

镁合金 AZ40M 再结晶晶粒尺寸与硬度模型研究

朱雄, 夏华, 胡冬, 王姝俨

(重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054)

摘要: **目的** 研究变形温度及变形速率对镁合金 AZ40M 再结晶晶粒尺寸以及硬度的影响。**方法** 在 gleeble-1500D 热模拟机上进行热物理模拟压缩实验, 变形温度为 250 ~ 400 °C, 变形速率为 0.001 ~ 1 s⁻¹, 通过金相法观测 AZ40M 镁合金在不同变形条件下的组织形貌, 采用维氏硬度计测出镁合金热变形后的硬度值。**结果** 当升高变形温度或降低变形速率时, 材料的晶粒尺寸增大且硬度减小。**结论** 得出了再结晶晶粒尺寸的变化规律, 建立了 AZ40M 镁合金的晶粒尺寸与硬度的关系模型。

关键词: AZ40M 镁合金; 再结晶晶粒尺寸; 硬度模型

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.05.013

中图分类号: TG115.21

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)05-0076-04

Recrystallized Grain Size and Hardness Model of AZ40M Alloy

ZHU Xiong, XIA Hua, HU Dong, WANG Shu-yan

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the effects of experimental temperatures and strain rates on the recrystallized grain size and hardness of the AZ40M alloy. **Methods** The hot compression experiments were carried out on the gleeble-1500 thermal simulation machine. The experimental temperatures and strain rates were investigated in the temperature range of 250 and 400 °C and the strain rate range of 0.01 and 1 s⁻¹. Metallographic observation was used to analyze the microstructure morphology of AZ40M alloy under different deformation conditions, and the hardness values of magnesium alloy after hot deformation were measured using Vivtorinox hardness meter. **Results** The recrystallized grain size increased significantly and the hardness decrease significantly at higher deformation temperature or lower strain rate. **Conclusion** The variation rule of recrystallized grain size was obtained. The relation model of recrystallized grain size and hardness was built for AZ40M alloy.

KEY WORDS: AZ40M alloy; recrystallized grain size; hardness model

镁合金在工程应用领域中占据着重要的位置, 被认为是最轻质的金属结构材料。由于镁及其合金在比强度、抗电磁屏蔽性能、机械加工等方面具有显著的优点, 使得它在汽车、电子电器、交通、航空航天以及国防军工领域具有巨大的应用前景^[1-5]。在镁

合金的塑性变形过程中, 由于动态再结晶作用, 材料的变形抗力减小且晶粒也明显得以细化, 进而改善了材料的变形组织, 以达到提高材料力学性能的目的^[5-9]。文中对镁合金 AZ40M 在不同变形条件下的动态再结晶过程进行了深入研究, 并采用电子显

显微镜和维氏硬度计,对不同变形条件的试样进行了显微组织观察和维氏硬度测试。根据实验数据分析了不同变形条件对材料锻后的晶粒尺寸、硬度的影响,并对采集的数据进行了相关的处理,从而建立了符合镁合金 AZ40M 的动态再结晶晶粒尺寸模型和锻后维氏硬度模型。

1 实验

实验材料为 AZ40M 镁合金,其化学成分(质量分数,%)为:Al:3.0~4.0,Zn:0.20~0.80,Mn:0.15~0.50,Si:0.10,Cu:0~0.05,Fe:0~0.005,Ni:0~0.005,基体为镁。试样尺寸为 $\phi 10\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 圆柱体,在 gleeble-1500D 热模拟机上进行热物理模拟压缩实验。实验的变形温度为 250,300,350,400 $^{\circ}\text{C}$,变形速率为 0.001,0.01,0.1,1 s^{-1} ,压缩变形使得真应变达到 1.0,实验前在试样的两端涂抹石墨润滑剂,减小实验中试样与压头之间的摩擦。实验结束时对试样进行淬火处理,以便于后期观察材料变形后的组织变化规律。采用金相显微镜观察合金金相组织,得到不同变形条件下的晶粒尺寸。采用维氏硬度计进行硬度测试,得到合金的硬度数据。金相制备腐蚀液选取为:苦味酸 1 g+醋酸 5 mL+水 10 mL+酒精 100 mL,腐蚀时间为 10~15 s。

2 结果与分析

2.1 晶粒尺寸分析

镁合金 AZ40M 材料在塑性变形过程中,动态再结晶晶粒尺寸受材料在变形过程中的温度和变形速率影响显著^[12-13]。图 1 为镁合金 AZ40M 在变形速率为 0.01 s^{-1} ,变形温度为 250~400 $^{\circ}\text{C}$ 的组织形貌。从图 1 中可以看出,镁合金 AZ40M 在塑性变形过程中随着变形温度的升高,其再结晶晶粒尺寸逐渐增大。这一现象主要是由于材料在发生动态再结晶的同时伴随着晶粒长大,晶粒长大所需的能量是由材料内部存储的能量提供的,温度的升高使得材料内部的能量增加,从而促进晶粒长大。

图 2 为镁合金 AZ40M 在温度为 350 $^{\circ}\text{C}$,变形速率为 0.001~1 s^{-1} 的组织形貌,从图 2 中可以看出,该材料的动态再结晶晶粒尺寸随着变形速率的增

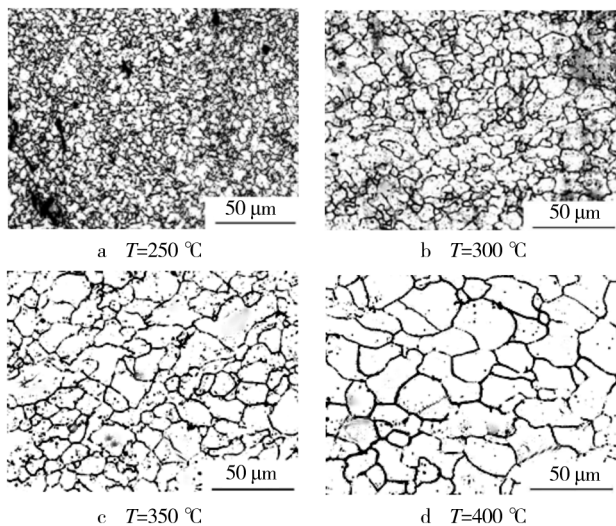


图 1 镁合金 AZ40M 不同变形温度下的微观组织
($\dot{\varepsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$, $\varepsilon=1.0$)

Fig. 1 The microstructure of magnesium alloy AZ40M at different deformation temperatures under a strain rate of 0.01 s^{-1}

加,晶粒尺寸减小。这是因为当变形速率增大时,材料内部位错密度增加,使得材料可以再结晶的形核概率增加,从而促进动态再结晶的发生,同样达到了细化晶粒的效果。

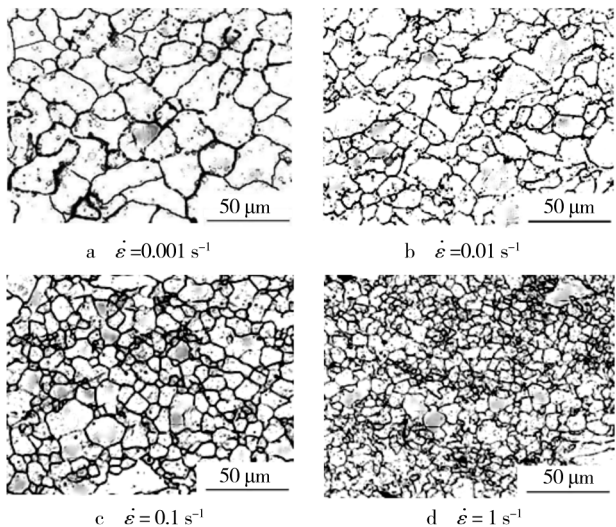


图 2 镁合金 AZ40M 不同应变速率下的微观组织($T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon=1.0$)

Fig. 2 The microstructure of magnesium alloy AZ40M at 350 $^{\circ}\text{C}$ under different strain rates

采用定量金相法来测量镁合金 AZ40M 在不同变形条件下的再结晶晶粒尺寸,在金相图中沿不同视场随机划线,依次统计出直线穿过的晶粒数,然后

借助于测微尺测量出这些晶粒的总尺寸,从而计算得到单一晶粒的平均尺寸。进行多次测量并取平均值,得出不同变形温度与变形速率条件下的晶粒尺寸,根据实验数据拟合出 $\ln D_{\text{drx}}$ 和 $\ln Z$ 的线性关系图(如图3所示),得到镁合金 AZ40M 的再结晶晶粒尺寸的表达式,如式(1)所示。

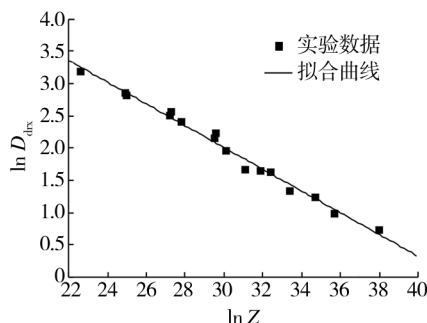


图3 $\ln D_{\text{drx}}$ 和 $\ln Z$ 的关系曲线

Fig. 3 The relationship between $\ln D_{\text{drx}}$ and $\ln Z$

$$D_{\text{drx}} = 1179.287Z^{-0.16853} \quad (1)$$

式中: D_{drx} 表示再结晶晶粒尺寸; Z 为 Zener-Hollomon 参数。

2.2 锻后硬度分析

经过对镁合金 AZ40M 锻后的微观组织分析可知,由于动态再结晶的发生使得材料在塑性变形过程中晶粒细化。由于细晶强化作用,从而使变形后的镁合金具有较高的强度及硬度,其综合力学性能也明显得以改善。材料的硬度是由材料塑性变形抗力决定的,所以材料的强度越高,塑性变形抗力就越大,硬度值就越高。材料强度与晶粒尺寸关系可采用 Hall-Petch^[10] 公式表示: $\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-0.5}$ 。式中: σ_y 表示材料的屈服强度; σ_0 是移动单个位错时产生的晶格摩擦阻力; d 为平均晶粒尺寸; k 是常数(取决于材料种类和晶粒尺寸的大小)。从这个关系式可以看出,材料的晶粒尺寸与其机械强度成反比,这是因为晶粒越细小,晶界就越多,位错移动的障碍就越多,所以材料的强度也就越大。试验力均为 1.96 N,试验保压时间为 15 s,在测量过程中选取了试样中不同区域的 4 个点作为测量点,将 4 次测量结果求平均作为该试样的维氏硬度值。测出镁合金 AZ40M 原始试样的维氏硬度为 61.2HV,其他在不同变形条件下的试样维氏硬度如表 1 所示。

由表 1 中的数据可知,镁合金 AZ40M 经过不同

表 1 不同变形条件下的维氏硬度

Table 1 Vickers hardness under different deformation conditions

$T/^{\circ}\text{C}$	$\dot{\varepsilon} / \text{s}^{-1}$			
	0.001	0.01	0.1	1
250	72.6	73.9	76.2	77.9
300	68.5	69.2	74.7	75.8
350	66.1	68.4	70.2	72.1
400	64.8	65.3	67.8	70.2

条件的热变形后硬度得到明显提高。当变形温度相同时,镁合金 AZ40M 锻后的维氏硬度随着变形速率的增加而明显增大;在同一变形速率条件下,变形温度越低材料的锻后硬度越高。将测出的硬度值进行数据处理,拟合出维氏硬度和 $\ln Z$ 的关系,如图 4 所示,计算出镁合金 AZ40M 锻后硬度模型如下:

$$\text{维氏硬度} = 0.96328 \ln Z + 41.01432 \quad (2)$$

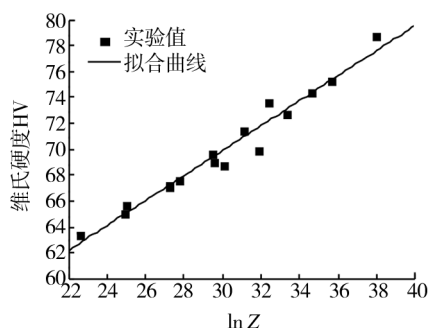


图4 维氏硬度和 $\ln Z$ 的关系曲线

Fig. 4 The relationship between HV and $\ln Z$

由于镁合金 AZ40M 在热变形过程中发生动态再结晶,晶粒尺寸明显变小,在细晶强化的作用下材料的硬度明显增强。由此可以得出晶粒尺寸与锻后硬度关系图,如图 5 所示,计算出晶粒尺寸与硬度模

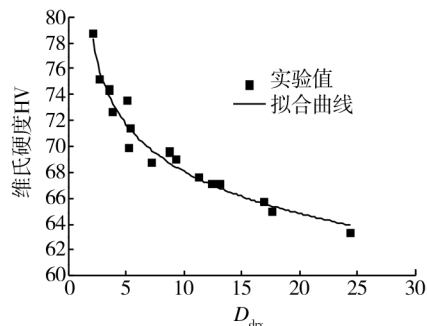


图5 维氏硬度和 D_{drx} 的关系曲线

Fig. 5 The relationship between HV and D_{drx}

型如下:

$$\text{维氏硬度} = 82.883\,979\,2 - \ln D_{\text{drx}} \quad (3)$$

3 结论

1) 通过对不同变形条件下的镁合金 AZ40M 试样进行微观组织观察和锻后维氏硬度测试试验,根据实验结果分析了不同变形温度和变形速率对镁合金 AZ40M 的再结晶晶粒尺寸及维氏硬度的影响规律,并建立了相关的晶粒尺寸模型与锻后硬度模型。

2) 研究了镁合金 AZ40M 在锻后硬度与晶粒尺寸间的关系,定量分析了细晶强化在镁合金 AZ40M 热变形过程中的作用,建立了镁合金 AZ40M 热变形后的硬度与晶粒尺寸的关系模型。

参考文献:

- [1] DIEM W. Magnesium in Different Applications[J]. All to Technology, 2001(1): 40—41.
- [2] KAMADO S, KOIKE J, KONDOH K, et al. Magnesium Research Trend in Japan[J]. Materials Science Forum, 2003, 419—422: 21—34.
- [3] 张高会, 张平则, 潘俊德. 镁及镁合金的研究现状与进展[J]. 世界科技研究与发展, 2003, 25(1): 72—78.
ZHANG Gao-hui, ZHANG Ping-ze, PAN Jun-de. Current Situation and Research Progress of Magnesium and Magnesium Alloys [J]. Research and Development of World Science and Technology, 2003, 25(1): 72—78.
- [4] 肖远伦, 赵军, 李祖荣, 等. 挤压态 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金热变形行为研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(1): 49—52.
XIAO Yuan-lun, ZHAO Jun, LI Zu-rong, et al. Hot Deformation Behaviour of Extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(1): 49—52.
- [5] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LIU Zheng, ZHANG Kui, ZENG Xiao-qin. The Theory Foundation of Magnesium Alloys and Its Application [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002.
- [6] 陈胤, 张志海, 吕欣颖, 等. AZ21B 镁合金塑性成形工艺探究[J]. 精密成形工程, 2011, 3(6): 70—73.
CHEN Yin, ZHANG Zhi-hai, LYU Xin-ying, et al. Research on the Plastic Forming of AZ21B Magnesium Alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(6): 70—73.
- [7] 雍文佳, 左小涛, 张敏. 镁对 ZL201 合金组织和性能的影响[J]. 精密成形工程, 2011, 4(3): 39—41.
YONG Wen-jia, ZUO Xiao-tao, ZHANG Min. Influence of Magnesium on Microstructure and Properties of ZL201 Alloy [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 4(3): 39—41.
- [8] 李保成, 王强, 张治民. AZ80 合金初始晶粒对其流变应力影响的研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(1): 88—90.
LI Bao-cheng, WANG Qiang, ZHANG Zhi-min. Influence of Grain Size on Hot Working Stresses in AZ80 Mg Alloy [J]. Journal of Plastic Engineering, 2008, 15(1): 88—90.
- [9] 陈先华, 耿玉晓, 刘娟. 镁及镁合金功能材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(1): 149—151.
CHEN Xian-hua, GENG Yu-xiao, LIU Juan. Research Status of Magnesium Alloys as Functional Materials [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2013, 31(1): 149—151.
- [10] SERAJZADEH S, TAHERI A K. An Investigation on the Effect of Carbon and Silicon on Flow Behavior of Steel [J]. Materials & Design, 2002, 23(3): 271—276.
- [11] 刘楚明, 刘子娟, 朱秀荣, 等. 镁及镁合金动态再结晶研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2013, 31(1): 148—150.
LIU Chu-ming, LIU Zi-juan, ZHU Xiu-rong, et al. Research and Development Progress of Dynamic Recrystallization in Pure Magnesium and Its Alloys [J]. China Journal of Nonferrous Metals, 2013, 31(1): 148—150.
- [12] SIEGERT K. Pneumatic Bulging of Magnesium AZ31 Sheet Metals at Elevated Temperatures [J]. CIRP Ann-Manuf Technol, 2003, 52(1): 241—244.
- [13] 刘钢, 苑世剑, 何祝斌. 镁合金管件热态内压成形研究进展[J]. 精密成形工程, 2009, 1(1): 27—31.
LIU Gang, YUAN Shi-jian, HE Zhu-bin. Development of Warm Hydroforming for Magnesium Alloy Tubes [J]. Journal of Plastic Engineering, 2009, 1(1): 27—31.
- [14] 赵浩峰, 池成忠. 镁合金及其复合材料[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
ZHAO Hao-feng, CHI Cheng-zhong. Magnesium Alloys and Their Composites [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2002.
- [15] SONG J H, IM Y T. Process Design for Closed-die Forging of Bevel Gear by Finite Element Analyses [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192—193: 1—7.