

# Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金的热变形行为及加工图研究

杜青春<sup>1</sup> 杨迪<sup>2</sup> 闫亮明<sup>2</sup>

(1.包头盛泰汽车零部件制造有限公司; 2.内蒙古工业大学材料科学与工程学院)

**摘要** 以 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金为研究对象,利用 Gleele-3500D 热模拟机研究了其等温热压缩变形行为。结果发现,该合金在热压缩过程中随应变增大,应力持续上升,到达峰值后,随变形增加,应力降低,并且随温度升高或应变速率减小,应力降低比例减小,为典型的动态再结晶特征。随变形温度的升高或应变速率的降低,再结晶晶粒比例增加、再结晶晶粒尺寸增加,粗大第二相破碎严重。通过对真应力-真应变曲线的分析,计算出了该合金热压缩的材料常数;建立了该合金的流变应力本构方程。通过动态模型建立该合金的热加工图,确定出最佳的热加工工艺参数:变形温度为 673~723 K,应变速率为 0.01~0.001 s<sup>-1</sup>。

**关键词** 稀土镁合金;热变形;本构方程;加工图;微观组织

中图分类号 TG146.22 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.04.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Deformation Behavior and Processing Maps of Mg-Zn-Gd-Y-Zr Alloy

Du Qingchun<sup>1</sup>, Yang Di<sup>2</sup>, Yan Liangming<sup>2</sup>

(1.Baotou Shengtai Auto Parts Manufacture Co., Ltd.; 2.School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology)

**Abstract:** The isothermal compression deformation behavior of Mg-Zn-Gd-Y-Zr alloy was performed on gleeble-3500 thermal simulator. The results reveal that the stress is increased with the increase of the strain. After reaching a certain value, the stress begin to decrease, and with temperature increase or strain rate decrease, stress decrease rate is decreased. The stress-strain curves present a typical dynamic recrystallization behavior. With increasing in deformation temperature or decreasing in strain rate, recrystallized grain fraction is increased, and recrystallized grain size is coarsened with severely broken of the coarse second phases. By analyzing the true stress-strain curve, the material parameter values of Mg-Zn-Gd-Y-Zr alloy were calculated and the constitutive equation was established. The thermal processing maps of the alloy were established based on the dynamic material model theory, and the optimal thermal processing parameters are presented as follows: deformation temperature of 400~450 °C and strain rate of 0.01~0.001 s<sup>-1</sup>.

**Key Words:** Rare Earth Magnesium, Hot Working, Constitutive Equation, Processing Map, Microstructure

随着环保问题日益突出,航空、交通运输和机械装备构件的轻量化发展成为必然趋势,这使得镁合金的研究成为热点之一。ZK61 镁合金是典型的高强度变形镁合金之一,并得到了广泛应用,但是其强韧性和耐热性能仍然不足<sup>[1~3]</sup>,这限制了其应用范围的扩大。YANG Y 等<sup>[4]</sup>研究了铸态 Mg-3.9Zn-0.6RE(Gd, Y)合金的微观组织,发现 Gd 和 Y 可以细化晶粒,Gd 可以提高镁合金的高温性能,Y 可以改善镁合金的强韧性和高温蠕变性能。CHEN J X 等<sup>[5]</sup>研究 Mg-13Gd-4Y-2Zn-0.5Zr 合金时发现,Gd 可以细化组织,改善合金力学性能和耐腐蚀性能。ZHENG C 等<sup>[6]</sup>研究发现 Mg-11Gd-4Y-2Zn-0.5Zr 合金中生成大量 LPSO 相,在静液挤压

作用下提高合金扭折行为,弱化织构。铸态 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金存在组织不均匀、第二相粗大的问题<sup>[7~9]</sup>,研究表明,采用热处理可改善其组织均匀性<sup>[10,11]</sup>,但组织粗大。热变形可以破碎合金中的粗大组织,改善合金的性能<sup>[1,3]</sup>。然而,由于镁合金具有密排六方晶格结构,使得其在室温环境下的塑性较差,难以进行塑性加工,并且镁合金坯料容易在变形过程中产生裂纹等缺陷,导致对其塑性加工产品的限制较大。合理改善并选用适合于镁合金的高温塑性变形条件来对其坯料进行塑性加工,对于生产镁合金产品具有积极的意义。

ABDUL M 等<sup>[1]</sup>研究了 ZK61 合金高应变速率下(0.001~10 s<sup>-1</sup>)的热变形行为,并建立了本构方程。陈

收稿日期:2020-10-12;修改稿收到日期:2020-12-23

第一作者简介:杜青春,男,1978 年出生,硕士,内蒙古包头(014046),E-mail:dujie111\_0@163.com

引用格式:杜青春,杨迪,闫亮明. Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金的热变形行为及加工图研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(4):466-470.

DU Q C, YANG D, YAN L M. Deformation behavior and processing maps of Mg-Zn-Gd-Y-Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4):466-470.

祥龙等<sup>[3]</sup>研究了挤压态 ZK61M 镁合金热压缩变形行为,并建立了本构方程。张恒<sup>[12]</sup>研究了锻造态 ZK61 合金的变形行为,并建立了加工图,确定了该合金的锻造工艺参数。目前,对添加 Gd 和 Y 的 ZK61 合金高温变形行为及其加工图的研究报道较少,为此本课题在 ZK61 镁合金中添加了 Gd 和 Y 制备出 Mg-5.88Zn-1.62Gd-0.87Y-1.56Zr 合金,通过等温压缩试验研究其热变形行为,构建 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金的本构方程和加工图,并获得其热加工参数范围,旨在为该合金变形工艺参数的选择提供参考。

## 1 试验材料和方法

采用金属型铸造制备 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 镁合金,铸坯尺寸为 50 mm×120 mm×300 mm,成分(质量分数,下同)为 Mg-5.88Zn-1.62Gd-0.87Y-1.56Zr。均匀化处理后的 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金组织见图 1。将均匀化后的坯料加工成  $\phi 10$  mm×15 mm 的热压缩试样,在 Gleeble-3500D 热模拟机上进行等温热压缩试验。采用单道次热压缩试验,变形温度为 523~723 K,应变速率为 0.001~1 s<sup>-1</sup>,应变量为 0.7。热压缩时,试样两端面与压头接触面之间放置石墨垫片,并涂抹适量的润滑剂,减小摩擦。在试验开始前,以 5 K/s 的加热速率将试样加热到试验所需温度,并保温 4 min,随后进行等

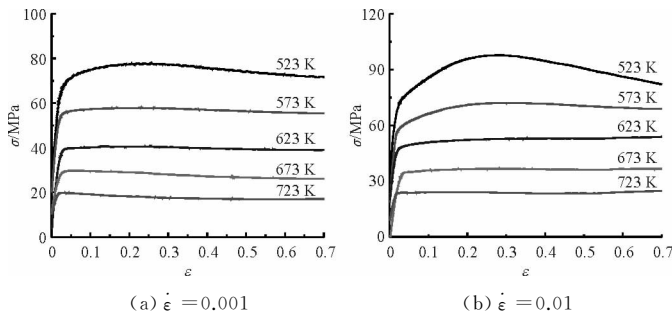


图 2 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金的真应力-应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves of Mg-Zn-Gd-Y-Zr alloy

应变曲线特征,表明其发生了动态再结晶。

## 2.2 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 稀土镁合金本构方程

在不同的应力状态下,流变应力  $\sigma_p$ 、变形温度  $T$  和应变速率  $\dot{\epsilon}$  三者间有不同的关系表达式。通过 3 种不同应力状态下的函数关系建立本构方程<sup>[13,14]</sup>。

低应力状态下:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma_p^{n_1} \exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

高应力状态下:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \cdot \exp(\beta \cdot \sigma_p) \cdot \exp[-Q/(R \cdot T)] \quad (2)$$

整体应力状态下:

$$\dot{\epsilon} = A_3 \cdot [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^n \cdot \exp[-Q/(R \cdot T)] \quad (3)$$

式中, $\dot{\epsilon}$  为应变速率; $R=8.314$  J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,为气体

常数; $Q$  为变形激活能; $A_1, A_2, A_3$  为双曲线常数; $\beta, n_1, \alpha(\alpha=\beta/n_1)$  为材料常数<sup>[8]</sup>。

分别对式(1)、式(2)和式(3)取对数

$$\ln \dot{\epsilon} = n_1 \cdot \ln \sigma + \ln A_1 - [Q/(R \cdot T)] \quad (4)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta \cdot \sigma_p + \ln A_2 - [Q/(R \cdot T)] \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = n \cdot \ln [\sinh(\alpha \cdot \sigma)] + \ln A_3 - [Q/(R \cdot T)] \quad (6)$$

由式(4)可知,  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln \sigma$  存在线性关系,一次函数的斜率即为材料参数  $n_1$  的数值。图 3 为 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金的  $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$  线性拟合曲线。利用拟合曲线可得出不同条件下的  $n_1$ , 随即对这些数值取平均数即为材料参数,  $n_1=5.0395$ 。

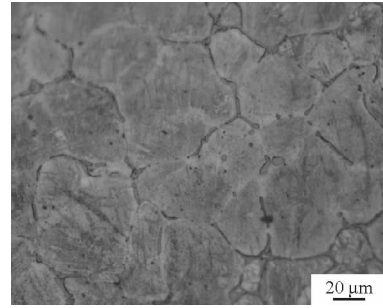


图 1 均匀化后的 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金的金相组织

Fig.1 Microstructure of as-homogenized Mg-Zn-Gd-Y-Zr alloy

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 真应力-应变曲线分析

图 2 为 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金在不同变形条件的真应力-应变曲线。可以看出,开始时变形使材料内部产生了大量的位错,相互缠结阻碍了其运动,使变形抗力急剧上升;随着应变增加,合金出现了动态软化,当应力达到峰值后出现两种情况,高温低应变速率时,应力达到峰值后动态软化和硬化达到平衡,曲线趋于稳定状态;在低温、高应变速率的情况下,应力达到峰值后开始明显下降,此时动态软化程度大于硬化程度,根据应力

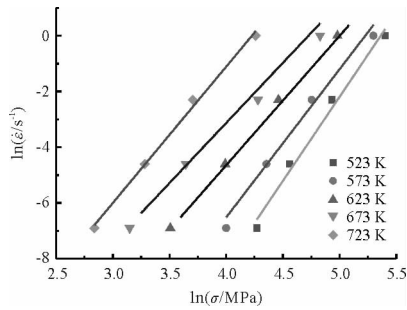


图3 合金  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln \sigma$  的关系

Fig.3 Relationship between  $\ln \dot{\epsilon}$  and  $\ln \sigma$  of the alloy

由式(5)可知,  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\sigma_p$  存在线性关系, 二者函数的斜率即为材料参数  $\beta$  的值。图4为 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金的  $\ln \dot{\epsilon}-\sigma_p$  拟合曲线, 基于拟合曲线, 对各个数值进行平均, 得出 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金的材料常数  $\beta = 0.064 0$ 。根据  $\alpha = \beta/n_1$  得出  $\alpha = 0.012 7$ 。

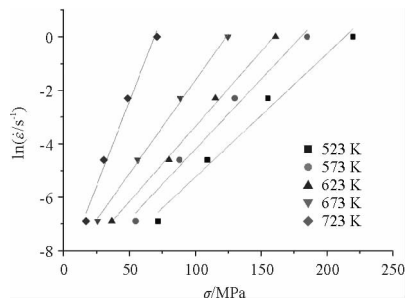


图4 合金  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\sigma$  的关系

Fig.4 Relationship between  $\ln \dot{\epsilon}$  and  $\sigma$  of the alloy

金属的塑性变形过程需要变形激活能<sup>[15]</sup>。其大小取决于金属材料本身的性质和外界变形条件的状态, 如加载温度、应变速率等因素。Mg-Zn-Gd-Y-Zr 稀土镁合金在热压缩过程中, 也受变形激活能的影响。利用双曲正弦函数表达热激活过程<sup>[16,17]</sup>。

为了更准确地表示热激活过程, 由 Zennerr 等引入了  $Z$  参数, 又叫温度补偿速率因子, 描述了变形温度  $T$  和应变速率  $\dot{\epsilon}$  的变化对材料热加工变形的影响。即:

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp[Q/(R \cdot T)] = A [\sinh(\alpha \cdot \sigma)]^n \quad (7)$$

对式(7)两边求取偏微分, 推导出变形激活能  $Q$  的表达式为:

$$Q = R \cdot \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]} \right\}_T \cdot \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (8)$$

对式(8)两边作出  $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]$  与  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)] - 1/T$  的关系曲线进行线性拟合, 对各个曲线的斜率求平均值, 即为式(7)中所需偏导值。图5为 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 稀土镁合金  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  的关系, 计算得出变形激活能  $Q = 92.875 7 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。图6为 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 稀土镁合金  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  与变形温度的关系。

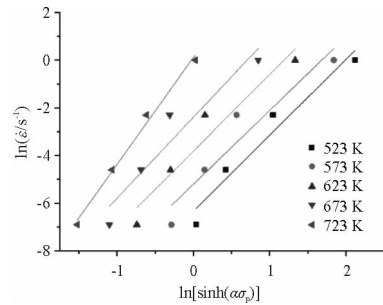


图5 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 稀土镁合金  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  的关系

Fig.5 Relationship between  $\ln \dot{\epsilon}$  and  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  of the Mg-Zn-Gd-Y-Zr alloy

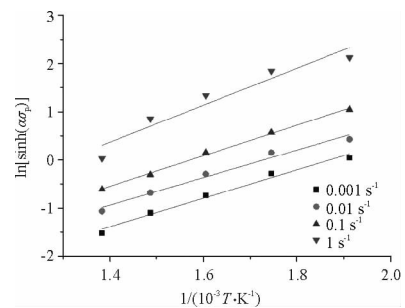


图6 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 稀土镁合金  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  与温度  $T$  的关系

Fig.6 Relationship between  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  and  $T$  of the Mg-Zn-Gd-Y-Zr alloy

对式(7)两边取对数

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \cdot \sigma)] \quad (9)$$

对于式(9)分析得出,  $\ln Z$  和  $\ln [\sinh(\alpha \cdot \sigma)]$  存在线性关系, 两者拟合曲线的斜率即为材料参数  $n$ , 截距即为  $A$  的对数。计算  $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \times \sigma)]$  相关数据, 并对其进行曲线拟合(见图7), 得到  $n = 6.4671$ ,  $A = 4.333 9 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ 。

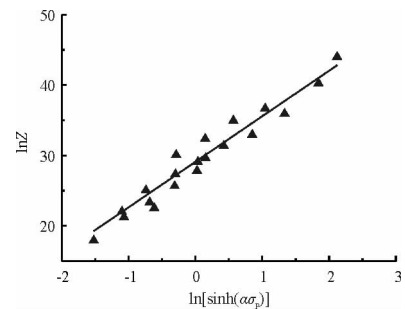


图7 合金热压缩时  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  与  $\ln Z$  的关系  
Fig.7 Relationship between the  $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$  and  $\ln Z$  of alloy after hot compression

将  $A$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $\alpha$  等相关数据带入其中, 得到 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 稀土镁合金等温热压缩变形的本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 4.333 9 \times 10^{12} [\sinh(0.012 7 \sigma)]^{6.467 1} \exp[-92 875.7/(RT)] \quad (10)$$

### 2.3 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 合金热加工图的研究

金属热加工的整体加工过程可以看做一个稳态系统。在这个稳态系统中机器做工提供能量,通过与工件接触将能量传至整个系统<sup>[18]</sup>。功率消耗主要表现在两个方面:发生塑性变形的功率消耗,此为耗散量,用  $G$  表示;材料发生塑性变形也造成了材料内部的微观组织发生改变,这些耗散的功率称为耗散协量,用  $J$  表示。材料功率可表示为:

$$p = \sigma \cdot \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma \cdot d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} \cdot d\sigma \quad (11)$$

为方便分析功率的分配关系,将  $G$  与  $J$  的比值称为材料的应变速率敏感性指数参数——应变速率敏感性因子,用  $m$  表示。

通常  $J$  的变化会引起材料内部组织发生改变,如发生动态再结晶、孔洞、超塑性变形、动态回复等。

将  $J$  与  $J_{\max}$  的比值称为功率耗散效率  $\eta$ ,可表示为:

$$\eta = J/J_{\max} = 2m/(m+1) \quad (12)$$

PRASAD Y V R K 等<sup>[13]</sup>依据最大熵产出率理论,得出当耗散函数  $D(\dot{\epsilon})$  与应变速率  $\dot{\epsilon}$  满足不等式:  $dD/d$

$d\dot{\epsilon} < D/\dot{\epsilon}$  时,材料在加工过程中便出现过度的变形状态。在材料动态理论中,耗散函数  $D$  相当于耗散协量  $J$ <sup>[19]</sup>。简化后,判别材料流变失稳条件可表示为

$$\partial \ln[m/(m+1)]/\partial \ln \dot{\epsilon} + m < 0 \quad (13)$$

设  $\zeta(\dot{\epsilon}) = \partial \ln[m/(m+1)]/\partial \ln \dot{\epsilon} + m$ , 则材料失稳条件可表示为:

$$\zeta(\dot{\epsilon}) < 0 \quad (14)$$

根据材料动态耗散规律,  $m$  可表示为:

$$m = \partial J/\partial G = \partial(\ln \sigma)/\partial(\ln \dot{\epsilon}) \quad (15)$$

对式(15)分析,分别计算出应变为 0.2、0.5、0.7 时不同变形条件下的流变应力。利用 origin8.5 对以上数据进行多项式拟合,并微分,由此求出不同变形条件下的  $m$  值。根据计算得到的  $m$  值,可求出不同变形条件下的  $\eta$  值。利用 origin8.5 以  $\log \dot{\epsilon}-T$  为基础,对功率耗散效率  $\eta$  建立等高线图,获得功率耗散图并求出  $\ln[2m/(m+1)]$  与  $\ln \dot{\epsilon}$  在不同变形条件下的数值,对两者进行多元线性回归,对回归值求微分并加对应各个变形条件的  $m$  值,便可达到失稳值  $\zeta(\dot{\epsilon})$ 。利用 origin8.5 以  $\log \dot{\epsilon}-T$  为基础平面,加入失稳值  $\zeta(\dot{\epsilon})$ ,得到失稳图。将功率耗散图与失稳图叠加就获得了加工图,见图 8。

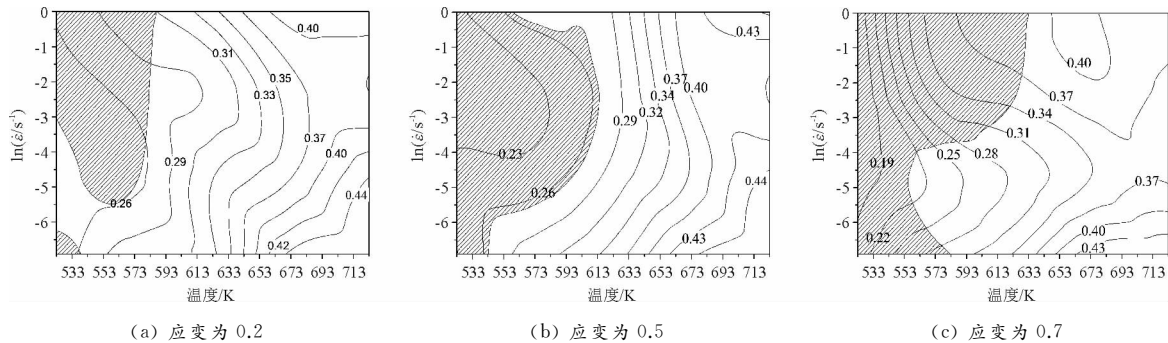


图 8 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 稀土镁合金在不同应变量的热加工图

Fig.8 Hot working map of Mg-Zn-Gd-Y-Zr alloy at different strain

从图 8a 可以看出,峰值区对应功率耗散最高值为 0.44,出现在应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$ ,变形温度为  $673 \sim 723 \text{ K}$  的区域。失稳区为图中阴影区域,主要出现在低温高应变速率区域。从图 8b 可以看出,峰值区对应功率耗散最高值为 0.44,出现在应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$ ,变形温度为  $678 \sim 723 \text{ K}$  的区域。失稳区则全部集中在低温区,在变形温度为  $523 \sim 613 \text{ K}$  失稳区较为突出。从图 8c 可以看出,峰值区对应功率耗散最高值为 0.43,出现在应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$ ,变形温度为  $663 \sim 723 \text{ K}$  的区域。与应变量为 0.5 的失稳区相比,应变量为 0.7 的失稳区同样出现在低温高应变速率区,并且失稳区域进一步扩大。随着材料应变增大,材料的最大功率耗散系数变化较小,而失稳区扩大;失稳区域主要出现在低温高应变区。

通过热加工图与金相组织结合的方法,得出 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 稀土镁合金最优的热加工参数:变形温度为  $673 \sim 723 \text{ K}$ ,应变速率为  $0.01 \sim 0.001 \text{ s}^{-1}$ ,功率耗散系数约为 44%。

### 2.4 微观组织演化

图 9 为不同变形条件下压缩后的组织形貌,与图 1 中原始组织相比,热压缩后晶粒沿垂直于压缩方向伸长,沿晶界分布的第二相被破碎。从图 9a 可见,出现尺寸约为  $3 \mu\text{m}$  的再结晶晶粒,主要沿晶界断续分布。从图 9b 可见,出现大量尺寸为  $5 \mu\text{m}$  的再结晶晶粒,其中晶界处的再结晶晶粒已成连续分布,部分位置原始晶粒内部也出现再结晶晶粒。与图 9a 相比,再结晶晶粒比例增加,再结晶晶粒尺寸小幅增加。从图 9c 可见,沿着晶界出现连续的再结晶晶粒,晶粒尺寸约为  $3 \mu\text{m}$ ,在粗

大第二相周围出现尺寸较大的再结晶晶粒。在图 9d 中,再结晶比例增加,同时再结晶晶粒尺寸增加,部分再

结晶晶粒尺寸达到  $10\ \mu\text{m}$ 。总之,随变形温度升高和应变速率的降低,再结晶晶粒比例增加,尺寸增大,沿晶界

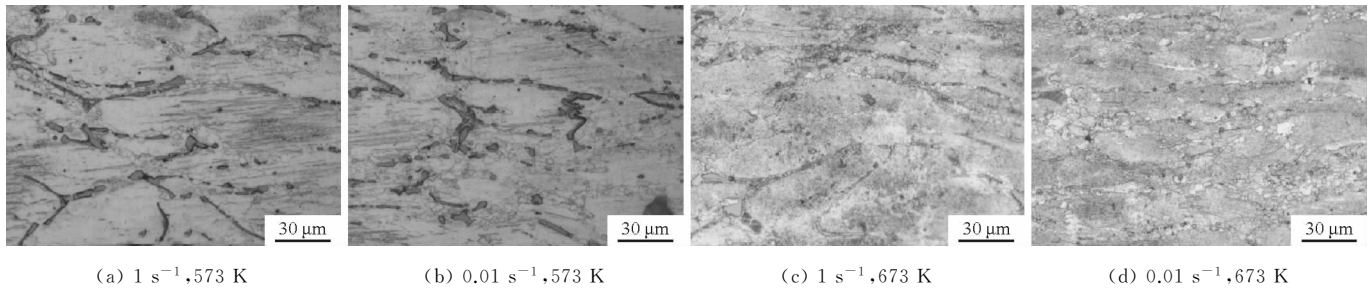


图 9 Mg-Zn-Gd-Y-Zr 稀土镁合金经不同条件压缩后的微观组织

Fig.9 Microstructure of Mg-Zn-Gd-Y-Zr alloy at different compression rate

分布的第二相破碎越严重。

### 3 结 论

(1) Mg-5.89Zn-1.62Gd-0.87Y-1.56Zr 镁合金为一种正变形速率敏感材料。其等温热压缩本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 4.3339 \times 10^{12} [\sinh(0.0127\sigma)]^{6.4671} \times \exp[-92875.7/(RT)]$$

热加工最优参数:变形温度为 673~723 K,应变速率为  $0.01\sim 0.001\ \text{s}^{-1}$ ,功率耗散系数约为 44%。

(2) 随变形温度升高和应变速率降低,再结晶晶粒比例增加,尺寸增大,沿晶界分布的第二相破碎严重。

#### 参 考 文 献

- [1] ABDUL M, WANG Y W, CHENG H W, et al. Constitutive analysis, twinning, recrystallization, and crack in fine-grained ZK61 Mg alloy during high strain rate compression over a wide range of temperatures[J]. Materials Science & Engineering, 2020, A771: 1-13.
- [2] 徐文. ZK61 镁合金冷轧板材退火工艺研究[J].热加工工艺, 2018, 47(20): 175-177.
- [3] 陈祥龙, 徐春国, 秦思晓, 等. 挤压态 ZK61M 镁合金热压缩变形行为与本构方程建立[J]. 锻压技术, 2019, 44(5): 147-154.
- [4] YANG Y, ZHANG K, MA M L, et al. Microstructure and phase compositions of as-cast Mg-3.9Zn-0.6RE (Gd, Y) alloy with different Gd/Y ratios[J]. Rare Metals, 2015, 34(3): 160-163.
- [5] CHEN J X, ZHU X Y, TAN L L, et al. Effects of ECAP extrusion on the microstructure, mechanical properties and biodegradability of Mg-2Zn-xGd-0.5Zr alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 34: 205-216.
- [6] ZHENG C, CHEN S F, WANG R X, et al. Effect of hydrostatic pressure on LPSO kinking and microstructure evolution of Mg-11Gd-4Y-2Zn-0.5Zr alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 34: 248-264.
- [7] 郑明毅, 徐超, 杜玉洲, 等. 一种 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 系合金大型铸锭及其制备方法: 中国, 201110331397.9[P]. 2013-04-10.
- [8] 沈威武. Mg-10Gd-xY-1.0Zn-0.5Zr 铸造镁合金的显微组织和力学性能研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.
- [9] 吕文泉, 王锦程. Mg-Zn-Y-Gd-Zr 铸造镁合金组织和性能的研究[A]. 2011 中国材料研讨会[C]. 北京, 2011.
- [10] 钟罗喜, 张奇, 袁淑, 等. 固溶处理对 Mg-10.5Gd-1.0Y-1.0Zn-0.5Zr 铸造镁合金的显微组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(16): 137-140.
- [11] DING Z B, ZHAO Y H, LU R P, et al. Effect of Zn addition on microstructure and mechanical properties of cast Mg-Gd-Y-Zr alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29: 722-734.
- [12] 张恒. 锻造态 ZK61 镁合金热压缩变形行为及组织研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [13] PRASAD Y V R K, RAO K P. Processing maps and rate controlling mechanisms of hot deformation of electrolytic tough pitch copper in the temperature range 300~950 °C[J]. Materials Science & Engineering, 2005, A391: 141-150.
- [14] 丰涵, 宋志刚, 浦恩祥, 等. 690 合金热压缩本构方程和热加工图的建立[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(5): 179-184.
- [15] YANG M, LIU X B, ZHANG Z Y, et al. Effect of adding rare earth elements Er and Gd on the corrosion residual strength of magnesium alloy[J]. Open Physics, 2019, 17(1): 373-380.
- [16] 马鸣龙. Mg-Y-MM-Zr 合金组织及性能研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2011.
- [17] 王勇. Mg-Y-Nd-Zr 稀土镁合金热变形行为研究[A]. 中国机械工程学会[C]. 甘肃, 2017.
- [18] 夏祥生, 张帷, 王长朋, 等. 稀土镁合金热压缩流变应力修正及热变形行为[J]. 精密成形工程, 2013, 5(4): 1-6.
- [19] 张胜, 王春旭, 姜庆伟, 等. 新型高密度 DT740 合金热变形行为及热加工图[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(6): 213-219.

(编辑: 张正贺)