

文章编号: 2095-2163(2020)05-0139-04

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

基于 Matlab 镁合金热加工图建立与分析

赵卫东, 何建丽, 何进, 吕刚

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘要: 为研究 WE43 镁合金热变形行为, 利用 Gleeble-3800 热模拟机, 在变形温度 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率 $0.001\sim 1\text{ s}^{-1}$ 的变形条件下对该合金进行高温压缩实验。由应力应变曲线可知, 在材料变形过程中影响流变应力的重要参数是温度和应变速率。根据应变曲线, 建立 WE43 镁合金的热加工图。结果表明: WE43 镁合金在高温压缩过程中最佳工艺参数为温度 $380\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 460\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率 $0.001\sim 0.01\text{ s}^{-1}$ 。

关键词: 高温压缩; 变形温度; 应变速率; 热加工图

Establishment and analysis of hot working drawing of magnesium alloy based on MATLAB

ZHAO Weidong, HE Jianli, HE Jin, LU Gang

(College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In order to study the hot deformation behavior of WE43 magnesium alloy, the high temperature compression test was carried out with Gleeble-3800 thermal simulator under the deformation temperature of $350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the strain rate of $0.001\sim 1\text{ s}^{-1}$. It can be seen from the stress-strain curve that temperature and strain rate are the important parameters that affect the rheological stress in the process of material deformation. According to the strain curve, the hot processing map of WE43 magnesium alloy is established. The results show that the optimum process parameter of WE43 magnesium alloy is $380\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 460\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the strain rate is $0.001\sim 0.01\text{ s}^{-1}$.

[Key words] high temperature compression; deformation temperature; strain rate; hot processing map

0 引言

轻金属在当今世界材料占有的比重日益增大。镁合金具有较小的密度、比强度和刚度, 使其在众多领域具有很大的应用价值^[1-3]。相关数据显示, 汽车自重减少 1% 可以节省 0.7% 的能源, 这对于工业上减少能源消耗而言具有举足轻重的意义^[3]。

热加工图能够宏观确定材料的最佳工艺。目前在众多材料模型中, 动态材料模型 (DMM) 具有独特优势, 特别适用于合金类材料, 如钛合金、铝合金、镁合金。在建立动态材料模型时, 利用应力应变曲线绘制效率耗散图与失稳判据图, 从而获得材料的热加工图^[4-8]。

本文利用 Matlab 建立 WE43 镁合金热加工图, 为了准确预测材料热变形过程的热激活能, 建立了含有温度、应变速率的三维激活能图, 重点研究材料的高温压缩的热变形行为, 为确定材料最佳工艺参数及其优化、提高产品的组织性能和质量提供参考。

1 实验材料与方法

为研究 WE43 镁合金热变形行为, 本实验在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变形温度, 应变速率 $0.001\sim 1\text{ s}^{-1}$ 条件下, 对 $\Phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的 WE43 镁合金试样进行高温压缩实验, WE43 镁合金化学成分见表 1。实验过程中, 在压头表面放置石墨片, 从而润滑表面以减小摩擦阻力。

表 1 WE43 镁合金的化学成分 (% , 质量分数)

Tab. 1 Chemical compositions of WE43 magnesium alloy (% , mass fraction)

Y	Zr	Gd	Nd	Ni	Fe	Cu	Mg
3.82	0.43	1.48	2.47	0.001	0.001	0.003	Bal.

2 实验结果与分析

2.1 真实应力-应变曲线

图 1 为 WE43 镁合金在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变形温度, 应变速率 $0.001\sim 1\text{ s}^{-1}$ 条件下的应力应变曲线。

基金项目: Mg-RE 合金热锻中第二相诱发空洞演化致其损伤断裂机制及多尺度模拟 (51805313)。

作者简介: 赵卫东 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 稀土镁合金板料塑性形变机制的研究; 何建丽 (1979-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 高温成形断裂及预防的研究。

通讯作者: 何建丽 Email: hejianling792@163.com

收稿日期: 2020-02-16

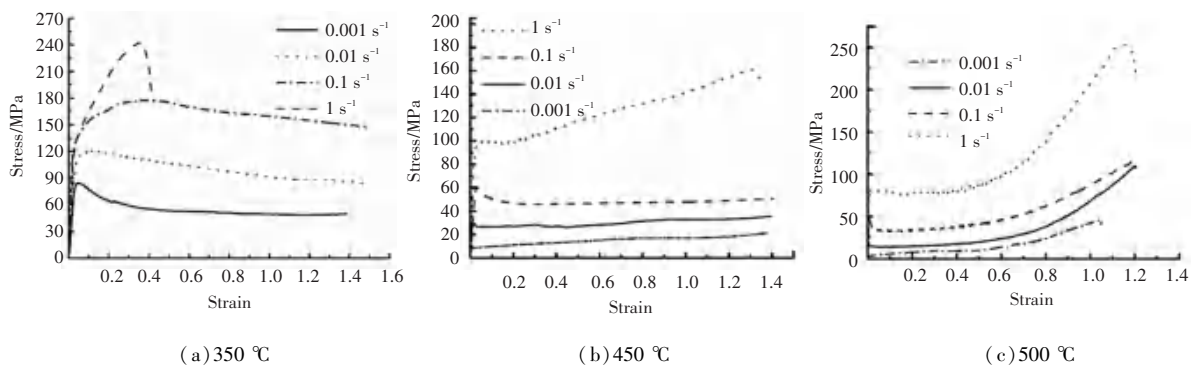


图1 WE43 镁合金在不同变形温度和应变速率下的真应力-应变曲线

Fig. 1 The true stress-strain curves of WE43 magnesium alloy at different deformation temperatures and strain rates

由图1可知,在高温压缩初始阶段,加工硬化对材料起决定性作用。随着压缩实验的进行,应力增加趋势逐渐放缓,说明在此变形过程中材料加工软化作用逐渐增强。同时可以看到低温下 WE43 镁合金的应变较小,宏观上则表现为材料塑性性能较差,升高温度提高了其塑性性能。镁合金由于低温塑型严重,限制了其应用范围,因此在实际生产中可以通过升高温度提高其塑性性能,这在改善加工工艺,增强材料应用方面有着很强的指导作用。建立 WE43 镁合金的热加工图,进一步确定材料最佳工艺。

2.2 热加工图的建立

压缩试件的耗散能量 P 为^[9-10]:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \sigma d\dot{\epsilon}, \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, σ 为应力。

当应变速率一定时,材料高温压缩变形的瞬时能量耗散由变形粘性热 G 和组织变化耗散的能量 J 两部分组成。

敏感指数 m 为:

$$m = \frac{dJ}{dG} = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\epsilon}}, \quad (2)$$

同时,变形粘性热 G 与协变量 J 均是由于 m 决定的,其中 J 的计算公式为:

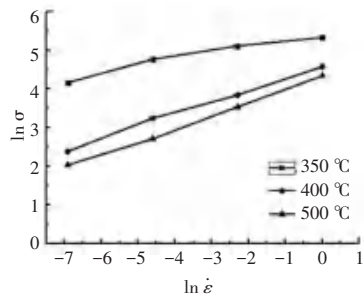
$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \left(\frac{m}{m+1} \right) \sigma \dot{\epsilon}. \quad (3)$$

在实际生产中,大多情况下都是非耗散体,其效率值通常用 η 表示,其表达式为:

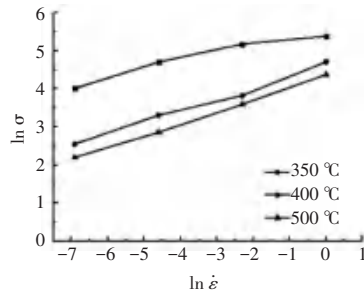
$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1}. \quad (4)$$

在 350 °C ~ 500 °C 变形温度,应变速率 0.001 ~ 1 s⁻¹ 条件下,得到如图 2 关系曲线。

对实验数据进行分析,求解耗散效率系数,表达式为:



(a) $\epsilon = 0.2$



(b) $\epsilon = 0.4$

图2 不同应变条件下应力对数与应变速率对数的关系曲线

Fig. 2 The relationship between stress logarithm and strain rate logarithm under different strain conditions

$$\ln \sigma = k_1 \times (\ln \dot{\epsilon})^0 + k_2 (\ln \dot{\epsilon})^1 + k_3 (\ln \dot{\epsilon})^2 + k_4 (\ln \dot{\epsilon})^3, \quad (5)$$

对上式求导,得到:

$$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\epsilon}} = k_2 + 2 \times k_3 \times (\ln \dot{\epsilon})^1 + 3 \times k_4 \times (\ln \dot{\epsilon})^2. \quad (6)$$

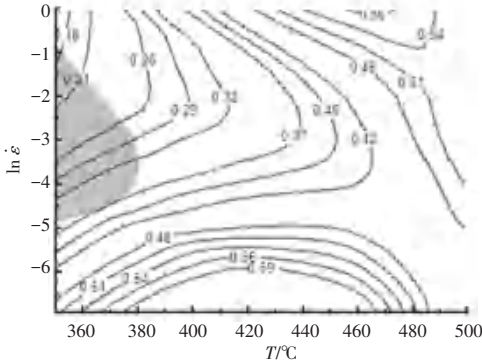
根据上述分析,WE43 镁合金高温压缩实验热变形过程可利用 Ziegler 失稳判据判断 WE43 镁合金失稳现象。采用相同的数学分析方法建立效率耗散图,建立拟合式:

$$\ln \left(\frac{m}{m+1} \right) = k_{11} + k_{22} \times (\ln \dot{\epsilon}) + k_{33} \times (\ln \dot{\epsilon})^2 + k_{44} \times (\ln \dot{\epsilon})^3, \quad (7)$$

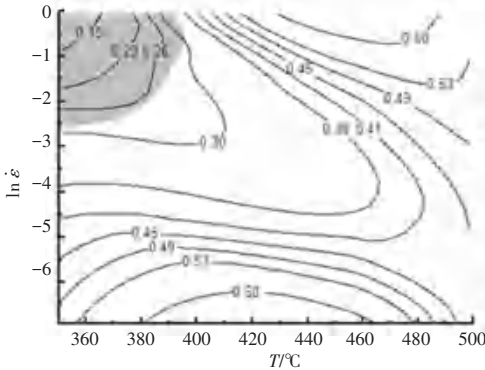
对上式求导,得到:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln \frac{m}{m+1}}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m = k_{22} + 2 \times k_{33} \times (\ln \dot{\epsilon})^1 + 3 \times k_{44} \times (\ln \dot{\epsilon})^2 + m. \quad (8)$$

建立 WE43 镁合金在 350 °C ~ 500 °C 变形温度, 应变速率 0.001 ~ 1 s⁻¹ 条件下的热加工图。根据 PRASAD 的研究^[6], 本实验取应变变量 0.2 和 0.4 分别建立热加工图, 如图 3 所示。



(a) $\epsilon = 0.2$



(b) $\epsilon = 0.4$

图 3 WE43 镁合金在不同应变下的热加工图

Fig. 3 Hot processing map of WE43 magnesium alloy under different strains

2.3 热加工图的分析

热加工图通常能够划分为两个区域,安全区域和失稳区域。如图 3 中的灰色区域为流动失稳区^[11]。在选择最佳工艺参数时,应选择安全区内能耗值较高的区域。由于失稳区及其附近的材料变形不稳定,要特别注意避免选择在失稳区附近。从图 3 可知,WE43 镁合金在高温压缩过程中最佳工艺参数为 380 °C ~ 460 °C 变形温度,应变速率 0.001 ~ 0.01 s⁻¹。

2.4 WE43 稀土镁合金高温压缩变形行为的热激活能 在研究材料热变形行为时,激活能对于研究材料热变形行为具有重要参考意义^[11-12]。为进一步研究 WE43 稀土镁合金热变形行为,采用考虑了变

形激活能的 Arrhenius 模型描述 WE43 稀土镁合金的高温热变形行为,表达式为^[11]:

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma_t) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (9)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; A 为与材料有关的系数; Q 表示变形激活能; R 为气体摩尔常数, 其值为 8.3145 J/(mol · K); T 为温度。

针对不同的应力状态, $F(\sigma)$ 有不同的表达式:

$$F(\sigma) = \sigma^{n_1}, \quad (\alpha\sigma < 0.8). \quad (10)$$

$$F(\sigma) = \exp(\beta\sigma), \quad (\alpha\sigma > 1.2). \quad (11)$$

$$F(\sigma) = [\sin h(\alpha\sigma)]^n. \quad (12)$$

式 (10) 为幂函数, 用于描述低应力变形; 式 (11) 为指数函数, 用于描述高应力变形; 式 (12) 为双曲正弦函数, 其中 n_1, n, α, β 为与材料相关的系数, 并存在如下关系:

$$\alpha = \beta/n_1, \quad (13)$$

整理上式可得:

$$\ln \sigma = \frac{1}{n_1} \cdot \ln \dot{\epsilon} - \frac{\ln A}{n_1} + \frac{Q}{n_1 RT}, \quad (14)$$

$$\sigma = \ln \dot{\epsilon} / \beta - \ln A_2 / \beta + Q / \beta RT. \quad (15)$$

由式 (14)、(15) 可知, 为了确定 n_1, β 的值, 需求得 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 线性关系和 $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 线性关系的斜率。根据式 (13) 可得 α 的值。

通过对上述公式进行分析计算, 为减小误差得到较为精确的结果, 在 0.2 ~ 0.9 应变范围内进行计算并取其平均值, 得到 n_1, β, α 在不同温度的值见表 2。

表 2 n_1, β 和 α 的值

Tab. 2 The values of n_1, β and α

Temperature/°C	n_1	β	α
350	4.082 5	0.040 237 5	0.009 877 107
450	3.367 625	0.070 625	0.021 035 851
500	3.534 25	0.072 875	0.021 248 823

将式 (12) 代入式 (9), 并取其对数:

$$\ln(\dot{\epsilon}) = \ln A + n \ln[\sin h(\alpha\sigma) - \frac{Q}{RT}], \quad (16)$$

进一步转化为:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{QT}{nR} + \frac{\ln \dot{\epsilon} - \ln A}{n}, \quad (17)$$

式 (16) 取关于 $1/T$ 的偏微分, 得到:

$$Q = Rn \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)}. \quad (18)$$

为确定系数 $n, \ln A, A$ 的值, 只需求得在应变处于某值时, $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$ 线性关系的斜率 k 和

截距 h , 以及 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \frac{1}{T}$ 线性关系的斜率。

关系式如下:

$$Q = nRK, \quad (19)$$

$$\ln A = \ln \dot{\epsilon} - nh. \quad (20)$$

通过上述公式计算, 得到 Q 在 0.2~0.9 应变范围内 350 °C ~ 500 °C 变形温度, 应变速率 0.001 ~ 1 s⁻¹ 条件下的值见表 3, 激活能变化范围: 93.051 ~ 191.827 KJ · mol⁻¹。

表 3 不同温度和应变速率下激活能的值

Tab. 3 The values of activation energy at different temperature and strain rate

Temperature/°C	Activation energy / (KJ · mol ⁻¹)			
	0.001 s ⁻¹	0.01 s ⁻¹	0.1 s ⁻¹	1 s ⁻¹
350	93.051	117.840	144.179	100.195
450	114.741	145.326	177.601	121.982
500	119.680	153.682	191.837	134.352

镁合金在实际生产中所占比重与日俱增, 为了在生产中更为准确方便的预测激活能, 提高其应用价值, 在 350 °C ~ 500 °C 变形温度, 应变速率 0.001 ~ 1 s⁻¹ 条件下建立含有温度、应变速率的 WE43 镁合金的激活能图, 如图 4 所示。图 4 说明在实验温度范围内激活能随着变形温度的升高呈现出显著增大的趋势, 同时随着应变速率的增加先增大再减小。

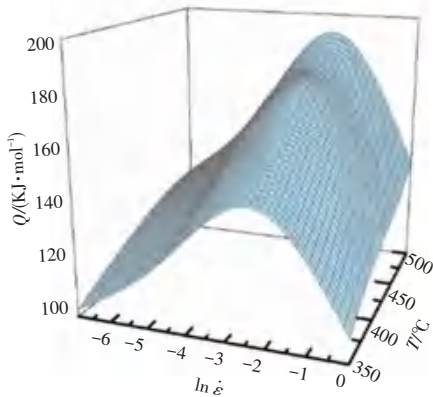


图 4 三维激活能图

Fig. 4 Three dimensional activation energy diagram

3 结束语

(1) WE43 镁合金低温时塑性性能很差, 可以通过提高温度改善材料塑性。

(2) 建立 WE43 镁合金热加工图, 用以确定材料的最佳工艺参数为: 380 °C ~ 460 °C 变形温度, 应变速率 0.001 ~ 0.01 s⁻¹。

(3) 建立 WE43 镁合金的三维激活能图, 表明在实验温度范围内激活能随着变形温度的升高呈现出显著增大的趋势, 同时随着应变速率的增加先增大再减小。

参考文献

- [1] 陈先华, 耿玉晓, 刘娟. 镁及镁合金功能材料的研究进展[J]. 材料科学与工程报, 2013, 31(1): 148-152.
- [2] 张勇, 张泰峰, 赵维义, 等. 镁合金表面处理技术现状和发展趋势[J]. 青岛理工大学学报, 2010, 31(4): 111-116.
- [3] 陈进. 汽车轻量化材料与制造工艺研究浅析[J]. 中国市场, 2016, 41(908).
- [4] 周军, 李中奎, 张建军, 等. 基于 Matlab 的热加工图的数值构造方法[J]. 稀有金属, 2007, 12(31): 49-52.
- [5] MIRZA F A, CHEN D L, LI D J, et al. Effect of rare earth elements on deformation behavior of an extruded Mg-10Gd-3Y-0.5Zr alloy during compression[J]. Materials and Design, 2012, 46, 411-418.
- [6] PRASAD Y V R K. Processing maps: A status report[J]. Journal of Engineering and Performance, 2003, 12: 638-645.
- [7] 廖喜平, 谢其军, 胡成亮, 等. 304 奥氏体不锈钢热变形行为及热加工图[J]. 锻压技术, 2017, 42(12): 150-156.
- [8] 李立新, 周志峰, 张涛, 等. DB685 钢的热变形行为及热加工图[J]. 锻压技术, 2016, 41(9): 126-129.
- [9] 马雪飞, 姜君, 李红雷. 基于动态材料模型的 Cr80 钢的热加工图[J]. 锻压技术, 2019, 44(1): 166-170.
- [10] 邱霖, 唐建敏, 刘洪光. 基于热拉伸试验的 DP590 高强钢变形本构关系及热加工图[J]. 锻压技术, 2017, 42(1): 121-125.
- [11] 徐微. 挤压 AZ80 镁合金的热拉伸变形特点及热加工图的研究[D]. 鞍山市: 辽宁科技大学, 2015.
- [12] 林潇, 等. HC1150 / 1400MS 马氏体钢的高温本构模型[J]. 金属热处理, 2017, 10(42): 197-202.

(上接第 138 页)

- [5] 徐彤阳, 方勇. 基于 Contourlet 变换的双三次插值算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(7): 20-22, 2.
- [6] Umehara Kensuke, Ota Junko, Ishida Takayuki. Application of Super-Resolution Convolutional Neural Network for Enhancing Image Resolution in Chest CT. [J]. Journal of digital imaging, 2018, 31(4).
- [7] Søren Forchhammer, Huiying Li, Jakob Dahl Andersen. No-reference analysis of decoded MPEG images for PSNR estimation and post-processing [J]. Journal of Visual Communication and

Image Representation, 2011, 22(4).

- [8] 李贤. 基于群稀疏字典的图像超分辨率算法研究[D]. 燕山大学, 2012.
- [9] 李斌. 面向高性能视频编码标准的率失真优化技术研究[D]. 中国科学技术大学, 2013.
- [10] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE transactions on image processing, 2004, 13(4): 600-612.