

材料与成形性能

7022 铝合金的高温力学性能和材料本构方程研究

殷 剑¹, 黎 诚², 金 康^{1,2}, 沈 智³, 董 奇⁴, 张 波²

(1. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083; 2. 中机精密成形产业技术研究院(安徽)股份有限公司, 安徽 芜湖 241000; 3. 南昌工程学院 机械工程学院, 江西 南昌 330099; 4. 合肥学院 先进制造工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 塑性成形过程中, 金属在模具型腔中处于三向应力状态且其变形温度随着流变应变处于动态变化中, 因此, 合金的流变应力受变形温度、变形量等多因素的综合作用。利用高温压缩模拟试验和有限元分析软件, 研究了 7022 铝合金在变形温度为 350、400 和 450 °C, 应变速率为 0.01、0.1、1 和 10 s⁻¹, 总变形量为 50% 时的流变应力、变形温度与应变速率之间的关系; 利用 Arrhenius 材料本构关系, 构建了 7022 铝合金的材料本构方程。结果表明: 在应变速率和变形温度的综合影响下, 7022 铝合金的峰值流变应力随着应变速率的增加以及变形温度的下降而升高, 在变形温度为 350 °C、应变速率为 10 s⁻¹ 的形变条件下流变应力达到最大, 为 156.0 MPa。并通过拟合曲线等方式得到 7022 铝合金的热激活能为 144.332 kJ·mol⁻¹。

关键词: 7022 铝合金; 热变形; 高温力学性能; 本构方程; 流变应力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.033

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 01-0237-08

Study on high temperature mechanical properties and material constitutive equation for 7022 aluminum alloy

Yin Jian¹, Li Cheng², Jin Kang^{1,2}, Shen Zhi³, Dong Qi⁴, Zhang Bo²

(1. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China;

2. China Machinery Industry Technology Research Institute of Precision Forming, Wuhu 241000, China;

3. School of Mechanical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;

4. School of Advanced Manufacturing Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China)

Abstract: During the plastic forming process, the metal is in a three-directional stress state in the die cavity and its deformation temperature is in the dynamic change with the rheological strain, and the rheological stress of alloy is affected by many factors such as deformation temperature, deformation amount and so on. Therefore, the relationships among rheological stress, deformation temperature and strain rate at the temperature of 350, 400 and 450 °C, the strain rates of 0.01, 0.1, 1 and 10 s⁻¹ and the total deformation amount of 50% were studied respectively by high temperature compression simulation test and finite element analysis software, and the material constitutive equation of 7022 aluminum alloy was established by using the Arrhenius material constitutive relation. The results show that under the comprehensive influence of strain rate and deformation temperature, the peak rheological stress of 7022 aluminum alloy increases with the increasing of strain rate and the decreasing of deformation temperature, the rheological stress reaches the maximum value of 156.0 MPa in the deformation condition of the deformation temperature of 350 °C and the strain rate of 10 s⁻¹, and the thermal activation energy of 7022 aluminum alloy is obtained to be 144.332 kJ·mol⁻¹ by fitting the curve and other methods.

Key words: 7022 aluminum alloy; hot deformation; high temperature mechanical properties; constitutive equation; rheological stress

由于各国环境保护压力的增大以及国际能源价格的不断攀升, 节能、环保技术也逐步受到重视^[1-2], 尤其是汽车工业轻量化战略的提出, 极大

地降低了能源成本以及环保压力, 而优化汽车结构所需的人力物力较大且周期较长, 但是, 采用铝合金轻量化材料替代钢构件能快速实现降低车身质量的目的^[3-5]。轻量化材料中, 铝合金由于具有比强度高、耐腐蚀性能好、吸能性好、储量丰富等特点被广泛使用, 其中 7XXX 系 (Al-Zn-Mg-Cu 系) 是铝合金中强度较高的材料, 是良好的高强度结构件的制造材料, 如汽车控制臂和连接杆件等^[6-8], 其

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-08-01

作者简介: 殷 剑 (1997-), 男, 硕士

E-mail: a18726451924@163.com

通信作者: 金 康 (1978-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: jinkang@cmipf.com

制造方法一般为锻造和挤压等塑性成形工艺^[9], 7022 铝合金为 7XXX 系铝合金中具有代表性的一种, 被广泛应用于航空航天和汽车的高强连接部件中。

常温下延展性低的特性使得 7022 铝合金极难成形复杂形状的零件, 而在高温状态下, 合金的变形抗力减小、流动性增加, 同时回弹量也极大地减小, 能够极大地提升材料的成形性能和产品精度, 铝合金的模锻成形工艺应运而生^[10-11]。而高温下 7022 铝合金的变形行为则是模锻成形的理论基础, 因此, 对其高温下应力应变行为的规律性进行深入研究具有极为重要的意义。韦韡等^[12]和张彦敏等^[13]采用热压缩试验方式, 针对 6082 铝合金探究了其在高温下的流变应力与应变速率之间的关系, 构建了 6082 铝合金在高温下的本构方程, 并得到了其峰值应力随着应变速率的增加和变形温度的下降而升高的结论。李建平等^[14]研究了 7075 铝合金板料和 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金在不同变形温度和应变速率下流变应力的变化情况, 并依据所得数据构建了相应材料的 Arrhenius 本构方程。陈睿等^[15]采用 SHPB 方法, 针对 7150-T6 铝合金在高温、高应变率下的动态力学性能、微观结构和本构模型进行了探究, 得出其在常温、高应变率下呈现局部热软化和低应变率敏感性的特点, 而在高温下则出现流变应力明显下降的现象, 为汽车的结构轻量化和安全性提供了指导。沈文涛等^[16]进行了不同变形温度和应变速率下 7050 铝合金的高温压缩试验, 得出其在不同试验条件下的流变应力变化特征, 并建立了合金的本构方程, 为 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的热成形工艺提供了理论支持。综上, 国内外针对 7022 铝合金材料性能方面的研究较少, 尤其是对高温力学性能方面开展的研究几乎没有。

本文依据模压锻造成形特征, 采用 Gleeble 热模拟压缩机进行了不同变形温度和应变速率下 7022 铝合金的等温压缩试验, 通过对 7022 铝合金高温压缩下应力与应变变化规律进行探究、分析和计算并将其导入 DEFORM-3D 中验证, 得到了含有 Zener-Hollomon 参数的 Arrhenius 材料本构方程, 为 7022 铝合金热成形工艺的制定和优化提供了理论依据。

1 试验材料与方案

试验采用尺寸为 $\Phi 35$ mm 的 O 态 7022 铝合金棒料作为原材料, 其化学成分如表 1 所示^[17]。等温压

表 1 7022 铝合金的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical components of 7022 aluminum alloy (%, mass fraction)

Zn	Mg	Cu	Si	Mn	Fe	Cr	Ti	Al
5.04	3.20	0.72	0.06	0.23	1.10	0.53	0.07	余量

缩试验所用的、表面被打磨光滑的圆柱试样尺寸为 $\Phi 10$ mm \times 15 mm^[18]。将理论参数与实际生产参数相结合, 选定 7022 铝合金热压缩试验中的变形温度为 350、400 和 450 $^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 0.01、0.1、1 和 10 s^{-1} , 总变形量为 50%^[19]。在试样与压头之间加入作为润滑介质的石墨薄片, 以减小试样的轴向摩擦对试验结果的影响。试验开始时, 以 10 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的升温速率将试样快速加热至设定温度, 并保温 5 min, 之后以设定的应变速率压缩至 50% 变形量^[20-21]。将高温压缩试验所得数据进行计算、拟合以及绘图处理后, 得到 7022 铝合金含有 Z 参数 (Zener-Hollomon 参数) 的材料本构方程^[22]。

2 试验结果及分析

2.1 7022 铝合金热压缩流变应力-流变应变曲线

不同变形条件下, 7022 铝合金的流变应力与流变应变关系曲线如图 1 所示, 由图 1 可知: 7022 铝合金的峰值流变应力随着应变速率的增加和变形温度的降低而升高^[23]。在外部条件的作用下, 晶粒之间位错的滑移、增殖和销毁是金属材料热变形的实质^[24]。变形的初始阶段, 由于启动位错所需的能量较高, 显现出明显的加工硬化, 所以, 7022 铝合金的流变应力会随着流变应变的增加而快速提升; 但当流变应力达到峰值后, 开始进入稳态阶段或略有下降, 此时在流变应力-流变应变曲线上流变应力呈现出保持不变或轻微下降的趋势^[25]。而应变速率与流变应力呈正相关, 应变速率越大, 流变应力随之增加。应变速率较低和变形温度较高时, 由于动态回复或者动态再结晶的进行, 位错密度降低, 此时的动态软化效应要大于加工硬化效应, 宏观上流变应力-流变应变曲线出现轻微下降的现象。由图 1a~图 1c 分析可知, 加工硬化导致 7022 铝合金的流变应力在高温压缩初始阶段快速达到峰值, 而随着变形温度的升高, 合金的动态软化效应和动态再结晶得到了加强, 降低了加工硬化效应的作用^[26], 流变应力在达到峰值后出现轻微的降低。

不同条件下 7022 铝合金的峰值流变应力如表 2

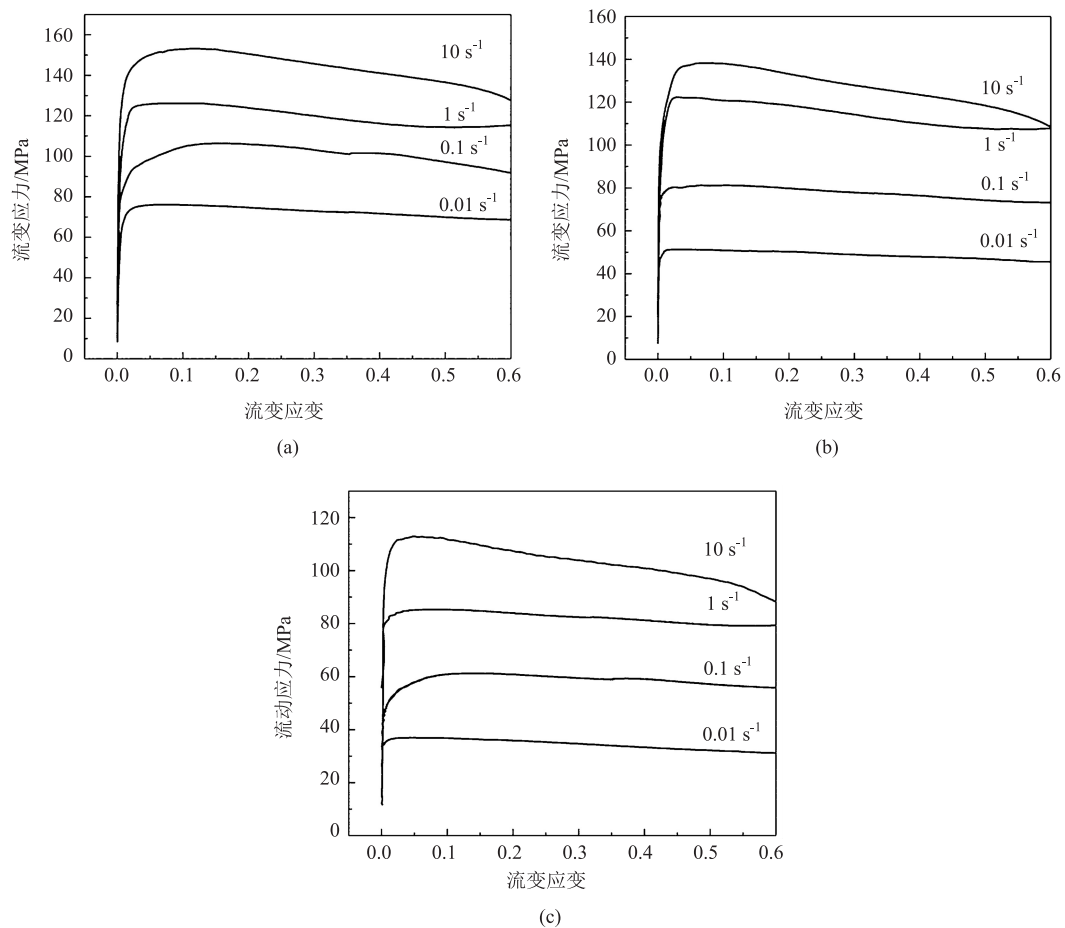


图 1 不同变形温度下 7022 铝合金的流变应力-流变应变曲线
(a) 350 °C (b) 400 °C (c) 450 °C

Fig. 1 Rheological stress-rheological strain curves of 7022 aluminum alloy at different deformation temperatures

表 2 不同变形温度和应变速率下的峰值流变应力 (MPa)

Table 2 Peak rheological stresses at different deformation temperatures and strain rates (MPa)

应变速率/ s ⁻¹	变形温度/°C		
	350	400	450
0.01	80.3	56.1	39.6
0.1	113.9	92.8	66.6
1	129.5	126.1	90.0
10	156.0	144.5	117.8

所示,在金属变形抗力的作用下使得应变速率提升,合金的峰值流变应力随之升高,而在温度对合金的软化作用下峰值流变应力随温度的升高而降低,且在变形温度为 350 °C、应变速率为 10 s⁻¹ 时流变应力达到最大值为 156.0 MPa。

2.2 7022 铝合金的本构方程和热变形激活能

根据流变应力-流变应变曲线可知,在 7022 铝合金的热成形与加工过程中,流变应力与变形温度

T 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 有关^[27]。一定变形条件下,金属材料的流变应力随流变应变的变化规律被描述为本构关系^[28]。目前,常用的本构模型有 Arrhenius 模型^[29]、J-C 模型^[30]、Sellar 模型^[31]及 Z-A 模型^[32]。其中,能够较好地表达高温下流变应变、流变应力与变形之间关系的为 Arrhenius 模型,其方程表示为^[33]:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\alpha\sigma < 0.8) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\alpha\sigma > 1.2) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A_3 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\text{所有 } \sigma) \quad (3)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s⁻¹; σ 为流变应力, MPa; Q 为热变形激活能, (J · mol⁻¹)^[34]; R 为气体常数,为 8.314 J · (mol · K)⁻¹; T 为变形温度, K; A_1 、 A_2 、 A_3 、 α 、 β 、 n_1 和 n 为材料常数,其中:

$$\alpha = \beta/n_1 \quad (4)$$

对式 (1)、式 (2) 和式 (3) 进行对数运算后, 可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - \frac{Q}{RT} \tag{5}$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - \frac{Q}{RT} \tag{6}$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_3 + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \frac{Q}{RT} \tag{7}$$

保持 T 相同的情况下, 对式 (7) 求偏导, 可得:

$$n = \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]} \right]_T \tag{8}$$

相同应变速率下, 假定热变形激活能 Q 与变形温度无关^[35], 即保持不变, 对式 (3) 求偏导可得:

$$Q = Rn \left[\frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{1/T} \right]_{\dot{\epsilon}} \tag{9}$$

为求解不同变形条件下, 变形量为 50% 时的流变应力 σ 随应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的变化关系以及 $\ln \sigma$ 随应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的变化关系, 将 $\ln \dot{\epsilon}-\sigma$ 的数据导入 Origin 中进行线性拟合。依据式 (6) 可知, 得到的直线斜率平均值即为 β 值, 拟合曲线见图 2, 拟合数据如表 3 所示。因此, $\beta=0.062 \text{ MPa}^{-1}$ 。

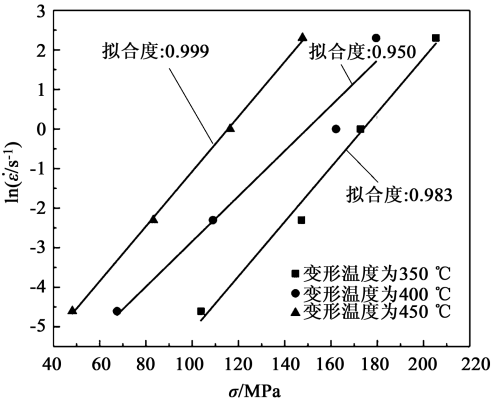


图 2 $\ln \dot{\epsilon}-\sigma$ 拟合图像
Fig. 2 $\ln \dot{\epsilon}-\sigma$ fitted image

表 3 $\ln \dot{\epsilon}-\sigma$ 拟合数据

Table 3 $\ln \dot{\epsilon}-\sigma$ fitted data

变形温度/℃	拟合方程	拟合度
350	$\ln \dot{\epsilon} = 0.0689\sigma - 11.999$	0.983
400	$\ln \dot{\epsilon} = 0.057\sigma - 8.561$	0.950
450	$\ln \dot{\epsilon} = 0.069\sigma - 8.007$	0.999

将 $\ln \dot{\epsilon}-\ln \sigma$ 的数据导入 Origin 中进行线性拟合, 依据式 (5) 可知, 所得直线斜率的平均值即为 n_1 值, 拟合曲线见图 3, 拟合数据如表 4 所示。因此, $n_1 =$

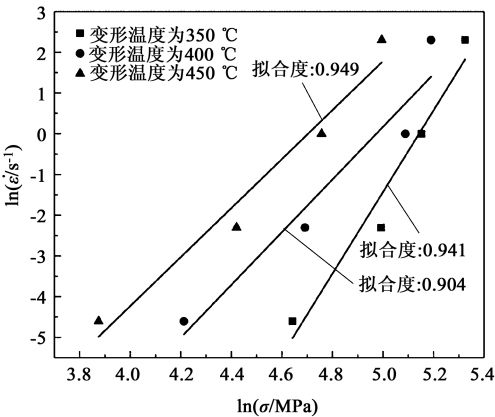


图 3 $\ln \dot{\epsilon}-\ln \sigma$ 拟合图像

Fig. 3 $\ln \dot{\epsilon}-\ln \sigma$ fitted image

表 4 $\ln \dot{\epsilon}-\ln \sigma$ 拟合数据

Table 4 $\ln \dot{\epsilon}-\ln \sigma$ fitted data

变形温度/℃	拟合方程	拟合度
350	$\ln \dot{\epsilon} = 10.027 \ln \sigma - 51.561$	0.941
400	$\ln \dot{\epsilon} = 6.468 \ln \sigma - 32.170$	0.904
450	$\ln \dot{\epsilon} = 6.014 \ln \sigma - 28.284$	0.949

7.503。根据式 (4), 可得 $\alpha=0.008 \text{ MPa}^{-1}$ 。

在应变速率设为不变的条件下, 将 $\ln \dot{\epsilon}-\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 计算数据导入 Origin 中进行线性拟合, 依据式 (7) 可知, 所得斜率的平均值即为 n 值, 拟合曲线见图 4, 拟合数据如表 5 所示。因此, 可得 $n=7.503$ 。

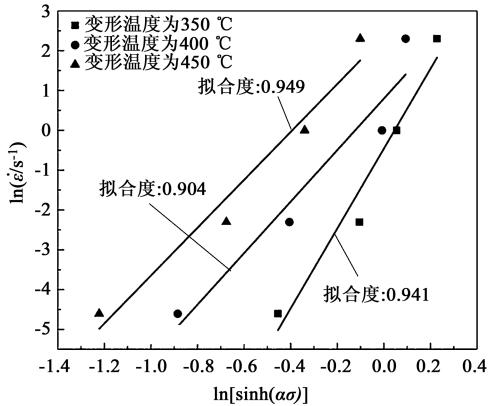


图 4 $\ln \dot{\epsilon}-\ln \sinh(\alpha \sigma)$ 拟合图像

Fig. 4 $\ln \dot{\epsilon}-\ln \sinh(\alpha \sigma)$ fitted image

表 5 $\ln \dot{\epsilon}-\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 拟合数据

Table 5 $\ln \dot{\epsilon}-\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ fitted data

变形温度/℃	拟合方程	拟合度
350	$\ln \dot{\epsilon} = 10.027 \ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 0.459$	0.941
400	$\ln \dot{\epsilon} = 6.468 \ln [\sinh(\alpha \sigma)] + 0.797$	0.904
450	$\ln \dot{\epsilon} = 6.014 \ln [\sinh(\alpha \sigma)] + 2.366$	0.949

同时, 将 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 的计算数据导入 Origin 中进行线性拟合, 所得斜率平均值即为 Q 值, 拟合曲线见图 5, 拟合数据如表 6 所示。因此, $Q = 1000 \times 2.31467 Rn = 144.332 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

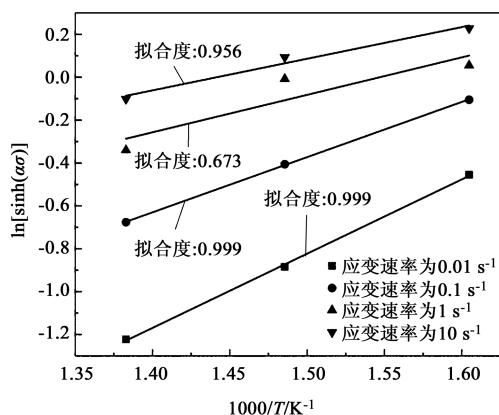


图 5 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 拟合图像

Fig. 5 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ fitted image

表 6 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 拟合数据

Table 6 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ fitted data

应变速率/ s^{-1}	拟合方程	拟合度
0.01	$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = 3.463 (1000/T) - 6.017$	0.999
0.1	$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = 2.574 (1000/T) - 4.233$	0.999
1	$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = 1.747 (1000/T) - 2.702$	0.673
10	$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = 1.475 (1000/T) - 2.126$	0.956

变形温度 T 与变形速率 $\dot{\epsilon}$ 对流变应力的影响可以用温度补偿因子 Zener-Hollomon (参数 Z) 进行描述^[36]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (10)$$

将式 (10) 带入式 (3) 中可以得到:

$$Z = A_3 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (11)$$

对式 (10)、式 (11) 两侧进行对数运算后可得:

$$\ln Z = \ln A_3 + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (12)$$

$$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} \quad (13)$$

$$\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A_3 + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (14)$$

不同变形温度下 $\ln Z$ 的值如表 7 所示。将 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 数据导入 Origin 中进行线性拟合, 如图 6 所示。其与 $\ln Z$ 轴的交点即为 $\ln A_3$ 的值。因此, $\ln A_3 = 26.95941 \Rightarrow A_3 = 5.11 \times 10^{11}$ 。

综上所述, 当变形量为 50% 时, 7022 铝合金的 Arrhenius 本构方程的参数为: $A_3 = 5.11 \times 10^{11}$, $\alpha = 0.008 \text{ MPa}^{-1}$, $\beta = 0.062 \text{ MPa}^{-1}$, $n_1 = 7.503$, $n = 7.503$, $Q = 144.332 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

表 7 不同变形温度与应变速率下 $\ln Z$ 的值

Table 7 Values of $\ln Z$ at different deformation temperatures and strain rates

应变速率/ s^{-1}	变形温度/ $^{\circ}\text{C}$		
	350	400	450
0.01	23.254	21.185	19.401
0.1	25.556	23.487	21.704
1	27.859	25.790	24.007
10	30.162	28.092	26.309

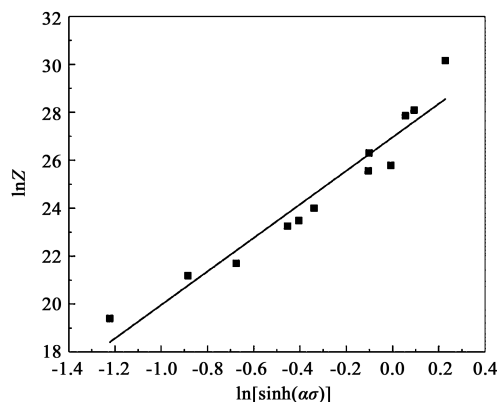


图 6 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 拟合图像

Fig. 6 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ fitted image

将以上参数代入式 (3), 可以得到 7022 铝合金的材料本构方程^[37]为:

$$\dot{\epsilon} = 5.11 \times 10^{11} [\sinh(0.008\sigma)]^{7.503} \exp\left(-\frac{144331.6}{8.314T}\right) \quad (15)$$

塑性成形过程中, 金属在模具型腔中处于三向应力状态且其变形温度随着流变应变处于动态变化中, 因此, 合金的流变应力受变形温度、变形量等多因素的综合作用, 为验证所得的 7022 铝合金的本构方程应用于数值模拟的合理性, 将上述本构方程的参数与温度补偿因子导入有限元软件中, 所得流变应力-流变应变曲线如图 7 所示。结果显示, 在 DEFORM-3D 材料库中, 所得材料的本构模型的流变应力、流变应变与变形温度间的关系为: 流变应力随着流变应变的增加和变形温度的降低而升高, 能够验证所得 7022 铝合金本构模型存在一定的合理性。

3 结论

(1) 7022 铝合金的流变应力受到变形温度与应变速率的综合作用, 材料的流变应力经过初期的加

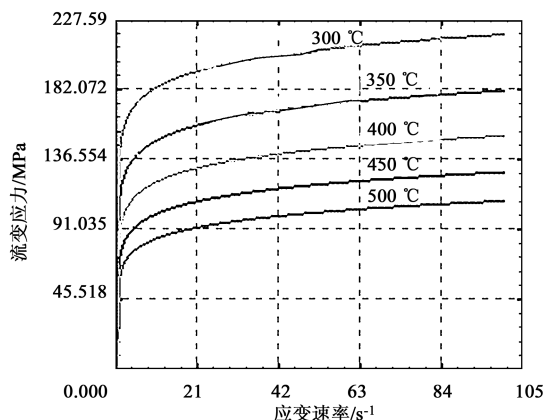


图7 DEFORM-3D 模拟中 7022 铝合金的流变应力-流变应变曲线
Fig. 7 Rheological stress-rheological strain curves of 7022 aluminum alloy in simulation by DEFORM-3D

工硬化阶段之后进入稳态状态或略有下降。变形的初始阶段由于启动位错所需的能量较高,所以,7022 铝合金的流变应力会随着流变应变的增加而快速提升,显现出明显的加工硬化;应变速率较低和变形温度较高时,合金的动态软化效应和动态再结晶得到加强,降低了加工硬化效应的作用,宏观上呈现出流变应力-流变应变曲线出现轻微下降的现象。变形温度越低、应变速率越大,7022 铝合金变形初期的加工硬化越剧烈,且在变形温度为 350 °C、应变速率为 10 s⁻¹ 条件下达到峰值流变应力为 156.0 MPa。

(2) 计算得到 7022 铝合金的变形激活能 Q 为 144.332 kJ · mol⁻¹,并构建了流变应力、应变速率和变形温度之间的 Arrhenius 本构方程: $\dot{\epsilon} = 5.11 \times 10^{11} \times [\sinh(0.008\sigma)]^{7.503} \exp\left(-\frac{144331.6}{8.314T}\right)$ 。温度补偿因子 Zener-Hollomon 参数 $Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{144331.6}{8.314T}\right)$ 。

参考文献:

[1] 刘杰. 7N01 铝合金高温变形行为研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
Liu J. Deformation Behavior of 7N01 Aluminum Alloy During Hot Compression Deformation at Elevated Temperature [D]. Changsha: Hunan University, 2008.

[2] 张树国, 裴恒伟, 杨湘杰. Al-Zn-Mg-Cu 合金半固态成形的研究现状与应用 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (3): 67-73.
Zhang S G, Pei H W, Yang X J. Research status and application of semi-solid forming of Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2020, 12 (3): 67-73.

[3] 汪建强, 郭丽丽, 李永兵, 等. 6016 铝合金板材室温成形性及其数值模拟 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (2): 43-51.
Wang J Q, Guo L L, Li Y B, et al. Formability and numerical simulation of 6016 aluminum alloy sheet at room temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (2): 43-51.

[4] 敖斌秋. 轻量化汽车材料技术的最新动态 [J]. 汽车工艺与材料, 2002, (Z1): 1-21.
Ao B Q. The latest development of lightweight automotive material technology [J]. Automobile Technology & Material, 2002, (Z1): 1-21.

[5] 倪炆, 蔡玉俊, 董晓传, 等. 7075 铝合金高温力学性能及本构方程研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (2): 128-134.
Ni Y, Cai Y J, Dong X C, et al. Study on high temperature mechanical properties and constitutive equation of 7075 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (2): 128-134.

[6] Jr E A S, Staley J T. Application of modern aluminum alloys to aircraft [J]. Progress in Aerospace Sciences, 1996, 32 (2/3): 131-172.

[7] Su R M, Qu Y D, Li R D, et al. Influence of RRA treatment on the microstructure and stress corrosion cracking behavior of the spray-formed 7075 alloy [J]. Materials Science, 2015, 51 (3): 372-380.

[8] 殷剑, 黎诚, 金康, 等. 铝合金汽车前下摆臂成形工艺的有限元模拟与优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 74-82.
Yin J, Li C, Jin K, et al. Finite element simulation and optimization of the forming process of the aluminum alloy front lower sway arm of automobile [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 74-82.

[9] Prasad N E, Wanhill R. Aerospace materials and material technologies [M]. Singapore: Springer, 2017.

[10] 殷剑, 金康, 黎诚. 时效处理对 7022 铝合金组织与性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43 (2): 49-57.
Yin J, Jin K, Li C. Effect of aging treatment on microstructure and properties of 7022 aluminum alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43 (2): 49-57.

[11] 黎诚, 殷剑, 金康. 时效处理对 7022 铝合金力学性能和导电率的影响 [J]. 材料热处理学报, 2021, 42 (12): 61-68.
Li C, Yin J, Jin K. Effect of aging treatment on mechanical properties and electrical conductivity of 7022 aluminum alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42 (12): 61-68.

[12] 韦韡, 蒋鹏, 曹飞. 6082 铝合金的高温本构关系 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (2): 100-106.
Wei W, Jiang P, Cao F. Constitutive equations for hot deformation of 6082 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20 (2): 100-106.

[13] 张彦敏, 陈赛, 葛学元, 等. 6082 铝合金热变形行为及热加工图 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (4): 113-121.
Zhang Y M, Chen S, Ge X Y, et al. Hot deformation behavior and

- processing map of aluminum alloy 6082 [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 113-121.
- [14] 李建平, 夏祥生. 挤压态 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金本构方程及加工图 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 95-100.
- Li J P, Xia X S. Constitutive equation and processing map of an as-extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 95-100.
- [15] 陈睿, 温仕成, 王旭, 等. 7150-T6 铝合金动态特性实验及本构方程研究 [J]. 机械科学与技术, 2022, (8): 1270-1277.
- Chen R, Wen S C, Wang X, et al. Experimental study of dynamic characteristics and constitutive equation of 7150-T6 aluminum alloy [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, (8): 1270-1277.
- [16] 沈文涛, 张鹏, 高蕾, 等. 7050 铝合金热压缩本构方程 [J]. 大型铸锻件, 2016, (6): 1-3.
- Shen W T, Zhang P, Gao L, et al. Constitutive equation of hot compression for 7050 aluminum alloy [J]. Heavy Casting and Forging, 2016, (6): 1-3.
- [17] 张腾, 周友龙, 刘拥军, 等. 6061 铝合金车体搅拌摩擦焊接接头微型剪切试验研究 [J]. 电焊机, 2012, 42 (10): 92-95.
- Zhang T, Zhou Y L, Liu Y J, et al. Research of the FSW joint of 6061 aluminum alloy by mini-shear-testing [J]. Electric Welding Machine, 2012, 42 (10): 92-95.
- [18] 任发才. 马氏体不锈钢热变形行为及汽轮机叶片热锻过程多物理场数值仿真研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- Ren F C. Research on Hot Deformation Behavior of Martensitic Stainless Steel and Multi-physics Numerical Simulation of Turbine Blade Hot Forging [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [19] 李轩颖, 徐雪峰, 王继, 等. 基于薄壁环压缩的铝合金管材应力-应变行为 [J]. 中国有色金属学报, 2017, 27 (10): 2020-2028.
- Li X Y, Xu X F, Wang J, et al. Stress-strain behavior of aluminum alloy pipe based on thin-walled ring compression [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27 (10): 2020-2028.
- [20] 王思秋. Ti-22Al-25Nb 合金粉末冶金制备及组织性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Wang S Q. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-22Al-25Nb Alloy Prepared by Power Metallurgy Route [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [21] 刘文超. 粉末冶金 Ti-22Al-25Nb 合金制备与微观组织研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- Li W C. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-22Al-25Nb Alloy Prepared by Powder Metallurgy Route [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [22] 陈泽中, 李文传, 李响, 等. 工艺参数对铝合金微槽道挤压成型的影响 [J]. 有色金属材料与工程, 2019, 40 (1): 27-32, 37.
- Chen Z Z, Li W C, Li X, et al. Effect of process parameters on isothermal extrusion forming of aluminum alloy microchannels [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2019, 40 (1): 27-32, 37.
- [23] 盈亮, 戴明华, 胡平, 等. 6061-T6 铝合金高温本构模型及温成形数值模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25 (7): 1815-1821.
- Ying L, Dai M H, Hu P, et al. Thermal constitutive model and numerical simulation of hot forming for 6061-T6 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25 (7): 1815-1821.
- [24] 赵业青, 李岩, 鲁法云, 等. 7150 铝合金热变形行为及微观组织 [J]. 航空材料学报, 2015, 35 (3): 18-23.
- Zhao Y Q, Li Y, Lu F Y, et al. Flow stress behavior and microstructure of 7150 aluminum alloys during hot deformation [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35 (3): 18-23.
- [25] 郭道强, 孟显娜, 张辉. Al-Mn-Mg-RE 铝合金高温热压缩变形行为的研究 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (2): 91-94.
- Guo D Q, Meng X N, Zhang H. Hot deformation behavior of Al-Mn-Mg-RE alloy during compression at elevated temperature [J]. Hot Working Technology, 2012, 41 (2): 91-94.
- [26] 李银华. 微合金化 CuNiSi 系合金时效及热变形行为研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2008.
- Li Y H. Study on aging and thermal deformation behavior of CuNi-Si series alloys [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2008.
- [27] 李萍, 朱慧玲, 严思梁, 等. 低活化马氏体钢热变形行为及机理型本构建模研究 [J]. 原子能科学技术, 2020, 54 (10): 1904-1911.
- Li P, Zhu H L, Yan S L, et al. Hot deformation behavior and physically based constitutive modeling of low activation martensitic steel [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54 (10): 1904-1911.
- [28] 张青云. 基于 ABAQUS 的皮质骨钻削性能的仿真和试验研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2014.
- Zhang Q Y. Finite Element Analysis and Experimental Research of Cortical Bone Drilling Performance Based on ABAQUS [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2014.
- [29] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high rates and high temperatures [A]. Processing of the Seventh International Symposium on Ballistics [C]. Hague, 1983.
- [30] Frank J Z, Ronald W A. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61 (5): 1816-1825.
- [31] 易幼平, 杨积慧, 蔺永诚. 7050 铝合金热压缩变形的流变应力本构方程 [J]. 材料工程学报, 2007, (4): 20-22.
- Yi Y P, Yang J H, Lin Y C. Flow stress constitutive equation of 7050 aluminum alloy during hot compression [J]. Journal of Ma-

- terials Engineering, 2007, (4): 20-22.
- [32] Cho J R, Jeong H S, Cha D J, et al. Prediction of microstructural evolution and recrystallization behaviors of a hot working die steel by FEM [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160 (1): 1-8.
- [33] 王倩倩, 王强, 张治民, 等. 铝钨粉末合金挤压成形工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (21): 1-4.
Wang Q Q, Wang Q, Zhang Z M, et al. Study on extrusion forming technology of Al-W alloy powder [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (21): 1-4.
- [34] 张彦敏, 王永健, 陈赛, 等. Cu-Al₂O₃ (0.68%) 弥散强化铜合金塑性变形特性 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (5): 128-133.
Zhang Y M, Wang Y J, Chen S, et al. Plastic deformation characteristics of Cu-Al₂O₃ (0.68%) dispersion strengthened copper alloy [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (5): 128-133.
- [35] 李红英, 赵菲, 刘丹, 等. 工程机械用 Q1100 钢的热变形应
- 变补偿本构方程 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2020, 51 (3): 608-618.
- Li H Y, Zhao F, Liu D, et al. Thermal deformation strain compensation constitutive equation for Q1100 steel for construction machinery [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2020, 51 (3): 608-618.
- [36] 王战锋, 张辉, 张昊, 等. 喷射沉积 5A06 铝合金热压缩变形的流变应力行为 [J]. 中国有色金属学报, 2006, (11): 1938-1944.
Wang Z F, Zhang H, Zhang H, et al. Flow stress behaviors of spray-deposited 5A06 aluminum alloy under hot compression deformation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, (11): 1938-1944.
- [37] 苗建芸. 5083 铝合金的超塑性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
Miao J Y. Research on the Superplasticity of Aluminium Alloy 5083 [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.

(上接第 221 页)

- [9] Sidor J J. Effect of hot band on texture evolution and plastic anisotropy in aluminium alloys [J]. Metals, 2021, 11 (8): 1310-1319.
- [10] 温涛, 陈永来, 杜玥, 等. 旋压变形对 2195 铝锂合金组织和性能的影响 [J]. 载人航天, 2020, 26 (6): 717-722.
Wen T, Chen Y L, Du Y, et al. Effect of spinning deformation on microstructure and properties of 2195 Al Li alloy [J]. Manned Spaceflight, 2020, 26 (6): 717-722.
- [11] Zanchetta B D, Silva V, Sordi V L, et al. Effect of asymmetric rolling under high friction coefficient on recrystallization texture and plastic anisotropy of AA1050 alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29 (11): 2262-2272.
- [12] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [13] Zhou Z Y, Xiao X, Zhang W J, et al. Microstructure and tensile properties anisotropy of 7xxx ultra-thick plate [J]. Materials Science Forum, 2021, 6114: 134-142.
- [14] Lin S P, Nie Z R, Huang H, et al. Annealing behavior of a modified 5083 aluminum alloy [J]. Materials and Design, 2010, 31 (3): 1607-1612.
- [15] 向正武, 李劲风, 宁红, 等. 不同预变形量 T8 态时效 2195 铝锂合金微观组织与强度贡献 [J]. 宇航材料工艺, 2021, 51 (4): 140-146.
Xiang Z W, Li J F, Ning H, et al. Microstructure and strength contribution of 2195 Al Li alloy aged in T8 state with different pre deformation [J]. Aerospace Material Technology, 2021, 51 (4): 140-146.
- [16] 李红英, 王小雨, 余玮琛. 固溶时效工艺对 2297 铝锂合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2017, 27 (11): 2187-2194.
Li H Y, Wang X Y, Yu W C. Effect of solution aging process on microstructure and mechanical properties of 2297 Al Li alloy [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27 (11): 2187-2194.
- [17] Rodgers B I, Prangnell P B. Quantification of the influence of increased pre-stretching on microstructure-strength relationships in the Al-Cu-Li alloy AA2195 [J]. Acta Materialia, 2016, 108: 55-67.
- [18] 郝敏, 王亮, 李国爱, 等. 热力耦合作用下 Al-2.8% Cu-1.35% Li-0.11% Zr 合金析出相演化和力学性能 [J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13 (1): 60-66.
Hao M, Wang L, Li G A, et al. Precipitation evolution and mechanical properties of Al-2.8% Cu-1.35% Li-0.11% Zr alloy under thermal mechanical coupling [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2022, 13 (1): 60-66.
- [19] Ivanov R, Deschamps A, De G F. Clustering kinetics during natural ageing of Al-Cu based alloys with (Mg, Li) additions [J]. Acta Materialia, 2018, 157: 186-195.
- [20] Ines H, Christian S, Muhammad B, et al. Precipitation of T1 and θ' phase in Al-4Cu-1Li-0.25Mn during age hardening: Microstructural investigation and phase-field simulation [J]. Materials, 2017, 10 (2): 117-121.