

AZ91D 镁合金的热压缩变形行为

张晓华, 姜巨福, 罗守靖

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 在应变速率为 $0.005 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、温度 $250 \sim 350$ 条件下, 采用 Instron-5500 热模拟机对 AZ91D 镁合金的高温压缩特性进行研究, 得到其真实应力—应变曲线。分析挤压温度和应变速率等对曲线的影响, 得出本构方程的一系列常数, 建立 AZ91D 镁合金在高温压缩中的本构方程关系式。结果表明: 变形过程中 AZ91D 镁合金的流动应力随温度的升高而降低, 随应变速率的升高而升高; 该流动应力可以用双曲正弦函数来描述, 其双曲正弦值随 Zener-Hollomon 参数自然对数的升高呈线性增大; AZ91D 镁合金是正应变速率敏感材料, 其应变速率敏感指数 $m=0.14$ 。

关键词: AZ91D 镁合金; 高温压缩; 流变应力; Zener-Hollomon 参数

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A

Compression deformation behavior of AZ91D magnesium alloy at elevated temperature

ZHANG Xiao-hua, JIANG Ju-fu, LUO Shou-jing

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The compression tests of AZ91D magnesium alloy at elevated temperature were carried out on Instron-5500 at strain rates ranging from 0.005 to 1 s^{-1} and deformation temperature between 250 and 350 . The true stress—strain curves were obtained and the influences of deformation temperature and strain rate on the curves were analyzed. The constitutive equation and some constants of AZ91D magnesium alloy during compression deformation were gained. The results show that during the compression, the flow stress of AZ91D magnesium alloy decreases with increasing deformation temperature whereas it increase with increasing strain rates. The flow stress of AZ91D magnesium alloy at elevated temperature can be described with the hyperbolic sine function, and the hyperbolic sine value of flow stress will increase linely with increasing natural logarithm of Zener-Hollomon parameter. The strain rate sensitivity index (m) of AZ91D magnesium alloy is equal to 0.14 .

Key words: AZ91D magnesium alloy; elevated temperature compression; flow stress; Zener-Hollomon parameter

镁合金是目前工程应用中最轻的金属结构材料, 具有较高的比强度和比刚度, 易于机械加工, 且回收方便, 是理想的绿色材料^[1-3]。在日益追求轻量化和环保的今天, 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^[4]。由于 Mg-Al-Zn 合金, 具有均衡的力学性能, 在工业生产中获得了较为广泛的应用。

但由于其为密排六方结构, 滑移系少, 冷塑性加工性能较差, 制约了高性能镁合金材料的开发与应用。而在高温下, 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^[5-8]。因此, 研究镁合金在高温条件下的塑性变形流变应力行为与加工工艺参数的相互影响关系具有重要意义。

本文作者通过对 AZ91D 镁合金进行高温压缩实验,研究了合金的高温热压缩流变行为,为 Mg-Al-Zn 系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参考。

1 实验

实验材料采用工业半连续 AZ91D 镁合金铸锭,其化学成分列于表 1。

表 1 AZ91D 镁合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of AZ91D magnesium alloy (mass fraction, %)

Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni	Mg
9.000	1.000	0.150	0.005	0.030	0.002	Bal.

沿镁合金铸锭轴向取试样,加工成 $d8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的圆柱状。热压缩实验在 Instron-5500 热模拟机上进行。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。变形温度选择为 250、265、295、310、340 和 350 ;应变速率为 0.005、0.05、0.1 和 1 s^{-1} 。试样采用电磁感应加热,加热到预定温度后,保温 15 min,以使试样温度均匀。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],即

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

式中: H_0 和 H_1 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 结果与分析

2.1 合金的真实应力—应变曲线

实验所得载荷位移数据,经过式(1)和(2)的换算,

可以得到 AZ91D 镁合金的真实应力—应变曲线,结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出, AZ91D 镁合金在不同的应变速率和不同的压缩温度下,其压缩过程大致都可以分为 4 个阶段:首先直线上升,到达峰值,为第一阶段;然后曲线有所下降,到达谷底,为第二阶段;曲线再稳步升高,为第三阶段;最后曲线下降,为第四阶段。在第一阶段中,坯料在冲头的冲击作用下,发生弹性和塑性变形,在很小的变形范围内,应力急剧上升,且其弹性阶段和塑性阶段并没有明显的分界线。在这个阶段,主要是坯料本身对外界的一种抵抗能力,在压缩中,产生加工硬化现象,导致流动应力直线上升,达到峰值。第二阶段是真实应力不断减小的阶段。当应力达到峰值以后,随着应变的增加,应力在峰值保持很短的时间后,就开始下降。这主要是由加工硬化和动态回复和再结晶综合作用造成的,动态回复和再结晶消除或者部分消除了加工硬化,降低了试件此时的强度。在第三阶段中,外加载荷越来越大,变形量也越来越大,位错在外力的作用下,不断增多,且相互交割加剧,引起变形抗力的增加。在第四阶段中,变形进入尾声,应力下降,材料彻底失效^[9]。

从图 1(a)和图 1(b)可以看出,相同的应变速率下,当温度升高时,试件的流动应力不断减小。这主要是因为随着温度的升高,试件原子激活能增加,促成回复和再结晶,使变形中的硬化效应得到消除或者部分消除。同时,温度越高,晶粒长大的速度也越快,晶界面积减小,很容易在外力的作用下,发生塑性变形。

同样可以看出,在相同的温度下,应变速率变大,试件的流动应力也相应提高。这一方面是因为变形速度的增加,意味着位错运动速度的加快,因此必然需要作用更大的剪切力;另一方面,由于变形速度的增加,试件没有足够时间发展软化过程,这也会促使流动应力提高^[9-10]。

2.2 本构方程

人们通常采用数学模型,如指数关系、幂指数关系和双曲正弦函数关系来描述材料高温变形稳态流变应力和应变速率、温度的关系^[11-15],分别表述如下:

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

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

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

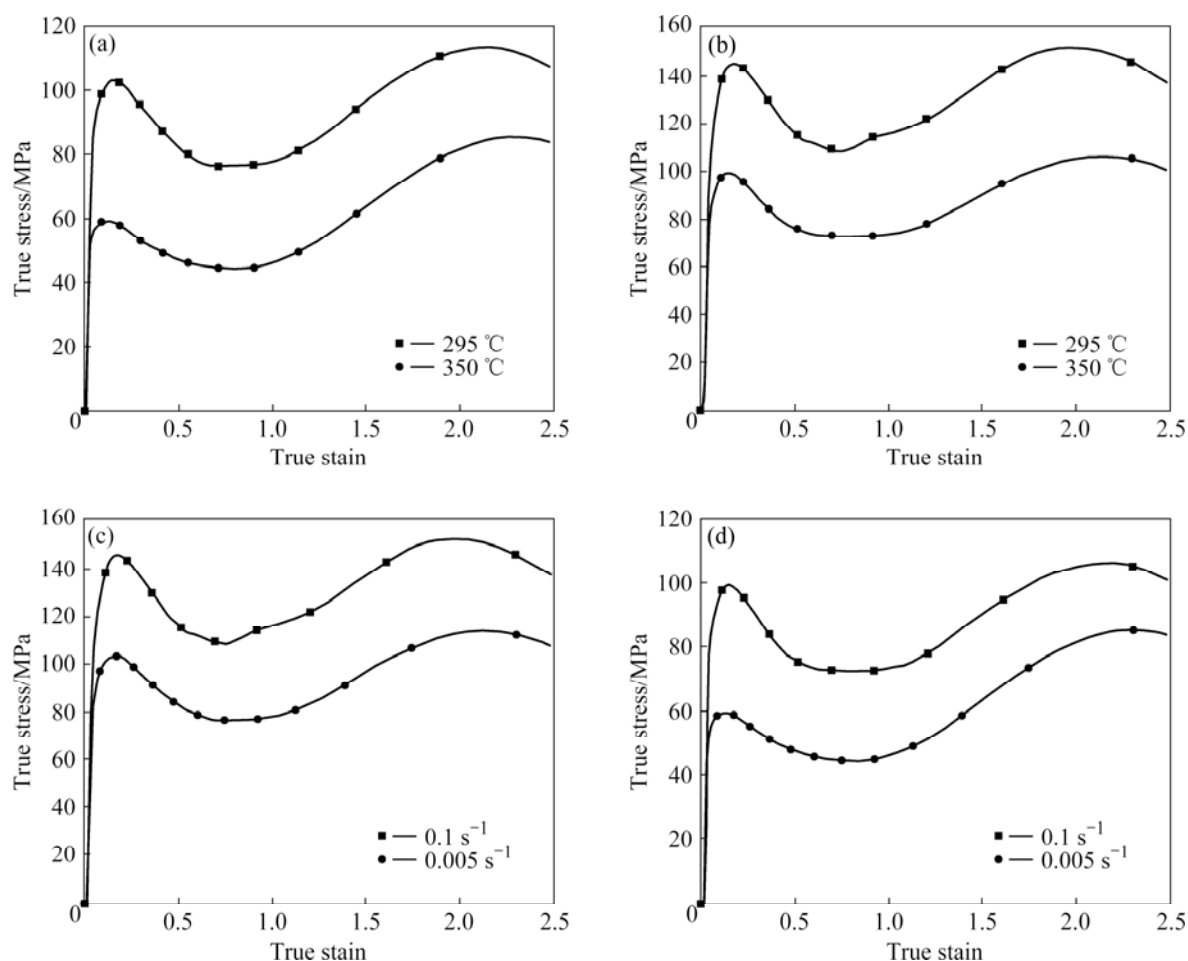


图 1 不同变形条件下 AZ91D 的真实应力—应变曲线

Fig.1 True stress—strain curves of AZ91D magnesium alloy under different conditions: (a) $\dot{\epsilon}=0.005 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$; (c) 295 °C; (d) 350 °C

式中： $\dot{\epsilon}$ 为应变速率； A 、 A_1 、 A_2 、 n_1 和 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， $n=1/m$ ； Q 为变形激活能，反映材料热变形的难易程度； R 为摩尔气体常数； T 为绝对温度。

一般来说，在低应力水平下，其关系可用指数关系描述，中高应力水平下可用幂指数关系描述，而双曲函数关系则可以适用于所有的应力情况下，而与应力大小无关^[16]。双曲函数关系是 Sellars 和 Tegart 推导出来的，是 Arrhenius 关系包含变形激活能和变形温度的双曲正弦表达形式，可以确定稳态热变形行为特性。很多工作已经证明了双曲函数关系可以描述热压缩的整体变形行为，此外，它也可以计算不同金属或合金的变形激活能 Q 。

Zener 和 Hollomon 推导并证明了应变速率和温度之间的关系可以用一个参数表示，称为 Z (Zener-Hollomon) 参数，可以表示为

$$Z = \dot{\epsilon} \exp[Q/(RT)] \quad (6)$$

对式(3)和(4)两边分别取自然对数，可以得到：

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

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

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

根据实验数据分别用 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 两种形式表述 AZ91D 镁合金高温压缩时应变速率与峰值应力的关系，结果如图 2 所示。由图 2 中曲线斜率分别表示 n_1 和 β 值，通过计算并取平均值，可得出 $\beta=0.075694$ ， $n_1=10.111130$ ，则：

$$\alpha = \frac{\beta}{n_1} = 0.0075$$

对式(5)两边取自然对数，并假定变形激活能跟温

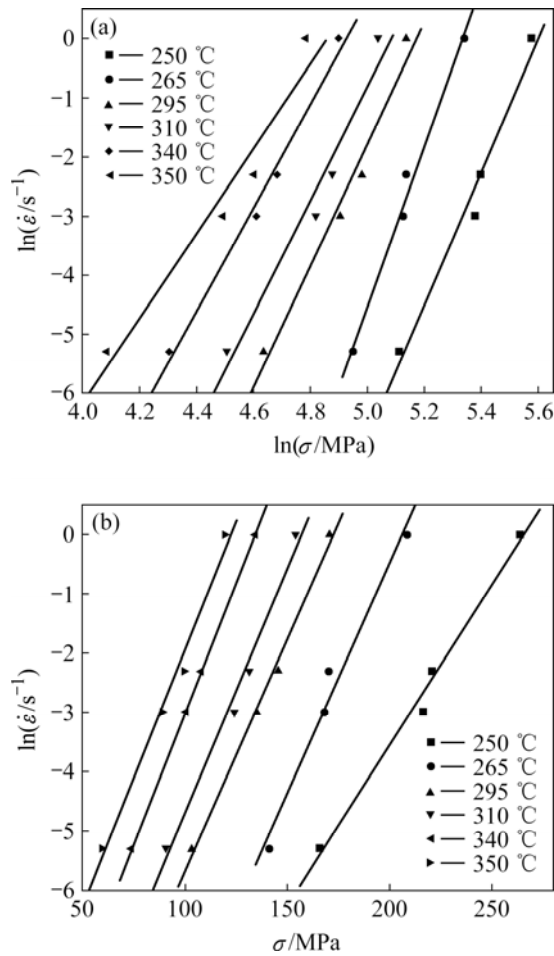


图 2 AZ91D 镁合金高温变形时应变速率与峰值应力的关系

Fig.2 Relationship between strain rate and peak stress of AZ91D magnesium alloy: (a) $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$; (b) $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$

度不相关, 当温度为常数时则可以得到:

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

由式(9)可以看出, $\ln \dot{\epsilon}$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 成线性关系, 其斜率即为应力指数 n 。

根据 AZ91D 镁合金的真实应力—应变曲线, 固定应变量为 15%, 可做出 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系曲线, 结果如图 3 所示。

计算其斜率并取平均值得应力指数 $n=6.95$, 则应变速率敏感指数 $m=1/n=0.14$ 。

在恒定应变速率条件下, 假定一定温度范围内 Q 保持不变, 对式(3)两边取对数, 可以得到:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = m \ln \frac{\dot{\epsilon}}{A} + \frac{mQ}{RT} \quad (10)$$

式中: m 为应变速率敏感因子, $m=1/n$ 。

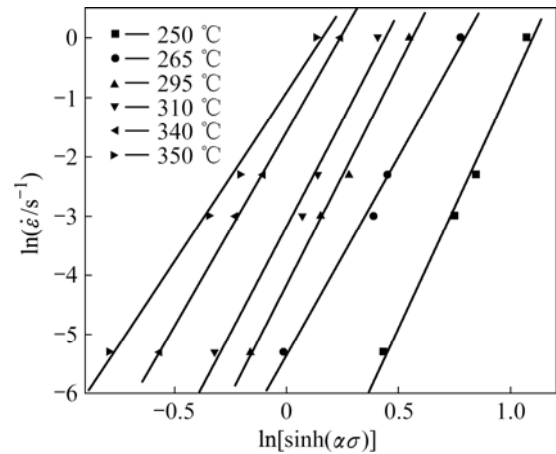


图 3 AZ91D 镁合金的应变速率和流变应力的关系

Fig.3 Relationship between strain rate and flow stress for AZ91D magnesium alloy

从式(10)可以看出, $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $1/T$ 成线性关系, 同样固定应变量为 15%, 将不同变形条件下的应力值代入式(10), 进行线性回归, 绘制相应的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 曲线, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 在相同的应变速率条件下, 流变应力的双曲正弦对数项和温度的倒数之间满足线性关系。

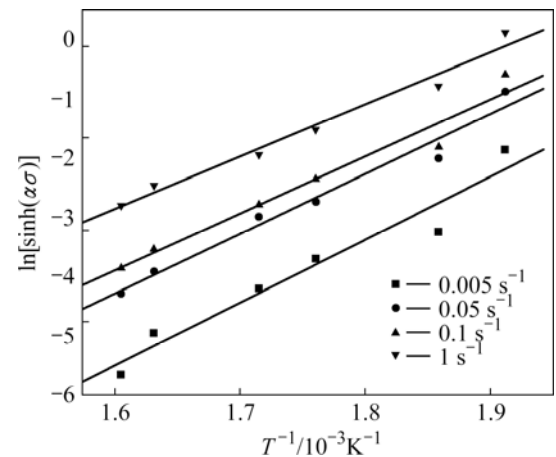


图 4 AZ91D 镁合金的流变应力和温度的关系

Fig.4 Relationship between flow stress and temperature of AZ91D magnesium alloy

对式(5)两边取自然对数并求偏微分可得

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

式(11)为 AZ91D 镁合金激活能 Q 的关系式。

$\left[\frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right]_T$ 和 $\left[\frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\varepsilon}}$ 分别为 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 的斜率, 其值分别为 6.95 和 3.16, 由此可以计算得到 AZ91D 镁合金的激活能 Q 为 182.65 kJ/mol。

对公式(6)两边取自然对数, 可以得到

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

将变形激活能 Q 和曲线的变形条件代入式(12), 则可以得到 $\ln Z$ 的值, 利用 $\ln Z$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 做图, 结果如图 5 所示。由图 5 可知两者成直线关系, 相关系数达到 98.29%, 表明用双曲正弦函数来描述 AZ91D 镁合金高温压缩变形行为是合适的。

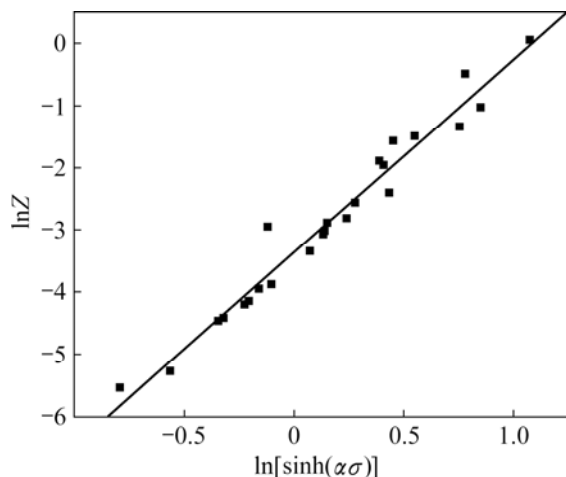


图 5 Z 参数和流动应力的关系

Fig.5 Relationship between parameter Z and flow stress

联立式(5)和(6), 得到

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

两边取自然对数, 得

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

由此可看出, n 为 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的斜率, $\ln A$ 为其截距, $\ln A = 34.67945$, $A = 1.15 \times 10^{16}$, 则

$$\dot{\varepsilon} = 1.15 \times 10^{16} [\sinh(0.0075\sigma)]^{6.95} \exp\left(\frac{-182.65}{RT}\right)$$

3 结论

1) 在 250~350 温度区间, AZ91D 镁合金高温

压缩变形行为受变形温度和应变速率的影响较大, 流变应力随变形温度的升高而降低, 随应变速率的升高而升高。AZ91D 镁合金为正应变速率材料, 其应变速率敏感指数 $m=0.14$ 。

2) 通过对流变应力的分析计算了 AZ91D 镁合金高温变形的基本材料常数, 结构因子 A 为 1.15×10^{16} , 应力水平参数 α 为 0.0075, 应力指数 n 为 6.95, 热变形激活能 Q 为 182.65 kJ/mol。其流变应力行为满足双曲正弦关系。

REFERENCES

- [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] AGHION E, BRONFIN B, ELIEZER D. The role of the magnesium industry in protecting the environment[J]. J Mater Process Technol, 2001, 117: 381-385.
- [3] 郭强, 严红革, 陈振华, 张辉. Mg-Al-Zn 系合金高温压缩流变应力研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(3): 75-79.
GUO Qiang, YAN Hong-ge, CHEN Zhen-hua, ZHANG Hui. Flow stress of Mg-Al-Zn alloys during hot compression deformation at elevated temperatures[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(3): 75-79.
- [4] 刘静安, 盛春磊. 镁及镁合金的应用及市场发展前景[J]. 有色金属加工, 2007, 36(2): 1-6.
LIU Jing-an, SHENG Chun-lei. Market development and application prospect of magnesium and its alloy[J]. Non-ferrous Metals Processing, 2007, 36(2): 1-6.
- [5] DU Zhi-hui, ZHANG Xu-hu, FANG Xi-ya, ZHANG Xiao-juan, CHEN Yong-lai, ZHANG Yu-wei. Hot compression deformation behavior of MB26 magnesium alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17(2): 400-404.
- [6] 王春艳, 吴昆, 郑明毅. ZK60 和 $Al_{18}B_4O_{33w}$ /ZK60 高温压缩流变应力行为的研究[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(2): 202-206.
WANG Chun-yan, WU Kun, ZHENG Ming-yi. Flow stress behavior of ZK60 and $Al_{18}B_4O_{33w}$ /ZK60 during hot compression deformation at elevated temperature[J]. Materials Science & Technology, 2007, 15(2): 202-206.
- [7] 李淑波, 吴昆, 郑明毅, 姚忠凯. SiC_w /AZ91 复合材料及 AZ91 镁合金的高温压缩变形的研究[J]. 材料工程, 2003, 2: 15-18.
LI Shu-bo, WU Kun, ZHENG Ming-yi, YAO Zhong-kai. Study of the high temperature compression deformation of SiC_w /AZ91 composite and AZ91 magnesium alloy[J]. Material Engineering, 2003, 2: 15-18.

- [8] 栾娜, 李落星, 李光耀, 钟志华. AZ80 镁合金的高温热压缩变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(10): 1678–1684.
LUAN Na, LI Luo-xing, LI Guang-yao, ZHONG Zhi-hua. Hot compression deformation behaviors of AZ80 magnesium alloy at elevated temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(10): 1678–1684.
- [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: China Machine 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: Beijing: China Machine 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, transl. 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 Materialia, 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, 王战峰, 张辉. 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, 17(10): 1667–1671.
WU Wen-xiang, SUN De-qing, CAO Chun-yan, WANG Zhan-feng, ZHANG Hui. Flow stress behavior of 5083 aluminium alloy under hot compression deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(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(5): 1175–1180.

(编辑 龙怀中)