为 340~500 °C、应变速率为 0.001~10 s⁻¹ 时 2195 铝锂合金的 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 关系曲线均具有较好的线性相关性。图 6a 中 5 个变形温度下拟合直线的斜率平均值为 n_1 , 其值为 8.4987; 图 6b 中 5 个变形温度下拟合直线的斜率平均值为 β , 其值为 0.1355 MPa⁻¹。由此可得到 $\alpha = \beta/n_1 = 0.0159 \text{ MPa}^{-1}$ 。

和应变速率, 可计算得到 2195 铝锂合金的结构因子平均值 $A=6.76 \times 10^{19}$ 。结合式 (8), 可得到 2195 铝锂合金的双曲正弦 Arrhenius 流变应力本构方程:

$$\dot{\varepsilon} = 6.76 \times 10^{19} [\sinh(0.0159\sigma)]^{5.5223} \exp\left(-\frac{275130}{RT}\right) \quad (12)$$

采用 Zener C 等^[21]提出的温度补偿变形速率因子 Z , 建立 2195 铝锂合金热压缩变形过程中 $\dot{\varepsilon}$ 和 σ

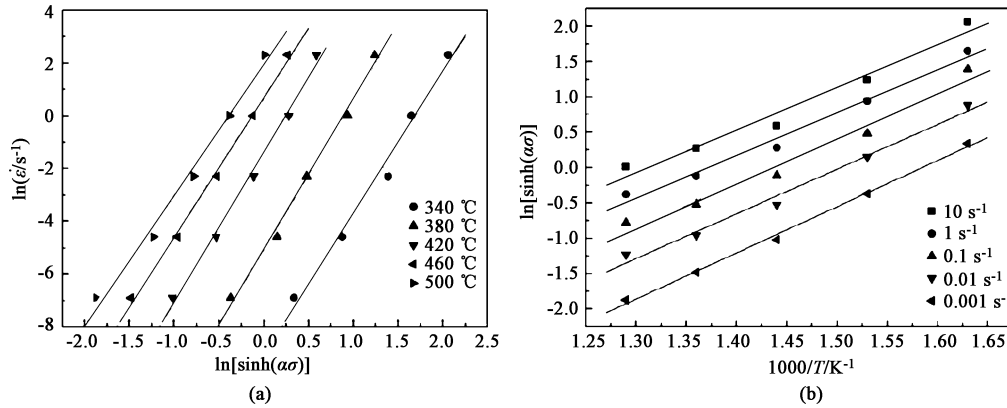


图 7 2195 铝锂合金的 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (a) 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ (b) 关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (a) and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ (b) for 2195 Al-Li alloy

的关系:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (13)$$

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (14)$$

图 8 为 2195 铝锂合金的 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线。不同变形温度和应变速率下, 2195 铝锂合金的实测值(散点)与拟合直线具有较好的相关性(相关系数 $R^2 = 0.97$), 表明采用本构方程计算得到的预测值与实测值较为吻合, 可以采用式(12)对 2195 铝锂合金的热变形行为进行有效预测。

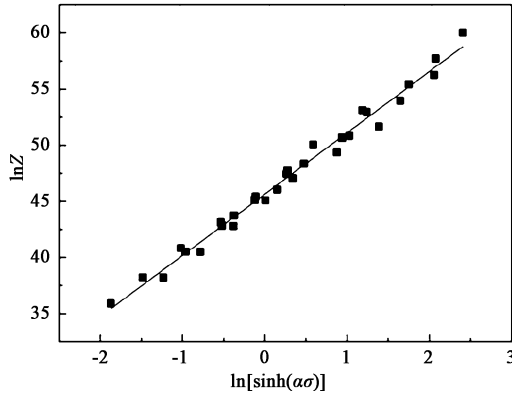


图 8 2195 铝锂合金的 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ for 2195 Al-Li alloy

2.3 流变应力的应变补偿

除变形温度和应变速率外, 热变形过程中的应变对材料常数 (α 、 β 、 Q 、 n 和 $\ln A$) 有较大影响, 可采用与应变有关的六阶多项式函数表达, 以增强流变应力本构方程的数据准确性和可靠性^[22]。基于应变补偿的流变应力本构方程中, 材料常数与应变 ε 的关系可表达为^[23]:

$$\alpha(\varepsilon) = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon + \alpha_2 \varepsilon^2 + \alpha_3 \varepsilon^3 + \alpha_4 \varepsilon^4 \quad (15)$$

$$\beta(\varepsilon) = \beta_0 + \beta_1 \varepsilon + \beta_2 \varepsilon^2 + \beta_3 \varepsilon^3 + \beta_4 \varepsilon^4 \quad (16)$$

$$Q = Q_0 + Q_1 \varepsilon + Q_2 \varepsilon^2 + Q_3 \varepsilon^3 + Q_4 \varepsilon^4 \quad (17)$$

$$n(\varepsilon) = n_0 + n_1 \varepsilon + n_2 \varepsilon^2 + n_3 \varepsilon^3 + n_4 \varepsilon^4 \quad (18)$$

$$\ln A = A_0 + A_1 \varepsilon + A_2 \varepsilon^2 + A_3 \varepsilon^3 + A_4 \varepsilon^4 \quad (19)$$

式中: $\alpha_0 \sim \alpha_4$ 分别为各项系数, 其他类似。

材料常数 (α 、 β 、 Q 、 n 和 $\ln A$) 与应变的多项式拟合曲线见图 9。拟合曲线分析结果表明, 材料常数 α 、 β 、 Q 、 n 和 $\ln A$ 拟合曲线的相关系数 R^2 分别为 0.9882、0.9674、0.9908、0.9823 和 0.9871, 其中, R^2 值越接近 1, 则表明拟合曲线越可靠^[24]。可见, 考虑应变补偿的 2195 铝锂合金的材料常数与应变回归方程的拟合度较高, 所构建的流变应力本构方程可以更好地反映流变应力与变形温度、应变速率等变形参数之间的对应关系。

将考虑应变补偿的 2195 铝锂合金的流变应力预测值与摩擦修正后的流变应力预测值进行对比分析, 结果见图 10。可见, 应变速率为 10、0.1 和 0.001 s^{-1} 时, 考虑应变补偿的 2195 铝锂合金的流变应力预测值与摩擦修正后的流变应力预测值吻合较好, 进一步采用相关系数 R^2 和平均相对误差 Δ 来验证基于应变补偿的 2195 铝锂合金的流变应力预测值的准确性^[25]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_c^i - \bar{\sigma}_c)(\sigma_p^i - \bar{\sigma}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_c^i - \bar{\sigma}_c)^2 \sum_{i=1}^N (\sigma_p^i - \bar{\sigma}_p)^2}} \quad (20)$$

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_c^i - \sigma_p^i}{\sigma_c^i} \right| \times 100\% \quad (21)$$

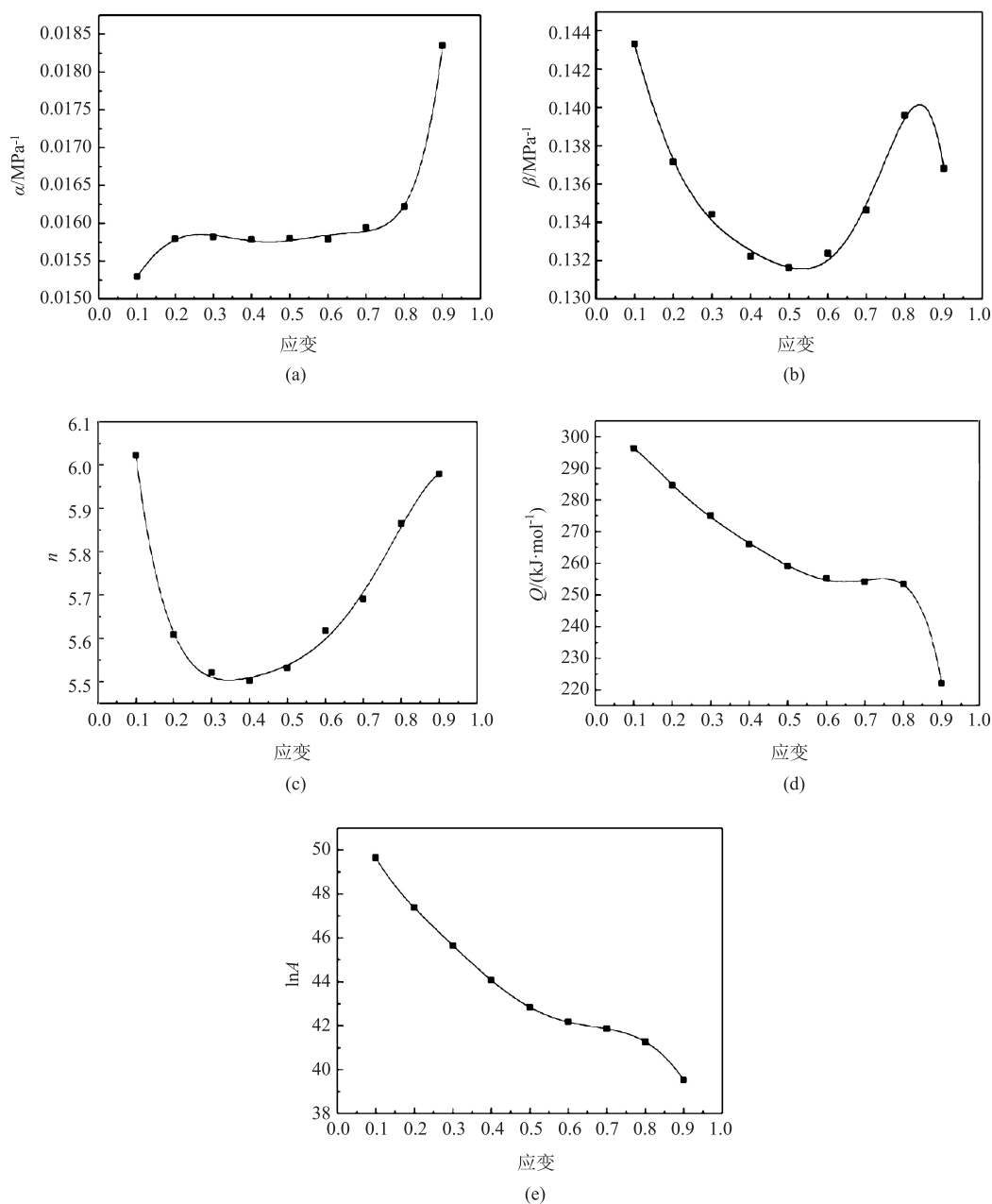


图9 2195 铝锂合金的材料常数与应变的多项式拟合曲线

(a) α (b) β (c) n (d) Q (e) $\ln A$

Fig. 9 Polynomial fitting curves of material constants and strain for 2195 Al-Li alloy

式中: σ_c^i 和 $\overline{\sigma_c}$ 分别表示摩擦修正的流变应力预测值及其平均值; σ_p^i 和 $\overline{\sigma_p}$ 分别表示基于应变补偿的流变应力预测值及其平均值; N 为数据点的数量, $i=1, 2, 3, \dots, N$ 。

通过对变形温度为 340~500 °C、应变速率为 10~0.001 s⁻¹ 时的 2195 铝锂合金的 R^2 和 Δ ^[26] 进行计算分析可知, $R^2=0.9913$, $\Delta=1.60\%$ 。可见, 基于应变补偿的 2195 铝锂合金的流变应力方程具有较高的可靠性。

3 结论

(1) 均匀化态 2195 铝锂合金中的枝晶偏析明显消除, 晶内和晶界处第二相基本回溶至基体, 晶界处有少量鱼骨状 Al₆(CuFeMn) 相; 均匀化处理过程中从过饱和固溶体中析出的豆瓣状纳米级析出相为 Al₃Zr 相, 尺寸较大的棒状第二相为 Al₂₀Cu₂Mn₃ 相。

(2) 摩擦修正后的流变应力要小于实测应力, 且较高变形温度和较低应变速率下二者差值较小,

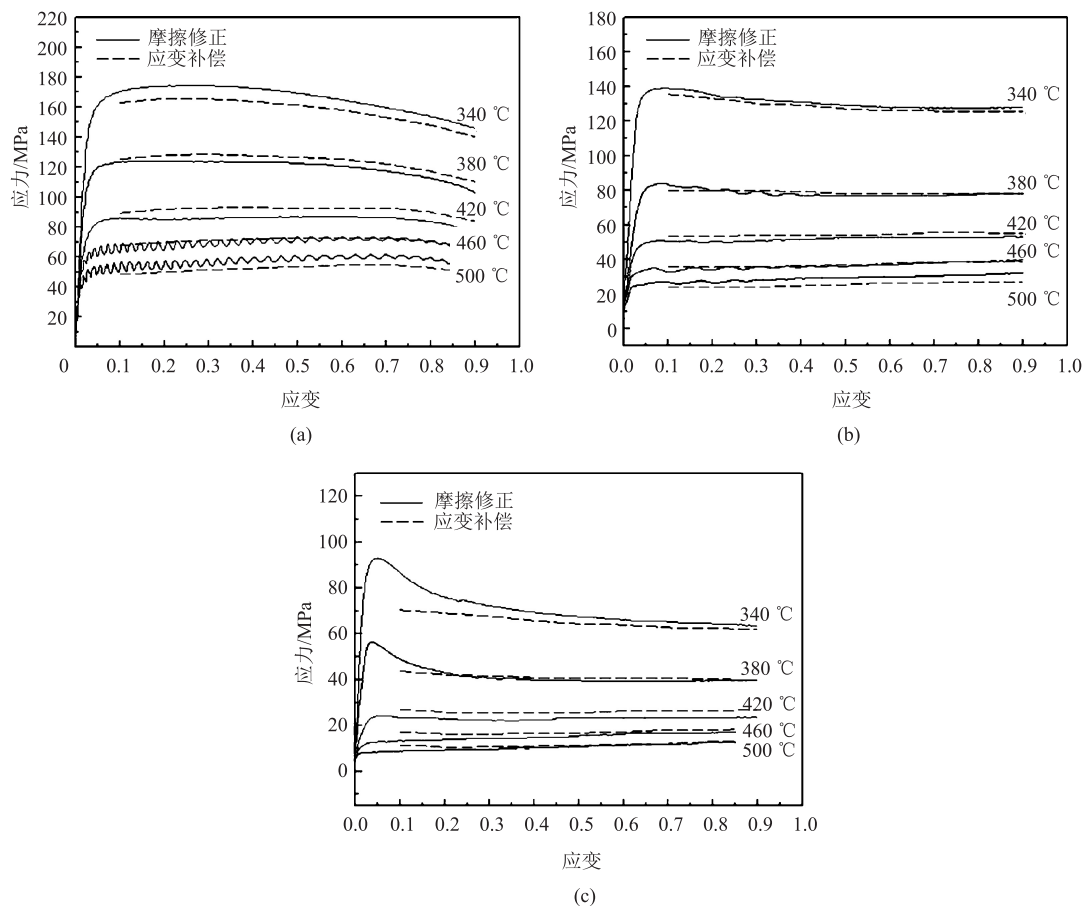


图 10 2195 铝锂合金基于应变补偿的流变应力预测值与摩擦修正后的流变应力预测值对比

(a) 10 s^{-1} (b) 0.1 s^{-1} (c) 0.001 s^{-1}

Fig. 10 Comparison of predicted values of flow stress based on strain compensation and after friction correction for 2195 Al-Li alloy

较低变形温度和较高应变速率下二者差值会愈发受到摩擦影响而增大。2195 铝锂合金的双曲正弦 Arrhenius 流变应力本构方程为 $\dot{\epsilon} = 6.76 \times 10^{19} \times [\sinh(0.0159\sigma)]^{5.5223} \exp\left(-\frac{275130}{RT}\right)$ 。

(3) 应变速率为 10 、 0.1 和 0.001 s^{-1} 时, 考虑应变补偿的 2195 铝锂合金的流变应力预测值与摩擦修正后的流变应力预测值吻合较好, 相关系数 $R^2 = 0.9913$, 平均相对误差 $\Delta = 1.60\%$, 可见, 基于应变补偿的 2195 铝锂合金的流变应力方程具有较高的可靠性。

参考文献:

- [1] 黄晓敏, 管奔, 臧勇. 航空铝锂合金热成形研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (12): 4745-4756.
Huang X M, Guan B, Zang Y. Research progress in hot forming of aviation aluminum-lithium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (12): 4745-4756.
- [2] 李建军, 徐佳辉, 黄亮, 等. 铝锂合金形变热处理工艺研究进展 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 1-10.

- Li J J, Xu J H, Huang L, et al. Research progress of thermomechanical treatment process of Al Li alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 1-10.
- [3] Harsha S, Dasharath S M. Investigation on mechanical properties of aluminium lithium alloy through rolling [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45 (P1): 392-398.
- [4] 朱宏斌, 韩艳彬, 王浩军, 等. 2A97 铝锂合金薄板热处理变形控制及其力学性能研究 [J]. 军民两用技术与产品, 2022, 469 (11): 48-53.
Zhu H B, Han Y B, Wang H J, et al. Research on deformation control and mechanical properties of 2A97 aluminum-lithium alloy sheet after heat treatment [J]. Dual-use Technologies and Products, 2022, 469 (11): 48-53.
- [5] 黄珂, 易幼平, 黄始全, 等. 2195 铝锂合金超低温流变行为及成形特性研究 [J]. 材料导报, 2022, 36 (3): 168-173.
Huang K, Yi Y P, Huang S Q, et al. Study on the ultra-low temperature rheological behavior and forming characteristics of 2195 Al-Li alloy [J]. Materials Reports, 2022, 36 (3): 168-173.
- [6] 周璇, 肖华强, 田雨鑫, 等. 2195 铝锂合金热变形流变行为与热加工图研究 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (1): 8-16.
Zhou X, Xiao H Q, Tian Y X, et al. Study on hot deformation

- rheological behavior and hot working diagram of 2195 Al-Li alloy [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15 (1): 8–16.
- [7] 于以标, 陈乐平, 徐勇, 等. 2060-T8E30 铝锂合金的热变形行为及本构模型 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50 (12): 4388–4394.
- Yu Y B, Chen L P, Xu Y, et al. Thermal deformation behavior and constitutive model of 2060-T8E30 Al-Li alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50 (12): 4388–4394.
- [8] Wang Y, Zhao G, Xu X, et al. Constitutive modeling, processing map establishment and microstructure analysis of spray deposited Al-Cu-Li alloy 2195 [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 779: 735–751.
- [9] 刘昊天, 申红斌, 肖瑞, 等. 1420 铝锂合金板材细晶化及超塑性试验研究 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (3): 65–71.
- Liu H T, Shen H B, Xiao R, et al. Experimental study on fine crystallization and superplasticity of 1420 aluminium-lithium alloys sheet [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (3): 65–71.
- [10] 李朝阳, 黄光杰, 曹玲飞, 等. 升温速率对 AA2060 铝锂合金中间形变热处理微观组织的影响 [J]. *材料导报*, 2022, 36 (7): 178–184.
- Li C Y, Huang G J, Cao L F, et al. Effect of heating rate on microstructure of AA2060 aluminum-lithium alloy during intermediate thermomechanical treatment [J]. *Materials Reports*, 2022, 36 (7): 178–184.
- [11] 刘一宏, 朱庆丰, 左玉波, 等. 预拉伸变形量对固溶态 2050 铝锂合金棒材力学性能影响 [J]. *轻合金加工技术*, 2022, 50 (7): 30–36.
- Liu Y H, Zhu Q F, Zuo Y B, et al. Effect of pre-stretching deformation on mechanical properties of 2050 aluminum-lithium alloy bars in solid solution [J]. *Light Alloy Processing Technology*, 2022, 50 (7): 30–36.
- [12] 赵一帆, 吴文科, 何国爱, 等. 基于应力修正的 2195 铝锂合金本构模型及热加工性能 [J]. *航空材料学报*, 2021, 41 (5): 51–59.
- Zhao Y F, Wu W K, He G A, et al. Constitutive model and hot-working properties of 2195 aluminum-lithium alloy based on stress correction [J]. *Journal of Aerospace Materials*, 2021, 41 (5): 51–59.
- [13] 郭幼节, 李劲风, 刘丹阳, 等. 铝锂合金动态再结晶行为的研究进展 [J]. *航空材料学报*, 2022, 42 (5): 15–31.
- Guo Y J, Li J F, Liu D Y, et al. Research progress of dynamic recrystallization behavior of Al-Li alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2022, 42 (5): 15–31.
- [14] Miao J S, Sutton S, Luo A A. Microstructure and hot deformation behavior of a new aluminum-lithium-copper based AA2070 alloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2020, 777: 139048.
- [15] 校振华, 冯亚磊, 冯启生, 等. 高强汽车中锰钢的热压缩变形行为研究 [J]. *精密成形工程*, 2023, 15 (2): 125–131.
- Xiao Z H, Feng Y L, Feng Q S, et al. Hot compression deformation behavior of manganese steel in high strength automobile [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15 (2): 125–131.
- [16] 汪冠宇, 马贵春, 吴建军. 2099-T83 铝锂合金本构模型研究 [J]. *塑性工程学报*, 2019, 26 (1): 174–181.
- Wang G Y, Ma G C, Wu J J. Study on constitutive model of 2099-T83 aluminum-lithium alloy [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26 (1): 174–181.
- [17] Ebrahimi R, Najafizadeh A. A new method for evaluation of friction in bulk metal forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 152 (2): 136–143.
- [18] Goetz R L, Semiati S L. The adiabatic correction factor for deformation heating during the uniaxial compression test [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2001, 10 (6): 710–717.
- [19] Sellars C M. Modelling microstructural development during hot rolling [J]. *Materials Science and Technology*, 1990, 6 (11): 1072–1081.
- [20] 董宇, 叶凌英, 柯彬, 等. 基于修正流变应力的 2050 铝锂合金统一本构方程和热加工图 [J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32 (5): 1254–1268.
- Dong Y, Ye L Y, Ke B, et al. Unified constitutive equation and hot working diagram of 2050 aluminum-lithium alloy based on modified flow stress [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32 (5): 1254–1268.
- [21] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. *Journal of Applied Physics*, 1944, 15 (1): 22–32.
- [22] Chen X X, Zhao G Q, Zhao X T, et al. Constitutive modeling and microstructure characterization of 2196 Al-Li alloy in various hot deformation conditions [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 59: 326–342.
- [23] Zhang J, Liu Z M, Shi D F. Hot compression deformation behavior and microstructure of as-cast and homogenized AA2195 Al-Li alloy [J]. *Metals*, 2022, 12 (10): 1580–1588.
- [24] 高明, 赵熹, 刘杰, 等. 新型高强度 Al-Zn-Mg-Cu 合金热变形本构方程及热加工图研究 [J]. *塑性工程学报*, 2021, 28 (3): 126–136.
- Gao M, Zhao X, Liu J, et al. Study on hot deformation constitutive equation and hot working diagram of a new high strength and toughness Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (3): 126–136.
- [25] 范芳, 张竹林, 王从明, 等. 基于流变行为和热加工图的 2014 铝合金轮毂成形工艺 [J]. *塑性工程学报*, 2022, 29 (10): 143–152.
- Fan F, Zhang Z L, Wang C M, et al. 2014 aluminum alloy hub forming process based on rheological behavior and hot working diagram [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29 (10): 143–152.
- [26] Li C, Chen Z, Zhang X Q, et al. Hot deformation behavior of high Zn-containing 7A65 Al alloy [J]. *Rare Metals*, 2022, 42 (1): 302–312.