

均质态 7475 铝合金的热变形行为

王永红^{1,2}, 王经涛^{1,2}, 黄同斌¹, 杨 航¹, 郭丰佳^{1,2,3}, 郑 铖^{1,2}

(1. 山东南山铝业股份有限公司 国家铝合金压力加工工程技术研究中心, 山东 龙口 265713;

2. 山东南山铝业股份有限公司 有色金属产业研究院, 山东 龙口 265713;

3. 烟台南山学院 材料科学与工程学院, 山东 龙口 265713)

摘要: 利用 Gleeble-3500 热模拟试验机研究了均质态 7475 铝合金在变形温度为 300~450 ℃、应变速率为 0.01~1 s⁻¹ 下的高温热变形行为。结果表明, 随着应变速率的增大和变形温度的降低, 流变应力呈增大趋势, 真应力-真应变曲线表现出明显的加工硬化和动态软化现象, 并依此建立了基于双曲正弦方程的本构模型以描述合金在高温下的热变形行为。此外, 基于试验数据和动态材料模型, 构建了不同应变下的热加工图, 揭示了应变、变形温度和应变速率对功率耗散率 η 和流变失稳 ξ 的影响; 根据整个热变形过程中功率耗散率值的变化趋势, 得出均质态 7475 铝合金主要经历了动态回复和动态再结晶, 未发生超塑性; 进一步对流变失稳区和安全加工区域进行分析, 确定均质态 7475 铝合金最佳的热加工区域为变形温度为 420~450 ℃ 和应变速率为 0.026~0.185 s⁻¹。

关键词: 均质态 7475 铝合金; 热变形; 流变应力; 本构方程; 热加工图

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.033

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 10-0248-08

Thermal deformation behavior of homogeneous 7475 aluminum alloy

Wang Yonghong^{1,2}, Wang Jingtao^{1,2}, Huang Tongjian¹, Yang Hang¹, Guo Fengjia^{1,2,3}, Zheng Cheng^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Plastic Working of Aluminium Alloys, Shandong Nanshan Aluminium Co., Ltd., Longkou 265713, China; 2. Nonferrous Metal Industry Research Institute, Shandong Nanshan Aluminum Co., Ltd., Longkou 265713, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Yantai Nanshan University, Longkou 265713, China)

Abstract: The high-temperature thermal deformation behavior of homogeneous 7475 aluminum alloy was studied by using thermal simulation testing machine Gleeble-3500 at the deformation temperature of 300~450 ℃ and the strain rate of 0.01~1 s⁻¹. The results show that with the increasing of strain rate and the decreasing of deformation temperature, the rheological stress shows an increasing trend, and the true stress-true strain curve exhibits obvious work hardening and dynamic softening phenomena. Based on this, a constitutive model based on hyperbolic sine equation is established to describe the thermal deformation behavior of alloy at high temperature. In addition, based on the experimental data and the dynamic material model, the thermal processing maps under different strains are established to reveal the influences of strain, deformation temperature and strain rate on the power dissipation rate η and rheological instability ξ . According to the trend of power dissipation rate during the entire thermal deformation process, it is concluded that the homogeneous 7475 aluminum alloy mainly undergoes dynamic recovery and dynamic recrystallization, without superplasticity. The rheological instability zone and safe processing zone are further analyzed, and the optimal thermal processing zone of homogeneous 7475 aluminum alloy is determined to be the deformation temperature of 420~450 ℃ and the strain rate of 0.026~0.185 s⁻¹.

Key words: homogeneous 7475 aluminum alloy; thermal deformation; rheological stress; constitutive equation; thermal processing map

Al-Zn-Mg-Cu (7XXX 系) 高强铝合金因具有较高的比强度、良好的抗应力腐蚀性和高的断裂韧性等优点, 被广泛应用于航空航天工业^[1]。在 7XXX 系铝合金中断裂韧性最高的 7475 铝合金是在 7075 铝合金基础上研发的, 通过降低 Fe、Si 含量使其在

具有 7075 铝合金强度的同时, 提高了抗应力腐蚀性能、断裂韧性和塑性, 更适用于制造各种结构件^[2]。然而, 7475 铝合金在室温下的成形性较差, 主要通过热塑性成形, 故需要进行高温变形过程中的热变形行为研究。通过对材料热变形行为的研究, 不仅可推测流变应力变化和改变微观组织, 还可为力学性能的提高及热变形过程的数值模拟提供基础^[3-5]。

本构模型是一种辅助研究者深入了解材料内在

收稿日期: 2024-02-27; 修订日期: 2024-05-09

作者简介: 王永红 (1986-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 2645138291@qq.com

变形机制的有效方法，能准确地描述流变行为，如加工硬化和动态软化^[6-7]。目前，Arrhenius 本构模型因精度高且参数少而受到研究者的青睐^[6]。Wang W Y 等^[8]建立了 Al-7.82Zn-1.96Mg-2.35Cu-0.11Zr 合金的 Arrhenius 本构模型，其具有很好的预测性。热加工图被认为是制定合适的热加工工艺参数的有益工具^[8-11]。Wang W Y 等^[8]根据热加工图制定了 Al-7.82Zn-1.96Mg-2.35Cu-0.11Zr 合金的挤压参数。Wang Y X 等^[12]建立了适用于 2195 (Al-4.12Cu-1.02Li-0.44 Mg-0.4Ag-0.11Zr-0.05Fe) 铝合金热轧成形的热加工图。因此，建立合金的热加工图对于优化合金的热加工工艺参数以及确定热加工稳定区起着重要作用^[9-11,13]。

为了提高 7475 铝合金热塑性变形生产过程的控制水平，进一步提高合金的质量和性能，本文通过对均质态 7475 铝合金开展不同变形温度和应变速率下的热压缩试验，研究了变形条件对流变应力的影响，通过建立热变形过程的本构方程描述了合金在高温下的热变形行为，并借助热加工图分析确定了

该合金适宜进行热加工的区域范围，从而为该合金的工业化生产提供依据。

1 试验材料与方法

试验用材料为 7475 铝合金扁锭，该扁锭经过 465 ℃保温 24 h 以及 485 ℃保温 10 h 的均质化处理，随后进行空冷，其化学成分如表 1 所示。利用线切割机从扁锭宽度方向的 1/4 位置处，切取尺寸为 $\Phi 10\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 的圆柱形试样，然后在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行试验。设置热模拟变形温度为 300、350、400 和 450 ℃，应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为 0.01、0.1、0.2、0.5 和 1 s⁻¹，变形量为 70%。热压缩前将试样以 3 ℃·s⁻¹ 的速度加热至设定温度，保温 2 min，使整个试样的温度均匀分布。为保留高温变形时的组织，需将试样在热压缩完成后立即进行水冷。利用由 Gleeble-3500 热模拟机获得的应力-应变数据，绘出真应力-真应变曲线，建立热压缩本构方程和热加工图。

表 1 均质态 7475 铝合金的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of homogeneous 7475 aluminum alloy（%，mass fraction）									
元素	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Si	Fe	Ti	Al
名义成分	5.2~6.2	1.9~2.6	1.2~1.9	0.18~0.25	0.06	0.10	0.12	0.06	余量
测量值	5.97	2.24	1.65	0.22	0.06	0.0028	0.063	0.06	余量

2 试验结果与讨论

2.1 真应力-真应变曲线

图 1 为在变形温度为 300~450 ℃、应变速率为 0.01~1 s⁻¹ 下获得的均质态 7475 铝合金的真应力-真应变曲线，即流变曲线。可以发现，不同变形温度和应变速率下的流变曲线具有基本相似的特征，即变形开始阶段合金发生加工硬化，流变应力随着应变的增加而迅速增大。该阶段由于大量位错的存在，且位错相互缠结与塞积，阻碍了位错的进一步滑移，使得合金的流变应力增大。随着应变的进一步增大，流变应力开始缓慢增大，此时由于形变能的不断积累，导致合金内部发生动态回复或动态再结晶，这种软化作用可使合金的流变应力减小^[14]。从图 1 中还可看出，流变应力受到变形温度和应变速率的显著影响。温度升高可以增加原子的热激活能，促进位错的运动，这为再结晶生长和晶界的迁移提供了驱动力，合金发生软化^[15]。而较高的应变

速率会加速位错的增殖，提高流变应力，同时缩短了激活能的积累时间，以减小软化作用，使合金发生硬化现象^[16-17]。此外，在变形的后期阶段，流变曲线出现流变应力仍随应变的增加而缓慢增加的趋势，这是由于动态回复（Dynamic Recovery, DRV）或动态再结晶（Dynamic Recrystallization, DRX）过程中位错的重新排列和抵消所引起的软化作用小于位错的不断增殖和缠结而导致的加工硬化作用所致^[18]。图 2 为均质态 7475 铝合金热压缩峰值应力随着变形温度与应变速率的变化趋势图。图 2 可以直观地反映出不同热压缩变形条件下峰值应力的变化，即变形温度的增加和应变速率的减小导致峰值应力非线性下降，峰值应力的最小值和最大值分别为 450 ℃、0.01 s⁻¹ 变形条件下的 44.09 MPa 和 300 ℃、1 s⁻¹ 变形条件下的 141.16 MPa。

2.2 本构方程的建立

本构方程可用来表示变形温度、应变和应变速率等不同热加工参数条件下流变应力的变化。目前，Arrhenius 双曲正弦模型能够较好地表达材料高温变形时流变应力的变化情况^[19-22]，具体模型如下。

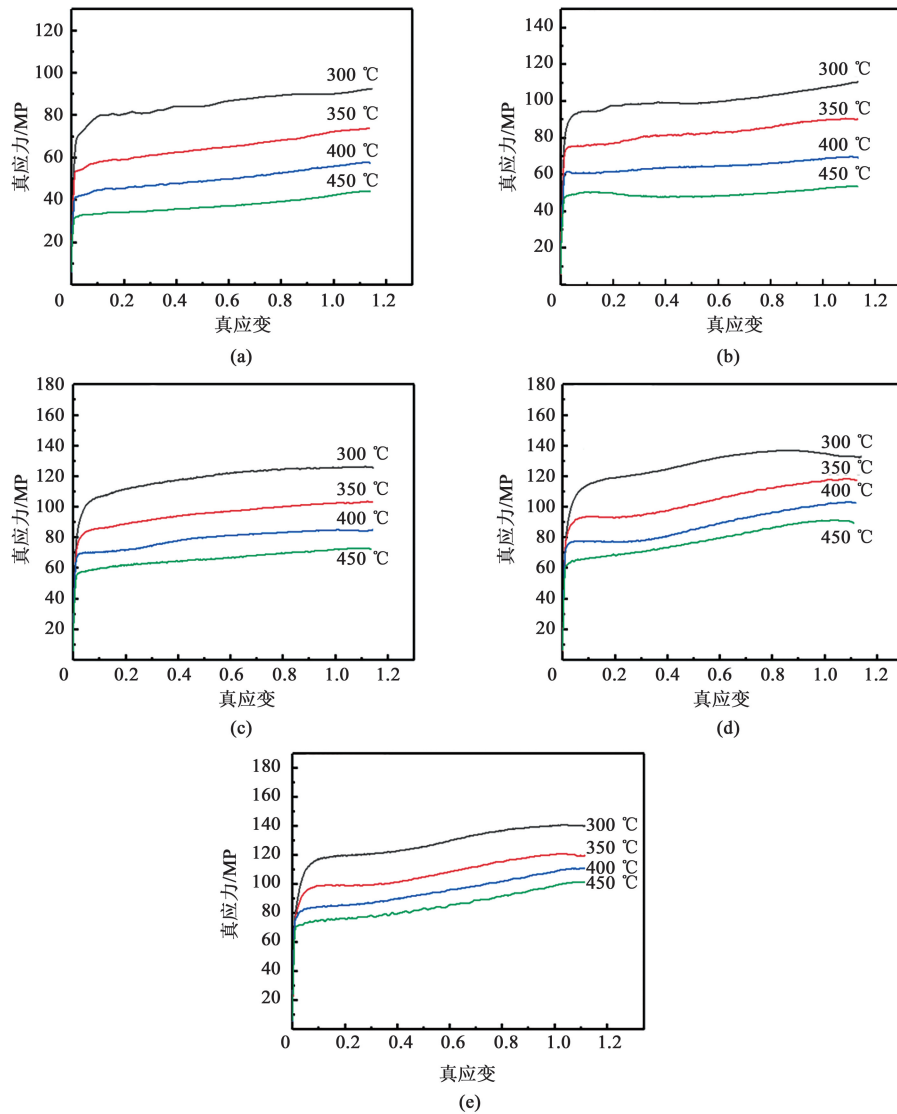


图 1 均质态 7475 铝合金在不同变形条件下的真应力-真应变曲线

(a) $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\epsilon} = 0.2 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\epsilon} = 0.5 \text{ s}^{-1}$ (e) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

Fig. 1 True stress-true strain curves of homogeneous 7475 aluminum alloy under different deformation conditions

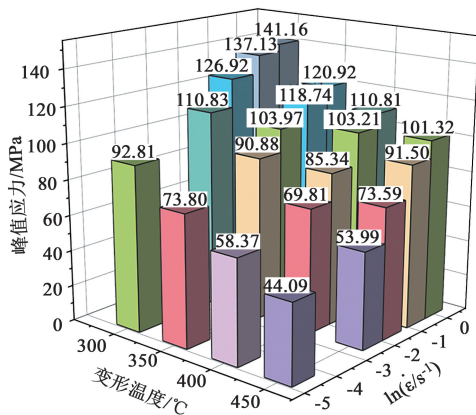


图 2 均质态 7475 铝合金热压缩峰值应力随变形温度与应变速率的变化

Fig. 2 Change of peak stress in thermal compression of homogeneous 7475 aluminum alloy with deformation temperature and strain rate

在高、低应力下, Arrhenius 双曲正弦模型如式

(1) 所示:

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

在低应力 ($\alpha \sigma < 0.8$) 下, 式 (1) 可表示为指数形式:

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

在高应力 ($\alpha \sigma > 1.2$) 下, 式 (1) 可表示为幂指数形式:

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

式中: α 为应力水平参数; n 为表观应力指数; R 为气体常数, 取值为 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为绝对温度; Q 为激活能; σ 为某一应变下对应的流变应力; A 、 A_1 、 A_2 、 n_1 和 β 均为材料常数, n_1 、 β 和 α

之间满足 $\alpha = \beta/n_1$ 。

由式 (1) 可见, 确定了 Q 、 A 、 α 和 n 的值, 再带入到式 (1) 中可以得到均质态 7475 铝合金在高温热变形时的本构方程, 从而可以计算出任何变形条件下的流变应力。根据热模拟试验采集的数据,

获得不同热压缩条件下的峰值应力。然后借助线性回归方法, 绘制 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 和 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1000/T$ 之间的线性关系, 如图 3 所示, 即可求得 $\alpha = 0.011276687 \text{ MPa}^{-1}$, $n = 5.4937075$, $Q = 92.26569382 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

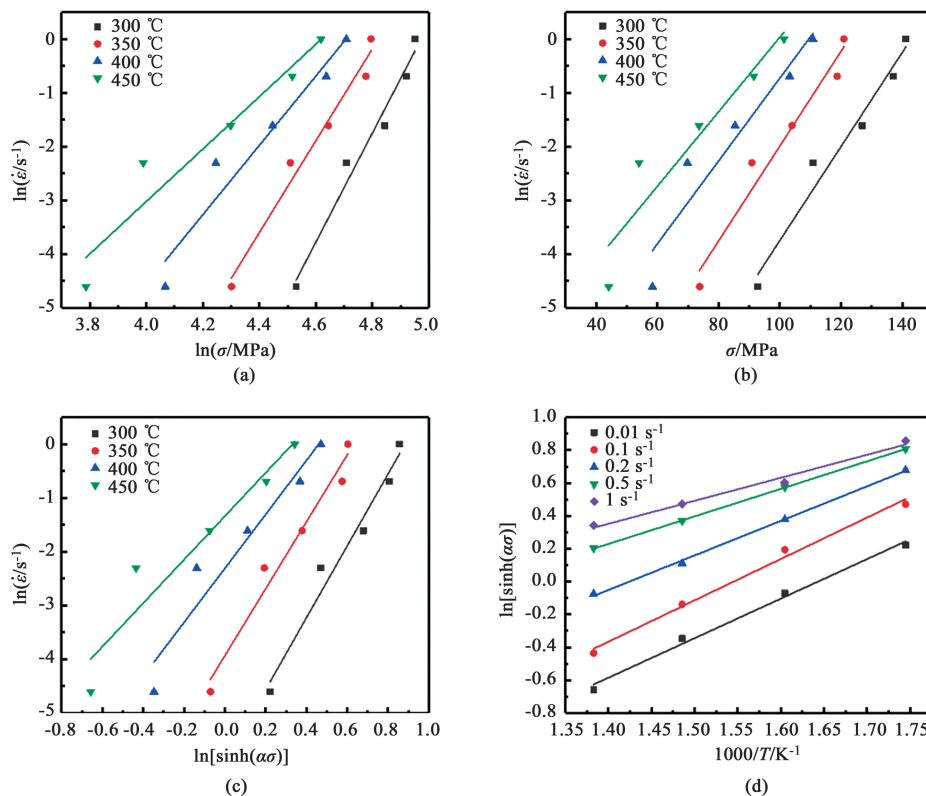


图 3 均质态 7475 铝合金在不同变形条件下的线性拟合图

(a) $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ (b) $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ (c) $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ (d) $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1000/T$

Fig. 3 Linear fitting diagrams of homogeneous 7475 aluminum alloy under different deformation conditions

Zener C 和 Hollomon J H^[23] 的研究表明, 温度和应变速率对应力的影响可以用 Zener-Hollomon 参数 (Z) 描述, 如式 (4) 所示:

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

通过对式 (4) 变形可得式 (5):

$$\sinh(\alpha \sigma) = (Z/A)^{1/n} \quad (5)$$

对式 (5) 两边取对数可得式 (6):

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \quad (6)$$

将求得的 Q 、 $\dot{\epsilon}$ 和 T 带入到式 (4) 中可求得对应的 Z 值, 利用线性回归方法, 线性拟合 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 曲线, 如图 4 所示。即可求得 $\ln A = 14.56379$, 从而得出 $A = 2113360.727 \text{ s}^{-1} \approx 2.113 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。

根据双曲正弦函数的定义, 可得 σ 与 Z 参数的关系如式 (7) 所示:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (7)$$

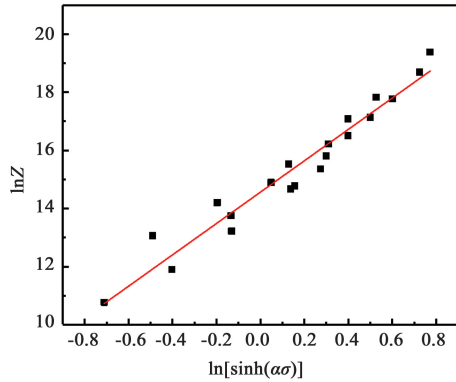
将以上通过线性拟合求得的 A 、 α 、 n 和 Q 的值带入式 (1) 和式 (7), 即可得到均质态 7475 铝合金在高温热变形条件下的本构方程, 如式 (8) 和式 (9) 所示:

$$\dot{\epsilon} = 2.113 \times 10^6 [\sinh(0.01128 \sigma)]^{5.494} \exp\left(-\frac{92.266}{RT}\right) \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{1}{0.01128} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{2.113 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{5.494}} + \left[\left(\frac{Z}{2.113 \times 10^6} \right)^{\frac{2}{5.494}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (9)$$

2.3 本构方程的验证

通过不同变形条件下进行热压缩试验获得的峰

图 4 均质态 7475 铝合金 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线Fig. 4 Relationship curve of $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ of homogeneous 7475 aluminum alloy

值应力值,建立了 7475 铝合金高温变形的本构方程,即式 (8) 和式 (9)。为确保所建立的本构模型的可靠性,需对比试验值与预测值来进行验证。因此,需要采用相关系数 R 和平均相对误差 $AARE$ 对该模型的可预测性进行评估^[24],计算公式分别见式 (10) 和式 (11):

$$AARE = \frac{1}{m'} \sum_{i=1}^{m'} \left| \frac{E_i - A_i}{E_i} \right| \quad (10)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{m'} (E_i - \bar{E})(A_i - \bar{A})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m'} (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^{m'} (A_i - \bar{A})^2}} \quad (11)$$

式中: E_i 为试验值; \bar{E} 为试验值对应的平均值; A_i 为从本构模型得到的预测值; \bar{A} 为预测值对应的平均值; m' 为试验次数。

将不同的变形温度和应变速率值带入至式 (9),可求得不同变形条件下峰值应力的预测值,再将峰值应力预测值和试验值分别带入式 (10) 和式 (11),并对试验值与预测值进行比较,结果如图 5 所示。由图 5 和计算结果可知,试验值和预测值的相关系数 R 为 0.98, $AARE$ 值为 7.28%,低于最大误差允许值 10%。试验数据与预测数据之间具有良好的相关性,所建立的本构模型具有较好的可预测性。

2.4 热加工图

目前,广泛用于分析材料的热加工性的热加工图是根据动态材料模型来绘制的^[25-28]。在该模型中,热变形可视为一个功率耗散过程。合金在热变形过程中的总功率 P 可分为 G 和 J 这 2 个部分: G 为塑性变形耗散的功率,其中,大部分以变形热的

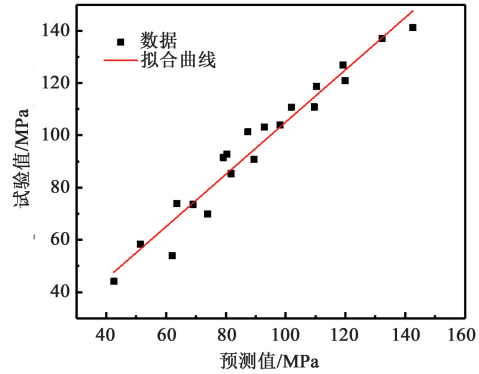


图 5 峰值应力的试验值与预测值对比

Fig. 5 Comparison between experimental and predicted values of peak stress

形式损失; J 为 DRV、DRX 和相变等微观结构转变过程中的功率耗散^[29]。而 G 和 J 与应变速率敏感参数 m 相关, m 值可用式 (12) 表示:

$$m = \left(\frac{\partial J}{\partial G} \right)_{\varepsilon, T} = \frac{\partial J}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial G} = \frac{\dot{\varepsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\varepsilon}} = \left[\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\varepsilon})} \right]_{\varepsilon, T} \quad (12)$$

式中: ε 为真应变。

对于一个理想的线性耗散体 ($m=1$ 时), J 值为最大值 $J_{\max} = \sigma \dot{\varepsilon} / 2$ 。对于非线性耗散体的功率耗散效率,采用 η 无量纲参数表示^[30],如式 (13) 所示:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (13)$$

功率耗散效率 η 与变形温度、应变和应变速率有关。在恒定应变下,根据 η 随温度和应变速率的变化而变化,可绘制出对应的功率耗散图。功率耗散图中不同的区域代表不同的微观结构机制,一般来说,功率耗散率大的区域具有较好的可加工性能^[16,31]。但是,在整个热变形过程中功率耗散图并不能完全表达出所有的信息,因为其主要描述的为微观结构演化所耗散的功率,而非热变形过程中的不稳定性^[32]。故在最大的功率耗散效率下并不能保证具有最佳的热加工性能,因为失稳的情况可能同时发生。因此,建立一个用来确定合金加工失稳区域的流变失稳图是非常有必要的。由 Ziegler H^[33] 提出的流变失稳判据 ξ 可用式 (14) 定义:

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln \left(\frac{m}{1+m} \right)}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \quad (14)$$

其中, $\xi(\dot{\varepsilon})$ 为无量纲参数,其值可以从式 (14) 中计算。通过绘制恒定应变量下的 ξ 值、变形温度和应变速率之间的关系曲线,即可得到加工

流变失稳图, 其中, $\xi(\dot{\varepsilon}) < 0$ 的区域表示合金在该区域内热加工会发生流变失稳。然后再通过将流变失稳图叠加至功率耗散图, 即可形成热加工图。在热加工图中, 通常将最佳的热加工参数范围选择在安全区中功率耗散率最大的区域^[34]。

基于上述方法, 建立均质态 7475 铝合金在真应变分别为 0.2、0.4、0.6 和 0.8 条件下的热加工图, 如图 6 所示。其中, 等高线上的值对应功率耗散率 η 值; 灰色阴影区域对应流变失稳区, 其 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 值小于 0; 白色区域的 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 值均大于 0, 为安全加工区域。由图 6 可知, 随着应变的增大, 流变失稳区域呈逐渐增大的趋势, 且均位于热加工图的中上部, 说明均质态 7475 铝合金在 $0.102 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 应变速率范围内更易发生流变失稳。此外, 合金在不同变形温度和应变速率下的功率耗散率存在差异。在 $0.01 \sim 0.298 \text{ s}^{-1}$ 的应变速率范围内, 功率耗散率随着变形

温度的降低而减小, 说明热加工性也在降低, 如图 6a 所示。随着真应变从 0.2 增加至 0.8, 最大功率耗散率值由 0.36 变为 0.49, 最大 η 值所在的应变速率由 $0.01 \sim 0.298 \text{ s}^{-1}$ 变为 $0.1177 \sim 0.248 \text{ s}^{-1}$, 变形温度范围约为 $437 \sim 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 说明均质态 7475 铝合金的最大功率耗散值所处的应变速率范围随着真应变的增加而缩小。此前有文献^[35-36]报道, 认为当 η 值分别在 $0.2 \sim 0.3$ 、 $0.3 \sim 0.45$ 和大于 0.6 时, 合金将分别发生 DRV、DRX 和超塑性。图 6 中的功率耗散率 η 值显示, 均质态 7475 铝合金主要经历了 DRV 和 DRX, 未发生超塑性, 并且对不同应变条件下的加工图进行综合分析发现, 在变形温度和应变速率分别为 $420 \sim 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.026 \sim 0.185 \text{ s}^{-1}$ 时, 功率耗散率存在峰值, 并处于加工安全区域内, 所以, 该区域为均质态 7475 铝合金的最佳热加工区域。

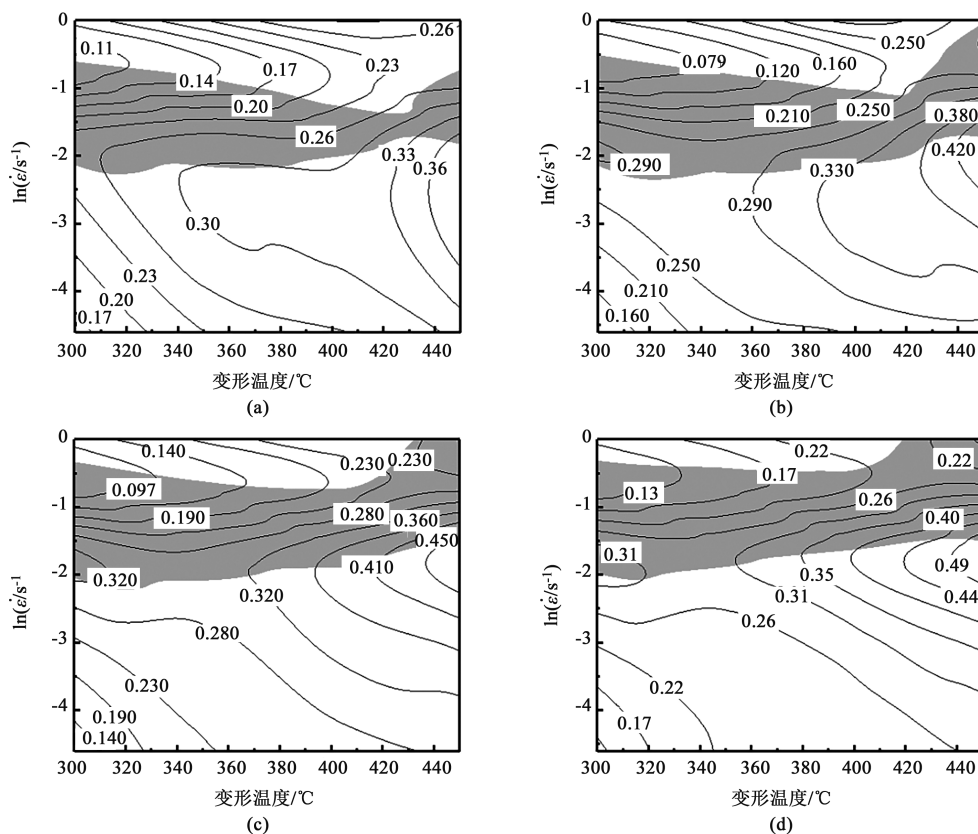


图 6 均质态 7475 铝合金在不同应变条件下的热加工图

(a) $\varepsilon = 0.2$ (b) $\varepsilon = 0.4$ (c) $\varepsilon = 0.6$ (d) $\varepsilon = 0.8$

Fig. 6 Thermal processing diagrams of homogeneous 7475 aluminum alloy under different strain conditions

3 结论

(1) 变形温度和应变速率对均质态 7475 铝合

金的流变应力有显著影响, 即降低变形温度或者增加应变速率均会使流变应力增大。整个热变形过程中的流变曲线是加工硬化和动态软化共同作用的结果。

(2) 利用热模拟数据和 Arrhenius 双曲正弦模型, 计算得到均质态 7475 铝合金的热压缩变形激活能为 $92.266 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 构建了不同热变形条件下的本构模型: $\dot{\varepsilon} = 2.113 \times 10^6 [\sinh(0.01128\sigma)]^{5.494} \times \exp\left(-\frac{92.266}{RT}\right)$ 和 $\sigma = \frac{1}{0.01128} \ln\left\{\left(\frac{Z}{2.113 \times 10^6}\right)^{\frac{1}{5.494}} + \left[\left(\frac{Z}{2.113 \times 10^6}\right)^{\frac{2}{5.494}} + 1\right]^{\frac{1}{2}}\right\}$, 由该模型得到的预测值与试验值之间的相关性较高, 相关系数为 0.98, 平均相对误差为 7.28%。

(3) 热加工图中的功率耗散率和流变失稳判据受变形温度、应变速率和应变的影响, 并且在热变形过程中, 均质态 7475 铝合金最佳热加工区域为 $420 \sim 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.026 \sim 0.185 \text{ s}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 罗兵辉, 柏振海. 高性能铝合金研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25 (3): 59-63.
Luo B H, Bai Z H. Development of high-performance aluminum alloys [J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2002, 25 (3): 59-63.
- [2] 杨孝鹤. 7475 高强铝合金热处理的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
Yang X H. Research on Heat Treatment of 7475 High-strength Aluminum Alloy [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [3] Wang S S, Jiang J T, Fan G H, et al. Accelerated precipitation and growth of phases in an Al-Zn-Mg-Cu alloy processed by surface abrasion [J]. Acta Materialia, 2017, 131: 233-245.
- [4] Chamanfar A, Alamoudi M T, Nanninga N E, et al. Analysis of flow stress and microstructure during hot compression of 6099 aluminum alloy (AA6099) [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743: 684-696.
- [5] Yan J, Pan Q L, Li B, et al. Research on the hot deformation behavior of Al-6.2Zn-0.70Mg-0.3Mn-0.17Zr alloy using processing map [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 632: 549-557.
- [6] Lin Y C, Chen X M. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working [J]. Materials & Design, 2011, 32 (4): 1733-1759.
- [7] Wang S, Luo J R, Hou L G, et al. Physically based constitutive analysis and microstructural evolution of AA7050 aluminum alloy during hot compression [J]. Materials & Design, 2016, 107: 277-289.
- [8] Wang W Y, Pan Q L, Sun Y W, et al. Study on hot compressive deformation behaviors and corresponding industrial extrusion of as-homogenized Al-7.82Zn-1.96Mg-2.35Cu-0.11Zr alloy [J]. Journal of Materials Science, 2018, 53 (16): 11728-11748.
- [9] Wang H J, Wang C, Mo Y, et al. Hot deformation and processing maps of Al-Zn-Mg-Cu alloy under coupling-stirring casting [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8 (1): 1224-1234.
- [10] Tang B B, Wang H T, Jin P P, et al. Constitutive flow behavior and microstructural evolution of 17vol% SiCp/7055Al composite during compression at elevated temperature [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (3): 6386-6396.
- [11] Lin Y C, Li L T, Xia Y C, et al. Hot deformation and processing map of a typical Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 550: 438-445.
- [12] Wang Y X, Zhao G Q, Xu X, et al. Constitutive modeling, processing map establishment and microstructure analysis of spray deposited Al-Cu-Li alloy 2195 [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2019, 779: 735-751.
- [13] Yang Q B, Wang X Z, Xu L, et al. Hot deformation behavior and microstructure of AA2195 alloy under plane strain compression [J]. Materials Characterization, 2017, 131: 500-507.
- [14] Bo L, Pan Q L, Yin Z M. Characterization of hot deformation behavior of as-homogenized Al-Cu-Li-Sc-Zr alloy using processing maps [J]. Materials Science & Engineering: A, 2014, 614: 199-206.
- [15] Zhang F, Sun J L, Shen J, et al. Flow behavior and processing maps of 2099 alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 613: 141-147.
- [16] Liu Y, Geng C, Lin Q Q, et al. Study on hot deformation behavior and intrinsic workability of 6063 aluminum alloys using 3D processing map [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 713: 212-221.
- [17] 倪珂, 杨银辉, 曹建春, 等. 18.7Cr-1.0Ni-5.8Mn-0.2N 节 Ni 型双相不锈钢的大变形热压缩软化行为 [J]. 金属学报, 2021, 57 (2): 224-236.
Ni K, Yang Y H, Cao J C, et al. Softening behavior of 18.7Cr-1.0Ni-5.8Mn-0.2N low nickel-type duplex stainless steel during hot compression deformation under large strain [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57 (2): 224-236.
- [18] Estrin Y, Mecking H. A unified phenomenological description of work hardening and creep based on one-parameter models [J]. Acta Metallurgica, 1984, 32 (1): 57-70.
- [19] Shi H, McLaren A I, Sellars C M, et al. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminum alloys [J]. Materials Science and Technology, 1997, 13 (3): 210-216.
- [20] McQueen H J, Fry E, Belling J. Comparative constitutive constants for hot working of Al-4.4Mg-0.7Mn (AA5083) [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2001, 10 (2): 164-172.
- [21] Spigarelli S, Evangelista E, McQueen H J. Study of hot workability of a heat treated AA6082 aluminum alloy [J]. Scripta Materialia,

- 2003, 49 (2): 179-183
- [22] Zhang H, Li L X, Deng Y, et al. Hot deformation behavior of the new Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy during compression at elevated temperatures [J]. *Materials Characterization*, 2007, 58 (2): 168-173.
- [23] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. *Journal of Applied Physics*, 1944, 15 (1): 22-32.
- [24] Mandal S, Rakesh V, Sivaprasad P V, et al. Constitutive equations to predict high temperature flow stress in a Ti-modified austenitic stainless steel [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2009, 500 (1-2): 114-121.
- [25] Sivakesavam O, Prasad Y V R K. Hot deformation behaviour of as-cast Mg-2Zn-1Mn alloy in compression: A study with processing map [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2003, 362 (1-2): 118-124.
- [26] Prasad Y V R K, Gegel H L, Doraivelu S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-6242 [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1984, 15 (10): 1883-1892.
- [27] Chen L, Ma X C, Liu X, et al. Processing map for hot working characteristics of a wrought 2205 duplex stainless steel [J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (3): 1292-1297.
- [28] Murty S V S N, Rao B N. On the flow localization concepts in the processing maps of titanium alloy Ti-24Al-20Nb [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 104 (1-2): 103-109.
- [29] Rao K P, Prasad Y V R K, Suresh K. Hot working behavior and processing map of a γ -TiAl alloy synthesized by powder metallurgy [J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (10): 4874-4881.
- [30] 冯菲, 曾卫东, 朱艳春, 等. 铸态 TC21 钛合金高温热变形行为及加工图 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41 (2): 251-255.
- Feng F, Zeng W D, Zhu Y C, et al. Hot deformation behavior and processing map of as-cast TC21 alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41 (2): 251-255.
- [31] Seshacharyulu T, Medeiros S C, Frazier W G, et al. Hot working of commercial Ti-6Al-4V with an equiaxed α - β microstructure: Materials modeling considerations [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 284 (1-2): 184-194.
- [32] Bembalge O B, Panigrahi S K. Hot deformation behavior and processing map development of cryorolled AA6063 alloy under compression and tension [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 191: 106100-106110.
- [33] Ziegler H. *An Introduction to Thermomechanics* [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1983.
- [34] Zhang J B, Wu C J, Peng Y Y, et al. Hot compression deformation behavior and processing maps of ATI 718 Plus superalloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 835 (1-2): 1-12.
- [35] Luo L, Liu Z Y, Bai S, et al. Hot deformation behavior considering strain effects and recrystallization mechanism of an Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. *Materials*, 2020, 13 (7): 1-20.
- [36] Zhen L, Hu H, Wang X Y, et al. Distribution characterization of boundary misorientation angle of 7050 aluminum alloy after high-temperature compression [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209 (2): 754-761.

2025 年《热加工工艺》征订启事

《热加工工艺》期刊创刊于 1972 年, 1986 年公开发刊, 半月刊, 期刊主管单位为中国船舶集团有限公司, 由中国船舶集团有限公司第十二研究所和中国造船工程学会联合主办, 为中国造船工程学会会刊, 由《热加工工艺》编辑部编辑出版。主要报道金属学与金属工艺、材料合成与加工工艺、船舶(舰船)工程领域的先进研究成果。本刊国际标准连续出版物号: ISSN1001-3814, 国内统一连续出版物号: CN61-1133/TG。

《热加工工艺》期刊为中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国精品科技期刊; 国内多家著名数据库的来源期刊; JST 收录期刊; 中国科协高质量科技期刊分级目录入选期刊(舰船科学、金属学与金属工艺(金属材料)、机械制造及其智能化、有色金属领域); 入选科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告(材料合成与加工工艺; 船舶、舰船工程; 金属学); 中国期刊方阵双百期刊、RCCSE 核心学术期刊等。

《热加工工艺》主要读者对象为铸造、锻压、焊接、金属材料及热处理、理化检测等相关专业的工程技术人员、管理干部和院校师生。本刊定价 20 元/本, 480 元/年。国内邮发代号: 52-94, 国外发行号: SM8143。读者可在当地邮局订阅, 也可直接通过《热加工工艺》编辑部邮购, 免收邮寄费。

地址: 陕西省兴平市 44 信箱 邮编: 713102 电话: (029) 38316273

E-mail: rjggy@vip.163.com http://www.rjggy.com, www.rjggy.net