文章编号: 1004-0609(2011)12-2987-08

Mg-Gd-Y-Zr 合金热变形本构方程

张新明, 吴懿萍, 邓运来, 唐昌平

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要:采用 Geeble-1500 热模拟实验机测试了高强耐热 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金在变形温度为 300~500 ℃、应变 速率为 10⁻³~1 s⁻¹下的流变力学行为,采用扫描电子显微镜对其微观组织进行观察,分析了幂函数(PI)、指数函数 (EI)和双曲正弦函数(SI)半经验本构方程对该合金变形行为拟合的适用性。结果表明: EI 拟合实验结果精度大于 PI 和 SI 的,即使对 SI 函数中材料常数α进行一定优化处理得到 SIO 函数的拟合精度,也与 EI 函数十分接近。 合金中高温耐热相提高合金高温下的强度是 EI 拟合优于 PI 和 SI 的原因。

Constitutive equation during hot compression deformation of Mg-Gd-Y-Zr alloy

ZHANG Xin-ming, WU Yi-ping, DENG Yun-lai, TANG Chang-ping

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Three kinds of constitutive equations, power law (PI), expression law (EI) and sine hyperbolic law (SI) were used to analyze the flow behavior of the Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy after compression at temperatures of 300–500 °C and strain rates of 10^{-3} –1 s⁻¹ by using Geeble–1500 test machine. The microstructures were studied using scanning electron microscope (SEM). The results show that EI fits the experimental results better than PI and SI. And even, the sine hyperbolic law with the optimization of material parameter α (SIO) exhibits the close precision to EI. The precipitated heat-resisting phase after compression is the reason for EI better fitting than PI and SI.

Key words: Mg-Gd-Y-Zr alloy; hot compression deformation; constitutive equation; material parameter optimization

高强耐热镁合金在航空航天中应用越来越广 泛^[1],但镁合金属于 HCP 结构金属,室温条件下伸长 率偏低,塑性加工性能差,故实际应用的镁合金材料 大都采用热变形,而流变力学规律与微观组织形成机 理是热加工的基础,因而受到广泛关注^[2-4]。

研究镁合金热变形行为时,一般使用幂函数、指数函数和双曲正弦函数这3种本构方程对其流变力学规律进行表征。其中,在研究 ZK60 合金的热压缩变形行为时,本文作者指出在变形温度分别为 423 K 和 423~723 K 范围内宜对应采用指数函数和幂函数形式本构方程进行拟合,则两者都能够得到最佳结果^[5]。

GUO 等^[6-7]在研究 AZ31 合金热压缩流变力学行为时 指出,低于 350 ℃下时适合用指数函数拟合,高于 350 ℃则适合用幂函数拟合。同时,也有作者指出分 别使用幂函数和双曲正弦函数拟合 AZ31 合金热压缩 变形行为时得到的拟合结果相差不大^[8]。由上可见, 拟合同种 ZK60 合金的热压缩变形行为时,在不同的 变形条件下宜采用不同类型本构方程才能得到各自最 佳的拟合结果;在拟合 AZ31 合金热压缩变形行为时 本构方程采用方案也有所不同。不同于 ZK 和 AZ 系 列合金,Mg-Gd-Y-X 系合金高温性能优异^[9],热压缩 变形时比前两种合金流变应力较大,文献[3, 10]中采

收稿日期: 2010-11-12; 修订日期: 2011-04-08

基金项目: 国防预研基金资助项目(51312010503)

通信作者: 张新明, 教授, 博士; 电话: 0731-88830265; E-mail: wuyipingjia@126.com

用双曲正弦函数拟合该系列合金热变形行为,其中材 料常数(α)设为幂函数硬化指数(n)与指数函数硬化系 数(β)的比值($\alpha = \beta/n$),而至今很少有研究涉及对比 幂函数、指数函数和双曲正弦函数 3 种类型本构方程 拟合 Mg-Gd-Y-X 系合金热变形行为时的优劣。

本文作者以一种 Mg-Gd-Y-Zr 合金为试验材料, 采用幂函数、指数函数和双曲正弦函数 3 种类型本构 方程拟合了该合金热压缩流变行为,综合分析了这 3 种函数拟合时的优劣,并对双曲正弦函数的材料常数 α进行优化处理以提高其拟合精度。在此基础上,结 合组织扫描讨论了本构方程拟合该合金热变形行为不 同适应性的微观机理,期望能对揭示 Mg-Gd-Y-X 系合 金的热变形规律提供有益参考。

1 实验

热压缩试验材料为自制铸态 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 稀 土镁合金(简称 GW63)。在热压缩前铸锭经过 520 ℃、 24 h 均匀化处理。热压缩试样(*d* 10 mm×15 mm)用线 切割机进行切取。热压缩试验在 Gleeble-1500 热模拟 试验机上进行:变形温度为 300~500 ℃,应变速率为 10⁻³~1 s⁻¹,最大真应变为 0.6。热压缩前试样两端涂 抹含石墨的固体润滑剂以减小变形时的摩擦。热压缩 时 1 min 内升温到变形温度并保温 3 min,以尽量保证 试样压缩时温度均匀。所有试样热压缩变形完成后迅 速水冷以固定高温变形结束时的显微组织。热压缩变 形后的试样沿垂直于压缩轴剖切,经粗磨、精磨、抛 光和腐蚀后在 Sirion200 场发射扫描电子显微镜下观 察微观组织,并分析合金中耐热相成分。根据计算机 采集的载荷一位移数据按体积不变原理绘制真应力— 真应变曲线。

2 结果及分析

2.1 真应力—真应变曲线

GW63 合金圆柱形试样热压缩变形的真应力一真 应变($\sigma - \varepsilon$)曲线如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 变形开始阶段(约 $\varepsilon \leq 0.05$),应力随应变上升很快,但



Fig.1 True stress—strain curves of alloy under thermal compress at different temperatures and strain rates: (a) $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\varepsilon} = 10^{-1} \text{ s}^{-1}$; (d) $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

达到峰值应力(σ_p)所需应变 (ε_p)相差很大,各试验条 件下 ε_p 的范围为 0.05 $\leqslant \varepsilon_p \leqslant 0.35$ 。 σ_p 及其对应的应 变 ε_p 均随温度降低和应变速率升高而增大。当应力达 到峰值后, $\sigma - \varepsilon$ 曲线分为两类,一类是下降型(D型), 即应力开始随应变的增加而不断降低;另一类是稳定 型(S型),即应力基本不随应变的增加而增加。 $\sigma - \varepsilon$ 曲线的 D型或 S型特征明显受 ϵ 和 T的耦合作用,如 在应变速率较低(10⁻³~10⁻² s⁻¹)的情况下,D型曲线出 现在温度为 300~350 ℃;随应变速率升高到 1 s⁻¹,温 度为 400~450 ℃时, $\sigma - \varepsilon$ 曲线也转变为 D型。

值得特别注意的是温度为 300 ℃、应变速率为 10⁻³ s⁻¹时达到峰值应力后,仍能维持稳态变形,但升 高应变速率,变形达到峰值应力后试样均失稳断裂。 因此,此后计算热变形参数时不考虑温度为 300 ℃时 的数据以便得到更加精确的拟合结果。

2.2 热变形本构方程

一般金属材料热变形可视为热力学过程,引入变 形表观激活能(*Q*)的概念,热变形的变形温度与应变速 率条件可采用带激活能项的 Zener-Hollomon(*Z*)参数 描述(见式(1))。在 $\sigma - \dot{\epsilon} - T$ 作为独立变量的前提下, 热变形本构方程有幂函数(式(2))(简称 PI)、指数函数 (式(3))(简称 EI)和双曲正弦函数(式(4))(简称 SI) 3 种半 经验类型的表征方案,它们均可转化为 $\sigma = f(Z)$ 型函 数。

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp[Q/(RT)] \tag{1}$$

 $\dot{\varepsilon} = A_{\rm EI} \exp(\beta_{\rm EI}\sigma) \exp[-Q/(RT)] \ \vec{\boxtimes} \ Z = A_{\rm PI}\sigma^{n_{\rm PI}}$ (2)

 $\dot{\varepsilon} = A_{\rm EI} \exp(\beta_{\rm EI}\sigma) \exp[-Q/(RT)] \ \ z = A_{\rm EI} \exp(\beta_{\rm EI}\sigma)$ (3)

$$\dot{\varepsilon} = A\sinh(\alpha\sigma)^n \exp[-Q/(RT)] \ \ \vec{\Sigma} \ Z = A\sinh(\alpha\sigma)^n$$
(4)

式中: σ 是流变应力, MPa; *R* 是气体常数, 8.314 J/(mol·K); $A_{\text{PI}} \propto A_{\text{EI}} \propto A$ 是应变独立因子, s⁻¹; n_{PI} 和 *n* 是应力指数; β_{EI} 是硬化系数; α 是应力因子, MPa⁻¹, 且 $\alpha = \beta_{\text{EI}} / n_{\text{PI}}$ 。

一般认为, PI 形式(式(2))适用于低应力水平, EI 形式(式(3))适用于高应力水平^[11], SI 形式(式(4))适用 于较宽的应力与应变速率范围^[12-13]。然而,应力水平 的高低并没有严格的衡量指标,只能依具体情况而定, 这就意味着对于同类型合金,有必要对上述 3 类本构 方程函数的适应性进行全面的验证。以下内容将采用 上述 3 种类型函数分别对实验合金流变行为进行拟 合,求解相应的材料常数并进行优劣性验证。拟合数 据的范围如下:变形温度为 350~500 ℃,应变速率为 10⁻³~1 s⁻¹。

从 幂 函 数 (PI) 出 发, 作 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma \pi \ln \sigma - 10^{3} (RT)^{-1}$ 关系图(见图 2), 按 $Q_{PI} = K_T K_{n_{PI}}$ 可得应变速 率为 $10^{-3} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 时各变形温度下的表观激活能 Q_{PI} , 如 表 1 中所列。取表 1 中 PI 下数据的算术平均,得 $Q_{PI}^{A} = 286.44 \text{ kJ/mol}$ 。

从指数函数(EI)出发,作 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma 和 \sigma - 10^{3} (RT)^{-1}$ 关系图(见图 3),按 $Q_{\text{EI}} = K_T K_{\beta_{\text{EI}}}$ 同样可得应变速率为 $10^{-3} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 时各变形温度下的表观激活能 Q_{EI} ,如表 1 中所示。取表 1 中 EI 下数据的算术平均数,得 $Q_{\text{EI}}^{\text{A}} = 254.65 \text{ kJ/mol}$ 。

从双曲正弦函数(SI)出发,按文献[14]中常用的方 法,从图 2(a)和 3(a)中可得到各变形条件下的 $n_{\rm PI}$ 和 $\beta_{\rm EI}$ 值,进一步可得到 $\alpha_{\rm SI} = \beta_{\rm EI} / n_{\rm PI} = 0.009 2 \text{ MPa}^{-1}$ 。 图 4 所示为 $\ln \dot{\varepsilon}$ — $\ln[\sinh(\alpha_{\rm SI}\sigma)]$ 和 $\ln[\sinh(\alpha_{\rm SI}\sigma)]$ —





表 1 变形速率为 10^{-3} ~1 s⁻¹时各变形温度下各本构方程获得的合金的表观激活能 Q

Table 1 *Q* of alloy at different deformation temperatures and strain rates of 10^{-3} –1 s⁻¹ by using different constitutive equations

Constitutive equation		Mean			
	350 ℃	400 °C	450 ℃	500 ℃	(kJ·mol ⁻¹)
PI	582.17	252.74	173.26	137.6	286.44
EI	316.71	217	220.02	264.87	254.65
SI	428.08	244.37	192.7	165.99	257.79
SIO	324.19	221.53	219.85	246.17	252.94

PI: Power law; EI: Expression law; SI: Sine hyperbolic law; SIO: SI with optimization of material parameter α .



Fig.3 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ (a) and $\sigma - 10^3 (RT)^{-1}$ (b) curves under EI

 $10^{3}(RT)^{-1}$ 关系图,根据 $Q_{SI} = K_T K_{n_{SI}}$ 同样可得应变速 率为 $10^{-3} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 时各变形温度下的表观激活能 Q_{SI} ,如表 1 中所列。取表 1 中 SI 下数据的算术平均数值,得 $Q_{SI}^{A} = 257.79 \text{ kJ/mol}$ 。



图 4 SI 下的 $\ln \dot{\varepsilon}$ — $\ln[\sinh(\alpha_{SI}\sigma)]$ 和 $\ln[\sinh(\alpha_{SI}\sigma)]$ — $10^{3}(RT)^{-1}$ 曲线

Fig.4 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha_{\rm SI}\sigma)]$ (a) and $\ln[\sinh(\alpha_{\rm SI}\sigma)] - 10^3 (RT)^{-1}$ (b) curves under SI

获得上述 PI、EI、SI 3 个函数所定义的 $n_{\rm PI}$ 、 $\beta_{\rm EI}$ 、 $\alpha_{\rm SI}$ 以及变形表观激活能 $Q_{\rm PI}^{\rm A}$ 、 $Q_{\rm EI}^{\rm A}$ 、 $Q_{\rm SI}^{\rm A}$ 后,依照式 (1)~(4)可进一步求出上述函数中的 $A_{\rm PI}$ 、 $A_{\rm EI}$ 、 $A_{\rm SI}$ 等 材料常数,如图 5(a)~(c)所示。图 5(a)~(c)的数据点及 其线性拟合结果表明,上述 3 个函数均能建立本研究 中 GW63 镁合金热变形的 $\sigma = f(Z)$ 型本构方程。在本 研究中,根据式(5)用这些函数预测应力值(σ^i)与试验 值($\sigma_{\rm P}^i$)间的标准方差(δ)作为判据来检验上述 3 个函 数的拟合精度,计算得 δ 由小到大的顺序为 EI(9.83)、 SI(16.78)、PI(44.87)。可见,拟合 GW63 合金变形行 为时, EI 比 SI 更加接近试验值。EI 函数适合在高应 力下使用,而 Mg-Gd-Y-X 系合金属于高强耐热合 金^[15-17],因此,这也符合本研究在拟合 GW63 合金热 变形时指数函数(EI)较双曲正弦函数(SI)更加精确的 实验事实。



图5 Z 与σ的关系

Fig.5 Relationship between *Z* and peak stress σ of alloys under hot compression deformation: (a) ln*Z*—ln σ ; (b) ln*Z*— σ ; (c) ln*Z*—ln[sinh($\alpha_{SI}\sigma$)]; (d) ln*Z*—ln[sinh($\alpha_{SI}\sigma$)]

然而,如图 2(a)和 3(a)所示,幂函数(PI)中材料常数 $n_{\rm PI}$ 和指数函数(EI)中 $\beta_{\rm EI}$ 是分别通过 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 和 $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 线性拟合得到的,因此,无法对其进行相关数学处理。而 SI 中材料常数 α 是通过关系式 $\alpha = \beta_{\rm EI} / n_{\rm PI}$ 获得,有一定的数学物理基础,可以对 α 进行优化处理,本研究中采用式(5)对 SI 函数中的材料常数 α 值进行优化,并记优化后的 SI 为 SIO 函数。

$$\begin{cases} \alpha_{\rm SI} / 10 \leqslant \alpha \leqslant 10 \alpha_{\rm SI} \\ \delta = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\sigma^{i} - \sigma_{\rm P}^{i})\right]_{\rm min}} \end{cases}$$
(5)

式中: σ^i 为按式(2)~(4)计算的各 $\dot{\varepsilon}$ —T条件下的应力 值; σ^i_p 为对应条件下的峰值应力。

在双曲正弦函数中,根据式(5)基于 Matlab 平台进 行编程,通过程序搜索得到最小的 δ 值为 9.17,此时 得到 SIO 函数下的 $\alpha_{SIO}=0.033$ MPa⁻¹,把此值代入 SIO 函数,则类似可按 $Q_{SIO}=K_T K_{n_{SIO}}$ 得到应变速率为 10^{-3} ~1 s⁻¹时各变形温度下的表观激活能 Q_{SIO} 如表1所列,取表中SIO下数据的算术平均值,得 Q_{SIO}^{A} =252.94kJ/mol。 A_{SIO} 可由图 5(d)求出为 exp33.89,由图可直观看出SIO下的线性拟合误差小于图 5(a)~(c)的。

综上可知,在使用 PI、EI 和 SI 函数拟合实验合 金热压缩变形行为时,由δ检验结果知 EI 拟合优于 SI。PI、EI 与 SI 对本研究 GW63 合金的适应性与文献 报道的 AZ 系列合金的不同,出现这种情况可能与 Mg-Gd-Y-X 系列合金的高温下强度高有关。在相同的 高温变形条件下,该系合金的强度远高于 AZ 系列合 金的,所以,适用于较高应力水平的指数函数(EI)本 构方程更加接近实验结果。若对 SI 函数中材料常数α 进行优化处理,则最终δ由小到大依次为 SIO、EI、 SI、PI,可见,优化处理对提高双曲正弦函数的精度 具有非常重要的意义。本文作者提出的方法(式(5))提 高预测精度的效果十分明显,如果不进行材料常数优 化,在本研究的试验条件下,双曲正弦函数的精度低 于指数函数的精度。

3 讨论

在实验数据拟合范围设定为变形温度 350~500 ℃、应变速率 10⁻³~1 s⁻¹ 时,各本构方程下得到的表观 激活能变化趋势如图 6 所示(见表 1)。从图 6 中可以





看出,对 GW63 合金热压缩变形拟合较精确的 EI 和 SIO 函数下得到的表观激活能随变形温度变化规律相 似,均为先下降后升高,而在拟合性较差的 SI 和 PI 函数下表观激活能数值则一直呈下降趋势。由于 GW63 合金中稀土元素 Gd 与 Y 的原子半径较大,热 压缩后组织中仍然存在富 Gd 和 Y 的稀土粒子,如图 7 及表 2 所示,使得合金热压缩流变应力处于高应力 水平且表观激活能整体数值偏大。同时也看到,EI 和 SIO 函数在变形温度为 500 ℃时,表观激活能值升高, 这可能是 500 ℃变形时多系滑移启动导致的。

拟合 AZ 和 ZK 系列合金热压缩流变行为时,文 献均指出在较低温度下适合使用指数函数,温度升高 适合使用幂函数^[5-7]。签于此,本研究中重新将实验数 据拟合范围设定为:变形温度 400~500 ℃,应变速率 10^{-3} ~1 s⁻¹,分别使用 PI、EI、SI 和 SIO 本构方程拟合 实验合金在较高温度下的热压缩流变行为并分析其优 劣性。采用式(1)~(5)相同的方法计算得到此时各拟合 函数下合金的表观激活能(见表 3), δ 由小到大的顺序 为 SIO(3.58)、EI(5.38)、SI(6.78)、PI(24.05)。由此可 见,无论拟合时变形温度范围选为 350~500 ℃,还是 400~500 ℃,各本构方程拟合优劣性结果一致,均是 SIO 与 EI 函数拟合更加接近实验的 $\sigma - \varepsilon - T$ 结果。



图 7 变形温度为 350~500 ℃时合金的 SEM 像

Fig.7 SEM images of alloy compressed at 350–500 °C: (a) 350 °C, 10^{-3} s^{-1} ; (b) 400 °C, 10^{-2} s^{-1} ; (c) 450 °C, 1 s^{-1} ; (d) 500 °C, 1 s^{-1}

Table 2	EDS r	esults	of p	oint A	in	Fig.	7(d)
---------	-------	--------	------	--------	----	------	------

Element	Mass fraction/%
Mg	28.56
Y	43.70
Gd	27.74

表 3 变形温度为 350~500 ℃和 400~500 ℃时用 PI、EI、SI 和 SIO 得到的合金的表观激活能

Table 3Apparent activation energy attained by PI, EI, SI andSIO at temperatures of 350-500 °C and 400-500 °C

Temperature/°C	$E/(kJ \cdot mol^{-1})$					
	PI	EI	SI	SIO		
350-500	286.44	254.65	252.94	257.79		
400-500	201.7	194.38	196.09	194.88		

本研究中,指数函数(EI)形式适用于高应力水平的物理意义符合本研究的实验拟合事实,即 EI 拟合精度优于双曲正弦函数(SI)的。虽然对 SI 中材料常数 α 进行优化处理后得到了拟合精度略优于指数函数的 SIO 函数,然而优化式(5)中 α 值范围的选定是多次尝试搜索得到的最佳结果,计算过程相对于采用指数函数拟合时更加繁琐。在 Matlab 编好的程序中,假如输入的 α 值搜索范围内没有包含能够得到最小 δ 时的 α_{SIO} (0.033 MPa⁻¹)值,那么优化后的双曲正弦函数(SIO)也将得不到比 EI 函数更好的拟合结果。因此,拟合 GW63 合金热压缩流变行为时采用指数函数(EI)最简便且能保证足够的拟合精度。

4 结论

1) Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金中 Gd 和 Y 的原子半径 较大,合金中高温耐热富稀土相使得合金高温强度整 体升高,合金热压缩流变应力较大,得到的表观激活 能较高。

2) 拟合 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金热压缩变形行为时,采用指数函数(EI)本构方程拟合的精度高于幂函数(PI)和双曲正弦函数(SI)的,能得到最简便并与指数函数精度足够的拟合结果。

3) 采用对双曲正弦函数(SI)中材料常数α进行优化处理后的 SIO 函数拟合实验数据虽然能够得到比指数函数(EI)拟合精度略优的实验结果,但拟合时α取

值范围需多次搜索尝试并设定为[α_{SI} /10,10 α_{SI}]时才 能得到最佳的 α_{SIO} 值。

4) 变形温度为 350~500 ℃、变形速率为 0.001~
1 s⁻¹时,求解得到 α_{SIO} =0.033 MPa⁻¹,进而得到采用
SIO 拟合时合金热压缩变形表观激活能和常数 A 分别为 252.94 kJ/mol 和 exp33.89。

REFERENCES

- 张新明, 彭卓凯, 陈健美, 邓运来. 耐热镁合金及其研究进展
 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(9): 1443-1450.
 ZHANG Xin-ming, PENG Zhuo-kai, CHEN Jian-mei, DENG Yun-lai. Heat-resistant magnesium alloys and their development[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(9): 1443-1450.
- [2] PRASAD Y V R K, RAO K P. Processing maps for hot deformation of rolled AZ31 magnesium alloy plate: Anisotropy of hot workability[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 487(1/2): 316–327.
- [3] YANG Z, GUO Y C, LI J P, HE F, XIA F, LIANG M X. Plastic deformation and dynamic recrystallization behaviors of Mg-5Gd-4Y-0.5Zn-0.5Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 485(1/2): 487–491.
- [4] YANG Y Q, LI B C, ZHANG Z M. Flow stress of wrought magnesium alloys during hot compression deformation at medium and high temperatures[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 499: 238–241.
- [5] GALIYEV A, KAIBYSHEV R, GOTTSTEIN G. Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60[J]. Acta Materialia, 2001, 49(7): 1199–1207.
- [6] GUO Q, YAN H G, ZHANG H, CHEN Z H, WANG Z F. Behaviour of AZ31 magnesium alloy during compression at elevated temperatures[J]. Materials Science and Technology, 2005, 21(11): 1349–1354.
- [7] GUO Q, YAN H G, CHEN Z H, ZHANG H. Elevated temperature compression behaviour of Mg-Al-Zn alloys[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(6): 725–729.
- [8] FATEMI-VARZANEH S M, ZAREI-HANZAKI A, HAGHSHENAS M. A study on the effect of thermo-mechanical parameters on the deformation behavior of Mg-3Al-1Zn[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 497: 438–444.
- [9] 肖 阳,张新明,陈健美,蒋 浩,邓桢桢. 高强耐热 Mg-9Gd-4Y-0.6Zr 合金的性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 16(5): 850-855.
 XIAO Yang, ZHANG Xin-ming, CHEN Jian-mei, JIANG Hao, DENG Zhen-zhen. Performance of Mg-9Gd-4Y-0.6Zr alloy with high strength and heat resistance[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 16(5): 850-855.
- [10] LI L, ZHANG X M. Hot compression deformation behavior and

processing parameters of a cast Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A,

- [11] MCQUEEN H J, RYAN N D. Constitutive analysis in hot working[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 322(1/2): 43-63.
- [12] 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]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172(3): 372–380.
- [13] SLOOFF F A, ZHOU J, DUSZCZYK J, KATGERMAN L. Constitutive analysis of wrought magnesium alloy Mg-Al4-Zn1[J]. Scripta Materialia, 2007, 57(8): 759–762.
- [14] 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, 1988: 42.
 POIRIER J P. The plastic deformation of crystals at high temperature[M]. GUAN De-lin, transl. Dalian: Dalian University of Science and Technology Press, 1988: 42.

- [15] HE S M, ZENG X Q, PENG L M, GAO X, NIE J F, DING W J. Microstructure and strengthening mechanism of high strength Mg-10Gd-2Y-0.5Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 427(1/2): 316–323.
- [16] YANG Z, LI J P, GUO Y C, LIU T, XIA F, ZENG Z W, LIANG M X. Precipitation process and effect on mechanical properties of Mg-9Gd-3Y-0.6Zn-0.5Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 454/455: 274–280.
- [17] 张新明,陈健美,邓运来,肖 阳,蒋 浩. Mg-Gd-Y-Zr 耐热 镁合金的压缩变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(12): 1925-1932.

ZHANG Xin-ming, CHEN Jian-mei, DENG Yun-lai, XIAO Yang, JIANG Hao. Deformation behavior of Mg-Gd-Y-Zr heat-resistant magnesium alloy during hot-compression[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(12): 1925–1932.

(编辑 李艳红)