

# 6061 铝合金热变形行为与热加工图

王海龙<sup>1,2,3</sup>, 梁卫抗<sup>1,2,3,4</sup>, 王乾廷<sup>1,2,3</sup>, 林光磊<sup>1,2,3</sup>

(1.福建工程学院 材料科学与工程学院,福建 福州 350118;

2.福建省新材料制备与成形技术重点实验室,福建 福州 350118;

3.福建省精确成型制造工程研究中心,福建 福州 350118;

4.福建省南平铝业股份有限公司,福建 南平 353000)

**摘要:** 基于 Gleeble-3500 热模拟试验机平台,对 6061 铝合金进行等温热压缩实验,研究了该合金在变形温度为 350 ~ 500 °C 和应变速率为 0.01 ~ 10 s<sup>-1</sup> 条件下的高温流变行为;并建立了 6061 铝合金的 Arrhenius 本构方程,应用于 Deform 软件进行热压缩实验模拟;基于动态材料模型和 Murty 准则,建立了 6061 铝合金在不同应变下的加工图,结合显微组织进行验证。结果表明,该合金材料的流变应力随应变速率增加而增大,随变形温度降低而增大;建立的本构方程能较好描述该合金的高温流变行为;变形温度为 460 ~ 500 °C,应变速率为 0.1 ~ 0.5 s<sup>-1</sup> 的区域是该合金最佳工艺参数范围。

**关键词:** 6061 铝合金;流变应力;本构方程;热加工图

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)01-0035-07

## Study on thermal deformation behavior and thermal processing map of aluminum alloy 6061

WANG Hailong<sup>1,2,3</sup>, LIANG Weikang<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Qianting<sup>1,2,3</sup>, LIN Guanglei<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Materials Processing and Application, Fuzhou 350118, China;

3. Fujian Provincial Precision Processing Manufacturing Engineering Research Center, Fuzhou 350118, China;

4. Fujian Nanping Aluminium Co., LTD, Nanping 353000, China)

**Abstract:** Based on the Gleeble-3500 thermal simulation testing machine platform, isothermal compressive experiments were performed for aluminum alloy 6061, and the high temperature flow behavior of the alloy was studied at deformation temperature of 350 ~ 500 °C and strain rate of 0.01 ~ 10 s<sup>-1</sup>. According to the test data, the Arrhenius constitutive equation of 6061 aluminum alloy was established. The established Arrhenius constitutive equation for the alloy was applied to the Deform software for experimental simulation of thermal compression. According to the dynamic material model and Murty method, the processing map of the alloy at different strains was established and verified by the microstructure. Results show that the flow stress of the alloy increases with the increase of strain rate and the decrease of deformation temperature. The established constitutive equation could better describe the flow behavior of the alloy at high temperature. The optimal process parameters for the alloy were the range with a deformation temperature of 460 ~ 500 °C and a strain rate of 0.1 ~ 0.5 s<sup>-1</sup>.

**Keywords:** aluminum alloy 6061; flow stress; constitutive equation; thermal processing map

收稿日期: 2021-11-18

基金项目: 福州市科技重大项目(2021-ZD-214);福州市科技创新平台项目(2020-PT-145);福建省科技计划对外合作项目(2020I1003)

第一作者简介: 王海龙(1995—),男,四川巴中人,硕士研究生,研究方向:金属塑性成形及数值模拟计算。

通信作者: 王乾廷(1977—),男,河南社旗人,教授,博导,研究方向:先进制造、材料加工。

6061 是一种具有良好成形性、耐腐蚀性和焊接性能的 Al-Mg-Si 系铝合金,被广泛应用于汽车、铁路和航空航天等领域<sup>[1]</sup>。在热加工过程中,若选择的热加工工艺参数不合适,材料可能产生缺陷,如晶粒粗大、力学性能低及产生裂纹等,需要研究材料的热变形行为,并观察微观组织,获取最优热加工工艺范围。因此,研究铝合金材料的高温本构方程和预测热加工过程中的安全加工区域具有重要意义。而双曲正弦 Arrhenius 本构方程因形式简单,方程参数容易通过实验数据求解得到,被广泛应用于有限元软件<sup>[2-3]</sup>。Wei 等<sup>[4]</sup>根据动态材料模型理论和 Prasad 失稳准则构建了热加工图,确定 Al-Mg-Si-Cu-Zn 合金最佳工艺参数范围为 470 ~ 500 ℃ 和 0.01 ~ 0.1 s<sup>-1</sup>。由于应变速率敏感指数  $m$  不是一个定值,而是随  $\varepsilon$  和  $T$  变化而变化,且流变行为并不满足幂律方程。因此,利用 Prasad 失稳准则计算出的值存在偏差<sup>[5-6]</sup>。

本研究基于 Gleeble-3500 热模拟试验机平台,开展 6061 铝合金的等温热压缩实验,根据实验数据建立了双曲正弦 Arrhenius 本构方程,并构建了不同应变条件下的热加工图,旨在为 6061 铝合金的热加工工艺制定和优化提供理论依据。

## 1 实验材料及方法

实验材料选择 6061 铝合金,其化学成分及质量分数如表 1 所示。选择  $\phi 8 \times 12$  mm 的圆柱试样在 Gleeble-3500 热模拟试验机上开展等温热压缩实验,实验前在试样的端面增加二硫化钼和石墨薄片作为润滑介质,以降低试样与压头接触面之间的摩擦。根据 6061 铝合金材料的加工特性和企业提供的工艺参数范围,选择变形温度为 350、400、450 和 500 ℃,应变速率为 0.01、0.1、1 和 10 s<sup>-1</sup>。实验前,将试样以 2 ℃/s 的加热速率加热至实验设定温度,保温 4 min 使试样组织均匀化,在应变速率为 0.01、0.1、1 和 10 s<sup>-1</sup>下进行压缩实验,最大压缩量为 60%,当实验结束后,立即对试样进行水淬,以保全高温变形组织。将压缩试样沿轴向切开,经打磨、机械抛光,采用 HF 1.5 mL、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 30 mL 和 H<sub>2</sub>O 60 mL 配比的腐蚀剂腐蚀约 1 min,并在 MV5000 光学显微镜下观察金相组织。

表 1 6061 铝合金化学成分及质量分数  
Tab.1 Chemical composition and mass fractions of aluminum alloy 6061

化学成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
质量分数/%	0.713	0.189	0.294	0.0916	0.966
化学成分	Cr	Zn	Ti	Al	
质量分数/%	0.246	0.0494	0.0188	余量	

## 2 结果与分析

### 2.1 应力-应变曲线

6061 铝合金在不同变形条件下的应力-应变曲线如图 1 所示。由图 1 可知,在相同变形温度条件下,流变应力随应变速率增加而增加,这是因为应变速率的增加,单位时间内的变形量和位错的数量也快速增加,造成大量位错相互缠结进而阻碍位错的运动,使得金属抗变形能力提高,因此,流变应力也增加<sup>[3]</sup>。在相同应变速率条件下,流变应力随变形温度升高而降低,这是因为材料的热激活能和原子内能随温度升高而增加,导致阻碍位错运动的阻力降低,使得金属抗变形能力减弱,有利于材料变形,流变应力降低<sup>[7]</sup>。

由图 1(a)可知,除了变形温度为 450、500 ℃ 外,6061 铝合金发生明显的动态软化现象。流变应力在变形初期阶段增长速率快,这是由于材料内部的位错数量随变形量的增加而增加,导致大量位错缠结并阻碍位错运动,且在此阶段动态软化率低于加工硬化率,因此,流变应力增加。当流变应力到达峰值应力后,材料出现动态软化现象,这是因为随着变形量的增加,材料内部的变形储能也不断增加,为动态再结晶和回复的出现提供能量,使动态软化率高于加工硬化率,导致流变应力降低。随着变形量的增加,流变应力逐渐稳定,说明加工硬化率和动态软化率处于动态平衡状态。从图 1(c)(d)可见,在应变量超过 0.1 后,除 400 ℃ 外,流变应力缓慢增加,这是因为高应变速率下材料变形时间变短,动态回复进行不充分或者没有出现,导致不能完全克服加工硬化的影响。另外在高应变速率下大量位错出现缠结,严重阻碍位错的运动,从而增加流变应力。

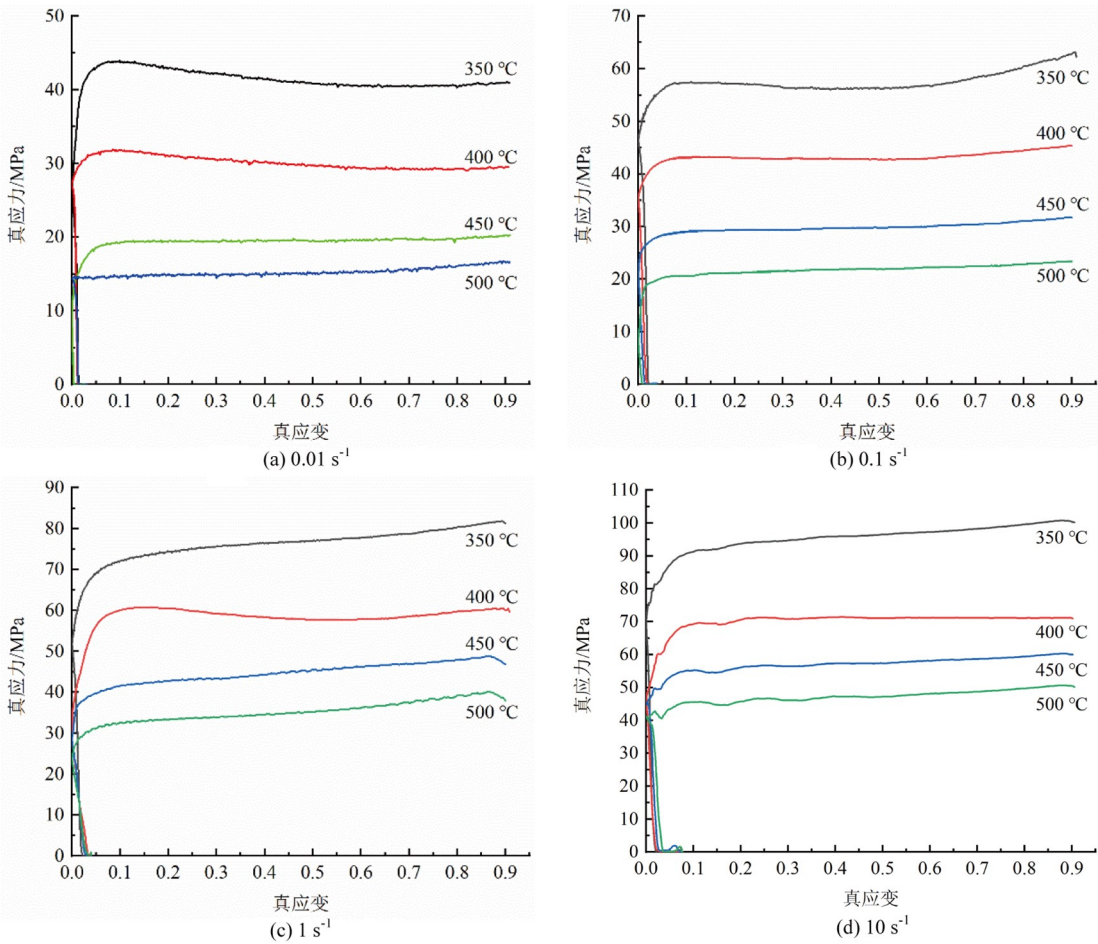


图 1 6061 铝合金在不同应变速率条件下的应力应变曲线

Fig.1 Stress-strain curve of aluminum alloy 6061 at different strain rates

2.2 Arrhenius 本构方程

Arrhenius 本构方程是用来描述材料在热变形过程中温度、应变速率与流变应力之间的关系,其表达式为<sup>[8]</sup>:

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

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT), \alpha\sigma < 0.8 \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT), \alpha\sigma > 1.2 \quad (3)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $s^{-1}$ ;  $A$  为结构因子,  $s^{-1}$ ;  $\alpha$  为应力水平参数,  $mm^2/N$ ;  $\sigma$  为流变应力,  $MPa$ ;  $n$  为应力指数;  $R$  为摩尔气体常数, 数值为  $8.314 J/(mol \cdot K)$ ;  $T$  为变形温度,  $K$ ;  $Q$  为热变形激活能,  $kJ/mol$ ;  $n_1$ ,  $\beta$ ,  $A_1$  和  $A_2$  均为材料参数。其中  $n_1$ ,  $\beta$  和  $\alpha$  之间满足  $\alpha = \beta/n_1$  的关系。

采用最小二乘法线性拟合求解 Arrhenius 本构方程中  $\alpha$ ,  $n$ ,  $Q$  和  $A$  参数的值。对式(2)(3)两边分别取对数可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (4)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (5)$$

将同一温度下不同应变速率的峰值应力分别代入式(4)(5), 绘制  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  以及  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  在特定温度下的关系曲线图, 如图 2(a)(b) 所示。通过线性拟合求得  $n_1$  的平均值为 7.174 778,  $\beta$  的平均值为 0.167 803, 应力水平参数  $\alpha$  由  $\beta/n_1$  进行求解, 即  $\alpha = 0.023 388 mm^2/N$ 。

假设热变形激活能  $Q$  与温度无关, 对式(1)两边同时取对数可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A - \frac{Q}{RT} + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (6)$$

将同一温度、不同应变速率下峰值应力代入式(6), 绘制  $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  在特定温度下的关系曲线图, 如图 2(c) 所示。对数据点进行线

性拟合可得直线的斜率  $n$ ,  $n$  取平均值为 5.208。

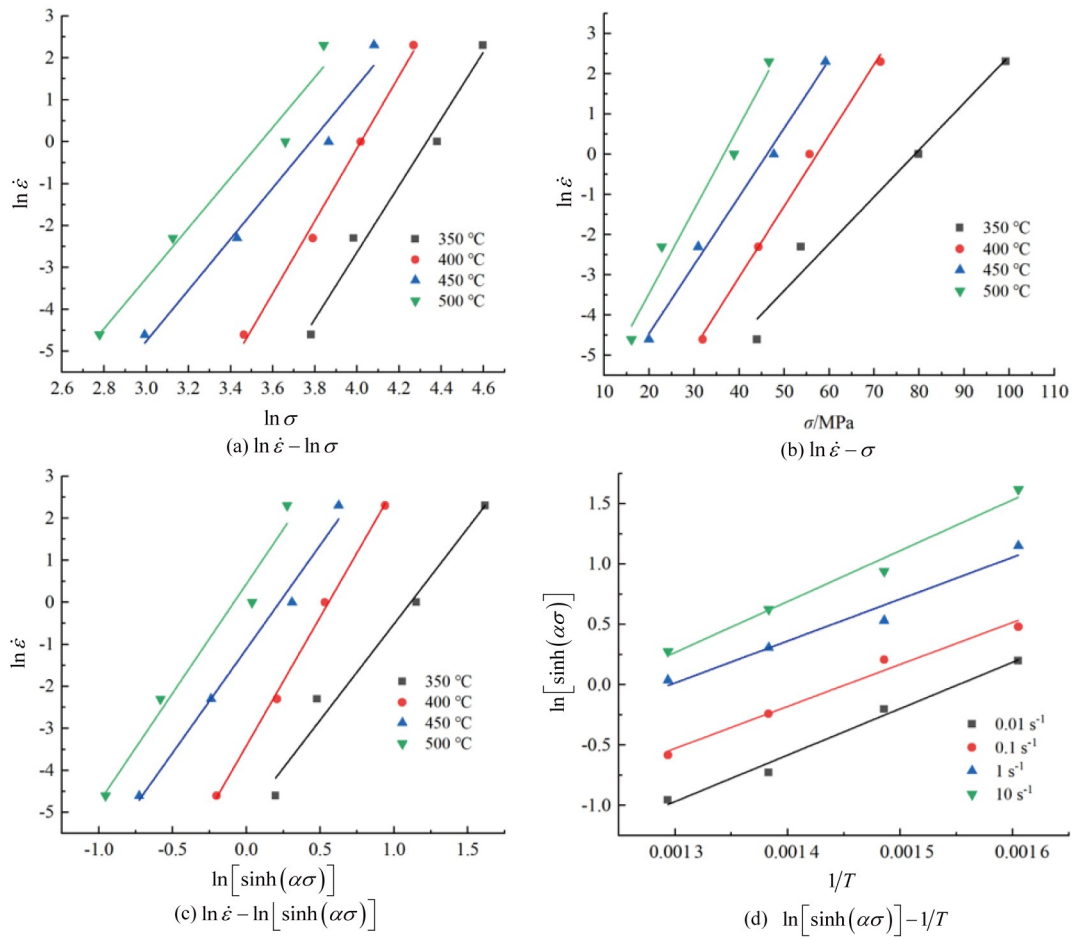


图 2 Arrhenius 本构方程参数求解

Fig.2 Parameter solution of Arrhenius constitutive equation

变换式(6)可得:

$$\ln [\sinh(\alpha\sigma)] = \left( \ln \dot{\varepsilon} - \ln A + \frac{Q}{RT} \right) / n \quad (7)$$

将  $n$  值代入式(7), 绘制特定应变速率下的  $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$  的关系曲线, 如图 2(d) 所示。通过线性拟合可得直线的斜率和截距  $(\ln \dot{\varepsilon} - \ln A) / n$ 。热变形激活能  $Q$  取平均值为 162.462 kJ/mol, 材料结构因子  $A$  取平均值  $1.652 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ 。

6061 铝合金 Arrhenius 本构方程为:

$$\sigma = 42.76 \sinh^{-1} \left[ (\dot{\varepsilon} / 1.652 \times 10^{11})^{1/5.208} \cdot \exp(162.462 / 5.208 RT) \right] \quad (8)$$

2.3 6061 铝合金试样热压缩实验的数值模拟

在 Deform 软件材料库中重新定义 6061 铝合金材料的 Arrhenius 本构方程参数。选取 6061 铝合金试样在温度 450 °C、应变速率  $1 \text{ s}^{-1}$  以及应变

量 0.91 的热压缩过程进行模拟分析。

试样在热压缩后其外形为腰鼓形, 这是由于压头与试样端面存在摩擦力, 导致试样沿径向变形, 产生腰鼓现象, 测量并计算实际实验和仿真分析试样最大腰鼓直径的平均值分别为 12.933 和 13.019 mm, 误差为 0.66 %; 实际实验和仿真分析试样上端面直径平均值分别为 11.86 和 11.553 mm, 误差为 2.66 %; 而试样下端面直径平均值分别为 12 和 11.582 mm, 误差为 3.61 %。

将图 3(a) 载荷-行程曲线通过式(9) 和式(10) 转换为应力-应变曲线, 如图 3(b) 所示。

$$\varepsilon = \ln \left( \frac{l_0 - \Delta l}{l_0} \right) \quad (9)$$

$$\sigma = F / \left( \frac{\pi r^2 l_0}{l_0 - \Delta l} \right) \quad (10)$$

式中,  $l_0$  为试样原始高度, mm;  $\Delta l$  为试样压缩高



度,mm;  $F$  为载荷,N;  $r$  为试样的原始半径,mm。

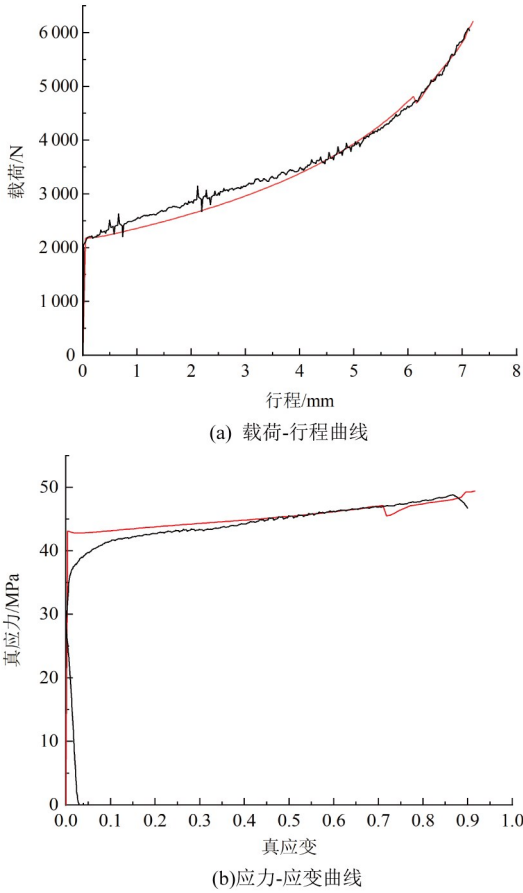


图 3 实验与数值模拟结果对比

Fig.3 Comparison of experimental and simulated results

由图 3 可知,实验与仿真分析的载荷-行程曲线和应力-应变曲线的变化趋势基本一致。图 3(a)中的载荷在行程为 0.5 ~ 4 mm 的区间偏差相比其他区域大,平均误差为 6.54 %。这是因为实际压缩过程的摩擦系数是变化的,而数值模拟软件中设定的摩擦系数是定值,导致两者出现一定偏差,这也引起应力出现偏差,如图 3(b)所示。应力在应变 0.04 ~ 0.4 的区间,数值模拟的应力值高于实验的应力值,两者的平均误差约 3 %。这是由载荷和压缩高度两者的偏差共同引起的。因而,本文建立的 Arrhenius 本构方程能较好地描述 6061 铝合金材料的高温流变行为。

2.4 6061 铝合金热加工图建立与分析

动态材料模型中材料吸收的能量主要以两种方式耗散:一是材料发生塑性变形所消耗的能量,用  $G$  表示;二是材料变形过程组织演变消耗的能量,用  $J$  表示<sup>[9]</sup>。

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\sigma} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (11)$$

式中:  $P$  为是输入总功率;  $\sigma$  为流变应力,MPa;  $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $s^{-1}$ 。

应变速率敏感指数  $m$  表达式如下:

$$m = \frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\epsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\epsilon}} = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (12)$$

Murty 提出了任意类型的流变失稳准,则  $G$  的积分可以转化为<sup>[17]</sup>:

$$G = \int_0^{\dot{\epsilon}_{\min}} \sigma d\dot{\epsilon} = \int_0^{\dot{\epsilon}_{\min}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_{\dot{\epsilon}_{\min}}^{\dot{\epsilon}_{\min}} \sigma d\dot{\epsilon} = \left( \frac{\sigma \dot{\epsilon}}{m+1} \right)_{\dot{\epsilon}=\dot{\epsilon}_{\min}} + \int_{\dot{\epsilon}_{\min}}^{\dot{\epsilon}_{\min}} \sigma d\dot{\epsilon} \quad (13)$$

式中:  $\dot{\epsilon}_{\min}$  一般取试验中的最小应变速率值,  $s^{-1}$ 。

热变形过程中,材料微观组织演变所消耗能量的功率大小,可通过定义无量纲的能量耗散效率参数  $\eta$  表征。

$$\eta = \frac{2J}{P} = 2 \left( 1 - \frac{G}{P} \right) \quad (14)$$

理论上能量散耗率  $\eta$  越大,材料加工越容易,而在能量散耗率较高的情况下也可能出现失稳现象,因此,能量散耗率  $\eta$  不能完全体现材料加工的好坏。需要对热加工图进一步补充, Murty 提出材料失稳的判据条件如式(15)。

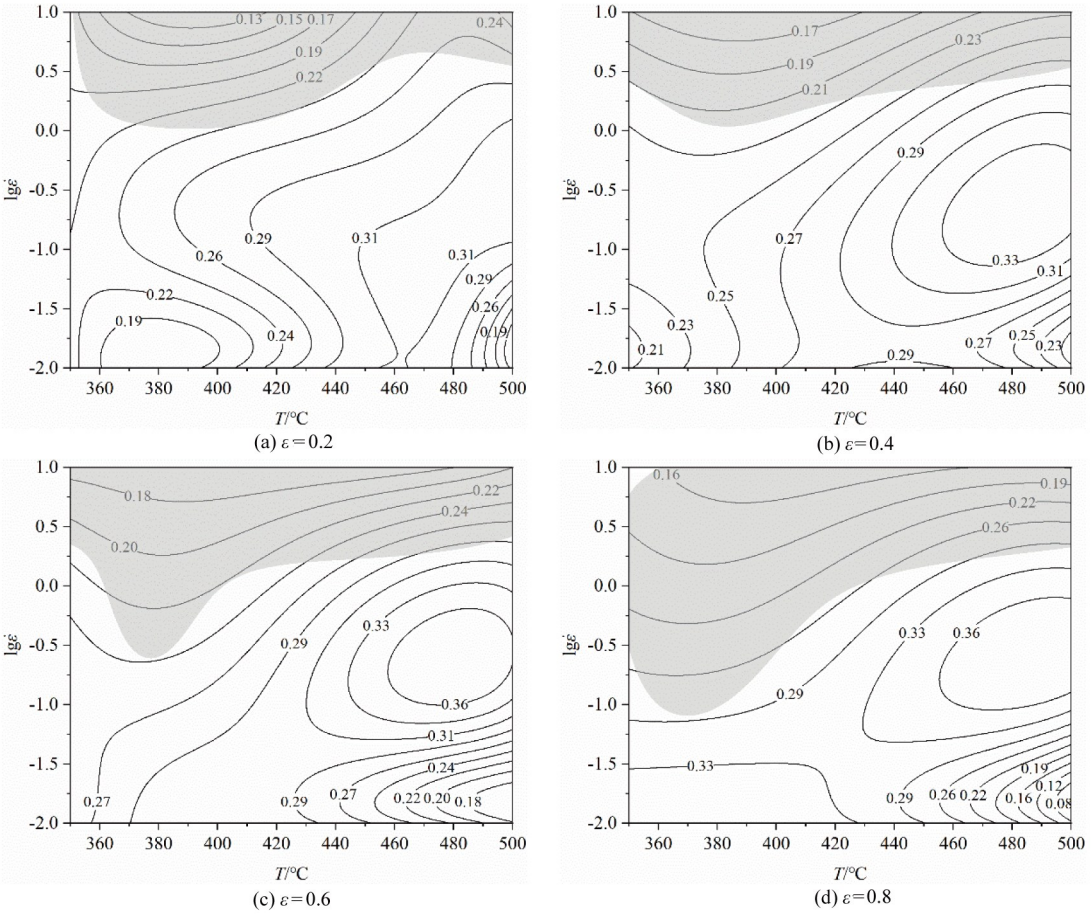
$$2m/\eta - 1 < 0 \quad (15)$$

6061 铝合金在不同应变下的热加工图如图 4 所示。图中数值表示能量散耗率,阴影部分表示流变失稳区域。由图 4 可知,当应变为 0.2 时,热加工图中没有出现能量散耗率峰值,但出现一条山脊,能量散耗率在 31 % 左右。当应变分别为 0.4、0.6 和 0.8 时,6061 铝合金的热加工图有且仅有一个峰值,即变形温度 460 ~ 500 °C,应变速率 0.1 ~ 0.5  $s^{-1}$ ,其能量散耗率在 33 % ~ 36 % 之间,且峰值区域在应变为 0.2 时的山脊区域处。由图 4 可知,流变失稳区域主要集中在高应变速率区,且流变失稳区域随着应变增加而扩散。在变形温度较低时,可能产生热黏塑性失稳而形成绝热剪切,导致低温区域可加工范围较窄。而低温高应变速率下,由于材料内部因变形产生的热量在短时间内无法扩散至其他区域,温度分布不均匀,进一步影响该合金在发生塑性变形时微观

组织分布,导致该区域的能量散耗率较低。因此,6061 铝合金最佳工艺参数范围为:变形温度 460 ~ 500 ℃,应变速率 0.1 ~ 0.5 s<sup>-1</sup>。

试样在不同变形条件下压缩后的组织分别如图 5 所示。从图 5 可见,组织沿轴向被压扁,沿径向被拉长。图 5(a)中晶粒组织细小且狭长,分布较为均匀,这是因为该变形条件下,材料的热激活能和驱动力低,难以满足动态再结晶出现的条件。由图 5(b)(c)可知,组织沿轴向被压缩的程度减小,且分布越来越均匀,并出现细小的晶粒,表明在这两种变形条件下存在动态再结晶现象。从图

5(d)可以看出,在该变形条件下组织分布不均匀,靠近试样中部的组织呈纤维状,且晶界变得模糊,靠近端部的组织粗大,且分布不均匀,这是因为靠近试样中部区域的变形量较大,而靠近端部的变形量小,且高应变速率下析出相聚集在被压扁的晶界附近,这将降低晶界的结合强度,导致材料内部产生裂纹,影响材料的力学性能<sup>[10]</sup>。结合热加工图可知,变形温度 500 ℃,应变速率 0.1 s<sup>-1</sup>时的能量散耗率高,且组织分布均匀,材料的力学性能最好。



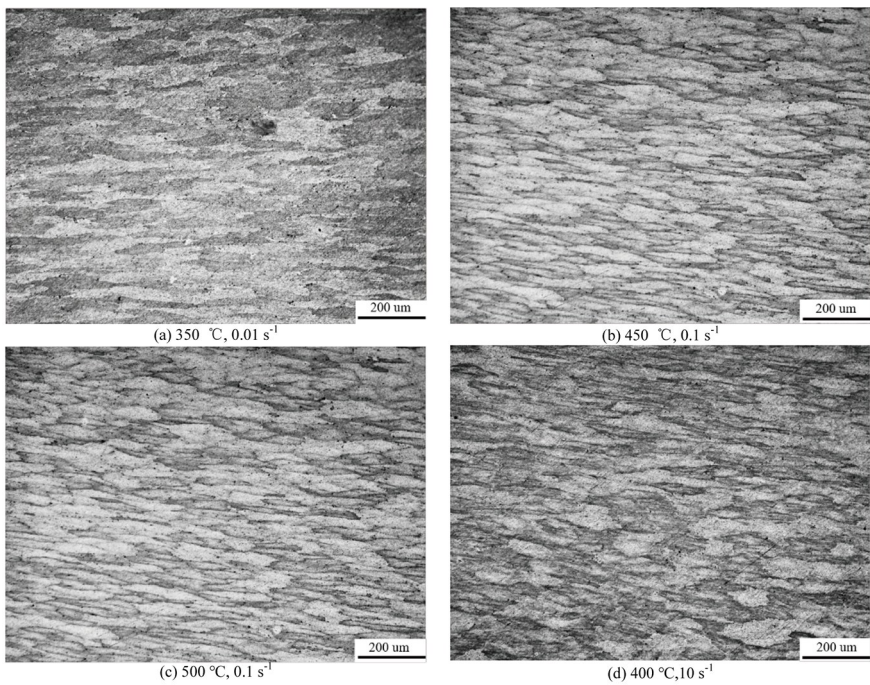


图 5 不同变形条件下压缩后的组织

Fig.5 Microstructure after compression at different deformation conditions

好地描述 6061 铝合金的高温流变行为。

4) 基于动态材料模型理论和 Murty 准则,建立了 6061 铝合金在不同应变条件下的热加工图,结合

显微组织表征,得到 6061 铝合金最佳工艺参数范围:变形温度 460 ~ 500 °C,应变速率 0.1 ~ 0.5 s<sup>-1</sup>。

参考文献:

[1] 于洪兵, 杜艳丽. 合金化及热处理对汽车用 6061 铝合金组织与性能的影响[J]. 铸造技术, 2017, 38(10): 2374-2376.

[2] SANABRIA V, GENSCH F, MUELLER S. Application of friction shear test for constitutive modeling evaluation of magnesium alloy AZ31B at high temperature[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 47: 237-244.

[3] 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.

[4] WEI T, WANG Y D, TANG Z H, et al. The constitutive modeling and processing map of homogenized Al-Mg-Si-Cu-Zn alloy[J]. Materials Today Communications, 2021, 27: 102471.

[5] 曾卫东, 周义刚, 周军, 等. 加工图理论研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 673-677.

[6] 康军伟, 周延军, 刘海涛, 等. C17200 合金热变形行为及热加工图[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(10): 130-136.

[7] 王晓溪, 张翔, 王华东, 等. 基于热加工图的 6061 铝合金热压缩变形特性研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(9): 944-948.

[8] 刘崇亮, 权高峰, 周明扬, 等. 铸态 Mg-8Y-6Gd-1Nd-0.17Zn 稀土镁合金高温压缩本构行为及加工图[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(8): 2591-2598.

[9] ZHANG T, ZHANG S H, LI L, et al. Modified constitutive model and workability of 7055 aluminium alloy in hot plastic compression[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(11): 2930-2942.

[10] 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.

(责任编辑: 陈雯)