材料分析及测试

挤压态 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金热变形行为研究

肖远伦^{1,2}, 赵军^{1,2}, 李祖荣^{1,2}, 张朝荣^{1,2}, 赵强^{1,2}, 柏遇合¹, 吴道勋¹, 夏祥生^{1,2}

2. 国防科技工业精密塑性成形技术研究应用中心, 重庆 400039)

摘要:目的 研究挤压态 Mg-8.90Gd-5.11Y-3.10Zn-0.47Zr 高强镁合金在变形温度 $300\sim500$ $^{\circ}$ $^{\circ}$

关键词: Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金: 高温压缩行为: 流变应力: 激活能

DOI: 10.3969/j. issn. 1674-6457. 2014. 01. 009

中图分类号: TG146.22 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2014)01-0049-05

Hot Deformation Behaviour of Extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy

XIAO Yuan-lun^{1,2}, ZHAO Jun^{1,2}, LI Zu-rong^{1,2}, ZHANG Chao-rong^{1,2}, ZHAO Qiang^{1,2}, BAI Yu-he¹, WU Dao-xun¹, XIA Xiang-sheng^{1,2}

Southwest Research Institute of Technology Engineering, Chongqing 400039, China;
 National Defense Research and Application Centre of Precision Plastic Forming Technology, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Objective To study the hot deformation behaviors of extruded Mg−8.90Gd−5.11Y−3.10Zn−0.47Zr alloy. **Methods** High-temperature uniaxial compression tests were conducted using Gleeble−1500D simulated machine. **Results** Hot compression tests were carried out in the temperature range of 300 ~ 500 °C and strain rate of 0.001 ~ 1 s⁻¹. The flow stress decreased with increasing temperature at a given strain rate, while it increased with increasing strain rate at a given deformation temperature. Exponential law, power exponential law and hyperbolic sine law were used to describe the hot deformation behavior, among which hyperbolic sine law fitted the best, and the liner regression coefficient reached 0.974 484. The deformation activation energy decreased with increasing temperature. **Conclusion** The hot deformation behavior can be described by the hyperbolic sine law, and the deformation activation energy and stress exponent were calculated as 234.0476 kJ/mol and 3.860 86, respectively.

KEY WORDS: Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy; high-temperature compression behavior; flow stress; deformation activation energy

镁合金作为密度最低的工程结构材料,其在 航空航天、国防军工和汽车领域有着非常广阔的 应用前景[1-2],但目前的商用镁合金,如 AZ31, AZ80,ZK60等,由于高温强度偏低、耐热耐蚀等性 能较差,从而限制了镁合金的应用范围。研究表 明,向镁合金中添加 Gd,Y,Nd 等稀土元素后,由 于稀土元素具有较好的固溶和时效强化效果,可 以大幅度提高镁合金的室温及高温力学性能[3-4]。 加之,稀土元素还具有熔体净化,以及易在合金表 面形成一层稀土氧化物,能够大幅度提高合金的 耐蚀性能,稀土镁合金的研究开发已成为镁合金 的一个重要研究方向[5-9]。随着节能减排任务加 重,相关行业对镁合金精密成形零件的要求越来 越高,如采用传统的以铸坯为原材料进行精密成 形零件的生产,其精密成形件的力学性能达不到 相关行业的要求。为提高锻件性能,唯一的方法 就是采用经过变形后(如挤压、锻造等)的镁合金 作为原始坯料进行下料。镁合金为密排六方结 构,能够开动的滑移系相比于铝合金要少,导热系 数也较大,变形温度区间窄,成形件常常晶粒粗大, 更有甚者存在变形开裂[10-12]。以此为背景,文中以 挤压态的高强 Mg-8.90Gd-5.11Y-3.10Zn-0.47Zr 合金为研究对象,分析了合金的流变应力特征,得到 了合金的变形激活能和应力指数等材料常数,为此 合金锻造工艺的制定提供了必要的理论基础及试验 依据。

1 试验材料及方法

实验合金的成分为 Mg-8.90Gd-5.11Y-3.10 Zn-0.47Zr (%,质量分数),合金采用半连续法制备,铸锭规格为 Φ 160 mm×3000 mm,将铸锭进行均匀化处理之后,在400 ℃下进行成 Φ 45 mm 的棒材。沿挤压棒材 1/2 半径处切取 Φ 8 mm×12 mm 的热压缩试样。为了减小试样与压头之间的摩擦力,在试样两端分别添加钽片与石墨片作为润滑剂,采用Gleeble-1500D 热模拟机进行进行高温单轴压缩试验,以 3 ℃/s 的升温速率至指定变形温度后保温 5 min,以消除试样内部的温度梯度,压缩变形的温度为300~500 ℃,应变速率为0.001~1 s⁻¹,压缩试验完成后立即水淬。

2 结果及分析

2.1 变形条件对流变应力的影响

2.1.1 流变应力特征

图 1 所示为 Mg-8.90Gd-5.11Y-3.10Zn-0.47 Zr 合金在指定变形条件下的实测流变应力-应变曲线。可见,曲线具有典型的动态再结晶特征,应力随着应变速率的升高或变形温度的降低而增加。在较低变形温度下,在变形初期,合金的流变应力随着应变量的增加而迅速增加,存在明显的加工硬化;当流变应力到达最大值之后,随着应变的增加流变应力逐渐降低,进一步增加应变量,发生了明显的二次加工硬化。在高温低应变速率条件下,当应力值达最大后,基本不随变形量的变化而改变,呈现出典型的稳态流变特征。

流变应力-应变曲线的变化是材料变形机理的宏观表现。在变形的初期,因塑性变形位错产生塞积并繁殖,此时还未达到发生动态再结晶的临界条件,加工硬化明显;随着应变量的增加,由于位错的增殖其密度逐渐升高,原子贮能提高,再结晶的驱动力增大,当达到再结晶形核的临界条件时,动态再结晶与动态回复的软化机制开始起作用,导致加工硬化速率降低;当两者趋于平衡时,得到了峰值应力;而后软化作用加强,应力随应变量的增大而逐渐降低;随应变量的进一步增加,在再结晶晶粒中发生了二次加工现象,其变形机理与变形初期一致。

2.1.2 应变速率对流变应力的影响

合金高温塑性变形是一个受热激活控制的过程,合金的变形温度(T)、流变应力(σ)、应变速率($\dot{\varepsilon}$)通常可以采用以下 3 种关系表达式加以描述[13-15]:

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

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

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

其中:A,A₁,A₂,n,n₁, α , β 为材料常数,其中 n₁, α 和 β 之间满足 $\alpha = \beta/n$ ₁;R 为气体常数(8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹);Q 为变形激活能,其值的大小直接反

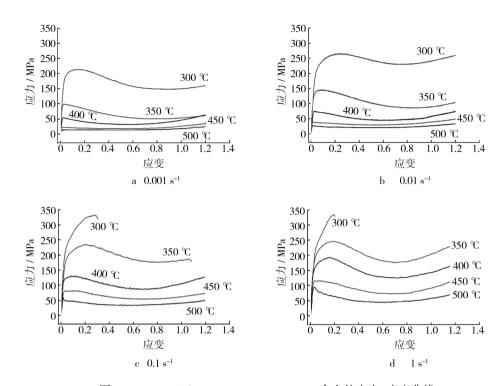


图 1 Mg-8.90Gd-5.11Y-3.10Zn-0.47Zr 合金的应力-应变曲线 Fig. 1 Flow stress-strain curves of the Mg-8.90Gd-5.11Y-3.10Zn-0.47Zr alloy

映了热变形的难易程度;T为热力学温度(K)。

分别对式(1)-(3)两边取对数,可以得到:

$$\ln \dot{\varepsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A_1 - Q/(RT) \tag{4}$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \beta \sigma + \ln A_2 - Q/(RT) \tag{5}$$

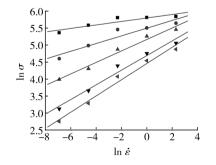
$$\ln \dot{\varepsilon} = n \ln \left[\sinh(\alpha \sigma) \right] + \ln A - Q/(nRT) \tag{6}$$

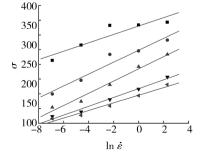
将相关参数代入式(4)-(6),可以得到相应的 应变速率-流变应力关系见图 2。图 2 中的一元线 性回归的相关系数如表 1 所示,可见,除了温度为 300 ℃的线性回归系数较低外,其他条件下的线形 关系均较好吻合,其中回归系数最高的是双曲正弦

表 1 不同关系曲线拟合的回归系数

Table 1 Correlation factors (R) of the different fitted lines

温度	不同关系下的 R 值				
$^{\circ}$ C	$\ln \dot{\varepsilon}$ – $\ln \sigma$	$\ln \dot{\varepsilon}$ – σ	$\ln \dot{arepsilon}$ - $\ln [\sinh(lpha\sigma)]$		
300	0.909 55	0.919 54	0.919 29		
350	0.949 44	0.969 94	0.967 93		
400	0.988 78	0.989 56	0.993 87		
450	0.986 73	0.991 53	0.995 41		
500	0.990 30	0.985 71	0.995 92		





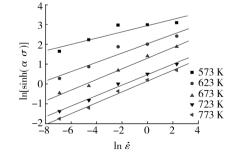


图 2 σ 与 $\dot{\varepsilon}$ 的关系

Fig. 2 The relationship between σ and $\dot{\varepsilon}$

函数关系。因此,本合金高温压缩塑性形变时的应变速率-流变应力关系,满足双曲正弦函数公式(3),整个应力水平下应变速率对流变应力的影响关系可以采用双曲正弦函数来描述。

2.1.3 温度对流变应力的影响

温度与应变速率之间的关系可用式(7)进行表述:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^{n}$$
 (7)

当变形速率一定时,在一定变形温度范围内,假定热变形激活能 Q 与温度 T 无关,对式(7)两边分别取对数得:

$$\ln \dot{\varepsilon} + Q/RT = \ln A + n[\sinh(\alpha\sigma)]$$
 (8)
而式(8)可以改写为如下的形式:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = A' + 1000 \frac{B'}{T} \tag{9}$$

可以将相应的参数代入式(9)中,从而可以得到相应的温度-应力关系曲线,见图 3。从图 3 中可以看出,当应变速率保持恒定时,温度倒数和峰值应力的双曲正弦对数之间满足线性关系。

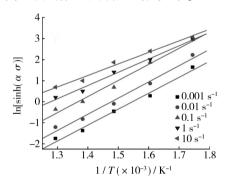


图 3 σ 与 T 的关系

Fig. 3 The relationship between σ and T

2.2 材料常数确定及变形激活能

应力、温度、速率之间的关系可以采用双曲正弦函数公式来描述,对式(6)两边取偏微分,可得:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln \left[\sinh (\alpha \sigma) \right]} \right\}_{T} \left\{ \frac{\partial \ln \left[\sinh (\alpha \sigma) \right]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\varepsilon}} = Rn\lambda$$
(10)

式中:第1项应力指数n为 $\ln \varepsilon$ - $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线的斜率;第2项 λ 为 1/T- $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线的斜率。取图 2ε 与图 3 中拟合曲线斜率的倒数平均值,从而可得 350,400,450,500 $\mathbb C$ 下的应力指数n分别为 4.268 22,3.730 79,3.788 02,3.656 31,可得应力指数的平均值为 3.860 86。同理,可求得

0.001,0.01,0.1,1 s^{-1} 下的值分别为 7.561 84, 7.683 61,7.637 45,6.282 82,从而可得 λ 的平均值为 7.291 43。将不同温度及应变速率下的应力指数值及 λ 值代入式(10)中,可以得到不同温度及应变速率下的变形激活能,结果见表 2。

表 2 不同变形条件下合金的变形激活能

Table 2 Deformation activation energy of the alloy under different conditions

kJ/mol

温度/℃	应变速率/s ⁻¹			
	0.001	0.01	0.1	1
350	268. 3393	272.6604	271.0224	222.952
400	234. 5519	238.3286	236. 8968	194.8792
450	238. 1502	241.9845	240.5308	197.8686
500	229.8700	233.5707	232. 1675	190.9887

由表 2 可知,温度与应变速率对合金的变形激活能都存在明显的影响,合金的变形激活能随着变形温度的升高呈现下降的趋势,这是由于在高温下,以动态再结晶、回复等为主的软化机制占主导地位。从表 2 也可以看出,合金在应变速率为 0.001 ~ 0.1 s⁻¹区间内,合金的变形激活能的变化幅度不大,这可以充分说明在此条件下,合金对应变速率不敏感,合金具有相同的塑性变形机制。由表 2 可以得到合金的变形激活能为 234.0476 kJ/mol。

3 结语

- 1) 对于 Mg-8.90Gd-5.11Y-3.10Zn-0.47Zr 镁合金,应力-应变曲线表现出了明显的动态再结晶特征,流变应力随应变速率的升高或变形温度的降低而增加。
- 2) 在热变形过程中,双曲正弦函数的线性回归 系数最高,其可以用来描述整个应力水平下流变应 力、变形温度、应变速率之间的关系。
- 3) 基于采用双曲正弦函数关系,合金的应力指数和平均热激活能分别为: n = 3.86086, Q = 234.0476 kJ/mol。

参考文献:

[1] 余琨,黎文献,王日初,等.变形镁合金的研究、开发及应用[J].中国有色金属学报,2003,13(2):277—288.

- YU Kun, LI Wen-xian, WANG Ri-chu, et al. Research, Development and Application of Wrought Magnesium Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2);277—288.
- [2] 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 Alloys Processing and Its Application [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [3] 李永军,张奎,李兴刚,等. 挤压变形对 Mg-5.0Y-7.0 Gd-1.3Nd-0.5Zr 合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2010,20(9):1692—1697.

 LI Yong-jun, ZHANG Kui, LI Xing-gang, et al. Influence of Extrusion on Microstructures and Mechanical Properties of Mg-5.0Y-7.0Gd-1.3Nd-0.5Zr Magnesium Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010,20(9):1692—1697.
- 能研究[J]. 稀有金属材料与工程,2011,40(4):635—639.

 MA Ming-long, ZHANG Kui, LI Xing-gang, et al.
 Study on the Mierostruetures and Properties of GWN751K
 Magnesium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineer-

ing,2011,40(4):635-639.

马鸣龙,张奎,李兴刚,等. GWN751K 镁合金组织和性

- [5] ZHANG Kui, LI Xing-gang, LI Yong-jun, et al. Effect of Gd Content on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Y-RE-Zr Alloys [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2008, 18(s1);s12—s16.
- [6] ANYANWU I A, KAMADO S, KOJIMA Y. Creep Properties of Mg-Gd-Y-Zr alloys [J]. Materials Transactions, 2001, 42(1):1212-1218.
- [7] KUBÁSEK J, VOJTĚCH D. Structural and Corrosion Characterization of Biodegradable Mg-RE (RE = Gd, Y, Nd) Alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 22(5);1215—1225.
- [8] TANG Lie-chong, LIU Chu-ming, Chen Zhi-yong, et al. Microstructures and Tensile Properties of Mg-Gd-Y-Zr

- Alloy during Multidirectional Forging at 773 K[J]. Materials & Design, 2013, 50(5); 587—596.
- [9] XIA Xiang-sheng, ZHANG Kui, LI Xing-gang, et al. Mi-crostructure and Texture of Coarse-grained Mg-Gd-Y-Nd-Zr Alloy after Hot Compression [J]. Materials & Design, 2013, 44(5):521—527.

[10] 夏祥生,李兴刚,马鸣龙,等. 粗晶 Mg-6.8Gd-4.5Y-

1.1Nd-0.5Zr 合金高温变形行为研究[J]. 材料热处理学报,2012,33(9):30—35.

XIA Xiang-Sheng, LI Xing-gang, ZHANG Kui, et al. Hot Compression Deformation Behavior of Mg-6.8Gd-4.

5Y-1.1Nd-0.5Zr Alloy[J]. Transactions of Materials

and Heat Treatment, 2012, 33(9):30-35.

- [11] 范永革,汪凌云. 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. FAN Yong-ge, WANG Ling-yun. Instability Flow Characteristics of AZ31 Magnesium Alloy at Moderate Temperature [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005,15(10):1602—1606.
- [12] 郭强,严红革,陈振华,等. 多向锻造工艺对 AZ80 镁合金显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报,2006,42(7):739—744.

 GUO Qiang, YAN Hong-ge, CHEN Zhen-hua, et al. Effect of Multiple Forging Process on Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy AZ80[J]. Acta Metallurgica sinica,2006,42(7):739—744.
- [13] XIA Xiang-sheng, CHEN Qiang, ZHANG Kui, et al. Hot Deformation Behavior and Processing Map of Coarse grained Mg-Gd-Y-Nd-Zr alloy [J]. Materials Science and Engineering A,2013,587(10);283—290.
- [14] XU Yan, HU Lian-xi, DENG Tai-qing, et al. Hot Deformation Behavior and Processing Map of As-cast AZ61 Magnesium Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2013,559(6):528—533.
- [15] McQUEEN H J, RYAN N D. Constitutive Analysis in Hot Working[J]. Materials Science and Engineering A,2002, 322(1/2);43—63.