

Mg-Y-Nd-Zr-Zn 铸造镁合金组织与性能研究

张艳平, 陶健全, 李晓松, 孙昌建

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 镁合金的显微组织演变和力学性能。**方法** 采用金相显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、能谱 (EDS) 以及电子万能实验机等, 研究了 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 镁合金铸态及 T6 态的组织与性能。**结果** Mg-Y-Nd-Zr-Zn 铸态合金组织由含 Y 的镁基固溶体、网状富稀土的共晶相和颗粒状的 Zr 单质组成; 经 525 °C×10 h+200 °C×16 h 处理后, 晶界网状第二相消失, 细小的 Mg-RE 金属间化合物从基体中析出, 弥散分布于晶界及晶内。**结论** T6 处理后, Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金力学性能显著提高, 抗拉强度、屈服强度和断裂伸长率分别为 306 MPa, 230 MPa 和 3.5%。

关键词: Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金; T6; 组织; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.016

中图分类号: TG29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2016)04-0083-04

Microstructure and Properties of Mg-Y-Nd-Zr-Zn Casting Magnesium Alloy

ZHANG Yan-ping, TAO Jian-quan, LI Xiao-song, SUN Chang-jian

(Southwest Technique and Engineering Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: In order to study the microstructure evolution and mechanical performance of the Mg-Y-Nd-Zr-Zn magnesium alloy, the microstructure and mechanical performance of Mg-Y-Nd-Zr-Zn alloy of cast and T6 treatment were studied by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), energy spectrum (EDS) and electronic universal testing machine. The results showed that: the microstructure of cast Mg-Y-Nd-Zr-Zn magnesium mainly included solid solution containing Y, net rare earth-rich eutectic phase and particulate Zr elemental composition. The grain boundary reticular second phase disappeared between small Mg-RE intermetallic compound precipitated from the matrix, dispersed in the grain boundary and grain by the 525 °C × 10 h + 200 °C × 16 h heat treatment. After T6 treatment, the mechanical properties of Mg-Y-Nd-Zr-Zn alloy increases significantly, and the tensile strength, yield strength and break elongation reach 306 MPa and 230 MPa and 3.5% respectively.

KEY WORDS: Mg-Y-Nd-Zr-Zn alloy; T6; microstructure; mechanical properties

镁合金作为工业应用中最轻的金属结构材料, 已广泛应用于航空、航天、兵器、交通、电子等领域^[1-3]。镁与一些金属元素合金化后可显著提高材料的性能。已有研究表明^[4-6], 稀土元素 (RE), 如 Y, Ce, Nd 等能够显著提高镁合金的室温和高温力学性能。

稀土元素原子扩散能力差, 既可提高镁合金的再结晶温度和减缓再结晶过程, 又可以析出非常稳定的弥散相粒子, 从而大幅度提高镁合金的高温强度和蠕变能力。镁合金中添加 2 种或 2 种以上的稀土元素时, 由于稀土元素间的相互作用, 能降低彼此在镁

收稿日期: 2016-02-28

作者简介: 张艳平 (1987—), 女, 湖北人, 硕士, 工程师, 主要从事生产安全管理工作。

中的固溶度,并相互影响其过饱和固溶体的沉淀析出动力学,产生附加的强化作用,同时稀土元素能使合金凝固温度区间变窄,提高铸件的致密性^[7-8]。为进一步分析稀土元素 Y, Nd 在铸造镁合金中的作用和组织演变,本文研究 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 铸造合金的铸态和 T6 态的组织 and 力学性能。

1 实验

试样制备采用的中间合金及原材料为 MgY30, MgZr30, MgNd30 中间合金, Zn 锭、Mg 锭(99.6%)、RJ-6 熔剂。熔炼过程为:将原材料预热至 300 °C,坩埚预热至暗红色,撒入 RJ-6 熔剂;加入镁锭,熔化至 780 °C;加入 Zn 锭、MgY30 和 MgNd30 中间合金,保持加入温度不低于 780 °C,氩气搅拌 3~5 min,分批加入 MgZr30 中间合金,升温至 800 °C 并精炼 15~20 min,精炼剂为 RJ-6 熔剂。精炼完成后,静置 20~40 min,降温至 740 °C,浇入树脂砂型模型中。实验合金的主要成分为:Y 6.12%, Nd 2.41%, Zr 0.49%, Zn 0.17%。T6 态试样的热处理工艺为 525 °C×10 h(80 °C 热水淬火)+200 °C×16 h(空冷)。

铸态及 T6 态的组织试样经 40~1200 目砂纸打磨后,采用化学抛光,再用 5% 的硝酸酒精腐蚀。采用金相显微镜(OM)及扫描电镜(SEM)分析合金热处理前后的组织形貌,析出相的形态、大小及分布。采用能谱仪(EDS)进行微区分析,确定析出相的种类。对铸态及 T6 热处理态的拉伸试样,按金属材料室温拉伸试验方法(GB/T 228—2002)的规定进行加工和拉伸测试,试验设备为 CSS-44100 型电子万能试验机,拉伸速度为 1 mm/min。在同一状态下测试 3 根试样,取平均值。

2 结果与讨论

2.1 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金铸态组织

图 1 所示为砂型铸造 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 镁合金的铸态显微组织。铸态组织主要由 α -Mg 基体、网状分布的析出相组成,且析出相呈网状不规则分布于晶界处,铸态 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金平均晶粒尺寸为 80 μm 。

相关研究表明^[9-12],化学结构相似性的稀土元素间互相取代可形成多元金属间化合物。铸态 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金中晶界第二相应为 Mg-Y,

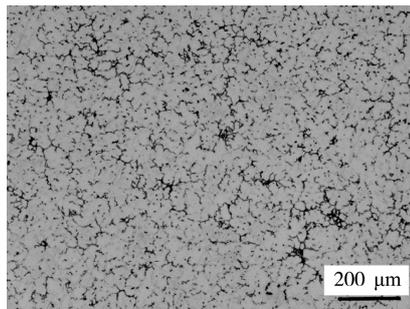


图 1 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 镁合金铸态显微组织

Fig.1 The as-cast microstructure of Mg-Y-Nd-Zr-Zn magnesium alloy

采用能谱仪对铸态组织中基体(A)、颗粒状组织(B)和网状共晶组织(C)3种不同形态的化合物成分进行分析表明,这3种相分别为含Y的镁基固溶体、颗粒状的Zr单质、富稀土的共晶相。稀土元素Y和晶粒细化剂Zr在合金中的分布较为均匀,而Nd则主要以第二相的形式偏聚在晶界上,形成金属间化合物。

铸态 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金 SEM 和 EDS 分析结果如图 2 所示。由图 2 可见,铸态 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金析出相主要分布在晶界处,在晶粒和晶界处还有弥散分布的颗粒状化合物。

2.2 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金 T6 态组织

合金经 T6 处理后,晶粒形态及尺寸,第二相的组成、数量、形态及分布,发生明显改变。图 3 所示为 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 镁合金 T6 态的显微组织。合金经 525 °C×10 h+200 °C×16 h 热处理后,晶粒发生明显长大,平均晶粒尺寸为 150 μm 。经 T6 处理后,铸态合金晶界上的网状共晶组织已基本消失,固溶到镁基体中,基体中有少量的颗粒状第二相呈弥散分布。

图 4 所示为 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金 T6 态 SEM 形貌及 EDS 分析结果,通过对组织中的颗粒状析出相进行能谱分析发现,析出相含有大量的 Y 和 Nd 稀土元素,因此,弥散分布的晶内颗粒状化合物为富稀土的共晶相。

2.3 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金力学性能

Mg-Y-Nd-Zr-Zn 镁合金铸态及 T6 热处理态的室温力学性能如表 1 所示。铸态合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 224 MPa, 175 MPa 和 2.0%。经 525 °C×10 h(80 °C 热水淬火)+200 °C×16 h(空冷)热处理后,合金的抗拉强度、屈服强度和

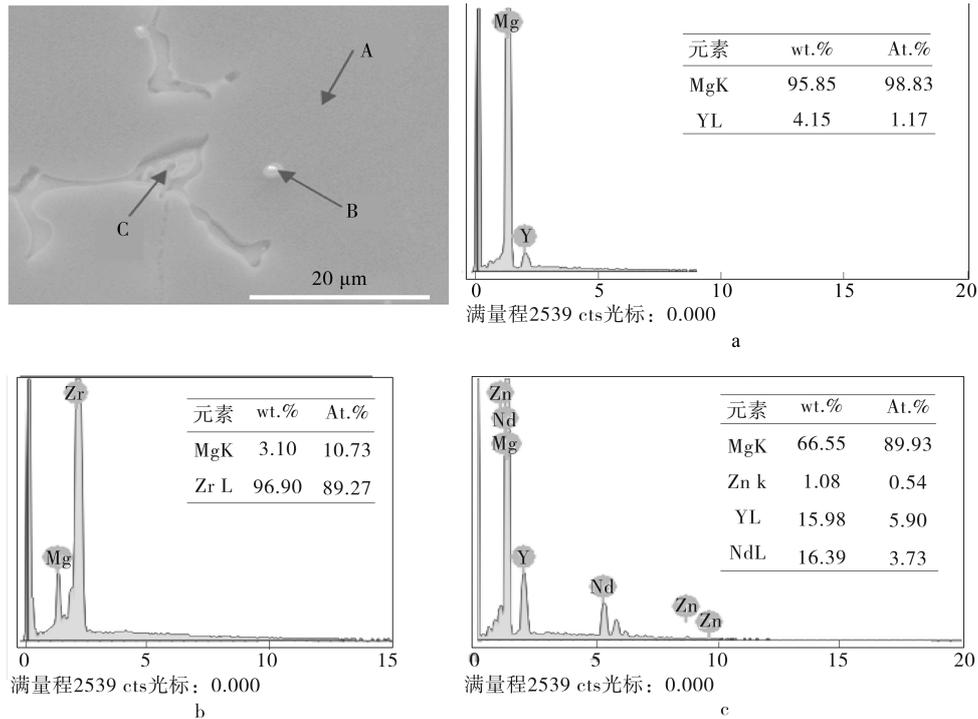


图 2 铸态 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金 SEM 和 EDS 分析结果
 Fig.2 The SEM and EDS analysis results of as-cast Mg-Y-Nd-Zr-Zn alloy

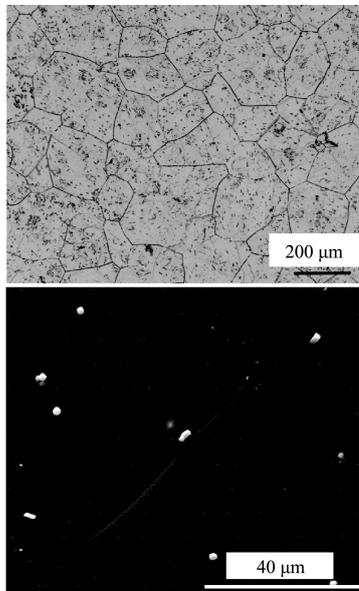


图 3 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 镁合金 T6 态的显微组织
 Fig.3 The microstructure of T6 state for Mg-Y-Nd-Zr-Zn magnesium alloy

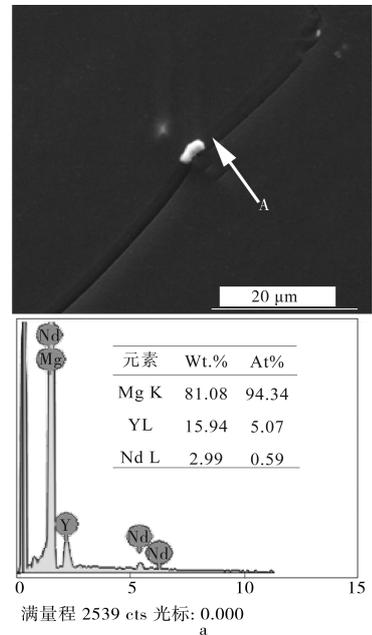


图 4 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金 T6 态 SEM 形貌及 EDS 分析结果
 Fig.4 The SEM morphology and EDS results of Mg-Y-Nd-Zr-Zn alloy by T6 treatment

断后伸长率分别为 306 MPa, 230 MPa 和 3.5%。

Mg-Y-Nd-Zr-Zn 镁合金力学性能的提高, 主要是由于稳定的 Mg-RE 第二相的强化作用^[13-16]。稀土镁合金在 525 °C 固溶处理过程中, 晶界网状分布的不稳定的化合物发生分解, 共晶组织发生完全固溶。

在 200 °C 时效过程中, 细小的 Mg-Y, Mg-Nd 等第二相从基体中逐渐析出, 以颗粒状的形态弥散分

表 1 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金室温力学性能

Table 1 The mechanical properties of Mg-Y-Nd-Zr-Zn alloys at room temperature

合金状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率/%
F	224	175	2.0
T6	306	230	3.5

布于晶界及晶内,稳定的颗粒状第二相一方面可阻碍晶粒内部位错的滑移,提高 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金晶粒本身的抗变形能力,另一方面可强烈抑制晶界的滑动,对合金室温性能具有较好的强化作用。

3 结论

(1) Mg-Y-Nd-Zr-Zn 铸态合金组织由含 Y 的镁基固溶体、网状富稀土共晶相和颗粒状的 Zr 单质组成。

(2) 经 T6 处理后, Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金中晶界网状第二相消失,细小的 Mg-RE 金属间化合物从基体中析出,弥散分布于晶界及晶内。

(3) 铸态 Mg-Y-Nd-Zr-Zn 合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 224 MPa、175 MPa 和 2.0%。经 T6 处理后,抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 306 MPa、230 MPa 和 3.5%。

参考文献:

- [1] 杨素媛,张丽娟. 稀土镁合金的研究现状及应用[J]. 稀土, 2008, 29(4): 81—86.
YANG Su-yuan, ZHANG Li-juan. Research Status of RE-Mg Alloy[J]. Chinese Rare Earths, 2008, 29(4): 81—86.
- [2] 万迪庆,袁艳平,周新建,等. 高强镁合金组织细化方法研究现状[J]. 材料导报, 2015, 29(9): 76—80.
WAN Di-qing, YUAN Yan-ping, ZHOU Xin-jian, et al. A Review of Microstructure Refinement Methods for High Strength Magnesium Alloys[J]. Materials Review, 2015, 29(9): 76—80.
- [3] 李杰华,介万奇,杨光昱,等. 合金化元素 Zn 对 GW 系镁合金组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2007, 43(10): 1077—1081.
LI Jie-hua, JIE Wan-qi, YANG Guang-yu, et al. Influences of Alloying Element Zn on The Microstructures and Mechanical Properties of Gw Series Magnesium Alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(10): 1077—1081.
- [4] 李德君,任凤章,刘平,等. 稀土 Nd 对 AZ31 变形镁合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(10): 1876—1882.
LI De-jun, REN Feng-zhang, LIU Ping, et al. Effect of Rare Earth Nd on Microstructure and Mechanical Properties of AZ31B Wrought Magnesium Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(10): 1876—1882.
- [5] 彭建,吕滨江,胡耀波,等. 稀土 Y 对 Mg-2.0Zn-0.3Zr 镁合金铸态组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(4): 672—677.
Peng Jian, Lv Bing-jiang, Hu Yao-bo, et al. Effect of Rare-Earth Y on Microstructure and Mechanical Properties of As-Cast Mg-2.0Zn-0.3Zr Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(4): 672—677.
- [6] 刘楚明,李冰峰,刘洪挺,等. 稀土元素 Nd 和 Dy 对铸态 ZK10 镁合金组织及性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(1): 125—131.
LIU Chu-ming, LI Bing-feng, LIU Hong-ting, et al. Effect of Nd and Dy on microstructure and mechanical properties of as-cast ZK10 magnesium alloy[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2010, 41 (1): 125—131.
- [7] 郑伟超,李双寿,汤彬,等. 混合稀土对 AZ91D 镁合金组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(8): 835—842.
ZHENG Wei-chao, LI Shuang-shou, TANG Bin, et al. effects of Mischmetal on Microstructure and Mechanical Properties of az91d magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(8): 835—842.
- [8] 谢飞,胡静,林栋梁,等. 稀土 Y 含量对铸造镁合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(3): 90—93.
XIE Fei, HU Jing, LIN Dong-liang, et al. Influence of Yttrium Content on Microstructure and Property of East Magnesium Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(3): 90-93.
- [9] 夏长清,武文花,吴安如,等. Mg-Nd-Zn-Zr 稀土镁合金的热变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(11): 1810—1816.
Xia Chang-qing, Wu Wen-hua, Wu Ru-an, et al. Hot-compression Deformation Behavior of Mg-Nd-Zn-Zr Magnesium Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(11): 1810—1816.
- [10] 王振东,房灿峰,孟令刚,等. 高强 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的微观组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(1): 1—6.
WANG Zhen-dong, FANG Can-feng, MENG Ling-gang, et al. Microstructures and Mechanical Properties of High-strength Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(1): 1—6.
- [11] 张修丽,李德辉,刘路,等. Mg-Y-Nd 合金中的析出相[J]. 材料导报, 2006, 20(z1): 465—466.
ZHANG Xiu-li, LI De-hui, LIU Lu, et al. Phase Precipitated in a Mg-Y-Nd Alloy[J]. materials REVIEW, 2006, 20(z1): 465—466.
- [12] 刘娟,夏长清,吴安如,等. Mg-5.0Y-3.0Nd-0.5Zr 合金铸态组织和力学性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(9): 720—721.
Liu Juan, Xia Chang-qing, Wu An-ru, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Mg-5.0Y-3.0Nd-0.5Zr Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(9): 720—721.
- [13] SHI Fei, WANG Chun-qing, ZHANG Zhong-ming, et al. Microstructures, Corrosion and Mechanical Properties of As-cast Mg-Zn-Y(Gd) Alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(7): 2172—2180.
- [14] JAN(I)K V, HNILICA F, ZUNA P, et al. Cavitation and Grain Boundary Sliding during Creep of Mg-Y-Nd-Zn-Mn alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(z1): 64—68.
- [15] Azzeddine H, Bradal D. On Some Aspects of Compressive Properties and Serrated Flow in Mg-Y-Nd-Zr alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2013(8): 804—810.
- [16] 张丁非,张红菊,段作衡,等. Nd 对 Mg-6Zn-Mn 镁合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料工程, 2013(3): 1—5.
ZHANG Ding-fei, ZHANG Hong-ju, DUAN Zuo-heng, et al. Effect of Nd Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Mg-6Zn-Mn Magnesium Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(3): 1—5.