

Mg-5Sm-3Gd 镁合金的流变应力预测模型及热加工图

李 萍¹, 崔 扬¹, 王 莹¹, 赵 洁², 张 清^{2*}

(1. 洛阳理工学院 土木工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘 要:采用 Gleeble-1500 热模拟试验机获得了固溶态 Mg-5Sm-3Gd 镁合金的热压缩流变应力曲线, 选择峰值应力建立本构方程并验证其准确性, 通过热加工图分析最优加工区间。结果表明: 当变形温度从 500 °C 下降到 350 °C 或者应变速率从 0.01 s⁻¹ 增加至 1 s⁻¹ 时, 会使合金的流变应力值增大。经实验对比验证, 该方程预测的流变应力精度较高, 平均相对误差在 1.88% 以内, 相关系数为 0.99。合金在 $T = 440\text{ °C} \sim 500\text{ °C}$ 、 $\dot{\epsilon} = 0.01\text{ s}^{-1} \sim 0.05\text{ s}^{-1}$ 区域内能量耗散率大于 30% 且不发生失稳, 适合热加工。

关键词: Mg-5Sm-3Gd 镁合金; 热压缩; 流变应力; 本构方程; 热加工图

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-0277(2026)01-0054-08

由于镁合金是密排六方结构, 室温下的滑移系少^[1~3], 其塑性和成型性都较差, 因此镁合金的热变形过程已成为国内外学者研究的重要内容之一^[4]。镁合金的流变行为是非常复杂的, 对镁合金流变应力的研究需要建立精确的本构方程以及流变应力模型。其中, Arrhenius 双曲线本构模型是较为常用的^[5], 可以清楚地展现应变速率和变形温度对流变应力的影响。王健等^[6]对 AZ81-1Y 镁合金进行热压缩实验, 通过真应力-真应变曲线得到该合金的双曲正弦本构方程, 算出峰值流变应力与实验值有较好的吻合性。陈宝东等^[7]对 Mg-Zn-Zr-Y 进行高温压缩变形实验, 得出本构模型计算出的流变应力峰值与实际值的吻合程度取

决于热变形条件的取值范围, 对于描述高变形温度 and 低应变速率下的稳态塑性变形行为表现出较好的适用性。孙朝阳等^[8]研究了 AZ31 镁合金的热压缩流变应力变化, 建立了基于双曲正弦模型的峰值流变应力和统一本构关系, 预测值与实测值的相关系数为 0.976, 平均相对误差为 5.07%。由此可见, 基于峰值应力构建的本构方程在预测应力时的准确性是比较被认可的。

适当添加稀土元素可以改善镁合金的力学性能, 特别是高温强度和抗蠕变性能等。其中, 轻稀土元素 Sm 的原子尺寸与镁接近, 并且在镁中的最大固溶度(5.8%, 质量分数, 下同)比 Nd(3.6%)还高, Sm 的加入可以显著改善镁合金的室温和高温

收稿日期: 2023-05-07

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(222102230112)

作者简介: 李 萍(1978-), 女, 河南洛阳人, 硕士, 副教授, 主要从事材料学与材料力学相关研究, E-mail: eappol@163.com

* 通信作者: 张 清, 教授, E-mail: foxzq@126.com

DOI: 10.3724/S1004-0277.202501006

强度^[9]。同时,重稀土元素 Gd 也是当下合金化元素的研究热点,Gd 元素能与 Mg 生成 Mg_5Gd 、 Mg_3Gd 、 Mg_2Gd 、 $MgGd$ 等稳定的第二相,产生优异的固溶和时效强化效应。有研究^[10]发现将这两种不同组的稀土元素共同加入到镁合金中,固溶度可以互相降低,从而增加析出相的种类,获得更优良的综合力学性能。但是,关于 Mg-Sm-Gd 系合金的研究大多数都是针对其组织及力学性能^[11,12],在本构方程及热加工图方面很少看到关于该合金的研究。本文以 Mg-5Sm-3Gd 镁合金作为研究对象,对该合金的流变应力进行分析,基于峰值应力构建本构方程并验证,同时借助热加工图了解该合金适宜的加工区域。

1 实验部分

该实验研究对象为 Mg-5Sm-3Gd 镁合金,熔炼时采用纯镁锭以及 Mg-30Gd、Mg-30Sm(纯度大于等于 99.5%)中间合金作为原料。将按准备好的原料置于氧化铝坩埚中于中频感应加热炉内熔炼,加入保护气体(1% SF_6 + 99% CO_2 的混合气体)防止熔炼过程中出现高温氧化。熔炼温度控制在 750 °C,等待原料熔化后搅拌均匀,然后等温度降到 730 °C,保温 5 min,熔化的合金液需倒进提前准备好的金属模具中,等待其凝固后再从模具中取出,冷却后锯成试块。对铸态合金试块进行固溶处理,将镁合金试块置于箱式电阻炉内,经 520 °C、8 h 的保温,之后用约 70 °C 热水进行淬火。

固溶处理后,通过线切割获得能进行热压缩的小圆柱试样(尺寸为直径 10 mm,高为 15 mm),在 Gleeble-1500 热模拟试验机上对固溶态试样进行热压缩实验。实验温度从 350 °C 开始,以 50 °C 的梯度逐渐递增至 500 °C,应变速率为 $0.01\text{ s}^{-1} \sim 1\text{ s}^{-1}$ (以 10 倍变量递增),最大变形量为 70%。热压缩后进行流变应力分析,基于峰值建立本构方程并构建合金的热加工图。

2 结果与分析

2.1 热压缩流变应力分析

图 1 为 Mg-5Sm-3Gd 合金的热压缩流变应力曲线,如图 1 所示,不同条件下的曲线都表现出合金在压缩过程中有动态再结晶发生,即在初始变形时,加工硬化作用占据主导并使得流变应力迅速增大,最大值时的加工硬化作用与再结晶的软化效果首次相持平,随着变形继续,动态再结晶的软化作用影响加大,流变应力开始出现下降趋势,最后趋于平缓。从图 1a 中可以发现,变形温度从 350 °C 上升至 500 °C 时,流变应力的峰值所对应的应变变量越来越小(应变变量从 0.18 到 0.003),峰值应力也随着温度升高逐渐下降,从 156.81 MPa 降至 36.48 MPa,这种变化趋势在其他的应变速率下也是一样,这是由于在加工硬化阶段位错数量快速增加,并且相互发生缠绕,使得变形不易进行,因此流变应力在此时会快速增大;随着变形的增加,能驱动动态回复和动态再结晶发生的能量更加充足,变形温度越高,动态再结晶发生地越早。当流变应力达到最大值的时候,这时的动态再结晶的软化作用和加工硬化影响不相上下。峰值过后,流变应力曲线的斜率逐渐减小,最后趋于平缓,此阶段的动态再结晶一直发挥主要作用。温度越高,应变速率越小,流变应力的峰值越小,这说明升高温度或者降低应变速率有利于动态再结晶的发生。

2.2 本构方程的建立

建立本构方程,可以进一步探讨材料在不同变形温度和应变速率下流变应力的变化行为,可用式(1)来表达:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left[\frac{-Q}{RT}\right] \quad (1)$$

式中, σ 表示流变应力,单位 MPa; A 、 α 、 n 均是特定常数; T 表示热力学温度,单位为 K; Q 表示变形激活能,单位为 kJ/mol; R 表示气体常数, $R = 8.314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

指数关系被用于表示低应力状态:

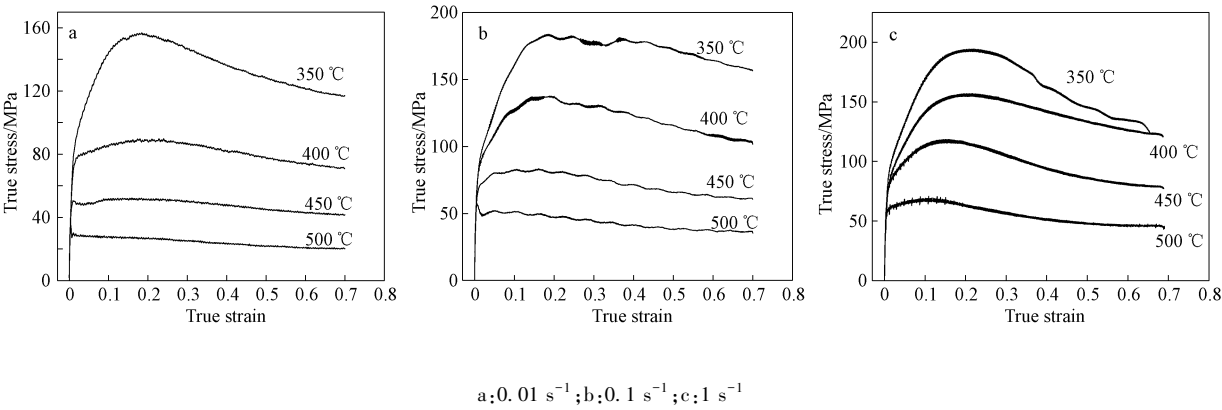


图 1 不同应变速率 Mg-5Sm-3Gd 合金热压缩流变应力曲线

Fig. 1 Thermal compression flow stress curves of Mg-5Sm-3Gd alloy under different strain rates

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left[\frac{-Q}{RT}\right] \quad (2)$$

幂函数关系被用于表示高应力状态:

$$\dot{\varepsilon} = A_2 [\exp(\beta\sigma)] \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (3)$$

对式(1)至式(3)取自然对数,然后分别对 $\ln \dot{\varepsilon}$ 或者 $1/T$ 求偏导得:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial(\ln \dot{\varepsilon})}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_T \quad (4)$$

$$\frac{1}{n_1} = \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\varepsilon})} \Big|_T \quad (5)$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\partial \sigma}{\partial(\ln \dot{\varepsilon})} \Big|_T \quad (6)$$

结合式(5)和式(6)以及实验时的变形温度、应

变速率和峰值应力即可求出 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 以及 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 的拟合曲线,如图 2 所示,拟合出的斜率平均值即为 n_1 和 β 的值,因此 $\alpha = \frac{\beta}{n_1} = 0.0117$ 。

根据所求得 α 值同理对 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 进行线性拟合,如图 3 所示,将拟合结果代入到式(4)得出变形激活能 $Q = 296.595 \text{ kJ/mol}$ 。

为了求出本构方程中的常数 n 和 A ,可以引入参数 Z ,如式(7)所示:

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

对式(7)取对数得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (8)$$

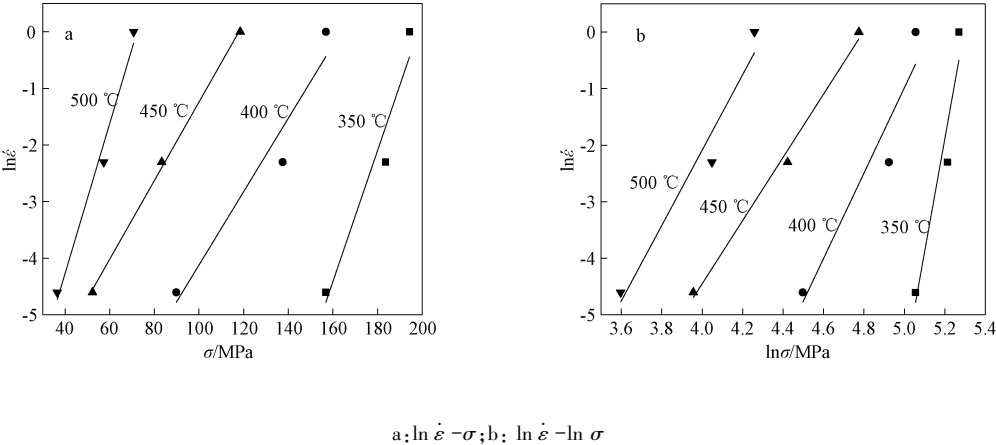


图 2 应变速率与流变应力之间的线性拟合关系

Fig. 2 Linear fitting relationships between strain rate and flow stress

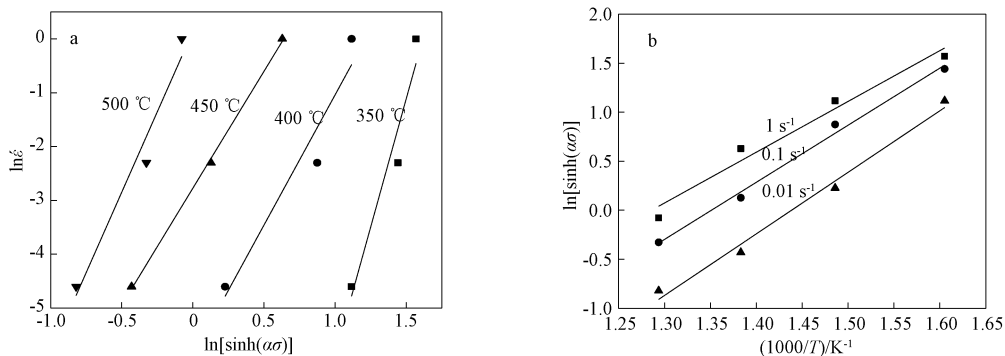


图 3 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (a) 及 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ (b) 之间的拟合曲线
Fig.3 Fitting curves of $\ln \dot{\epsilon}$ with $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (a) and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ with $1000/T$ (b)

根据式(8)可以对 $\ln Z - [\ln \sinh(\alpha\sigma)]$ 进行线性拟合,如图 4 所示,图中直线斜率即为应力指数 $n=5.9810$,在 $\ln Z$ 轴的截距是 $\ln A=46.2744$,即 $A=1.2494 \times 10^{20}$ 。图 4 的拟合相关系数为 0.992。将各个数据整合后得到本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 1.2494 \times 10^{20} [\sinh(0.0117\sigma)]^{5.9810} \exp\left(\frac{-296595}{RT}\right) \quad (9)$$

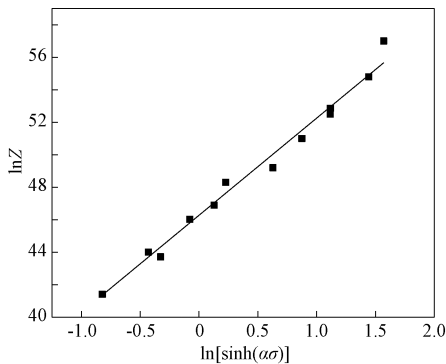


图 4 $\ln Z$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig.4 The relationship between $\ln Z$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

2.3 本构方程的验证

根据式(1)和式(7),将流动应力 σ 表示为含常数 Z 的函数:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (10)$$

将所得参数代入到式(10)中得:

$$\sigma = 85.4701 \ln \left\{ \left(\frac{Z}{1.2494 \times 10^{20}} \right)^{\frac{1}{5.981}} + \left[\left(\frac{Z}{1.2494 \times 10^{20}} \right)^{\frac{2}{5.981}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (11)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{296.595 \times 10^3}{RT} \right) \quad (12)$$

将对应各个峰值应力的应变速率和变形温度参数代入到式(11)计算出对应的应力值,如表 1 所示,可以看出峰值应力预测值与实验值二者的相对误差以及平均相对误差之间的关系,其中,平均相对误差在 1.88%以内,可证明该方程预测的准确性。

2.4 合金热加工图构建

动态材料模型(Dynamic material model, DMM)不仅可以描述一定区域中某种确定微观组织的变形机制,还可以描绘在加工过程中应避免的失稳区域,从而预估不同材料的加工可能性,获得比较适合的加工区间^[13],是一种比较常见的金属加工和优化的工具。目前研究人员已在此做了大量研究^[14~16]。DMM 加工图是功率耗散率和失稳图的叠加^[17],式(13)和式(14)可以分别确定功率耗散率等值曲线和流变失稳范围。

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

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

式中, η 为该合金在变形过程中的能量耗散率; J 为功率耗散协量; ξ 为流变失稳系数; m 为应变速率敏感性指数, 即 $m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}}$ 。

根据式 (13) 和式 (14) 代入相应的数据制作该合金的热加工图, 如图 5 所示, 图 5a、图 5b 和图 5c 分别对应应变变量 0.2、0.4 和 0.6, 从图中可以看出, 不同程度的轮廓线对应不同的数字 (代表合金的能量耗散率 η), 数值越大越有利于加工, 对于镁合金来说, 能量耗散率在 20% 至 30% 之间时合金发生动态回复, 大于 30% 时发生动态再结晶, 所以镁合金应选择 η 高于 30% 的区域进行加工处理。图中灰色区域则是由 ξ 确定, 作图时将 $\xi \leq 0$ 的区间定义为灰色失稳区, 即在变形过程中受变形温度及速率影响而导致的失稳区间, 加工时应避免在此类区域内。

表 1 实验值与预测值的对比误差

Table 1 Comparison error between experimental and predicted values					
Temperature/ ℃	Strain rate/ s ⁻¹	Experimental value/ MPa	Predicted value/ MPa	Relative error/ %	Average relative error/%
350	0.01	194.33	214.46	10.36	1.88
	0.1	183.63	182.20	-0.78	
	1	156.81	150.64	-3.94	
400	0.01	156.89	155.55	-0.86	-0.68
	0.1	137.49	125.07	-9.03	
	1	89.79	96.83	7.84	
450	0.01	118.51	108.13	-8.76	1.14
	0.1	83.31	81.78	-1.84	
	1	52.26	59.59	14.03	
500	0.01	70.71	72.76	2.89	-1.65
	0.1	57.29	52.37	-8.59	
	1	36.48	36.76	0.76	

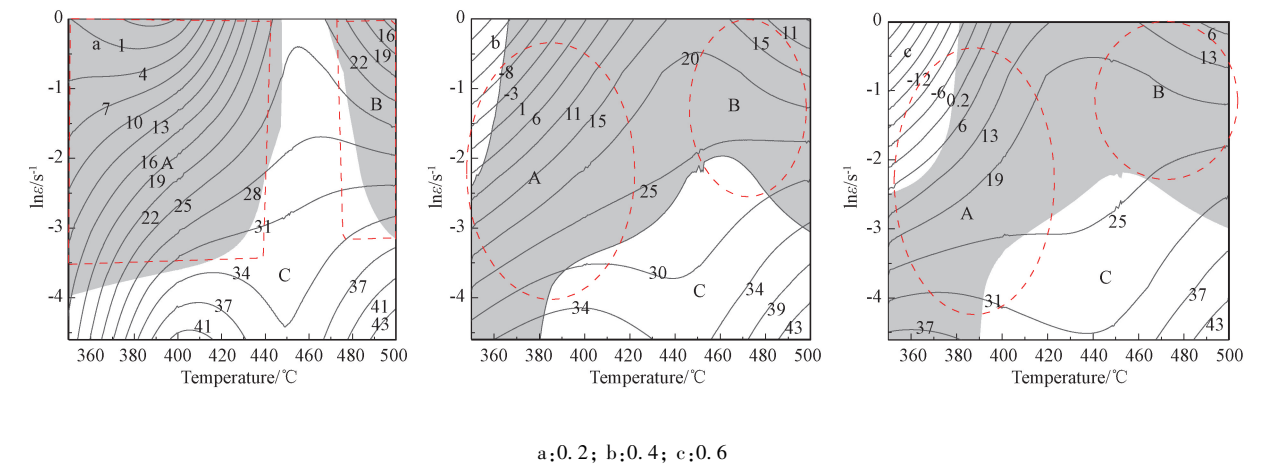


图 5 Mg-5Sm-3Gd 合金在不同应变下的热加工图

Fig. 5 Thermal processing maps of Mg-5Sm-3Gd alloy at different strains

从图 5 可以看出, 该合金的灰色失稳区间主要集中在 A 区和 B 区, 图 5a 中 A 区对应了 $T=350\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 430\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.03\text{ s}^{-1} \sim 1\text{ s}^{-1}$, B 区对应了 $T=470\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.04\text{ s}^{-1} \sim 1\text{ s}^{-1}$; 同理, 图 5b 中 A 区: $T_1=350\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 390\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1} \sim 0.03\text{ s}^{-1}$ 和 $T_2=350\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 440\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.03\text{ s}^{-1} \sim 1\text{ s}^{-1}$, B 区对应了 $T=450\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.05\text{ s}^{-1} \sim 1\text{ s}^{-1}$; 图 5c 中 A 区: $T_1=350\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 390\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1} \sim 0.08\text{ s}^{-1}$ 和 $T_2=$

$380\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 440\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.08\text{ s}^{-1} \sim 1\text{ s}^{-1}$, B 区对应了 $T=420\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.07\text{ s}^{-1} \sim 1\text{ s}^{-1}$ 。其中, A 区显微组织如图 6a 所示, 由于此区域变形温度较低, 动态再结晶难以形成, 且稀土镁合金塑性较差, 由于应力集中可能会出现裂纹或者发生局部流变而失稳; B 区域的变形温度较高, 应变速率较快, 材料只在变形能量较高处发生动态再结晶, 且晶界处的再结晶晶粒极小, 由于速率高, 没有足够的时间长大,

因而可能发生失稳现象,其显微组织如图 6b 所示,再结晶区域呈“项链”状分布。同时从图 5 中可以发现,随着变形的进行 A 区域有减小趋势,这种变

化可能是由于变形程度的不断加大,使得动态再结晶的软化作用逐渐凸显,应力开始减小,降低了失稳发生的可能。

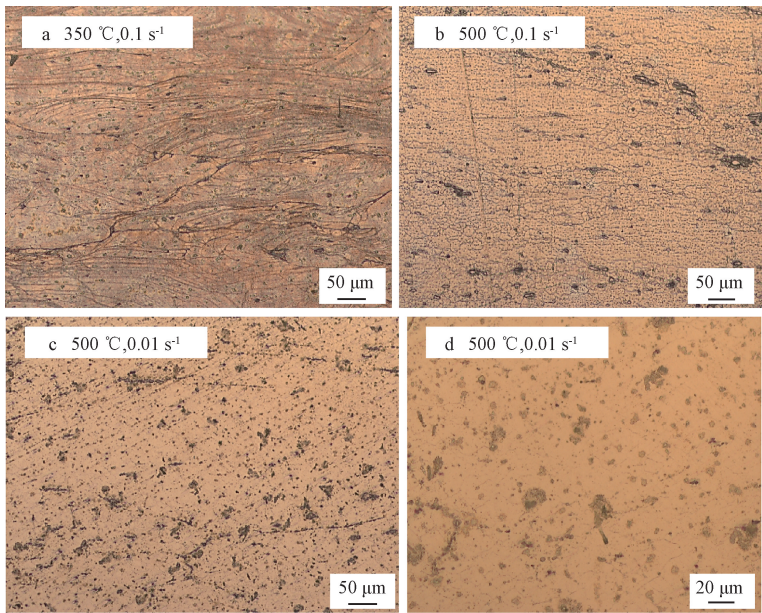


图 6 Mg-5Sm-3Gd 合金在不同变形条件下的金相组织

Fig. 6 Metallographic microstructure of Mg-5Sm-3Gd alloy under different deformation conditions

当变形工艺在 C 区时,材料适合进行热加工,能够发生动态再结晶,最优加工区域 $T=440\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ s}^{-1}\sim 0.05\text{ s}^{-1}$,该条件下的金相组织图对应图 6c 和图 6d,该区域属于高温低应变速率,相对而言更利于动态再结晶的发生,从图 6d 可看出原始晶界几乎已被新生成的晶粒覆盖。

3 结论

- 1. 固溶态 Mg-5Sm-3Gd 镁合金在变形温度为 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为 $0.01\text{ s}^{-1}\sim 1\text{ s}^{-1}$ 条件下的真应力-真应变曲线显示,降低变形温度或者增大应变速率会使合金的流变应力和峰值应力增大。
- 2. 基于峰值应力构建了 Mg-5Sm-3Gd 镁合金的热压缩本构方程,经实验对比验证,该方程预测的流变应力值与实测值的平均相对误差在 1.88% 以内,相关系数为 0.99,能比较准确地描述该镁合金的流变应力变化行为。

- 3. 构建 Mg-5Sm-3Gd 合金在应变分别为 0.2、0.4 和 0.6 的 DMM 加工图,结合加工图和显微组织分析得出,合金的主要失稳区为 A 区和 B 区。A 区: $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\varepsilon}=0.02\text{ s}^{-1}\sim 1\text{ s}^{-1}$; B 区: $T=460\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\varepsilon}=0.05\text{ s}^{-1}\sim 1\text{ s}^{-1}$;最适宜的热加工区为: $T=440\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ s}^{-1}\sim 0.05\text{ s}^{-1}$ 。

参考文献:

[1] 曾小勤, 陈义文, 王静雅, 等. 高性能稀土镁合金研究新进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 2963-2975.
Zeng X Q, Chen Y W, Wang J Y, et al. Research progress of high-performance rare earth magnesium alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 2963-2975.

[2] 朱艳春, 马立峰, 黄志权, 等. 加工参数对铸态 AZ31B 镁合金热变形行为及组织演变的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(1): 263-268.

- Zhu Y C, Ma L F, Huang Z Q, et al. Effects of processing parameters on hot deformation behavior and microstructure evolution of as-cast AZ31B magnesium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(1): 263-268.
- [3] 姜炳春, 卢立伟, 文泽军, 等. LZ92 镁锂合金流变应力预测模型[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(9): 147-154.
- Jiang B C, Lu L W, Wen Z J, et al. Flow stress prediction model of LZ92 magnesium lithium alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(9): 147-154.
- [4] 周洁, 吴任东, 袁朝龙, 等. 不同工艺状态下 AZ31B 镁合金热压缩变形行为[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(5): 1793-1798.
- Zhou J, Wu R D, Yuan C L, et al. Deformation behavior of AZ31B magnesium alloys with different process states under thermal compression[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(5): 1793-1798.
- [5] 朱艳春, 石晓辉, 曾卫东, 等. 轻合金热变形本构模型研究[J]. *轻金属*, 2017, (5): 47-55.
- Zhu Y C, Shi X H, Zeng W D, et al. Research on the constitutive model during hot deformation of light alloys[J]. *Light Metals*, 2017, (5): 47-55.
- [6] 王健, 李全安, 陈晓亚, 等. AZ81-1Y 镁合金热加工行为和本构方程构建[J]. *材料热处理学报*, 2022, 43(2): 143-151.
- Wang J, Li Q A, Chen X Y, et al. Hot working behavior and constitutive equation construction of AZ81-1Y magnesium alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2022, 43(2): 143-151.
- [7] 陈宝东, 郭锋, 温静, 等. Mg-Zn-Zr-Y 合金高温塑性变形本构模型及流变行为预测[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(11): 3305-3310.
- Chen B D, Guo F, Wen J, et al. Constitutive model of hot plastic deformation and flow behavior prediction of Mg-Zn-Zr-Y alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(11): 3305-3310.
- [8] 孙朝阳, 栾京东, 刘赟, 等. AZ31 镁合金热变形流动应力预测模型[J]. *金属学报*, 2012, 48(7): 853-860.
- Sun Z Y, Luan J D, Liu G, et al. Predicted constitutive modeling of hot deformation for AZ31 magnesium alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 48(7): 853-860.
- [9] 付三玲, 李全安, 张清, 等. 含 Sm 耐热镁合金的研究进展[J]. *铸造技术*, 2015, 36(11): 2615-2618.
- Fu S L, Li Q A, Zhang Q, et al. Research status on heat-resistant magnesium alloys containing samarium[J]. *Foundry Technology*, 2015, 36(11): 2615-2618.
- [10] 张清, 王莹, 李萍. Mg-5Y-3Sm 合金的组织与性能稳定性研究[J]. *铸造技术*, 2018, 39(7): 1401-1403.
- Zhang Q, Wang Y, Li P. Study on microstructure and mechanical properties stability of Mg-5Y-3Sm alloy[J]. *Foundry Technology*, 2018, 39(7): 1401-1403.
- [11] 秦成, 车朝杰, 程丽任, 等. 铸态 Mg-Sm-Gd-Zn-Zr 合金微观组织与力学性能研究[J]. *中国稀土学报*, 2021, 39(3): 523-530.
- Qin C, Che C J, Cheng L R, et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Sm-Gd-Zn-Zr alloy[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2021, 39(3): 523-530.
- [12] 朱利敏, 李全安, 周耀, 等. Sm 对 Mg-10Gd-0.5Zr 合金组织及力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(1): 171-176.
- Zhu L M, Li Q A, Zhou Y, et al. Effect of Sm on microstructures and mechanical properties of Mg-10Gd-0.5Zr alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(1): 171-176.
- [13] 李庆波, 周海涛, 蒋永峰, 等. 加工图的理论研究现状与展望[J]. *有色冶金设计与研究*, 2009, 30(4): 1-6.
- Li Q B, Zhou H T, Jiang Y F, et al. Research status quo and prospect of the theory of shop drawing[J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 2009, 30(4): 1-6.
- [14] Wang J, Shi B L, Yang Y S. Hot compression behavior and processing map of cast Mg-4Al-2Sn-Y-Nd alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(3): 626-631.

[15] Ma J F, Wang S H, Yang J L, et al. Hot deformation behavior, processing maps and microstructural evolution of the Mg-2.5Nd-0.5Zn-0.5Zr alloy [J]. Materials, 2022, 15(5) : 1745.

[16] Najafi S, Sheikhani A, Palizdar Y, et al. Processing maps and hot compression behaviors of ZK60 alloy after adding different rare earth elements[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32 (5) : 2249-2263.

[17] 彭建, 童小山, 尚守亮, 等. Mg-6Zn-1Mn 镁合金的热压缩变形行为及加工图[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(8) : 1627-1631.

Peng J, Tong X S, Shang S L, et al. Hot compression deformation behaviour and processing map of Mg-6Zn-1Mn magnesium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(8) : 1627-1631.

Flow Stress Prediction Model and Thermal Processing Map of
Mg-5Sm-3Gd Magnesium Alloy

LI Ping¹, CUI Yang¹, WANG Ying¹, ZHAO Jie², ZHANG Qing^{2*}

(1. School of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: The flow stress curves of Mg-5Sm-3Gd solid solution treated magnesium alloy were obtained by using a Gleeble-1500 thermal simulator. A constitutive equation of the alloy was established and verified by using peak stress method, and the thermal processing map was analyzed for the most suitable working area. The results show that the flow stress increases with decrease of deformation temperature (from 500 ℃ to 350 ℃) or increase of strain rate (from 0.01 s⁻¹ to 1 s⁻¹). Experimental comparisons and validations have confirmed that the rheological stress predicted by this equation demonstrates high accuracy, with an average relative error within 1.88% and a correlation coefficient of 0.99. The alloy exhibits an energy dissipation efficiency exceeding 30% and no flow instability within the temperature range of 440 ℃ to 500 ℃ and strain rate range of 0.01 s⁻¹ to 0.05 s⁻¹, indicating its suitability for thermal processing.

Key words: Mg-5Sm-3Gd magnesium alloy; hot compression; flow stress; constitutive equation; thermal processing map