文章编号: 1004-0609(2013)08-2069-08

ZM21 及 ZM61 合金的热变形行为与动态再结晶 临界条件的表征

童小山¹, 彭 建^{1,2}, 石大伟¹, 潘复生^{1,2}, 彭 毅¹

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400044;2. 国家镁合金材料工程技术研究中心,重庆 400045)

摘 要:采用 Gleeble-1500 热/力模拟试验机进行压缩实验,研究 Mg-2Zn-1Mn (ZM21)与 Mg-6Zn-1Mn (ZM61)合 金在变形温度 523~723 K、应变速率 0.01~10 s⁻¹范围内的流变应力行为,并以热压缩实验为基础,建立两种合金 的动态模型加工图,引入材料加工硬化率 θ,结合 θ—σ 曲线拐点判据识别合金发生动态再结晶的临界应变 ε_c。结 果表明,ZM21 与 ZM61 合金在热压缩过程中发生明显的动态回复与动态再结晶;随着 Zn 含量的增加,ZM61 合 金的变形激活能比 ZM21 合金的升高约 20%,并且 ZM61 合金在高温变形时更容易出现失衡;两者发生动态再结 晶的临界应变 ε_c均随着应变速率的增加而升高,随变形温度的升高而降低。 **关键词:** 镁合金;热压缩;动态再结晶;临界应变

中图分类号: TG 146.2 文献标志码: A

Thermal compression behavior and characterization of dynamic recrystallization critical conditions for ZM21 and ZM61 magnesium alloys

TONG Xiao-shan¹, PENG Jian^{1, 2}, SHI Da-wei¹, PAN Fu-sheng^{1, 2}, PENG Yi¹

College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
 National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing 400045, China)

Abstract: The thermal compression behavior of Mg-2Zn-1Mn (ZM21) and Mg-6Zn-1Mn (ZM61) magnesium alloys was investigated by uniaxial compression tests on Gleeble–1500 thermal simulation test machine at the temperature ranging from 523 K to 723 K and strain rate ranging from 0.01 s⁻¹ to 10 s⁻¹. According to the experimental results, the hot processing maps based on the dynamic materials modeling were drawn. The critical strain ε_c that the dynamical recrystallization occurs was identified by introducing the hard working rate θ and inflection point of $\theta - \sigma$ curves under different deformation. The results show that the dynamic recovery and dynamic recrystallization occur obviously during hot compression of ZM21and ZM61 alloys. Compared with ZM21 alloy, the deformation activation energy of ZM61 alloy increases by 20% because of the increase of Zn content, and the ZM61 alloy is more unstable than ZM21 alloy. The critical strain ε_c of both alloys increases with the increase of strain rate and decreases with the increase of deformation temperature.

Key words: magnesium alloy; thermal compression; dynamic recrystallization; critical strain

镁晶体结构的特殊性,导致镁合金室温塑性及成 形性较差,极大地限制了镁合金尤其是变形镁合金在 工业上的应用。而热机械加工(Thermo mechanical processing, TMP)是改善镁合金加工性的有效方法^[1]。

基金项目:国家"十二五"科技支撑计划(2011BAE22B03-3);重庆市科委资助项目(CTSC2010AA4045, 2010CSTC-HDLS, CSTS2010BB4068) 收稿日期: 2012-06-20;修订日期: 2012-09-14

通信作者: 彭 建, 教授, 博士; 电话: 023-65112291; E-mail: jpeng@cqu.edu.cn

对于镁及镁合金,扩展位错较宽难以束集,位错的滑移 和攀移困难,从而动态回复速度很慢,亚组织中位错密 度较高,剩余的储能足以引起再结晶^[2],因此,动态再 结晶成为改善镁合金塑性及细化组织的途径之一。

Mg-Zn-Mn 合金作为一种新型的低成本变形镁合 金,应用前景十分广泛。Mg-2Zn-1Mn(ZM21)合金由 于合金化程度低,具有较好的热加工成形性能。根据 文献[3],ZM21 合金采用静液挤压实现了每分钟超过 120 m。但是 ZM21 合金制品室温力学性能不高。因 此,在 ZM21 合金基础上增加 Zn 含量使得合金制品 的力学性能得以提高。张丁非等^[4]研究发现 Zn 含量为 6%(质量分数)时,合金的力学性能达到最佳。另有研 究表明,Mg-6Zn-1Mn(ZM61)合金经时效处理后,其 变形强度能够达到 ZK60 的水平^[5]。但是,Zn 的加入 一方面使得合金热裂倾向增加,另一方面使得镁的扩 展位错变宽难以发生集束,非基面滑移更困难,发生 动态再结晶倾向增大^[6],因此有必要明确 Zn 元素对镁 合金热变形规律的影响。

目前,关于 Mg-Zn-Mn 合金热成形方面的研究很 少, 而关于 Zn 对镁合金高温变形时流变行为和动态 再结晶的影响规律研究更少见报道。张丁非等[7]仅研 究了 ZM61 合金在 573~663 K、0.001~0.1 s⁻¹ 变形条件 下的热变形行为,发现 ZM61 镁合金的热流变行为可 用包含 Arrhenius 项的 Zener-Hollomon 参数来描述。 近年来,基于热压缩模拟研究,国内外也开始把加工 图作为一种便捷的途径来确定镁合金的热加工工艺制 度^[8]。SIVAKESAVAM 等^[9]应用动态材料模型(DMM) 绘制出 ZM21 合金的加工图,图中出现一个功率耗散 的峰值:温度 450 ℃、应变速率 0.01 s⁻¹ 时,耗散效率 达到最大值 33%,为 Mg-2Zn-1Mn 合金进行热加工的 最佳变形工艺。但是已有文献对 ZM61 合金 DMM 加 工图研究未见报道, 更未涉及 Zn 含量的添加对两种 合金在热变形条件下塑性变形参数作比较。因此,本 文作者以具有高塑性的 ZM21 合金和高强度的 ZM61 合金作为研究对象,补充 Mg-Zn-Mn 系合金在其他文 献中没有包含的变形温度和应变速率下的热变形行 为,通过本构方程、材料加工硬化率 θ ,判据识别合 金发生动态再结晶的临界应变 ε_{c} 等方法完善ZM21和 ZM61 合金的动态加工图,以期为制定合理的热加工 工艺提供指导。

1 实验

成分见表 1,其中 Mn 以 Mg-Mn 中间合金的形式加入, Zn 以纯金属的方式加入,采用电阻炉熔炼,熔剂保护, 金属模浇注成 *d* 90 mm 铸锭。铸锭经 400 ℃、10 h 均 匀化处理后,机械加工成尺寸为 *d* 10 mm×12 mm 的 圆柱形压缩试样。为减小压缩时试样两端面的摩擦力, 在压缩试样两端开浅凹槽,以便加入含石墨的固体润 滑剂。变形温度为 523~723 K,应变速率为 0.01、0.10、 1.0 和 10 s⁻¹,预设最大变形程度为 60%。压缩前升温 速度为 10 K/s,保温 3 min,变形结束后立即水淬,以 保留其高温变形组织。

表1 Mg-Zn-Mn 镁合金的化学成分

Table 1	Chemical	compositions	of Mg-Zn-Mn	alloy
---------	----------	--------------	-------------	-------

Allow	Mass fraction/%				
Alloy	Zn	Mn	Others	Mg	
Mg-2Zn-1Mn	2.02	0.94	< 0.05	Bal.	
Mg-6Zn-1Mn	5.31	0.72	< 0.05	Bal.	

2 结果与讨论

2.1 合金的真应力—真应变曲线

图 1 所示为 ZM21 及 ZM61 合金在应变速率为 1.0 s⁻¹、不同变形温度下的真应力—真应变曲线。由图 1 可以看出,两种合金真应力—真应变曲线呈现动态再 结晶的特征,即存在明显的峰值或者稳态流变现象; 合金的峰值应力和稳态应力随着变形温度的升高或应 变速率的降低而显著降低,说明 Mg-Zn-Mn 合金属于 热敏感型和应变速率敏感型材料。

从图 1 还可以看出,相对于 ZM21 合金,ZM61 合金的峰值流变应力较高,且在相同变形温度(如 *T*=623 K)下,合金的真应力一真应变曲线的锯齿状尖 波动现象增强。这可能是由于 Zn 的增加导致镁的扩 展位错变宽难以发生集束,非基面滑移更困难,使 ZM61 合金发生动态再结晶倾向增大;另一方面可能 是动态再结晶引起的软化与已再结晶晶粒的变形和重 新硬化交替进行,流变曲线出现周期性类似锯齿状的 流变特征。

2.2 Mg-Zn-Mn 合金高温塑性变形过程中变形参数 及本构方程的确定

热加工变形是一个类似于高温蠕变的受位借运动 速率控制的热激活过程,对不同热加工条件下的数据 分析表明,合金的流变应力、应变速率和变形温度之



图 1 Mg-Zn-Mn 合金在应变速率为 1.0 s⁻¹、不同变形温度 下的真应力—真应变曲线

Fig. 1 True stress—strain curves of Mg-Zn-Mn alloys at strain rate of 1.0 s^{-1} and different deformation temperatures: (a) Mg-2Zn-1Mn; (b) Mg-6Zn-1Mn

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(\frac{-Q}{RT}) \tag{1}$$

在高应力水平条件下(ασ>1.2):

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(\frac{-Q}{RT})$$
⁽²⁾

在所有应力条件下:

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

式中: A_1 、 A_2 、A、 n_1 、n、 α 均为材料常数; R 为摩 尔气体常数, 8.314 J/(mol·K); T为热力学温度; Q为 变形激活能,是材料发生塑性变形时,金属原子发生 剧烈的热运动需要跨越的一个能量"门槛值",是表征 材料热变形的重要参数。利用 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 关系式,采用最小二乘法回归求出 n 和 β 值,则

 $\alpha = \beta / n$ 。根据实验结果得出 ZM21 合金和 ZM61 合金 α 值分别为 α_1 =0.016 58, α_2 =0.011 92。

当应变速率为常数时,假定变形激活能*Q*在很小的温度范围内保持不变,根据式(3)可计算变形激活能如下:

$$Q = R \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha \sigma)]} \bigg|_{T} \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)} \bigg|_{\dot{\varepsilon}}$$
(4)

因此,根据 ln $\dot{\varepsilon}$ — ln[sinh($\alpha\sigma$)] 与 ln[sinh($\alpha\sigma$)] — 1/T 的关系(见图 2),由式(4)分别得到 ZM21 和 ZM61 合金在高温下热变形的激活能 Q_1 =166.19 kJ/mol, Q_2 =198.20 kJ/mol。与 ZM21 合金相比,ZM61 合金的 变形激活能较高,增大约 20%。这是由于 Zn 原子的 加入会降低镁合金的层错能,进一步使扩展位错宽 化,动态再结晶倾向增加。另外,Zn 原子的增加会与 基体形成更多 Mg-Zn 等第二相粒子^[7],在高温塑性变 形过程中会阻碍位错的运动。这些都使得位借的交滑 移和攀移困难,更容易发生孪生变形,且孪晶处容易 发生再结晶形核^[11]。动态再结晶的形成和长大会消耗 大量的位错,从而潜在位错源数量减少且启动更为困 难,这将导致 ZM61 合金的变形激活能增大。

通过引入Zener-Hollomon参数来描述变形速率与变形温度对变形的影响^[12]:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A \sinh(\alpha \sigma)^n \tag{5}$$

对式(5)两边取对数,得到如下线性关系:

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

由式(6)对 ln Z — ln[sinh($\alpha\sigma$)] 作线性回归,得到 ZM21 和 ZM61 合金应力指数分别为 n_1 =6.868 2, n_2 =5.840 6,见图 3,其截距分别为 ln A_1 =28.099 4, ln A_2 =36.892 4,则 A_1 =1.597 4×10¹², A_2 =1.052 3×10¹⁶。

根据双曲正弦函数的定义以及式(5),可将流变应 力*σ*表示为

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

将上述求得的 Q 值代入式(5),可得到 Mg-Zn-Mn 合金 Z 参数表示式(Z₁ 为 ZM21 合金, Z₂ 为 ZM61 合金):

$$Z_1 = \dot{\varepsilon} \exp(\frac{166.19 \times 10^3}{RT}) \tag{8}$$

$$Z_2 = \dot{\varepsilon} \exp(\frac{198.20 \times 10^3}{RT}) \tag{9}$$



Fig. 2 Relationship between strain rate and peak stress of alloys during high temperature plastic deformation: (a) $\ln \dot{\varepsilon} = \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ of ZM21; (b) $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = 1/T$ of ZM21; (c) $\ln \dot{\varepsilon} = \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ of ZM61; (d) $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = 1/T$ of ZM61



图 3 Mg-Zn-Mn 合金热变形时 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系 Fig. 3 Relationship between $\ln Z$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ of Mg-Zn-Mn alloys

将求得的 α 、n和 A值代入式(7)中,可得到 Mg-Zn-Mn 合金用 Z参数表示的峰值应力 σ 、变形温 度T和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的本构方程(σ_1 为 ZM21 合金的, σ_2 为 ZM61 合金的): $\sigma_{1} = \frac{1}{0.01658} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{1.5974 \times 10^{12}} \right)^{\frac{1}{6.8682}} + \left[\left(\frac{Z}{1.05974 \times 10^{12}} \right)^{\frac{2}{6.8682}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$ (10) $\sigma_{2} = \frac{1}{0.01192} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{1.0523 \times 10^{16}} \right)^{\frac{1}{5.8406}} + \left[\left(\frac{Z}{1.0523 \times 10^{16}} \right)^{\frac{2}{5.8406}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$ (11)

2.3 Mg-Zn-Mn 合金动态 DMM 加工图 PARASAD 等^[13]基于动态材料模型(DMM)提出的

第23卷第8期

加工图理论,将热成形工艺与成形性能有机的结合在 一起,能清晰准确地反映金属在热变形过程中应变速 率、变形温度与金属的成形性能之间的关系,已经在 镁及其合金早期的研究中得到了验证,对优化材料的 热加工工艺参数、改善材料的加工性、控制组织及避 免缺陷的产生具有重要指导作用^[14-15]。

应变为 0.6 时 ZM21 与 ZM61 合金的 DMM 加工 图如图 4 所示。图 4 中,等值线是能量耗散率 η 值, 阴影区域对应合金变形过程中的流变失衡区。从图 4 可以看出,温度范围在 693~723 K、应变速率为 0.01~0.1 s⁻¹范围内,能量耗散率均大于 30%,且温度 723 K、应变速率 0.01 s⁻¹时,耗散效率达到最大值为 32%,此区域为 ZM21 合金适合热加工成形区域。而 在温度为 723 K、应变速率在 1~3.2 s⁻¹区域内,合金 发生流失稳,所以避免在这个区域内进行热加工。对 于 ZM61 合金,在高温变形时存在 2 个非稳定区域, 第一个区域是在 523~553 K、0.018~0.316 s⁻¹变形区域 内,第二个区域是 683~723 K、0.398 s⁻¹。此外,温度

范围在 623~698 K、应变速率为 0.01~0.365 s⁻¹ 范围



图 4 应变为 0.6 时合金的热加工图

Fig. 4 Processing maps of alloy at ε =0.6: (a) ZM21; (b) ZM61

内,能量耗散率均大于 30%,此区域为 ZM61 合金适合热加工成形区域。

相比于 ZM21 合金, ZM61 合金在高温变形时出 现失衡区域增大。在低温、低应变速率条件下,合金 晶界不均匀变形容易出现"项链"状组织而出现局部 流变失衡^[16]。由图 5(a)所示为 ZM21 合金在 250 ℃、 0.1 s⁻¹ 变形条件下的显微组织。合金大部分区域发生 了动态再结晶,在局部变形量较大的区域出现了许多 了细小的再结晶晶粒,但"项链"状组织不明显。相 反,ZM61 合金在相同变形条件下,变形的大晶粒被 动态再结晶小晶粒包围,呈现出典型的"项链"状组织 特征,导致 ZM61 合金出现局部流变失稳,如图 5(c) 所示。两者合金在 400 ℃、10 s⁻¹ 变形条件下的显微组 织如图 5(b)和(d)所示,两者合金组织均以等轴动态再 结晶晶粒为主。材料在高温、高应变速率下,变形过 程中大量的热量难以散出,易出现绝热剪带而导致合 金出现流变失稳现象^[12]。此外,Zn含量的增加使得合 金的热裂倾向增加,这些原因导致 ZM61 合金高温变 形时出现失衡区域较 ZM21 合金的大。

2.4 Mg-Zn-Mn 合金动态再结晶临界条件的表征

动态再结晶通过细化晶粒改善材料的加工性能, 在热加工过程中起到了重要的作用,有必要探讨热加 工工艺参数对合金动态再结晶行为的影响。临界应变 是表征动态再结晶启动及演变过程的重要参数之一, 准确描述变形条件对临界应变的影响规律是建立动态 再结晶动力学模型的关键^[17]。

当应变速率与变形温度一定时,应力随应变的变 化率称之为加工硬化速率,即 $\theta = \partial \sigma / \partial \varepsilon$ 。YOO 等^[18] 和 TAN 等^[19]在考虑不可逆热力学基础上,认为 $\theta - \sigma$ 曲线的转折点意味着动态再结晶的发生。近年来,一 些学者采用此法判断镁、铝等合金的动态再结晶临界 条件,达到较高的精度^[20-22]。材料动态再结晶的特征 可以从加工硬化率 θ 和流变应力 σ 的关系来分析^[22]。 为准确识别 $\theta - \sigma$ 曲线上拐点,对 $\theta - \sigma$ 曲线进一步 求偏导可以得到如图 7 所示的–($\partial \theta / \partial \sigma$)— θ 曲线, 图 6 中拐点对应图 7 中曲线的最小值点。

通过引入 Zener-Hollomon 参数分析变形温度 T 和 变形速率 $\dot{\epsilon}$ 对合金再结晶临界应变 ϵ_c 的影响。根据实 验得到的 ϵ_c 作 $\ln \epsilon_c$ — $\ln Z$ 曲线(见图 8),通过线性回归 获得以下关系式(ϵ_{c1} 为 ZM21 合金, ϵ_{c2} 为 ZM61 合金):

 $\ln \varepsilon_{\rm c1} = -3.1678 + 0.01897 \ln Z_1 \tag{12}$

$$\ln \varepsilon_{c2} = -5.0578 + 0.0621 \ln Z_2 \tag{13}$$

因此, ZM21 和 ZM61 镁合金发生动态再结晶的



图 5 两种合金在不同变形条件下的显微组织

Fig. 5 Microstructures of alloys under different deformation conditions: (a) 523 K, 0.1 s^{-1} , ZM21; (b) 673 K, 10 s^{-1} , ZM21; (c) 523 K, 0.1 s^{-1} , ZM61; (d) 673 K, 10 s^{-1} , ZM61



图 6 在应变速率 0.1 s^{-1} 下合金应变硬化速率 θ 与流变应力 σ 的关系 **Fig. 6** Relationship between θ and σ of alloys under 0.1 s^{-1} : (a) ZM21; (b) ZM61





临界条件如下:

$$\varepsilon > \varepsilon_{c_1} = 4.209 \, 4 \times 10^{-2} \, Z_1^{\ 0.018 \, 97}$$
(14)

$$\varepsilon > \varepsilon_{c_2} = 6.379 \times 10^{-3} Z_2^{0.0621}$$
 (15)

由以上分析可以看出,在热变形过程中 ZM61 合 金动态结晶发生的临界应变量对变形工艺参数较 ZM21 合金敏感。同时,临界应变 ε。随着应变速率 έ 的 增加而增大,随变形温度 T 的升高而降低。这是因为 温度升高,合金中原子热振荡及扩散速率增加,促进 了位错的交滑移和攀移,动态再结晶越容易发生,使 动态再结晶的临界应变量减小。此外,应变速率的增 大,位错的滑移和攀移过程变短,增加了动态再结晶 的形核数量和晶粒长大速率,不利于动态再结晶的软 化作用,使得动态再结晶软化和应变硬化达到平衡的 临界应变量增大。



图 8 临界应变 $\ln \varepsilon_c = \ln Z$ 参数的关系 **Fig. 8** Relationship between $\ln \varepsilon_c$ and $\ln Z$ parameter

3 结论

 ZM21及ZM61合金真应力—真应变曲线呈现 动态再结晶的特征,即存在明显的峰值或者稳态流变 现象;合金的峰值应力和稳态应力随着变形温度的升 高或应变速率的降低而显著降低。

2) 采用包含Arrhenius项的Z参数法构建了ZM21 及ZM61 合金高温塑性变形时峰值应力、变形温度和 应变速率之间的本构方程,并且相对于ZM21 合金, ZM61 合金的变形激活能提高约 20%。

3) ZM21 及 ZM61 合金的 DMM 加工图表明,相 比于 ZM21 合金, ZM61 合金在高温变形时出现失衡 区域增大,但适合 ZM61 合金进行热加工成形的区域 亦增大。 4) 引入加工硬化率 θ ,结合 $\theta - \sigma$ 曲线拐点判据 识别合金发生动态再结晶的临界应变 ε_c ,并建立了临 界应变 ε_c 与 Z 参数之间的定量关系,表明 ZM21 和 ZM61 合金发生动态再结晶的临界应变 ε_c 都随着应变 速率的增加而升高,随变形温度的增加而降低。

REFERENCES

- 刘楚明, 刘子娟, 朱秀荣, 周海涛. 镁及镁合金动态再结晶研 究进展[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(1): 1-12.
 LIU Chu-ming, LIU Zi-juan, ZHU Xiu-rong, ZHOU Hai-tao.
 Research and development progress of dynamic recrystallization in pure magnesium and its alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(1): 1-12.
- [2] 王 斌,易丹青,方西亚,刘群会,吴春萍. ZK60 及 ZK60 (0.9Y)镁合金高温变形行为的热模拟研究[J]. 稀有金属材料 与工程, 2010, 39(1): 106-111.

WANG Bin, YI Dan-qing, FANG Xi-ya, LIU Qun-hui, WU Chun-ping. Thermal simulation on hot deformation behavior of ZK60 and ZK60 (0.9Y) magnesium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(1): 106–111.

- [3] SWIOSTEK J, LETZING D, KAINER K U. Hydrostatic extrusion at 100 °C and its effect on the grain size and mechanical properties of magnesium alloys[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2006, 48(11/12): 499–503.
- [4] ZHANG Ding-fei, SHI Guo-liang, ZHAO Xia-bing, QI Fu-gang. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg-x%Zn-1%Mn (x=4, 5, 6, 7, 8, 9) wrought magnesium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 15–25.
- [5] PARK S S, BAE G T, KANG D H, JUNG I H, SHIN K S, KIM N J. Microstructure and tensile properties of twin-roll cast Mg-Zn-Mn-Al alloys[J]. Scripta Materialia, 2007, 57: 793–796.
- [6] 陈振华. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 28-50.
 CHEN Zhen-hua. Magnesium[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 28-50.
- [7] 张丁非,方 霖,段红玲,戴庆伟. ZM61 镁合金的热变形行为[J]. 材料热处理学报,2011,32(4):25-29.
 ZHANG Ding-fei, FANG Lin, DUAN Hong-ling, DAI Qing-wei.
 Constitutive equation of thermal compression deformation for ZM61 magnesium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(4): 25-29.
- [8] 王宏伟,易丹青,王 斌,蔡金铃,钱 峰,陈缇萦. Mg-6.3Zn-0.7Zr-0.9Y-0.3Nd 镁合金的高温塑性变形行为的热 压缩模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 378-384.
 WANG Hong-wei, YI Dan-qing, WANG Bin, CAI Jin-ling, QIAN Feng, CHEN Ti-ying. Hot compressive deformation simulation of Mg-6.3Zn-0.7Zr-0.9Y-0.3Nd magnesium alloy at elevated temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous

Metals, 2010, 20(3): 378-384.

- [9] 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 and Engineering A, 2003, 362: 118–124.
- [10] LI L, ZHOU J, DUSZCZYK J. Determination of a constitutive relationship for AZ31B magnesium alloy and validation through comparison between simulated and real extrusion[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 172: 372–380.
- [11] 杨续跃,张之岭,张 雷,吴新星,王 军.应变速率对 AZ61 镁合金动态再结晶行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011,21(8):1801-1807.
 YANG Xu-yue, ZHANG Zhi-ling, ZHANG Lei, WU Xin-xing, WANG Iun Influence of strain rate on dynamic recrystallization

WANG Jun. Influence of strain rate on dynamic recrystallization behavior of AZ61 magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(8): 1801–1807.

[12] 周 舸,丁 桦,曹富荣,赵文娟,候红亮,李志强.TC21 合 金的热压缩变形行为及变形机理[J].中国有色金属学报, 2011,21(9):2111-2118.

ZHOU Ge, DING Hua, CAO Fu-rong, ZHAO Wen-juan, HOU Hong-liang, LI Zhi-qiang. Hot compression deformation and deformation mechanisms of TC21 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2111–2118.

- [13] PRASAD Y V R K, GEGEL H L, DORAIVELU S M, MALAS J C, MORGAN J T, LARK K A, BARKER D A. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-6242[J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15: 1883–1883.
- [14] 汪凌云,范永革. AZ31 镁合金的中温流变失稳特征[J]. 中国 有色金属学报, 2005, 15(10): 1602-1606.
 WANG Ling-yun, FAN Yong-ge. Instability flow characteristics of AZ31 magnesium alloy at moderate temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(10): 1602-1606.
- [15] 李红英,刘 洋,胡继东,曹翠婷,魏冬冬. ZA27 合金的热变 形及加工图[J]. 中国有色金属学报,2012,22(2):365-369.

LI Hong-ying, LIU Yang, HU Ji-dong, CAO Cui-ting, WEI Dong-dong. Hot deformation and processing map of ZA27 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(2): 365–369.

[16] 汪凌云,范永革,黄光杰,黄光胜. 镁合金 AZ31B 的高温塑 性变形及加工图[J]. 中国有色金属学报,2004,14(7): 1068-1072.

WANG Ling-yun, FAN Yong-ge, HUANG Guang-jie, HUANG Guang-sheng. Plastic deformation at elevated temperature and processing maps of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(7): 1068–1072.

- [17] HE Yun-bin, PAN Qing-lin, CHEN Qin, ZHANG Zhi-ye, LIU Xiao-yuan, LI Wen-bin. Modeling of strain hardening and dynamic recrystallization of ZK60 magnesium alloy during hot deformation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 246–254.
- [18] YOO M H, AGNEW S R, MORRIS J R, HO K M. Non-basal slip systems in HCP metals and alloys: source mechanisms[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319/321: 87–92.
- [19] TAN J C, TAN M J. Dynamic continuous recrystallization characteristics in two stage deformation of Mg-3Al-1Zn alloy sheet[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 339: 124–132.
- [20] JOHN J J, XAVIER Q, LAN J, MARTIN E. The Avrami kinetics of dynamic recrystallization[J]. Acta Materialia, 2009, 57(9): 2748–2756.
- [21] QUAN Guo-zheng, MAO Yuan-ping, LI Gui-sheng, LI Wen-quan, WANG Yang, ZHOU Jie. A characterization for the dynamic recrystallization kinetics of as-extruded 7075 aluminum alloy based on true stress—strain curves[J]. Computational Materials Science, 2012, 55: 65–72.
- [22] LIU J, CUI Z, RUAN L. A new kinetics model of dynamic recrystallization for magnesium alloy AZ31B[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 529: 300–310.

(编辑 龙怀中)