68

## Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 镁合金多向锻造组织和性能研究

尹雪雁<sup>1</sup>.于建民<sup>1</sup>.张治民<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 材料加工系, 太原 030051; 2. 山西省精密成形工程技术研究中心, 太原 030051)

摘要:由于锻坯的组织和力学性能对其后续成形过程具有重要的影响,研究锻坯的组织和力学性 能均匀性具有重要实用价值。利用实验的方法,对比研究了 Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 合金材料的三次 多向锻造后的组织演变和力学性能的不同。实验结果表明:随着锻造次数的增加,动态再结晶明 显,Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 镁合金晶粒逐渐细化,析出相逐渐增多;并且,随着锻造次数的增多,硬度 变化呈小幅波动的趋势,且第一次多向锻造后的硬度最大。

关键词: Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 镁合金; 多向锻造; 硬度; 组织演变

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.06.010

中图分类号: TG319 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2014)06-0068-04

## Microstructure and Performance of Mg-13Gd-4Y-0.5Zr Magnesium Alloy under Multidirectional Forging

YIN Xue-yan<sup>1</sup>, YU Jian-min<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-min<sup>1,2</sup>

Department of Material Processing Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
 Engineering Technology Research Center for Integrated Precision Forming of Shanxi, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT**: The microstructure and mechanical properties of forging stocks have important influences on the subsequent forming process, therefore the study on the uniformity of the microstructure and mechanical properties of forging stocks has important practical value. This paper compared and studied the microstructure evolution and mechanical properties of the alloy material Mg-13Gd-4Y-0.5Zr after three times of multidirectional forging through experimental methods. The experimental results showed that along with the increasing number of forging, the Mg-13Gd-4Y-0.5Zr magnesium grain would be gradually refined, and the precipitation phase gradually increased. In addition, along with the increasing number of forging, the hardness was found after the first multidirectional forging.

KEY WORDS: Mg-13Gd-4Y-0.5Zr magnesium alloy; multidirectional forging; hardness; microstructure evolution

镁合金是目前最轻的金属结构材料,具有导电 性、导热性、电磁屏蔽性,同时具有性能良好,比强度 和比刚度高,减震性好,切削加工和尺寸稳定性佳, 易回收,有利于环保等优点<sup>[1-4]</sup>。镁合金六方晶体 结构带来的变形加工难题,已成为阻碍镁合金材料 大规模应用的瓶颈问题<sup>[5]</sup>。耐热变形镁合金在一 定温度下的塑性变形行为和塑性变形性能的研究, 将对促进镁合金的产业化进程以及镁合金在航空、

收稿日期:2014-10-10

作者简介:尹雪雁(1990—),女,山西灵石人,硕士生,主要研究方向为精密成形技术。

航天领域以及结构领域的更广泛应用,产生积极、重要的影响<sup>[6]</sup>。近年来大塑性变形方法(SPD)作为制备高性能镁合金的有效途径,一直广受关注,其代表性的方法包括等径角挤压、累积叠轧(ARB)、往复挤压、多向锻造和大应变轧制等<sup>[7]</sup>。其中多向锻造 工艺由于操作简单、成本低廉,并且可通过现有的生产装备制备大尺寸材料,得到了较快的发展,该工艺已成功地应用于 AZ21, AZ31, AZ61, AZ80, ZK21, ZK80 等合金<sup>[8]</sup>。由于锻坯的组织和力学性能对其 后续成形具有重要的影响,研究锻坯的组织和力学 性能均匀性具有重要实用价值。文中以多向锻造 Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 合金为研究对象,研究了多向 锻造稀土镁合金的力学性能和显微组织演变。

#### 1 实验

实验所用的 Mg-13Gd-4Y-0.5Zr(%,质量分数)镁合金铸态坯料,其化学成分如表1所示。

镁合金铸坯下料尺寸为495 mm×70 mm×65 mm,经520℃均匀化处理,并保温4h。然后分别在520,450,350℃下对该坯料进行3次多向锻造,为保持各道次变形后的组织,每道次变形后均采用60℃水冷却。每次多向锻造完成后的金相试样尺寸按

表 1 合金的化学成分(质量分数,%) Table 1 Chemical composition of the alloy (mass frac-

tion, %)	
----------	--

Gd	Y	Zr	Fe	Si	Cu	Ni
12.88	4.0	0.50	< 0.01	<0.01	< 0.03	<0.01

10 mm×10 mm×5 mm 切取,根据变形道次分别标记 为1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>。

将选取的试样用 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀,腐蚀时间为 10~20 s,然后以酒精及清水清洗金 相表面。腐蚀好的试样分别在 ZIESS 光学显微镜下进行观察并拍摄照片。硬度测试在 THBP-62.5 TIME 布氏硬度计上进行,加载实验力为 62.5 kg,保持时间为 15 s,压头为 2.5 mm。

### 2 结果与分析

## Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 镁合金材料的 硬度测试结果概述

对取样的铸态及不同道次多向锻造后的3块坯 料进行布氏硬度测试,测试结果如表1所示;取测量 的平均值绘制柱状图如图1所示。

表 2 硬度测试结果 Table 2 Hardness test results

	测量次数							
	1	2	3	4	5	6	7	一十月祖
铸态	88.01	89.89	90.01	91.53	91.21	89.00	87.92	89.65
1#	100.2	99.57	99.68	100.7	102.6	102.6	100.9	100.9
2#	97.81	95.03	97.38	100.7	100.6	98.57	99.91	98.57
3#	98.55	99.00	99.23	98.29	99.85	98.96	99.95	99.12





从柱状图中可以看出:经过不同道次的多向锻造后,其硬度比铸态合金有明显的提高,从 89.65HB 提高到 98~100HB,坯料在不同道次的多向锻造后 表现的硬度变化不大,一道次、二道次和三道次的硬 度分别为 100.9HB,98.57HB,99.12HB。表现为经 一道次变形后硬度最高,随锻造次数增多,其硬度先 减小后又微微增加。第 3 次锻后硬度值增大,这是 由于多向锻造可以促使 Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 变形 镁合金晶粒细化,从而提高了合金的硬度,但并不是 锻造次数越多硬度值越大。

# Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 镁合金显微组 织的观察与分析<sup>[9-11]</sup>

70

从图 2 中可以看出,铸态合金晶粒大小并不均 匀,晶界轮廓较粗,主要由白色的 Mg 基体相和晶界 处呈黑色的不均匀的共晶相组成,共晶相主要沿晶 界分布,尤其是三角晶界处,即共晶相沿晶界的某些 地方产生了偏聚,而在晶界的另一些地方则很少;合 金的铸态组织呈多边形等轴晶状,晶界上分布有不 连续的析出相。



图 2 铸态组织金相图 Fig. 2 The casting metallographic microstructure

从图 3 中可以看出,第一次多向锻造之后,合金的组织基本上还保留铸态形貌,晶粒粗大,大小不一,沿晶界仍可看见明显分布的共晶相以及局部少量的细小再结晶晶粒,说明动态再结晶已经开始,这是由于镁合金的多向锻造工艺的外加载荷的方向是多变的,所以累积的塑性变形很大,必然会导致变形镁合金的再结晶温度下降,利于 Mg-13Gd-4Y-0.5 Zr 变形镁合金发生再结晶。



图 3 第 1 次锻造后组织金相图 Fig. 3 The metallographic microstructure after first forging

同时观察到的极少量的析出相在晶界和晶粒内 部析出。在第1道次变形时,合金开始发生动态再 结晶,动态再结晶尺寸较大,合金内部的位错密度 低,可提供形核的位置不多,加之,此道次锻造温度 较高,一旦有析出也易于回溶,所以析出相很少。



图 4 第 2 次锻造后组织金相图 Fig. 4 The metallographic microstructure after second forging

第2次锻造完成后,组织形貌明显发生了巨大的改变,原始大晶粒被拉长,呈现扁平状。随着动态 再结晶道次的增加,在形变能聚集的晶界位置出现 了大量的细小再结晶晶粒。这是因为一旦动态再结 晶现象发生,位错密度将在这些区域急剧增加,在接 下来的变形过程中,位错将不断积累,动态再结晶晶 粒数量将进一步增加。同时在一些晶粒的原始晶粒 边界没有发生动态再结晶,这是因为在再结晶过程 中只有少数的晶粒具有优先变形方向,造成晶粒的 变形不同步性,位错密度将很大提高。这也将导致 变形的不均匀分布,可见动态再结晶并不是一个均 一过程。

图 4 可以看到粗大的晶粒内有大量孪晶出现。 镁合金晶体结构为密排方结构,只有 3 个独立的滑 移系,变形过程中可启动的滑移系较有限,晶界附近 变形协调能力较差,晶粒通过孪生协调变形,所以在 2\*合金试样中晶粒内出现了大量的孪晶组织。

和第一次锻后组织相比,有更多的析出相形成。 析出相的析出具有明显的不均匀,主要呈点状分布, 没有固定的形貌。这是因为经2道次变形后,合金 的动态再结晶比例增大,而且第1道次形成的动态 再结晶晶粒在随后的变形过程中得到进一步细化, 使晶界面积大幅增加,而且经过大塑性变形后,晶体 内增多的缺陷,为析出相粒子的析出提供了丰富的 形核位置,细小的动态再结晶晶粒使溶质原子的扩 散距离大大缩短,而且其内部的高密度的位错、空位 等缺陷为溶质原子的扩散提供了通道,大大加速了 析出相的析出。

第3次多向锻造完成之后,网状的晶界共晶相 出现了断网现象,由连续网状分布逐渐转变为断续、 弥散的分布。虽然试样依旧存在着原始大晶粒,但 是相对于第一、二次锻造时,大晶粒的数量显著减



图 5 第 3 次锻造后组织金相图



少。再结晶晶粒的数量明显增加,说明 Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 镁合金内部组织的均匀化程度提高。这 是因为随着多向锻造道次的进一步增加,在新形成 的细晶粒的晶界处有更精细的晶粒成核。以这种方 式,再结晶细晶粒随着动态再结晶过程进行进一步 形成和增多;细小再结晶晶粒的体积分数进一步增 大。最后,再结晶的细小晶粒逐步取代原始粗晶粒, 晶粒变得更加细小。同时随着多向锻造道次的增 加,由于载荷力方向的变化,原本具有不利取向的晶 粒将会获得有利的变形取向,从而可以实现变形的 均匀分布。显微组织中仍能看见明显的孪晶,说明 晶粒依然是通过孪生协调变形,孪晶的产生虽不会 直接产生塑性变形,但能够使晶粒的位向发生改变, 同时新的滑移系开动,间接地对塑性变形做出贡献。

第3道次的多向锻造完成后,析出相进一步增 多,这是由于进一步的变形,使得析出的粒子增加了 位错运动的阻碍,从而增加析出粒子附近动态再结 晶形核率,一旦位错密度达到临界值,新的晶粒就会 在析出粒子附近形核,加之,析出粒子在晶界的存 在,有利于阻碍再结晶晶粒的长大,两方面的共同作 用导致析出区的晶粒相对细小。多向锻造是一个温 度逐渐降低的过程,随着温度不断降低,不利于析出 相的回溶,而且合金内部的缺陷增多,因而析出相会 越来越明显。

#### 3 结论

1) 多向锻造能够不同程度地提高 Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 材料的硬度,在经历多次多向锻造后,可 以看出锻造次数的增多,硬度只是在小范围发生波 动,并且硬度最大值出现在第一次锻造完成之后。

2) 随着多向锻造变形道次的增加,大晶粒数量

不断减少,多向锻造可以促使 Mg-13Gd-4Y-0.5Zr 变形镁合金晶粒呈现长条状并逐渐变细小,析出相 增多,动态再结晶形成;且锻造次数越多,晶粒越细 小,动态再结晶更加明显,析出相越多。

#### 参考文献:

- [1] 张家振,马志新,李德富. 热处理对 Mg-Gd-Y-Zr 合金 组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理,2007,36 (18):73-74.
  ZHANG Jia-zhen, MA Zhi-xin, LI De-fu. Influence of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of Mg-Gd-Y-Zr Alloy[J]. Material & Heat Treatment,2007,36(18):73-74.
- [2] AGHION E, BRONFIN B, ELIEZER. The Role of the Magnesium Industry in Protecting the Environment[J]. Materials Processing Technology, 2001, 117:381-385.
- [3] 朱亚哲,李保成,张治民. 镁合金的特点及其塑性加工 技术研究进展[J]. 热加工工艺,2012,41(1):88—91.
  ZHU Ya-zhe, LI Bao-cheng, ZHANG Zhi-min. Magnesium Alloy Characteristics and Developments of Its Plastic Forming Technology[J]. Casting Forging Welding,2012, 41(1):88—91.
- [4] 丁文江, 靳丽, 吴文祥, 等. 变形镁合金中的织构及其 优化设计[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (10): 2371—2372.
  DING Wen-jiang, JIN Li, WU Wen-xiang. Texture and Texture Optimization of Wrought Mg Alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10):2371—2372.
- [5] 刘庆. 镁合金塑性变形机理研究进展[J]. 金属学报, 2010,46(11):1458—1472.
  LIU Qing. Research Progress on Plastic Deformation Mechanism of Mg Alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010,46(11):1458—1472.
- [6] 马高山,张颂阳,王含英. 耐热变形镁合金的塑性变形研究[J]. 材料热处理技术,热加工工艺,2011,40 (16):22-23.

MA Gao-shan, ZHANG Song-yang, WANG Hanying. Research on Plastic Forming of Heat – resisting Wrought Magnesium Alloy[J]. Material & Heat Treatment, 2011, 40(16):22-23.

[7] XIA Xiang-sheng, CHEN Ming, LU Gong-jin. Microstructure and Mechanical Properties of Isothermal Multi-axial Forging Formed AZ61 Mg Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23:3186—3192.

(下转第93页)

[D]. 北京:北京航空航天大学,2007.

LI Wei-dong. Technological Research and System Development of Numerical Stretch Forming for Aircraft Skin [D]. Beijing:Beihang University,2007.

[5] 吴向东,万敏,李盛. 便携式板料应变测量系统 GMAS
 [J],锻压技术,2005(z1):208—210.

WU Xiang – dong, WAN Min, LI Sheng. Potable Sheet Metal Strain Measurement System GMAS[J]. Forging & Stamping Technology,2005(z1):208—210.

- [6] 彭静文,李卫东,万敏. 机翼前缘蒙皮拉形工艺参数优 化与试验[J]. 塑性工程学报,2011,18(4):74—78.
  PENG Jing-wen, LI Wei-dong, WAN Min. Optimization and Experimental Research of Processing Parameters in Stretch Forming of Wing Leading Edge Skin[J]. Journal of Plasticity Engineering,2011,18(4):74—78.
- [7] 韩金全.飞机蒙皮拉形模具型面与工艺参数优化研究
   [D].北京:北京航空航天大学,2009.
   HAN Jing-quan. Design and Optimization of Tool Surface and Processing Parameters in Aircraft Stretching[D]. Bei-

jing: Beihang University,2009.

- [8] BAHLOUL R, MKADDEM A, DAL SANTO P, et al. Sheet Metal Bending Optimization Using Response Surface Method, Numerical Simulation and Design of Experiments
   [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006 (48):991-1003.
- [9] JANSSON T, ANDERSSON A, NILSSON L. Optimization of Draw-in for an Automotive Sheet Metal Part An Evaluation Using Surrogate Models and ResponseSurfaces [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005 (159):

[8] 吴远志,严红革,朱素琴,等. 多向锻造 ZK60 镁合金组 织和性能的均匀性[J]. 中国有色金属学报,2014,24 (2):310-316.

WU Yuan-zhi, YAN Hong-ge, ZHU Su-qin, et al. Homogeneity of Microstructure and Mechanical Properties of ZK60 Magnesium Alloys Fabricated by High Strain Rate Triaxial-forging [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2):310—316.

[9] 夏祥生. 多向锻造 EW75 合金组织及力学性能研究 [D]. 北京:北京有色金属研究总院,2012.

> XIA Xiang-sheng. Study on the Microstructures and Mechanical Properties of EW75 Alloy During Multidirectional Forging [D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2012.

426-434.

- [10] MKADDEMA A, BAHLOUL R. Experimental and Numerical Optimization of the Sheet Products Geometry Using Response Surface Methodology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007(189):441-449.
- [11] HE De-hua, LI Dong-sheng, LI Xiao-qiang. Optimization on Springback Reduction in Cold Stretch Forming of Titanum-alloy Aircraft Skin [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010(20):2350-2357.
- [12] HE De-hua, LI Xiao-qiang, LI Dong-sheng. Process Design for Multi-stage Stretch Forming of Aluminum Alloy Aircraft Skin[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010(20):1053-1058.
- [13] O'Donnell M. Finite Element Modeling of a Multi-stage Stretch-forming Operation Using Aerospace Alloys [D]. Belfast: University of Ulster, 2003.
- [14] HEUNG K, SEOK H. FEM based Optimum Design of Multi-stage Deep Drawing Process of Molybdenum Sheet
   [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184(1/3):354—362.
- [15] CAI Zhong-yi, WANG Shao-hui, XU Xu-dong. Numerical Simulation for the Multi – point Stretch Forming Process of Sheet Metal [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009 (209): 396—407.
- [16] ESMAEILIZADEH Reza, KHALILI Kourosh, MOHAM-MADSADEGHI Bagher, et al. Simulated and Experimental Investigation of Stretch Sheet Forming of Commercial AA1200 Aluminum Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(2):484-490.

 [10] 徐烽. 多向锻造变形对 ZK60 镁合金组织和性能影响
 [D]. 南京:南京理工大学,2011.
 XU Feng. Effect of Multi-direction Forging Process on Microstructure and Mechanical Properties of ZK60 Magnesium Alloy[D]. Nanjing; Nanjing University of Science &

[11] 简炜炜,康志新,李元元. 多向锻造 ME20M 镁合金的 组织演化与力学性能[J].中国有色金属学报,2008, 18(96):1006—1011.

Technology, 2011.

JIAN Wei-wei, KANG Zhi-xin, LI Yuan-yuan. Microstructural Evolution and Mechanical Property of ME20M
Magnesium Alloy Processed by Multidirectional Forging
[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18
(6):1006—1011.

<sup>(</sup>上接第71页)