

均热态 7055 铝合金热塑性本构建模与最优加工窗口识别

李 东  
(上海飞机设计研究院材料工程部)

**摘 要** 针对均热态 7055 铝合金的热变形特性开展研究,基于等温热压缩试验得到的真实流动应力,构建了应变补偿的 Arrhenius 本构模型和基于 Murty 准则的热加工图。结果表明,本构模型预测结果与试验结果吻合良好,可为后续有限元仿真提供理论参考;根据加工图识别,得到最优加工参数窗口:应速率范围为  $0.01\sim0.368\text{ s}^{-1}$ ,温度范围为  $380\sim450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

**关键词** 7055 铝合金;本构模型;热加工图;最优加工窗口

**中图分类号** TG146.21;TG115.5<sup>+</sup>3      **文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2023.012.012      开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Constitutive Modelling and Identification of Optimal Processing Windows  
for Homogenized 7055 Aluminum Alloy

Li Dong  
(Material Engineering Department, Shanghai Aircraft Design and Research Institute)

**Abstract:** The thermal deformation characteristics of homogeneous 7055 aluminum alloy was investigated, and a strain-compensated Arrhenius constitutive model and processing maps based on Murty criterion were constructed according to the flow stress obtained from isothermal hot compression tests. The results indicate that the predicted results of constitutive model are in consistent with the experimental ones, which can provide theoretical guidance for the subsequent finite element simulation. Moreover, according to the processing map, the optimal thermal processing parameter window was identified as strain rate range of  $0.01\text{ s}^{-1}\sim0.368\text{ s}^{-1}$  and temperature range of  $380\text{ }^{\circ}\text{C}\sim450\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Key Words:** 7055 Aluminum Alloy, Constitutive Model, Processing Map, Optimal Processing Window

Al-Zn-Mg-Cu(7xxx)系铝合金因其良好的塑韧性、耐蚀性、抗疲劳性等综合性能,被广泛应用于航空航天零部件的制造<sup>[1-2]</sup>。7055 铝合金航空航天大型零部件制造过程中,均热态铸锭开坯自由锻是获得致密均匀组织的关键工艺。然而,在此过程中,温度、应变等波动剧烈,易出现流变失稳、微观裂纹等缺陷,因此,对材料热加工时的流变特性和可加工参数窗口识别展开研究十分重要。

材料本构建模对其后续热成形模拟仿真至关重要,陈学海等<sup>[3]</sup>对 7085 铝合金开展了热物理模拟试验,根据获得的流动应力数据建立了峰值应力热变形本构模型。高岩等<sup>[4]</sup>研究了 7A85 铝合金的热变形行为,构建了本构模型并分析了变形微观组织。LIN H T 等<sup>[5]</sup>研究了 Al-Cu-Li 合金的高温变形行为,并构建了其热加工图。

压缩试验,分析了其流变行为,构建了应变补偿的流动应力本构模型和基于 Murty 准则的热加工图,实现了对最优加工窗口的识别,为该合金的热加工工艺参数制定和优化提供参考。

1 试验方法

采用线切割将均热态 7055 铝合金铸锭加工成  $\phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$  试样(留 0.1 mm 打磨余量),依次采用 400~1000 号砂纸打磨,并进行尺寸检验。试样化学成分见表 1。在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行热物理模拟试验,将试样以  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的加热速度分别加热至 300、350、400 和  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温 180 s 以消除内部温度梯度,然后以  $0.01$ 、 $0.1$ 、 $1$  和  $10\text{ s}^{-1}$  的应变速率进行热压缩试验,压缩高度为总高度的 60%。压缩前,试样端面与砧板之间加入石墨润滑。

本研究针对均热态 7055 铝合金开展了热物理模拟

收稿日期:2023-01-29;修改稿收到日期:2023-03-22

作者简介:李东,男,1980 年出生,高级工程师,上海(201210),E-mail:donglee1980@126.com

引用格式:李东. 均热态 7055 铝合金热塑性本构建模与最优加工窗口识别[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 654-1 657.  
LI D. Constitutive modelling and identification of optimal processing windows for homogenized 7055 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 654-1 657.

表 1 7055 铝合金的化学成分

| Tab.1 Chemical compositions of 7055 aluminum alloy % |     |     |      |      |      |      |      |    |
|------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|----|
| $w_B$                                                |     |     |      |      |      |      |      |    |
| Zn                                                   | Mg  | Cu  | Zr   | Fe   | Cr   | Si   | Mn   | Al |
| 7.8                                                  | 2.3 | 2.0 | 0.15 | 0.15 | 0.04 | 0.12 | 0.05 | 余量 |

2 试验结果与讨论

2.1 流动应力曲线

图 1 为均热态 7055 铝合金热压缩流动应力-应变曲线。可以看出,在变形初期,加工硬化效应占主导,流动应力显著上升,峰值应力随变形温度的升高和应变速

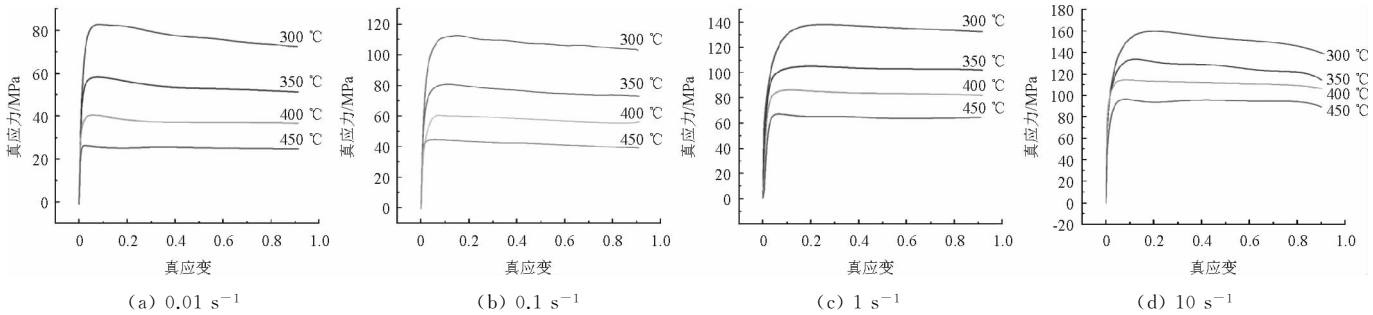


图 1 不同应变速率下均热态 7055 铝合金热压缩应力-应变曲线

Fig.1 Hot compressive stress-strain curves of homogenized 7055 aluminum alloy at different strain rates

2.2 本构建模

经典 Arrhenius 流变本构模型广泛应用于描述各类金属材料在热加工过程中的流变行为,其主要包含<sup>[4,8]</sup>:

所有应力水平下:

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

低应力水平( $\alpha\sigma < 0.8$ ):

$$\dot{\epsilon} = A' \sigma^{n'} \exp[-Q/(RT)] \tag{2}$$

高应力水平( $\alpha\sigma > 1.2$ ):

$$\dot{\epsilon} = A'' \exp(\beta\sigma) \exp[-Q/(RT)] \tag{3}$$

式中, $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $s^{-1}$ ;  $\sigma$  为应力, MPa;  $A$ 、 $\alpha$ 、 $n$  为与温度无关的材料常数;  $Q$  为激活能, kJ/mol;  $T$  为热力学温度, K;  $R$  为摩尔气体常数, 8.314 kJ/(mol · K), 且  $\beta = \alpha n'$ 。为了拓展该模型的应用范围,采用 Zener-Hollomon 参数对该模型进行表征<sup>[9]</sup>:

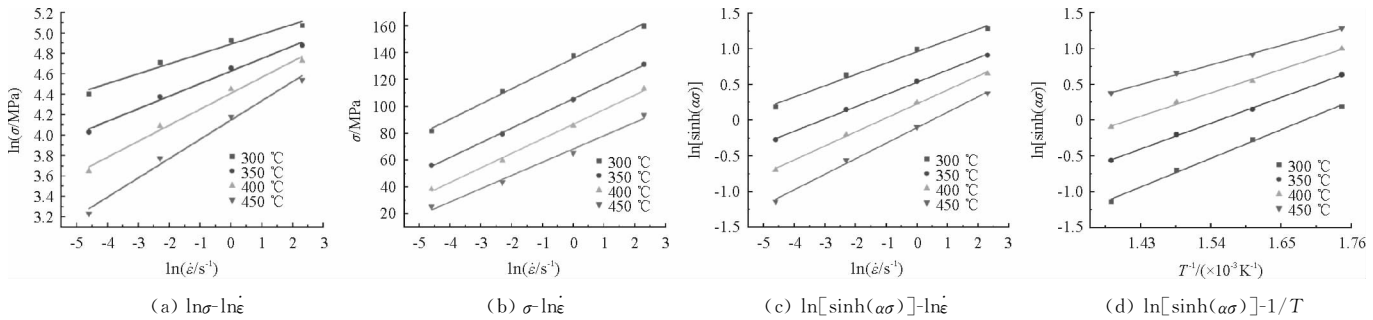


图 2  $\ln\dot{\epsilon}-\ln\sigma$ 、 $\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 、 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln\dot{\epsilon}$ 、 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1/T$  关系

Fig.2 Relationship of  $\ln\dot{\epsilon}-\ln\sigma$ 、 $\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 、 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln\dot{\epsilon}$  and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1/T$

率的降低逐渐下降。到达峰值后,软化作用增强,流动应力随应变增加逐渐下降,300 °C 下流动应力软化效果最明显,450 °C 下流动应力软化效果最弱。300 °C 时,由于存在较多难变形的粗大第二相,在热变形过程中易诱发质点激发形核 (Particle stimulated nucleation, PSN)<sup>[6]</sup>,促进动态再结晶的发生,导致流动应力软化。在 450 °C 时,粗大难变形第二相随温度升高溶解于基体中,PSN 难以发生。同时,由于铝基体属于高层错能结构,促进位错发生交滑移产生动态回复而抑制动态再结晶的发生<sup>[7]</sup>。因此,在此温度下,流动应力普遍表现为典型的动态回复特征。

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

根据正弦双曲函数的定义,可得到该模型下应力的求解公式:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \left\{ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \tag{5}$$

为求解该模型,对式(1)~式(3)两侧同时取自然对数:

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

$$\ln\dot{\epsilon} = \ln A' + n' \ln\sigma - Q/(RT) \tag{7}$$

$$\ln\dot{\epsilon} = \ln A'' + \beta\sigma - Q/(RT) \tag{8}$$

取图 1 中应变 0.2 所对应的数据建立  $\ln\sigma-\ln\dot{\epsilon}$  和  $\sigma-\ln\dot{\epsilon}$  的散点图,并进行线性拟合,取斜率平均值即可得到  $n'=7.09$  和  $\beta=0.089 \text{ MPa}^{-1}$ ,从而计算得到  $\alpha=0.0125 \text{ MPa}^{-1}$ ,见图 2。将  $\alpha$  值代入式(6)中,并进行  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln\dot{\epsilon}$  线性拟合,见图 2c,取斜率平均值

到  $1/n = 0.183\ 8$ , 则可得到  $n$  值为  $5.439\ 6$ , 平均截距为  $\ln A = 23.9$ 。此外, 根据文献[10], 可知  $Q = 1\ 000\ Rnk$ , 其中  $k$  值通过对  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$  进行线性拟合求平均斜率得到, 见图 2d, 最终求得  $Q$  值为  $139.43\ \text{kJ/mol}$ 。

将应变为  $0.2$  下求得的  $Q$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 、 $\ln A$  值代入式(5)进行流动应力预测。然而, 该模型未考虑到应变对流动应力的影响, 从图 1 中可以看出, 在较低温度下, 随应变增加, 流动应力发生明显软化。因此, 采用该参数无法较为准确地描述均热态 7055 铝合金的流变行为。为建立准确的流变本构方程, 需建立  $Q$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 、 $\ln A$  值与应变的响应关系。将应变  $0.05 \sim 0.90$  范围内, 以  $0.01$  为间隔的  $Q$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 、 $\ln A$  值分别求出, 并采用 6 次多项式进行拟合, 拟合结果见图 3。可以看出, 采用 6 次多项式拟合的  $R^2$  值均在  $0.99$  以上, 表明该多项式函数具有较高的拟合精度。根据线性拟合, 得到的 6 次多项式函数表达式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} f(\alpha) &= 0.012\ 6 - 0.011\epsilon + 0.11\epsilon^2 - 0.422\epsilon^3 + \\ &\quad 0.792\epsilon^4 - 0.722\epsilon^5 + 0.256\epsilon^6 \\ f(n) &= 7.42 - 28.71\epsilon + 165.67\epsilon^2 - 498.67\epsilon^3 + \\ &\quad 808.69\epsilon^4 - 667.28\epsilon^5 + 219.39\epsilon^6 \\ f(Q) &= 120.6 + 304.9\epsilon - 1\ 625.5\epsilon^2 + 2\ 383.5\epsilon^3 - \\ &\quad 2\ 401.5\epsilon^4 - 265.7\epsilon^5 + 735.2\epsilon^6 \\ f(\ln A) &= 20.86 + 51.66\epsilon - 284.33\epsilon^2 + 591.54\epsilon^3 - \\ &\quad 465.19\epsilon^4 + 0.793\epsilon^5 + 110.14\epsilon^6 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

结合式(9), 式(5)可表达为:

$$\sigma = \frac{1}{f(\alpha)} \left\{ \left[ \frac{\dot{\epsilon} \exp\left[\frac{f(Q)}{RT}\right]}{\exp[f(\ln A)]} \right]^{\frac{1}{f(n)}} + \left[ \frac{\left[ \frac{\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{f(Q)}{RT}\right)}{\exp(f(\ln A))} \right]^{\frac{2}{f(n)}}}{+1} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (10)$$

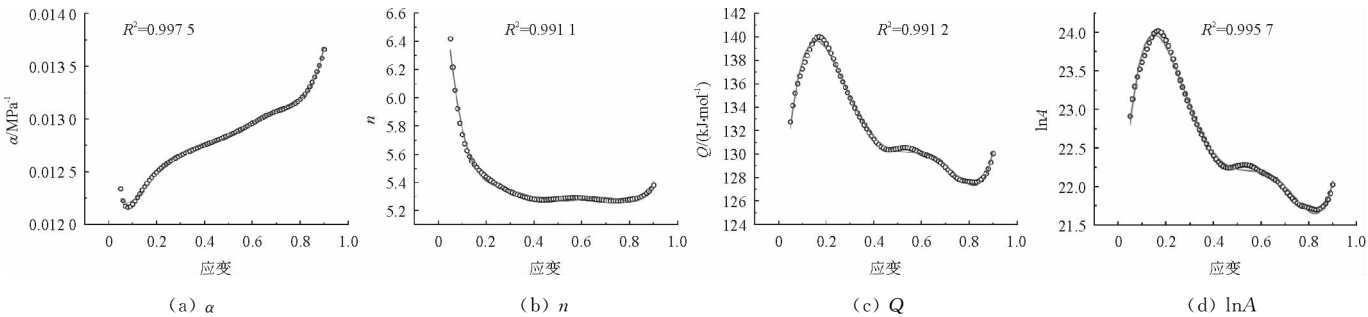


图 3  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$ 、 $\ln A$  的 6 次多项式拟合曲线

Fig.3 The 6<sup>th</sup> order polynomial fitted curves of  $\alpha$ ,  $n$ ,  $Q$  and  $\ln A$

根据式(10), 均热态 7055 铝合金流动应力预测结果见图 4。可以看出, 预测结果与试验值吻合较好, 证

明该模型具有较高的预测精度, 能够为实际成形数值模拟仿真提供可靠的理论模型。

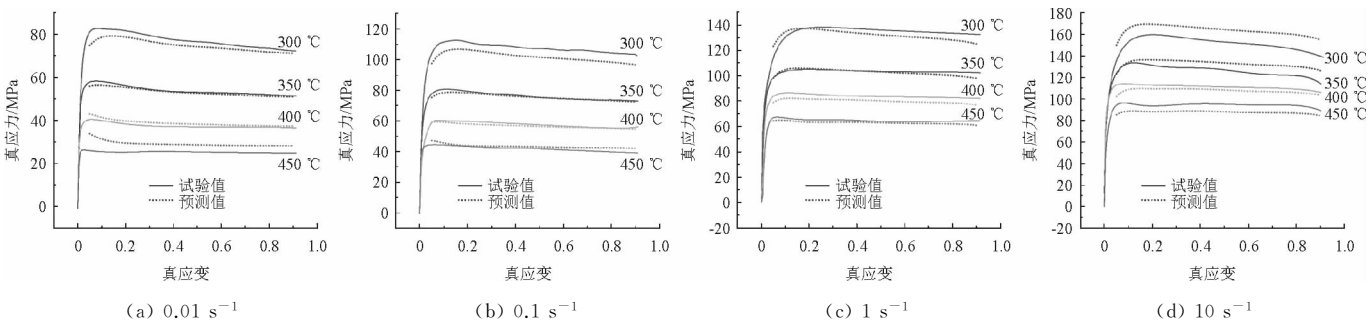


图 4 本构模型的预测值与试验值的对比

Fig.4 Comparison between predicted and experimental results of constitutive model

### 2.3 最优加工窗口识别

热加工图是识别各类合金在热加工过程中最优可加工参数窗口的重要理论途径, 其中, 基于 Kumar-Prasad 准则的热加工图被广泛应用于各类合金材料研究中<sup>[10-11]</sup>。然而, NARAYANA M S V S 等<sup>[12-13]</sup>研究发现, 采用非定值的应变速率敏感指数( $m$ )参与求解的新型加工图对微观组织失稳识别具有更高的精度, 被命

名为基于 Murty 准则的加工图, 在钛合金<sup>[14]</sup>和铝基复合材料<sup>[15]</sup>中得到应用。其功率耗散效率  $\eta$  和失稳判据  $\xi$  的表达式分别为:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{P - G}{J_{\max}} = 2 \left[ 1 - \frac{1}{\sigma \dot{\epsilon}} \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} \right] \quad (11)$$

$$\xi = 2m - \eta < 0 \quad (12)$$

式中,  $P$  为塑性变形所消耗的能量( $G$ )和微观组织演变

所消耗的能量( $J$ )之和; $m$  值可通过下式求得。

$$\ln \sigma = a_1 + a_2 \ln \dot{\epsilon} + a_3 (\ln \dot{\epsilon})^2 + a_4 (\ln \dot{\epsilon})^3 \quad (13)$$

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = a_2 + 2a_3 \ln \dot{\epsilon} + 3a_4 (\ln \dot{\epsilon})^2 \quad (14)$$

式中, $a_1 \sim a_4$  为材料常数。将不同条件下的应力应变数据代入式(11)和式(12)中,即可求得相应的  $\eta$  值和  $\xi$  值,再采用等高线的形式叠加绘图,即可得到对应的加工图。图 5 为在 0.3~0.9 应变条件下,基于 Murty 准则的 7055 铝合金热加工图,图中阴影区域为失稳区,等

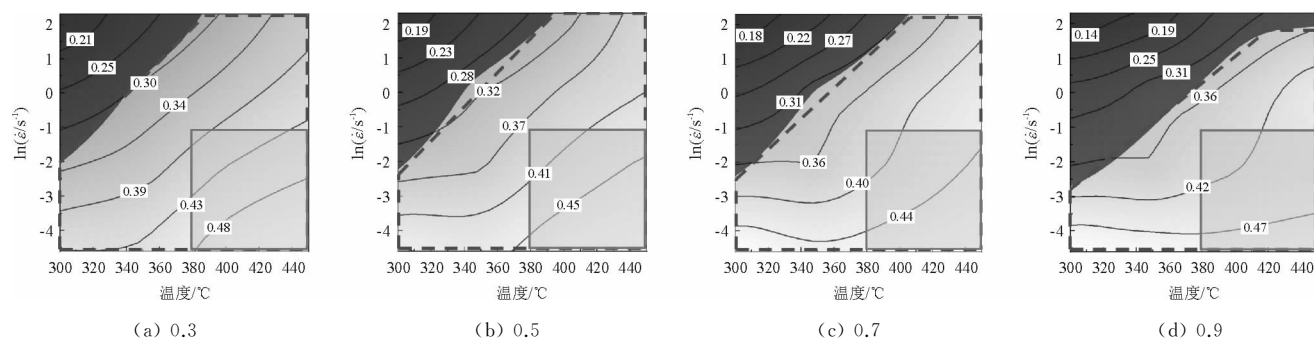


图 5 不同应变下 7055 铝合金基于 Murty 准则的加工图

Fig.5 Processing maps of 7055 aluminum alloy at different strains based on Murty criterion

### 3 结 论

(1)构建了均热态 7055 铝合金的本构模型。基于热模拟压缩流动应力数据,引入应变因素,构建了适配均热态 7055 铝合金的应变补偿 Arrhenius 流动应力本构模型,模型预测精度较高。

(2)识别了均热态 7055 铝合金的最优可加工参数窗口。基于 Murty 失稳判定准则,求解构建了适配均热态 7055 铝合金的热加工图,根据失稳分布和功率耗散效率分布,识别了该状态材料的最优可加工参数窗口:应速率范围为  $0.01 \sim 0.368 \text{ s}^{-1}$ ,温度范围为  $380 \sim 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] 王富强,杨立新,王晓巍,等. 某型机 7B04 铝合金接头锻造工艺优化[J]. 锻压技术, 2021, 46(10): 38-43.
- [2] 崔振华,刘晓艳,王路路,等. 7050 超高强铝合金蠕变时效成形行为与性能研究[J]. 有色金属材料与工程, 2020, 41(3): 7-14.
- [3] 陈学海,陈康华,梁信,等. 7085 铝合金热变形的流变应力行为和显微组织[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(2): 225-230.
- [4] 高岩,丛大鹏,于春鹏,等. 7A85 航空铝合金热加工过程的本构变形行为及组织演变[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(5): 225-231.
- [5] LIN H T, LONG S, WU D X, et al. Flow behavior and microstructure evolution of Al-3.65Cu-0.98Li alloy during hot deformation[J]. Materials Research Express, 2022, 9(4): 046 505.
- [6] LONG S, WU D X, WANG S Y, et al. An optimized constitutive model and microstructure characterization of a homogenized Al-Cu-Li alloy during hot deformation[J]. Journal of Alloys and Com-

高线数值为功率耗散系数。可以看到,随着应变增加,失稳区域逐渐扩大,且均集中在高应变速率和低温区域。此外,功率耗散效率随着温度升高和应变速率降低逐渐升高。根据文献[16],功率耗散效率越高,微观组织越倾向于稳定的动态回复和动态再结晶组织。根据失稳判据和功率耗散效率分布的综合判定,认为功率耗散效率在 0.4 以上属于最优可加工区域,即图中方框区域,所对应的应速率范围为  $0.01 \sim 0.368 \text{ s}^{-1}$ ,温度范围为  $380 \sim 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

- pounds, 2022, 929:167 290.
- [7] LI J C, WU X D, LIAO B, et al. Simulation of low proportion of dynamic recrystallization in 7055 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(7): 1 902-1 915.
- [8] SELLARS C M, MCTEGART W J. On the mechanism of hot deformation[J]. Acta Metallurgica, 1966, 14: 1 136-1 138.
- [9] 杜冲,汪泽匪,孟毅,等. Al-Cu-Mg-Zn 超硬铝合金盘类构件塑性变形性能及锻造成形工艺的研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(2): 101-109.
- [10] LONG S, XIA Y F, WANG P, et al. Constitutive modelling, dynamic globularization behavior and processing map for Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al alloy during hot deformation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 796: 65-76.
- [11] 郝爱国,吉卫,郝花蕾. 7050 铝合金的热变形行为及热加工图研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(17): 141-144.
- [12] NARAYANA M S V S, NAGESWARA R B, KASHYAP B P. On the hot working characteristics of 2014 Al-20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  metal matrix composite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(2): 279-285.
- [13] NARAYANA M S V S, NAGESWARA R B, KASHYAP B P. Identification of flow instabilities in the processing maps of AISI 304 stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(2): 268-278.
- [14] 袁大庆,董洪波,邹忠波,等. 基于 Murty 判据的 TB8 钛合金加工图及变形区分析[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(11): 73-78.
- [15] 袁战伟,李付国,王春伟,等. 基于 Murty 准则的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料热加工图研究[J]. 材料导报, 2018, 32(4): 657-661.
- [16] 李明,李亨,徐圆义,等. Al-Mg-Si-Sc-Zr 合金热变形行为及其热加工图[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(10): 143-150.

(编辑:栗万仲)