

文章编号: 1003-1545(2019)02-0070-06

5052 + Er 铝合金的热变形行为研究

马 艳¹ 席本玉¹, 王 宇²

(1. 西安交通大学城市学院 陕西 西安 710018; 2. 上海大学 上海 200444)

摘要: 在 Gleeble-3500 型热/力模拟试验机上对 5052 + Er 合金进行了高温压缩热变形, 研究了变形温度和应变速率对 5052 + Er 合金高温压缩行为的影响。结果表明: 当应变速率为 0.01 s^{-1} 时, 真应力-真应变曲线表现出典型的动态再结晶特征; 当应变速率为 0.1 s^{-1} 和 1 s^{-1} 时, 曲线表现出动态回复特征; 继续增加应变速率至 10 s^{-1} 时, 流变应力达到峰值后出现后锯齿状波动, 此时的合金已经发生了动态再结晶; 随着变形温度的升高和应变速率的减小, 5052 + Er 合金的流变应力会逐渐减小; 5052 + Er 合金热压缩变形的流变应力方程为: $\sigma =$

$$95.42 \left\{ \left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{155500}{RT}\right)}{2.69 \times 10^{18}} \right)^{0.1877} + \sqrt{\left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{155500}{RT}\right)}{2.69 \times 10^{18}} \right)^{0.3754} + 1} \right\}$$

值的误差在 10% 以内。

关键词: 5052 + Er 合金; 高温压缩; 流变应力; 本构方程; 显微组织**中图分类号:** TG142.6 **文献标识码:** A

DOI:10.19515/j.cnki.1003-1545.2019.02.011

Study on Hot Deformation Behavior of 5052 + Er Aluminum Alloy

MA Yan¹, XI Benyu¹, WANG Yu²

(1. City College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710018, China;

2. Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The thermal deformation of 5052 + Er alloy at high temperature was carried out with the Gleeble-3500 type thermal/force simulation test machine and the effects of deformation temperature and strain rate on the high temperature compression behavior of 5052 + Er alloy were studied. The results show that when the strain rate is 0.01 s^{-1} , the true stress-true strain curve presents typical dynamic recrystallization features; When the strain rates are 0.1 s^{-1} and 1 s^{-1} , the curves are characterized with dynamic recovery; When the strain rate increases to 10 s^{-1} , after the flow stress reaches the peak value, the zigzag wave appears, and the dynamic recrystallization of the alloy occurs; With the increasing of the deformation temperature and the decreasing of the strain rate, the rheological stress of the 5052 + Er alloy decreases gradually, and the rheological stress equation of the thermal compression deformation of 5052 + Er alloy is $\sigma = 95.42 \left\{ \left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{155500}{RT}\right)}{2.69 \times 10^{18}} \right)^{0.1877} + \sqrt{\left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{155500}{RT}\right)}{2.69 \times 10^{18}} \right)^{0.3754} + 1} \right\}$, and the errors between the calculated values of the peak stress and the measured values under different thermal deformation conditions are lower than 10%.

Keywords: 5052 + Er alloy; high temperature compression; flow stress; constitutive equation; microstructure

铝合金加入 Er(镨) 微合金化的方法已被证实实在提高 Al-Mg 系合金综合性能方面具有

独特的优势^[1-4],但是 5052 + Er 合金的热变形行为又有着区别与传统 5052 合金的特征,

收稿日期: 2018-08-29

作者简介: 马艳, 1981 年生, 女, 回族, 硕士, 讲师, 研究方向: 体育器械等; 席本玉, 1984 年生, 男, 汉族, 硕士, 讲师, 研究方向: 体育器械材料等; 王宇, 1989 年生, 男, 汉族, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 材料工程等。

目前尚未见相关报道。本研究采用 Gleeble 3500 型热模拟试验机对 5052+Er 合金进行高温压缩变形试验并建立相应的高温流变应力方程,以期为高性能铝合金热轧工艺提供参考依据和技术支撑。

1 材料与方法

通过在商用 5052 合金的基础上添加 Er 的方法制备了 5052+Er 合金,采用火花直读光谱的方法测得合金板的主要成分,如表 1 所示。

表 1 实验合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of experimental alloy (w)

Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Si	Cu	Er	Al	%
2.32	0.08	0.10	0.22	0.07	0.08	0.06	0.15	余量	

采用线切割的方法从均匀化态 5052+Er 合金上截取 $\phi 10\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ (高)圆柱形试样。使用 Gleeble-3500 型热/力模拟试验机对 5052+Er 合金进行单道次轴向高温压缩,热变形温度分别为 300 °C、350 °C、400 °C、450 °C 和 500 °C,高温压缩的应变速率分别为 10 s^{-1} 、 1 s^{-1} 、 0.1 s^{-1} 和 0.01 s^{-1} ,变形量设定为 20%、40% 和 50%。高温压缩热模拟过程中,将试样装在夹具上固定后以 8 °C/s 升温至设定温度,保温 3 min 后进行轴向压缩实验。

从铸态和均匀化态 5052+Er 合金板上截取块状试样 60#、240#、400#、600#、800#、1 200#砂纸打磨和金刚石研磨膏抛光后,采用 Keller 试剂

(95 ml 水 + 2.5 ml HNO₃ + 1.5 ml HCl + 1.0 ml HF) 腐蚀后,在奥林巴斯 IX83 光学显微镜上观察。

2 结果与讨论

对铸态和均匀化态 5052+Er 合金进行光学显微组织观察,结果如图 1 所示。铸态组织中可见明显枝晶,枝晶偏析较为严重,二次枝晶间距较为粗大;经过均匀化退火后,枝晶偏析基本消除,晶界处可见初生未熔第二相,结合文献可知^[5],这些晶界处的析出相主要为 Al₃Er 相,可以起到净化除杂和细化晶粒的作用。

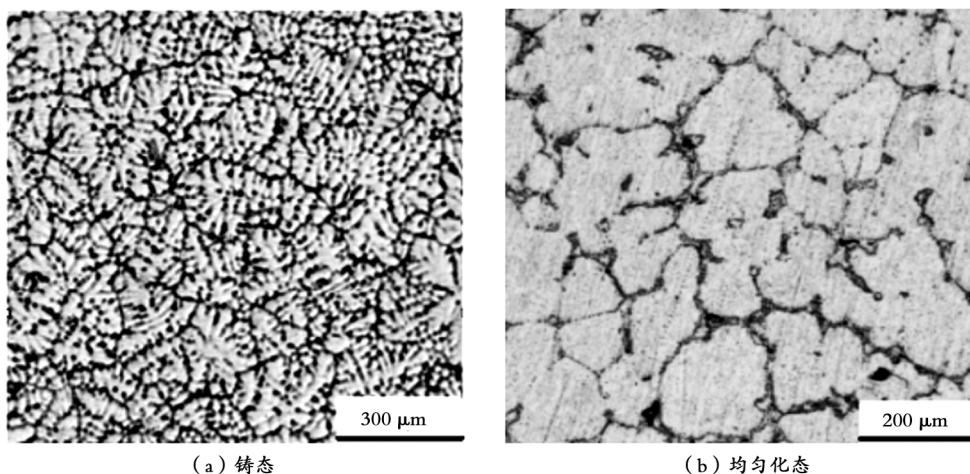


图 1 铸态和均匀化态 5052+Er 合金的光学显微组织

Fig. 1 Optical microstructures of as cast and homogenized 5052+Er alloys

图2为变形温度在300 °C ~ 450 °C、应变速率在0.01 s⁻¹ ~ 10 s⁻¹时5052 + Er合金的真应力-真应变曲线。对比分析可知，5052 + Er合金的真应力-真应变曲线具有相同的特征，即开始变形阶段，流变应力值会快速增加，此时主要发生加工硬化，而随着变形程度的增加，流变应力逐渐趋于稳定，这是因为此时的动态软化与加工硬化达到平衡^[6]。当应变速率为0.01 s⁻¹时，曲线表现出典型的动态再结晶特征（流变应力达到峰值后快速降低至稳定值）；当应变速率为0.1 s⁻¹和1 s⁻¹时，曲线表现出动态回复特征；继续增加应变速率至10 s⁻¹时，流变应力达到峰值后出

现后锯齿状波动，这是动态软化和加工硬化共同作用的结果^[7]。此时的合金已经发生了动态再结晶。在相同的应变速率下（0.01 s⁻¹ ~ 10 s⁻¹），当变形温度从300 °C升高至450 °C时，流变应力逐渐降低，这主要是由于较高的变形温度下软化作用更加显著，合金更容易发生变形的缘故^[8]。在相同的变形温度下（300 °C ~ 450 °C），当应变速率从10 s⁻¹减小至0.01 s⁻¹时，流变应力逐渐减小，这主要是由于较低的应变速率下合金的动态再结晶行为会更加充分，而较高的应变速率下的软化行为还来不及抵消加工硬化的影响^[9]，流变应力会相对较大。

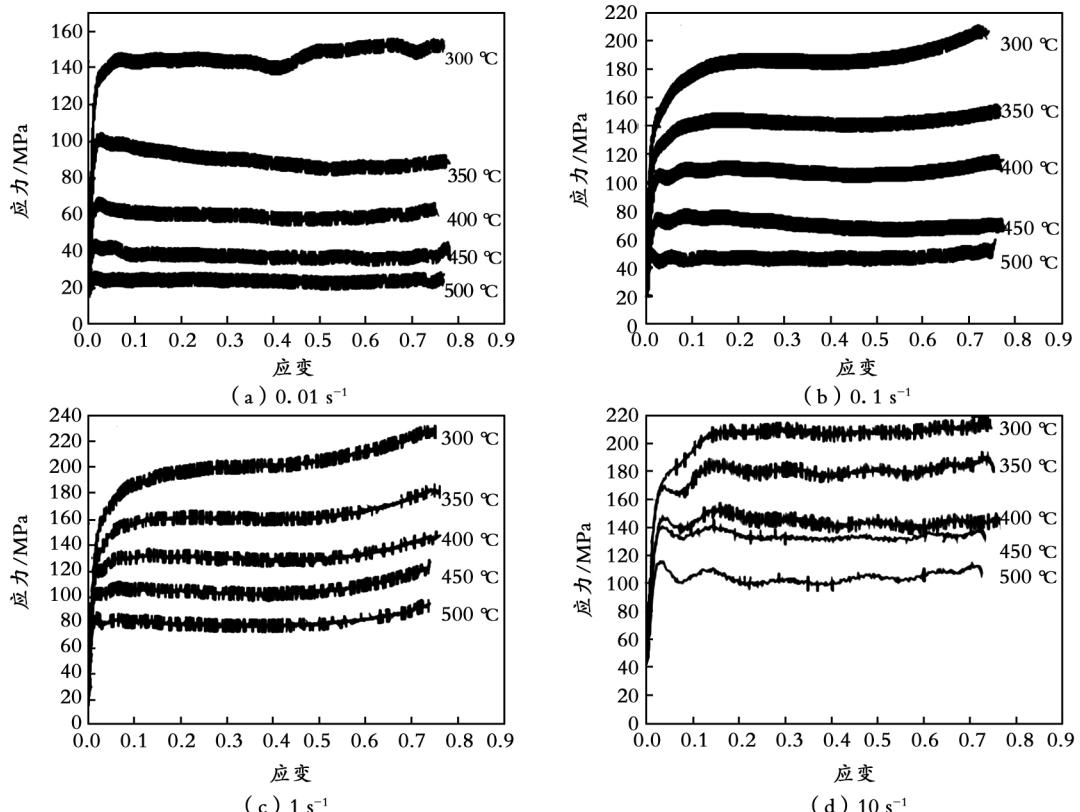


图2 不同应变速率下5052 + Er合金的真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of 5052 + Er alloy at different strain rates

根据图2的真应力-真应变曲线可知，变形温度和应变速率会对高温压缩变形过程中的流变应力产生很大影响，且5052 + Er合金的流变应力 σ 和应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 之间的相互关系可表

示为^[10-11]：

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/RT] \quad (3)$$

式中 A_1, A_2, n_1 为与变形温度无关的常数 n 为应力指数 α 为应力水平参数 ($\alpha = \beta/n_1$, mm²/N) A 为结构因子 (s⁻¹) Q 为热激活能 (kg/mol) 变形激活能 R 为气体常数 T 为热力学温度 (K)。

将式(1)、式(2)和式(3)两边取对数,可得:

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

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

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

图2的真应力-真应变曲线表明峰值应力都

出现在应变较小时,5052+Er合金在变形温度为300℃~450℃、应变速率为0.01 s⁻¹~10 s⁻¹时的峰值应力统计结果如表2所示,相应地对 $\ln\dot{\varepsilon}$ 和 $\ln\sigma$ 以及 $\ln\dot{\varepsilon}$ 和 σ 作图,结果如图3所示。采用最小二乘法进行线性回归处理^[12],可得到 $\ln\dot{\varepsilon} - \ln\sigma$ 的斜率(n_1)和 $\ln\dot{\varepsilon} - \sigma$ 的斜率(β),其中 n_1 和 β 都取不同温度下直线斜率的平均值,分别约为7.2915和0.0763。根据 $\alpha = \beta/n_1$ 可以计算得到 α 值为0.0105。

表2 5052+Er合金的峰值应力统计结果

Table 2 Statistical results of peak stresses of 5052+Er alloys MPa

应变速率/s ⁻¹	300 ℃	350 ℃	400 ℃	450 ℃	500 ℃
0.01	145.35	101.92	66.35	43.24	26.50
0.1	187.11	144.85	105.39	74.95	49.59
1	200.72	162.22	132.65	107.09	83.83
10	211.51	186.56	154.14	141.13	116.07

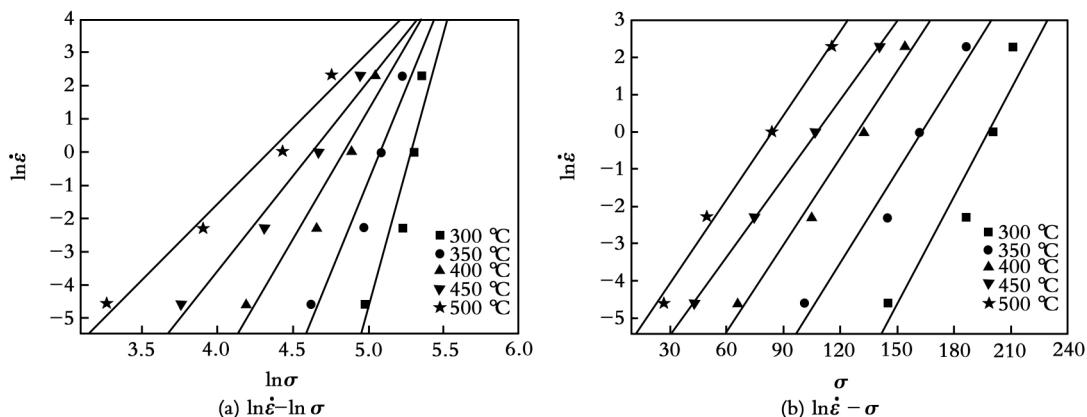


图3 $\ln\dot{\varepsilon}$ 和 $\ln\sigma$ 以及 $\ln\dot{\varepsilon}$ 和 σ 的关系曲线

Fig. 3 The relation curves of $\ln\dot{\varepsilon} - \ln\sigma$ and $\ln\dot{\varepsilon} - \sigma$

在特定的变形温度和变形速率下,对式(6)进行 $1/T$ 求偏导可得:

$$Q = R \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \left| \dot{\varepsilon} \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right|_T \quad (7)$$

根据式(7)并取 $K = \frac{d \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{d(1/T)}$ 可绘制

不同变形温度和应变速率下 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $1000/T, \ln\dot{\varepsilon}$ 的关系曲线,见图4。采用最小二乘法进行线性回归处理,可得到 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 直线的斜率 K 和 $\ln\dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$

直线的斜率 n_2 , 其中 K 和 n_2 都取直线斜率的平均值, 分别约为 3.510 和 5.329。由此可以计算

得到 5052 + Er 合金的平均变形激活能 $Q = 155.5 \text{ kJ/mol}$ 。

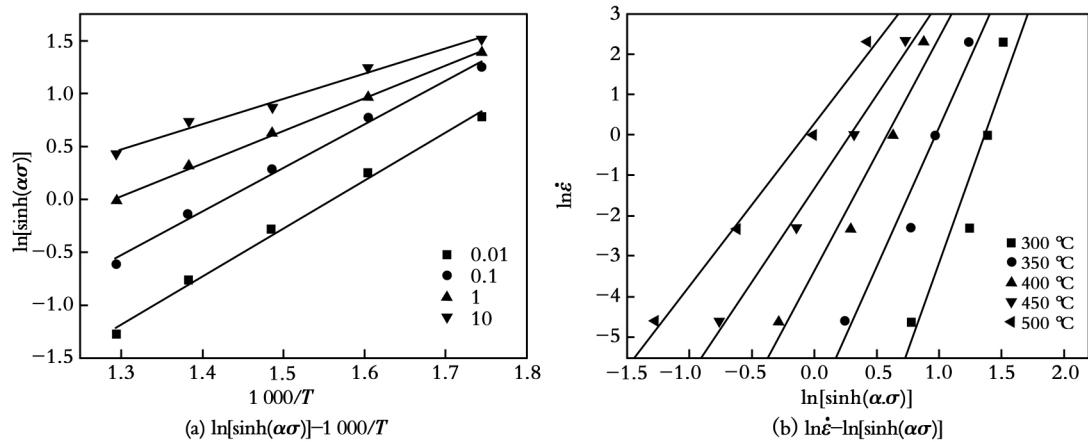


图 4 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $1000/T$ 、 $\ln\dot{\epsilon}$ 的关系
Fig. 4 The relation curves of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ and $\ln\dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

在 5052 + Er 合金高温压缩变形过程中, 还可以用温度补偿变形速率因子 Z 来表示热变形条件^[13—15]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (8)$$

$$Z = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (9)$$

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (10)$$

在应变速率和变形温度不同、变形激活能一定的条件下, 采用一元线性回归法得到 5052 + Er 合金 $n \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln Z$ 的关系如图 5 所示。

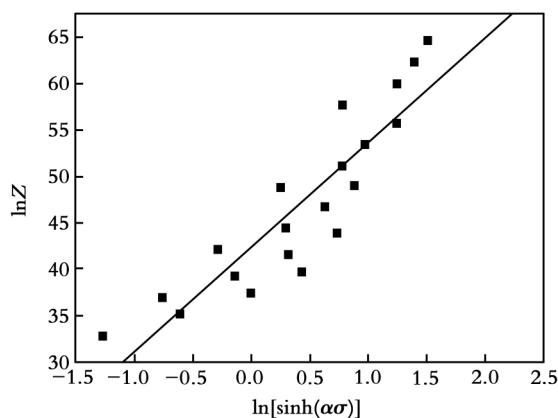


图 5 $\ln Z$ 和 $n \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系曲线
Fig. 5 Relationship between the $\ln Z$ and $n \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$

采用最小二乘法线性回归, 可得 $\ln A = 42.44$, 结构因子 $A = 2.69 \times 10^{18}$ 。将上述计算得到的 α 、 β 、 n 、 K 、 Q 、 $\ln A$ 和 A 值列于表 3, 可由此计算得到 5052 + Er 合金的热压缩变形的流变应力方程为:

$$\sigma = 95.42 \times \left\{ \left(\frac{\dot{\epsilon} \exp(\frac{155500}{RT})}{2.69 \times 10^{18}} \right)^{0.1877} + \right.$$

$$\left. \sqrt{\left(\frac{\dot{\epsilon} \exp(\frac{155500}{RT})}{2.69 \times 10^{18}} \right)^{0.3754} + 1} \right\} \quad (11)$$

为了验证式 (11) 的准确性, 将设定的变形温度和应变速率代入式 (11), 可以计算得到峰值应力的计算值与测量值的误差在 10% 以内, 表明本研究得出的流变应力方程具有较高的实际应用价值, 可为生产企业的热轧工艺制定提供依据。

表3 5052+Er合金流变应力方程的主要参数

Table 3 Main parameters of flow stress equation for 5052+Er alloy

$\alpha/(\text{mm}^2/\text{N})$	$\beta/(\text{mm}^2/\text{N})$	n	K	$Q/(\text{J/mol})$	$\ln A/(\text{s}^{-1})$	$A/(\text{s}^{-1})$
0.0105	0.0763	5.329	3.510	155500	42.44	2.69×10^{18}

3 结论

(1) 当应变速率为 0.01 s^{-1} 时, 真应力-真应变曲线表现出典型的动态再结晶特征; 当应变速率为 0.1 s^{-1} 和 1 s^{-1} 时, 曲线表现出动态回复特征; 继续增加应变速率至 10 s^{-1} 时, 流变应力达到峰值后出现后锯齿状波动, 此时的合金已经发生了动态再结晶。

(2) 在相同的应变速率下 ($0.01 \text{ s}^{-1} \sim 10 \text{ s}^{-1}$), 变形温度从 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 流变应力逐渐降低; 在相同的变形温度下 ($300 \text{ }^\circ\text{C} \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$), 应变速率从 10 s^{-1} 减小至 0.01 s^{-1} 时, 流变应力逐渐减小。

(3) 5052+Er合金的热压缩变形的流变应力方程为: $\sigma = 95.42 \left\{ \left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp(\frac{155500}{RT})}{2.69 \times 10^{18}} \right)^{0.1877} + \sqrt{\left(\frac{\dot{\varepsilon} \exp(\frac{155500}{RT})}{2.69 \times 10^{18}} \right)^{0.3754} + 1} \right\}$ 不同热变形条件下

峰值应力的计算值与测量值的误差在 10% 以内。

参考文献:

- [1] 刘欣, 秦宇. 加热方式对体育器材用 5052 铝合金锻压件性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(2): 42—46.
- [2] 韩颖, 王国军, 王英君, 等. 稀土元素 Er 对 5A06 铝合金铸态组织及性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2018, 46(2): 16—21.
- [3] 张静, 唐聪, 赵婧婧, 等. 均匀化退火对 5052 含 Er 铝合金显微组织的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(11): 3491—3497.
- [4] 林双平, 黄晖, 文胜平, 等. 含 Er 5083 合金均匀化退火过程中 Al3Er 相的 TEM 观察 [J]. 金属学报, 2009, 45(8): 978—982.
- [5] 王旭东, 林双平, 汤振雷, 等. Er 在 Al-Mg-Mn-Zr-Er 合金中的存在形式与析出特征 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(10): 965—968, 987.
- [6] 陈贵清, 傅高升, 王军德, 等. 考虑不同应变的 3003 铝合金流变应力预测模型建立与验证 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25(2): 265—271.
- [7] 戴青松, 刘栩, 付平, 等. 5083 铝合金高温变形行为及加工图 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(8): 1988—1994.
- [8] 杨群英, 刘文义, 张志清, 等. AA7085 铝合金热变形行为及加工图的研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(2): 409—415.
- [9] 薛克敏, 薄冬青, 李萍. 轧制态 7A60 铝合金的热压缩显微组织及流变行为 [J]. 材料导报, 2018, 32(8): 1306—1310.
- [10] 赵艳君, 蒋长标, 武鹏远, 等. 含稀土高镁铝合金热变形行为研究 [J]. 中国稀土学报, 2017, 35(3): 368—376.
- [11] 戴青松, 欧世声, 邓运来, 等. 5083 铝合金的热变形组织演变及晶粒度模型 [J]. 材料导报, 2017, 31(14): 143—146, 152.
- [12] 谢洪昊, 陈泽中. 6111 铝合金热变形流变行为及本构模型 [J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(4): 198—203.
- [13] 黄元春, 陈鹏冲, 刘宇. 2219 铝合金热变形行为的研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 87—90.
- [14] 李红斌, 李小林, 徐树成, 等. 6082 铝合金热变形流变应力曲线修正与本构方程 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23(3): 152—158.
- [15] CHEN G, FU G, LIN S, et al. Simulation of flow of aluminum alloy 3003 under hot compressive deformation [J]. Metal Science & Heat Treatment, 2013, 54(11—12): 623—627.

(编辑: 许紫娟)