

等通道角挤压 AZ91D 镁合金热压缩变形行为

张继豪¹, 吴洋², 万元元², 柴舒心², 屈俊岑²

(1.北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 在应变速率为 $0.005 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、温度 $200 \sim 275 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 利用 Instron-5500 热模拟机, 对经过等通道角挤压 (Equal Channel Angular Extrusion, ECAE) 后的 AZ91D 镁合金的高温压缩特性进行了研究, 得到了 ECAE-ed 态 AZ91D 镁合金真实应力-应变曲线, 分析了挤压温度、应变速率等对其的影响, 得出本构方程的一系列常量, 建立了 ECAE-ed 态 AZ91D 镁合金在高温压缩中的本构方程关系式, 并与铸态 AZ91D 镁合金进行了对比。结果表明: 热压缩过程中, ECAE-ed 态 AZ91D 镁合金与铸态一样, 流动应力随温度的升高而降低, 随应变速率的升高而升高; 流动应力也可以用双曲正弦函数来描述, 且双曲正弦值随 Zener-Hollomon 参数的自然对数的升高呈线性升高; 两者同为正应变速率敏感材料, 但 ECAE-ed 态 AZ91D 镁合金要比铸态应变速率敏感性小, 其指数从铸态的 $m=0.14$ 下降为 0.096 , 变形激活能从 182.65 kJ/mol 上升为 227.14 kJ/mol 。研究结果对 AZ91D 镁合金进一步塑性成形和应用具有指导意义。

关键词: AZ91D 镁合金; 高温压缩; 流变应力; 等通道角挤压; 本构方程。

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.027

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)05-0177-05

Elevated Temperature Compression Deformation Behavior of AZ91D Magnesium Alloy Processed by Equal Channel Angular Extrusion

ZHANG Ji-hao¹, WU Yang², WAN Yuan-yuan², CHAI Shu-xin², QU Jun-cen²

(1.School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2.Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Elevated temperature compression tests of AZ91D magnesium alloy were carried out on Instron-5500 at strain rates ranged from 0.005 s^{-1} to 1 s^{-1} and deformation temperature between $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $275 \text{ }^{\circ}\text{C}$. The true stress-strain curves were obtained and the influences of deformation temperature and strain rate on it were analyzed. Some constants of constitutive equation were gained and relations of constitutive equations of ECAE-ed AZ91D magnesium alloy in elevated temperature compression were established. At the same time, the results of ECAE-ed AZ91D were compared with that of cast. There were same processing between ECAE-ed AZ91D and cast: the lower the deformation temperature was, the higher the flow stress of AZ91D magnesium alloy would be; and the lower the strain rates was, the lower the flow stress would be. The flow stress could also be described with the hyperbolic sine function, and the hyperbolic sine value of flow stress increased linearly with the natural logarithm of Zener-Hollomon parameter. Both ECAE-ed and cast AZ91D are positive strain rate sensitivity materials, although the strain rate sensibility of AZ91D magnesium alloy in ECAE-ed was smaller than that of cast and the indexes reduced from 0.14 of cast to 0.096 of ECAE-ed. The value of deformation activated energy increased from 182.65 kJ/mol to 227.14 kJ/mol . The results have a guiding meaning for the further plastic deformation and industrial application of magnesium alloy.

KEY WORDS: AZ91D magnesium alloy; elevated temperature compression; flow stress; ECAE; constitutive equation.

镁合金是目前工程应用中最轻的金属结构材料, 在日益追求轻量化的今天, 汽车、通讯、航空和航天

等众多领域对镁合金的需求迅猛增加, 也促使镁合金成为近年来的研究热点之一^[1]。铸态镁合金力学性能

收稿日期: 2017-07-31

作者简介: 张继豪 (1996—), 男, 北京理工大学机械电子工程专业本科生。

低下,严重限制了其进一步的应用,人们通常采用大塑性变形来提高镁合金的力学性能,等通道角挤压作为一种可以多次重复的大塑性变形工艺,对提高镁合金性能具有较大的优势^[2-3]。同时,由于镁合金为密排六方结构,滑移系少,冷塑性加工能力较差,但在高温下,一些滑移角锥面开始发挥作用,从而使镁合金在高温下塑性增强,成形变得相对容易,很多镁合金的塑性变形工艺都在高温下进行,因此,研究变形镁合金在高温状况下的塑性变形流变应力行为具有重要意义^[4-6]。目前,不少研究者都针对镁合金高温下的塑性变形流动应力进行了分析,但大都集中在铸态合金^[7-8],等通道角挤压后的还鲜有报道。

文中通过对等通道角挤压处理的 AZ91D 镁合金进行高温压缩实验,研究了合金高温热压缩流变行为,并进行了一系列的分析,为镁合金在压力加工领域进一步的应用提供必要的实验数据和理论参考。

1 实验

实验材料采用工业半连续 AZ91D 镁合金铸锭,除 Mg 外,其他成分 Al, Zn, Mn, Fe, Cu, Ni 元素的质量分数分别为 9%, 1%, 0.15%, 0.005%, 0.03%, 0.002%。

上述半连续 AZ91D 镁合金铸锭,采用等通道角挤压对其进行大塑性变形,等通道角挤压实验温度为 225 °C,模具直径为 $\Phi 60$ mm,两通道交角 Φ 为 90°,外角夹角 Ψ 为 20°,内角半径 r 为 8 mm。

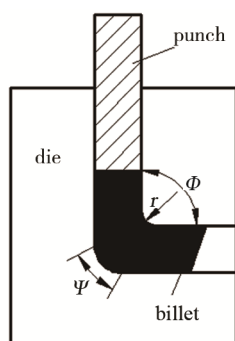


图1 等通道角挤压模具示意图
Fig.1 Schematic of ECAE die

经等通道角挤压后的 AZ91D 镁合金棒料,沿其轴向取试样,加工成 $\Phi 8 \times 12$ mm 的圆柱状。在试样两端均匀涂以石墨润滑剂,以减小摩擦对实验结果的影响。热压缩实验在 Instron-5500 热模拟机上进行。变形温度选择为 200, 225, 250, 275 °C; 应变速率为 0.005, 0.05, 0.1, 1.0 s⁻¹。试样采用电磁感应加热,加热到预定温度后,保温 15 min,使试样温度均匀。变形过程由计算机控制并自动采集数据。

压缩实验中仪器记录的是载荷-位移曲线,假定压缩过程中材料的体积恒定不变,则可以根据式(1)计算出压缩变形过程中的真实应力应变曲线^[9]。

$$A_1 \cdot H_1 = \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot H_0$$

$$A_1 = \frac{\pi D_0^2}{4 H_1} \cdot H_0 \quad (1)$$

式中: H_0 和 H_1 分别为试样压缩前后的高度; A_1 为压缩过程中某 t_1 时刻材料的有效横截面积; D_0 为试样压缩前的直径。

则在 t_1 时刻材料的真实应力 σ 为:

$$\sigma = \frac{F}{A_1} \quad (2)$$

式中: F 为 t_1 时刻材料承受的载荷。

2 结果与讨论

2.1 AZ91D 等通道挤压后的力学性能分析

通过处理载荷与位移数据的对应关系,经过式(1)和(2)的换算,可以得到等通道挤压态 AZ91D 镁合金的压缩真应力-应变曲线,见图 2。

对比不同变形参数下 AZ91D 镁合金真应力-应变曲线的变化规律可知,在 0.005 s⁻¹ 的应变速率下,

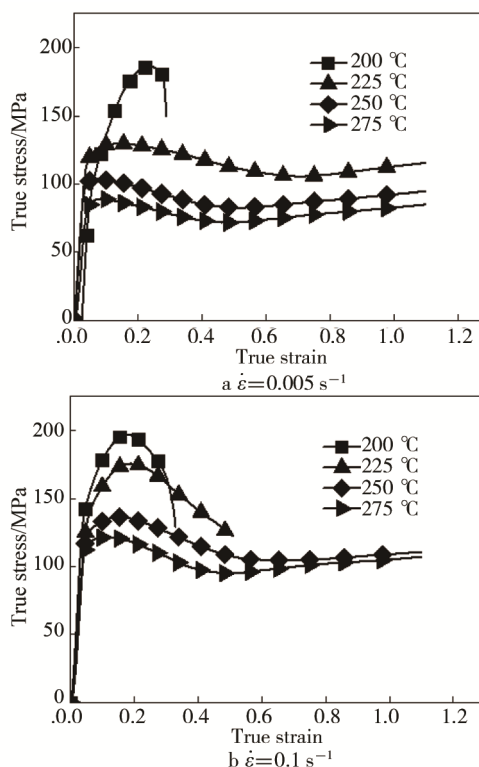


图2 不同变形条件下 AZ91D 真应力-应变曲线
Fig.2 True stress-strain curves of AZ91D in different deformation conditions

200 °C 压缩达到最大应力后随即断裂,发生破坏,随后在 225, 250, 275 °C 下, AZ91D 表现出较高的塑性;可随着温度升高,强度也发生变化,从 130 MPa 降至 80 MPa 左右。在应变速率 0.1 s^{-1} 情况下, AZ91D 镁合金尽管强度有所提高,可在 200 °C 和 225 °C 两个温度下,材料均发生了破坏,表明提高应变速率,材料抵抗外界破坏的能力降低。

其实镁合金热压缩变形过程是加工硬化与动态再结晶软化相互竞争的一个动态平衡过程。在压缩刚开始,材料处于弹性变形阶段,应力随应变的增加呈现出线性增大,达到屈服应力后, AZ91D 开始发生塑性变形,应力随应变的增加快速上升,该阶段的塑性变形主要是加工硬化起到了主导作用,但随着应变量的进一步增加,位错不断产生并发生交互作用,造成位错塞积,密度不断提高,塑性变形不能完全释放形变能。储存在材料内部的形变能,是动态回复和动态再结晶的启动所需的驱动能,位错密度较高的地方将成为动态再结晶形核点,材料内部开始产生显著的动态回复和动态再结晶过程,加工硬化逐渐被抵消,材料开始软化,加工硬化率降低,真应力-应变曲线斜率表现为形变加工硬化率,在曲线上表现为斜率逐渐减小;当流变应力达到极值时, AZ91D 形变加工硬化率与动态再结晶软化率达到了动态平衡;继续变形,材料内部动态再结晶造成的软化效果将大于形变产生的加工硬化效果,流变应力逐渐下降,当达到一定的形变量后,其应力值基本不变,此时加工硬化和回复再结晶软化达到了一个动态平衡。在应变速率从 0.005 s^{-1} 提高至 0.1 s^{-1} 后,峰值应力明显增加,因为随变形速度的增加,位错的产生、交互作用以及运动速度都有所加快,因此需要更大的外力诱导位错的运动;此外,动态回复和动态再结晶过程需要一定的时间,由于增加了变形速率,外力加载速度很快,材料的动态回复和动态再结晶来不及进行, AZ91D 镁合金内部没有足够时间产生动态回复和动态再结晶的软化过程,使得流动应力提高^[9-10]。

从图 2 还可以分析得出,当应变速率相同时,温度的升高将导致流动应力不断减小。其主要原因是随着形变温度的升高, AZ91D 镁合金具有较高的原子激活能,加快了材料内部动态回复和再结晶速率,消除或部分消除了形变过程中的硬化效应。同时,温度升高再结晶晶粒迅速长大,根据 Hall-Petch 公式可知材料的强度有所下降,在相同的压应力作用下更容易发生塑性变形。

2.2 本构方程

通过建立数学模型,如采用指数关系、幂指数关系等函数关系来描述材料变形稳态流变应力与应变速率和温度的关系^[11-15],分别表述如下:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta \sigma) \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (5)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; A, A_1, A_2, n_1, β 为常数; α 为应力水平参数, $\alpha = \beta / n_1$; σ 为材料流变应力; n 为应力指数,等于应变速率敏感指数的倒数,即 $n = 1/m$; Q 为变形激活能,表示材料热变形的难易程度; R 为摩尔气体常数; T 为热力学温度, K。

一般情况下,可以采用指数关系函数来对低应力下的流变应力变化规律进行描述;采用幂指数关系函数描述中高应力下流变应力变化规律;而双曲函数关系则可以适用于描述所有的应力情况下流变曲线的变化规律^[16]。Sellars 和 Tegart 推导出的双曲函数,具有 Arrhenius 关系,其为包含形变激活能和形变温度的双曲正弦函数,可以用来描述稳态热变形行为。此外,还可以用于计算不同金属及其合金的形变激活能 Q 。

Zener 和 Hollomon 证明了形变速率和温度的关系可以用 Z (Zener-Hollomon) 参数表示:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) \quad (6)$$

对式(3)和(4)两边分别取自然对数,可以得到:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (7)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (8)$$

$$\text{从式(7)和(8)可以看出, } n_1 = \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln \sigma}, \beta = \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \sigma}。$$

根据实验数据分别用 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 描述 AZ91D 镁合金高温压缩试验时形变速率与极值应力的关系,见图 3,其斜率分别表示 n_1 和 β 值,取平均可得出 $\beta = 0.1525$, $n_1 = 22.11$,则 $\alpha = \beta / n_1 = 0.0069$ 。

对等式(5)两边取对数,并假定变形激活能与变形温度无关,当变形温度取常数时,可以得到:

$$\ln \dot{\varepsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha \sigma)] \quad (9)$$

由式(9)可以看出, $\ln \dot{\varepsilon}$ 与 $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 线性相关,应力指数 n 由曲线斜率表示。

根据 AZ91D 镁合金的真应力-应变曲线,应变率取定值 15%,可描述出 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 的关系,见图 4。

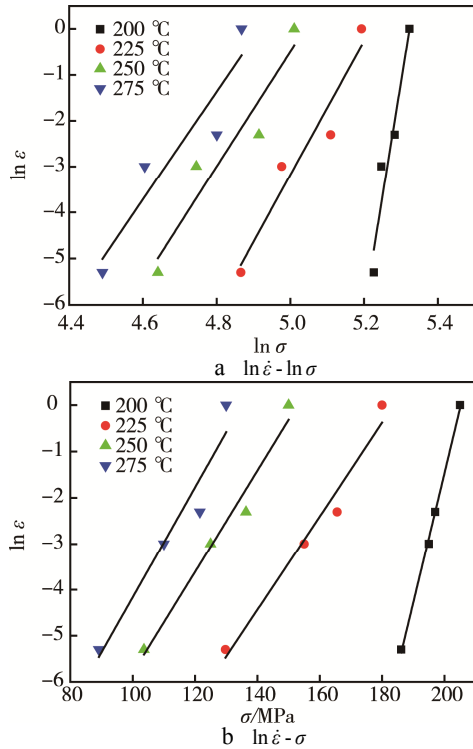


图3 AZ91D 镁合金高温形变速率与极值应力的关系
Fig.3 Relations between strain rate and peak stress of AZ91D magnesium alloy

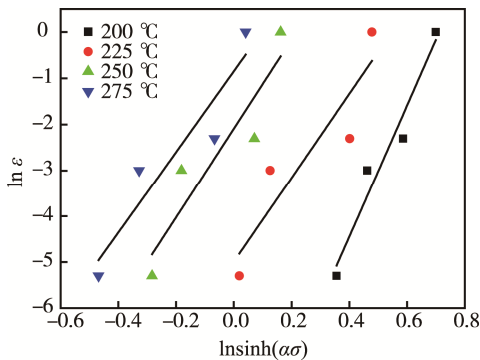


图4 应变速率和流变应力的关系 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

Fig.4 Relations between strain rate and flow stress $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

通过计算其斜率取平均值得出应力指数 $n=10.46$, 对应的形变速率敏感指数 $m=1/n=0.096$ 。

在恒定应变速率条件下, 假定一定温度范围内 Q 为一常数, 对式(3)两边取对数:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = m \ln \dot{\epsilon} + \frac{mQ}{1000R} \cdot \frac{1000}{T} \quad (10)$$

式中: m 为应变速率敏感因子, $m=1/n$ 。

从式(10)可以看出, $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $\frac{1000}{T}$ 为线性关系, 应变固定为 15% 时, 带入不同变形条件下的应力值, 并进行线性回归处理, 绘制 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 图, 见图 5。

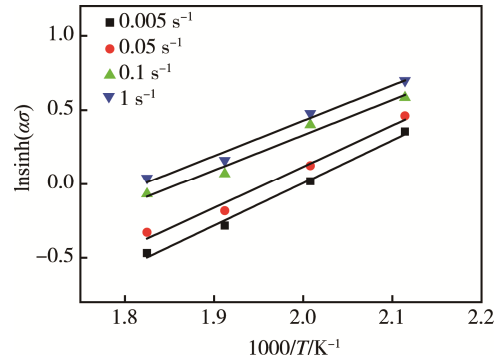


图5 流变应力和温度的关系 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$

Fig.5 Relations between flow stress and temperature $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$

图 5 表明应变速率条件相同时, 流变应力双曲正弦的对数和温度的倒数之间满足线性相关。

对式(5)两边取自然对数并求偏微分可得 AZ91D 镁合金激活能 Q 的关系式:

$$Q = R \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right]_T \left[\frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} \quad (11)$$

式中: $\left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right]_T$ 和 $\left[\frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}}$ 分别为

$\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 的斜率, 分别为 10.46 和 2.61, 可得 AZ91D 镁合金激活能 Q 为 227.14 kJ/mol。

对式(6) Z 参数的表达式两边取自然对数, 可以得到:

$$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} \quad (12)$$

将形变激活能 Q 和曲线的变形条件代入式(12), 计算得到 $\ln Z$ 的值, 利用 $\ln Z$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 绘图, 见图 6, 两者成线性关系, 吻合程度高达 94.6%, 证明采用双曲正弦函数描述 AZ91D 镁合金高温压缩变形行为是合理的。

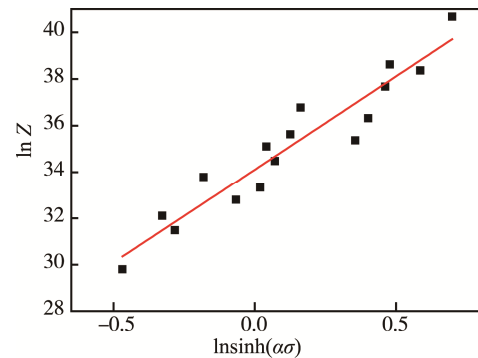


图6 Z 参数和流动应力的关系 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

Fig.6 Relations between parameter Z and flow stress $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

联立式(5—6), 得到:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp[Q/RT] = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (13)$$

两边取自然对数, 得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (14)$$

可以看出, n 为 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的斜率, $\ln A$ 为其截距, $\ln A = 49.69$, $A = 3.8 \times 10^{21}$, 则:

$$\dot{\varepsilon} = 3.8 \times 10^{21} [\sinh(0.0069\sigma)]^{10.46} \exp\left(\frac{-227140}{RT}\right)$$

文献[17]曾对半连续拉铸 AZ91D 镁合金进行了热压缩实验, 获取的本构方程为: $\dot{\varepsilon} = 1.15 \times$

$$10^{16} [\sinh(0.0075\sigma)]^{6.95} \exp\left(\frac{-182650}{RT}\right)$$

对比两者发现, 经等通道角挤压后的 AZ91D 镁合金, 应力指数从 6.95 上升至 10.46, 变形激活能从 182.65 kJ/mol 上升至 227.14 kJ/mol, 表明 AZ91D 镁合金经大塑性变形后, 应变速率敏感性下降, 同等条件下需要更大的外力才能开动滑移系, 进入塑性成形。

3 结论

1) 在 200 ~ 275 °C 温度区间, 变形温度和变形速率对等通道挤压态的 AZ91D 镁合金高温压缩变形行为具有较大的影响。温度升高, 流变应力逐渐降低, 反之应变速率升高, 流变应力显著升高; AZ91D 镁合金为应变速率敏感指数 $m=0.096$ 的正应变速率材料。

2) 通过分析流变应力, 得出了 AZ91D 高温形变的基本常数, 其中结构因子 $A=3.8 \times 10^{21}$, 应力指数 $n=10.46$, 应力水平参数 $\alpha=0.0069$, 热变形激活能 $Q=227.14$ kJ/mol; 其流变应力行为符合双曲正弦关系, 本构方程描述为 $\dot{\varepsilon} = 3.8 \times 10^{21} [\sinh(0.0069\sigma)]^{10.46} \exp\left(\frac{-227140}{RT}\right)$ 。

3) 与半连续拉铸态 AZ91D 镁合金相比, ECAE-ed 态 AZ91D 镁合金应变速率敏感指数从 0.14 下降为 0.096, 呈现出较小的应变速率敏感性, 而应变激活能则有所增加。

参考文献:

- [1] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1—6.
CHEN Zhen-hua. Wrought Magnesium Alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1—6.
- [2] GU C F, TO' TH L S, FIELD D P, et al. Room Temperature Equal-channel Angular Pressing of a Magnesium Alloy[J]. Acta Mater, 2013, 61: 3027—3036
- [3] ZHANG Xiao-hua, LUO Shou-jing, DU Zhi-ming. Uniformity and Continuity of Effective Strain in AZ91D Processed by Multi-pass Equal Channel Angular Extrusion. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(1): 92—98.
- [4] DU Zhi-hui, ZHANG Xu-hu, FANG Xi-ya, et al. Hot

Compression Deformation Behavior of MB26 Magnesium Alloy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17: 400—404.

- [5] 陈强. 合金加工流变学及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
CHEN Qiang. Rheology of Alloy Processing and Its Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [6] 何运斌, 潘清林, 覃银江, 等. ZK60 镁合金热变形过程中的动态再结晶动力学[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1205—1213.
HE Yun-bin, PAN Qing-lin, QIN Yin-jiang, et al. Dynamic Recrystallization Kinetics of ZK60 Magnesium Alloy during Hot Deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1205—1213.
- [7] 栾娜, 李落星, 李光耀, 等. AZ80 镁合金的高温热压缩变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2007, 10: 1678—1684.
LUAN Na, LI Luo-xing, LI Guang-yao, et al. Hot Compression Deformation Behaviors of AZ80 Magnesium Alloy at Elevated Temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 10: 1678—1684.
- [8] 余琨, 蔡志勇, 薛新颖, 等. 半连续铸造 AZ31B 镁合金的热压缩变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(11): 2075—2080.
YU Kun, CAI Zhi-yong, XUE Xin-ying, et al. Hot compressive Deformation Behavior of Semi-continuous Cast AZ31B Magnesium Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(11): 2075—2080.
- [9] 汪大年. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 115—128.
WANG Da-nian. Theory of Metal Plastic Deformation[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986: 115—128.
- [10] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 187—188.
CUI Zhong-qi. Metallography and Heat-treatment[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1997: 187—188.
- [11] POIRIER J P. 晶体的高温塑性变形[M]. 关德林, 译. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 24—85.
POIRIER J P. Plastic Deformation of Crystal at Elevated Temperature[M]. GUAN De-lin, Translated. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1989: 24—85.
- [12] McQUEEN H J, FRY E, BELLING J. Comparative Constitutive Constants for Hot Working of Al-4.4Mg-0.7Mn (AA5083)[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2001, 10(2): 164—172.
- [13] GALIYEV A, KAIBYSHEV R, GOTTSREIN G. Correlation of Plastic Deformation and Dynamic Recrystallization in Magnesium Alloy ZK60[J]. Acta Mater, 2001, 49: 1199—1207.
- [14] GALIYEV A, KAIBYSHEV R, SAKAI T. Continuous Dynamic Recrystallization in Magnesium Alloy[J]. Mater Sci Forum, 2003, 419/422: 509—514.
- [15] 吴文祥, 孙德勤, 曹春燕, 等. 5083 铝合金热压缩变形流变应力行为[J]. 中国有色金属学报, 2007, 10: 1667—1671.
WU Wen-xiang, SUN De-qin, CAO Chun-yan, et al. Flow Stress Behavior of 5083 Aluminium Alloy under Hot Compression Deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 10: 1667—1671.
- [16] XIAO Yu-de, WANG Wei, LI Wen-xian. High Temperature Deformation Behavior and Mechanism of Spray Deposited Al-Fe-V-Si Alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17: 1175—1180.
- [17] 张晓华, 姜巨福, 罗守靖. AZ91D 镁合金热压缩变形行为分析[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(10): 1720—1725.
ZHANG Xiao-hua, JIANG Ju-fu, LUO Shou-jing. Compression Deformation Behavior of AZ91D Magnesium Alloy at Elevated Temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(10): 1720—1725.