



热处理对 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金组织和力学性能的影响

蔚晓嘉, 刘邱祖, 韩世平

(太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024)

摘 要: 通过 OM、XRD、TEM、SEM 和电子拉力试验机等, 研究了固溶和时效处理对 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr(质量分数, %)合金显微组织和力学性能的影响。结果表明: 合金铸态组织由 α -Mg 基体和含 Mg₅Gd 相、Mg₁₂Nd 相的粗大枝晶组成, 经过热处理后, 合金中方块状颗粒相明显增多, 且分布在晶界处; 固溶时效态合金析出的纳米尺寸方块相可有效强化合金。时效态合金中 β' 析出相形态类似多个纺锤形相连接而成, 相互之间的夹角呈 120°, 且具有周期结构。铸态、固溶态和时效态合金在不同状态下的室温拉伸强度分别为: 189.3、201.4 和 251.1 MPa。

关键词: Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

随着航天技术的广泛发展, 对具有高温高力学性能的轻质结构材料的需求已经显得非常迫切, Mg-RE 合金因具有独特优势得到广泛的应用。众所周知, 在合金液中加入适量的稀土元素能够有利地改善其微观组织以及宏观力学特性, 尤其是在抗氧化和蠕变等方面, 因此对稀土元素在 Mg-RE 合金中的应用研究备受学者的关注^[1-5]。Gd 在 Mg-RE 液态合金中具有较高的固溶度, 且其固溶度能够随温度的降低快速减小, 可以实现对态合金的固溶强化和时效强化作用, 因此被认为是提高镁合金性能的典型稀土元素^[6-7]。FRONZI 等^[8]的研究表明, 稀土元素 Nd 与 Mg-RE 液态合金作用形成的 Mg₁₂Nd 相具有较高的硬度和熔点, 尤其是在 Mg-Gd 合金中能够有效地提高力学强度和抗蠕变性能。MOKDAD 等^[9]的研究表明, Zr 作为一种晶粒细化剂, 能够有效地阻碍位错移动和晶粒长大, 进而提高镁合金的力学性能。

在对高性能镁合金的探索 and 开发中, 由于 Mg-Gd 系合金的固溶体具有典型的时效强化特征, 研究者往往通过热处理使镁合金的性能达到应用标准^[10]。大量研究表明, Mg-Gd、Mg-Gd-Nd 等合金系时效析出序列为: SSSS(α -Mg 过饱和固溶体)→GP 区→ β'' (D0₁₉)→ β' (CBCO)→ β 1(FCC)→ β (FCC)。Mg-Gd 系合金时效初期 β'' (Mg₃Gd)相与 β' (Mg₇Gd)相共存于镁基体中, 两者

呈 120° 夹角且以纺锤状均匀分布^[11-12]。该相对应于合金的时效硬化峰值, 而且能在较大的温度范围内存在, 具有很强的稳定性, 是合金显著强化、抗蠕变性能提高的一个主要因素。

本文作者在相关文献研究的基础上, 探讨 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金固溶时效处理对其显微组织和力学性能的影响, 为研发高性能镁合金提供依据。

1 实验

实验原材料: 纯镁锭 (99.95%) 和中间合金 Mg-30Gd、Mg-25Nd、Mg-25Zr, 配料前要把原材料在装炉前进行烘干处理, 以保证后续的配量精度; 配料时考虑合金烧损率对各合金元素增配一定值。把感应炉中熔炼后的合金进行在 1%SF₆+99%CO₂(体积分数)混合气体保护环境下进行浇注处理, 进而把熔化后合金持续升温至 710 °C, 并保温 10 min, 然后浇注进入预热温度 250 °C 的模具中。浇注成型后在镁合金铸锭表面喷洒一层 MgO 粉, 然后通过箱式炉对其进行固溶(525 °C, 8 h)和时效(225 °C, 16 h)处理。

利用高精密的 Olympus 光学显微镜、JSM-5610LV 型扫描电镜(SEM)、JEM-2100 型高分辨透射电镜

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(20140321014-02)

收稿日期: 2015-11-01; 修订日期: 2016-06-01

通信作者: 蔚晓嘉, 副教授, 博士; 电话: 0351-6010010; E-mail: wswang222@126.com

(HRTEM)进行观察和分析显微组织测试和分析。通过截线法测量试样的室温拉伸断口形貌的晶粒尺寸,并在扫描电镜自带的能谱仪(EDS)进行微区成分分析,同时采用 D8Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)对试样进行物相分析。相关试样的拉伸试验在岛津 AG-I250kN 型精密万能实验机上进行,拉伸试验过程中速度设定为 1 mm/min。

2 结果与分析

2.1 合金的显微组织

图 1 所示为 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 为合金的显微组织。铸态合金组织主要由 α -Mg 基体和共晶相组成,枝状共晶相沿晶界呈断续网状分布,合金平均晶粒尺寸约为 52 μm (见图 1(a))。由于金属模凝固过程中冷却速度较快,合金初生枝晶一旦形成还来不及长大,温度就降到了共晶反应温度,初生枝晶间的液相开始发生共晶反应,形成共晶相,此时液相含量很多,共晶相含量较大,形成了断续网状分布。固溶态合金组织由 α -Mg 基体和少量沿着晶界分布的块状或长条不规则形状未溶相组成,网状枝晶化合物得到逐步消失(见图 1(b))。时效态合金组织出现了部分孪晶,并且有块状、颗粒状析出相分布在晶界、晶内,经测量,固溶时效后的晶粒平均尺寸为 64 μm (见图 1(c))。

图 2 所示为 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金的 XRD 谱。由图 2 可知:铸态组织包括 α -Mg 基体、 Mg_5Gd 相和 Mg_{12}Nd 相。共晶相可看作准二元共晶反应($L\text{-Mg} \rightarrow \alpha\text{-Mg} + \beta\text{-(Mg}_5\text{Gd} + \text{Mg}_{12}\text{Nd})$)的产物。说明铸态 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金的 XRD 衍射峰来自 α -Mg 基

体和 $\beta\text{-(Mg}_5\text{Gd} + \text{Mg}_{12}\text{Nd})$ 相。随着固溶过程的进行,共晶相逐渐溶解。经过固溶处理后, Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金中的共晶相基本溶入镁基体之中,残留共晶相的 XRD 衍射峰已不明显。时效态合金的衍射峰发生明显变化,除 α -Mg 基体和方块相衍射峰以外,几乎没有其他相的衍射峰。

图 3 所示为 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 为合金组织的 SEM 像。粗大的铸态枝晶,沿着晶界分布(见图 3(a));固溶态合金中颗粒状未溶相,少数呈小方块状分布在晶界和晶界附近(见图 3(b));时效态析出物中方块状颗粒明显增多,沿着晶界分布(见图 3(c))。合金经过 T6 处理后, Mg_5Gd 相在晶界附近再次析出,形态转变为方块颗粒状,而 Mg_{12}Nd 相的析出方式没有改变,同样为在晶界上形成的颗粒状。这说明固溶处理后溶解于镁基体内的 β 相在时效时重新析出。由于过饱和 Gd 原子脱溶方式的改变以及 Gd 原子扩散速率的增大,使得 β 相由铸态时的树枝状转变为热处理后的颗粒状。

Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金经过固溶时效处理后,合金晶界和晶内均有一些白色颗粒,通过 SEM 可清晰的看到这些白色颗粒呈方块相(见图 3(c)),将其中一个方块相单独放大来进行分析,如图 4 所示。根据 EDS 分析,确定这些方块相为富 Gd 的化合物,同时含有部分的 Nd,且 Gd 含量超过 70%。合金经过固溶时效处理后,共晶相几乎都溶入 α -Mg 基体,但合金中的方块相却明显增多并且有长大的现象。这些方块相可能来源于两个方面:一是少量的方块相在合金铸造过程中已经形成,由于其热稳定性好,在固溶时效处理过程中没有溶入 α -Mg 基体,而保留下来,同时共晶化合物中稀土原子向块状相扩散,使方块相长大;二

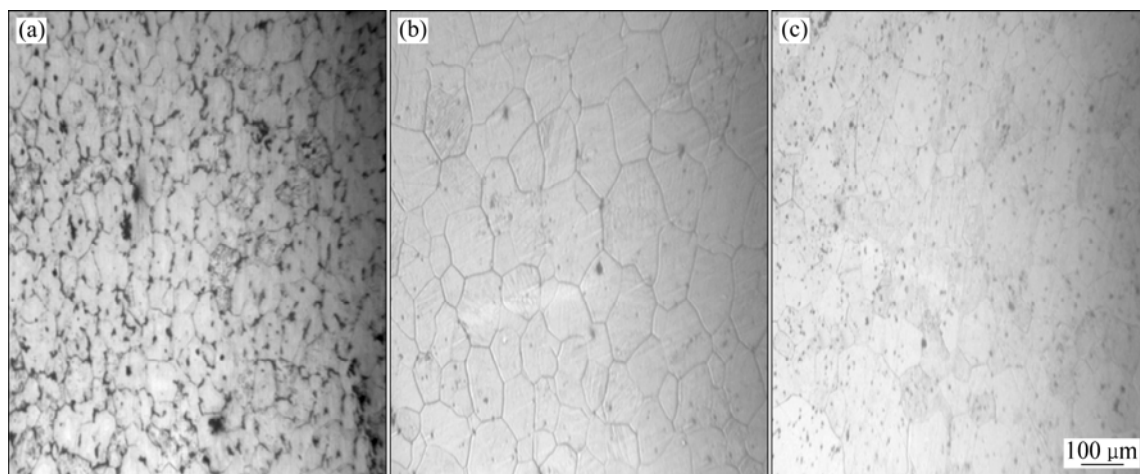


图 1 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金显微组织

Fig. 1 Microstructures of Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy: (a) As-cast; (b) Solid solution state; (c) Aging state

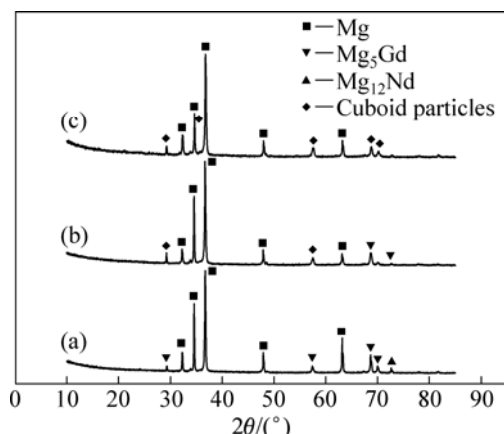


图2 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr合金的XRD谱

Fig. 2 XRD patterns of Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy: (a) As-cast; (b) Solid solution state; (c) Aging state

是固溶过程中, 稀土元素 Gd 和 Nd 与元素 Mg 及 Zr 进行重新组合, 形成新的方块相, 因此方块相的数量增加了。

研究发现, 其他 Mg-RE 合金中也存在类似的方块相, MOVAHEDI 等^[13]对 WNG421 合金中的方块相研究发现, 该方块相可能为富 Y、Gd 和 Nd 的镁固溶体, 且为面心立方(FCC)结构, 点阵常数 $a=0.56$ nm。此方块相形状特殊, 聚集后容易造成应力集中, 萌发裂纹, 从而影响合金的强度和塑性。另外, 此方块相中稀土含量很高, 在时效过程中会减少析出相的含量, 使析出强化作用减弱。目前, 还没有关于方块相对合金的力学性能影响的确切结论。

图 5 所示为合金组织的 TEM 明场像及选区电子衍射像。图 5(a)所示为合金铸态枝状共晶相的一部分, 呈柱棒状, 尺寸为微米级。在入射角为 $[\bar{4}9\bar{3}]_{\beta}$ 时, 晶

粒内 β 相呈枝状型态(见图 5(a'))。图 5 (b)所示为固溶态的合金组织, 绝大部分第二相(尤其是晶界相)已固溶于镁基体中, 且没有新相产生。未溶相呈颗粒状弥散分布在合金晶内与晶界。入射方向为 $[3\bar{3}0\bar{1}]_{\alpha}$ 的选区电子衍射谱, 分析颗粒状相主要是 Mg 和 Gd 合金互相作用的生成相(见图 5(b'))。通过固溶处理之后, Mg_5Gd 和 $Mg_{12}Nd$ 相已固溶于镁基体内, 而具有较高转变温度的 Mg_3Gd 和 $Mg_{41}Nd$ 在此固溶工艺条件下难于发生转变。图 5(c)所示为时效态合金组织, 合金经过时效后, 大量颗粒状及方块状的析出相弥散分布, 尺寸为纳米级。纳米级析出相的脱溶析出有效强化合金, 提高合金的耐蚀性能。图 5(c')所示为入射方向为 $[\bar{1}010]_{\alpha}$ 的选区电子衍射谱, 图中出现的小斑点在 $1/4\{0\bar{1}\bar{1}\}_{\alpha}$ 、 $1/2\{0\bar{1}\bar{1}\}_{\alpha}$ 和 $3/4\{0\bar{1}\bar{1}\}_{\alpha}$ 的位置。因为 Mg-Gd 系合金中的 β' 相具有底心正交结构, 可以判定选区中的电子衍射斑点符合 $[\bar{1}010]_{\alpha} // [\bar{1}00]_{\beta'}$ 、 $(0\bar{1}\bar{1})_{\alpha} // (020)_{\beta'}$ 和 $(0001)_{\alpha} // (00\bar{1})_{\beta'}$ 。

图 6 所示为 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金入射方向为 $[0001]_{\alpha}$ 时的 TEM 形貌及选区电子衍射分析图, 图 6(b)中有小斑点在 $1/4\{-1010\}_{\alpha}$ 、 $1/2\{-1010\}_{\alpha}$ 和 $3/4\{-1010\}_{\alpha}$ 位置出现, 经计算确定为 β' 相。由此可知: β' 相形状为多个类似纺锤形结构单元相互联结而成, 相互间夹角为 120° , 图中显示的衍射斑点是由 α -Mg 基体和 3 种具有固定位向关系的 β' 相衍射斑点组成, 符合文献[14-16]所述的 Mg-Gd 系合金 β' 相和 α 相的晶体学位向关系。

图 7(a)所示为时效态合金的 TEM 高分辨像。通过对图 7(a)中 A 和 B 两个区域进行傅立叶变换处理, 得到选区衍射斑点图如图 7(b)所示。由此可知, 衍射斑点特征明显符合图 6(b)所示 β' 析出相与 α 相的位向关

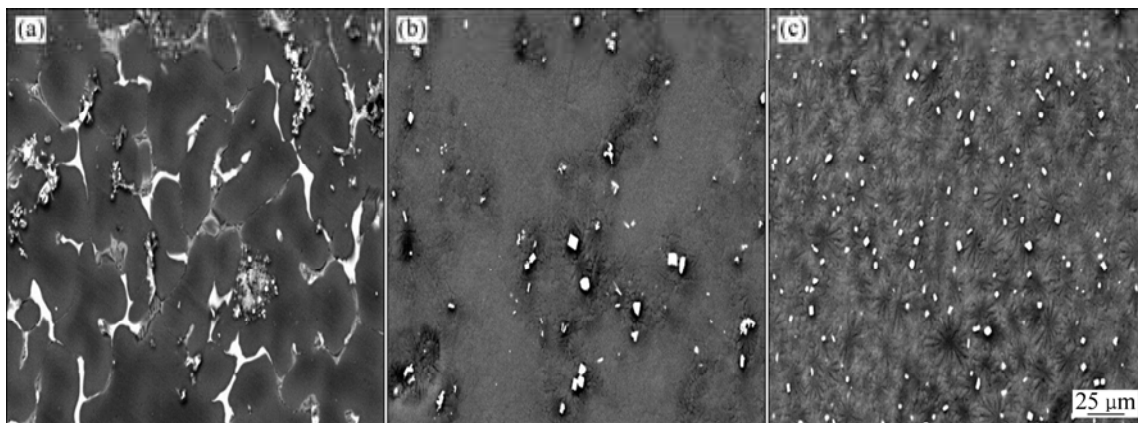


图3 合金的SEM像

Fig. 3 SEM images of Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy: (a) As-cast; (b) Solid solution state; (c) Aging state

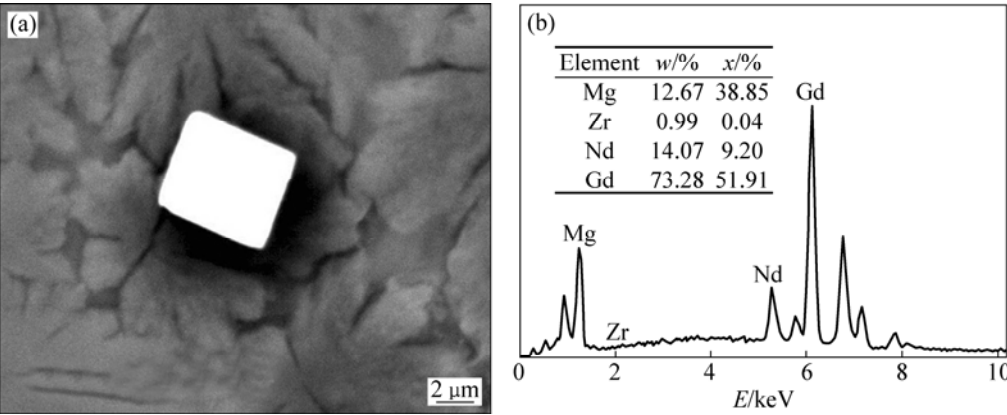


图 4 方块相形貌和能谱分析
Fig. 4 SEM image (a) and EDX spectrum (b) of cuboidal particle

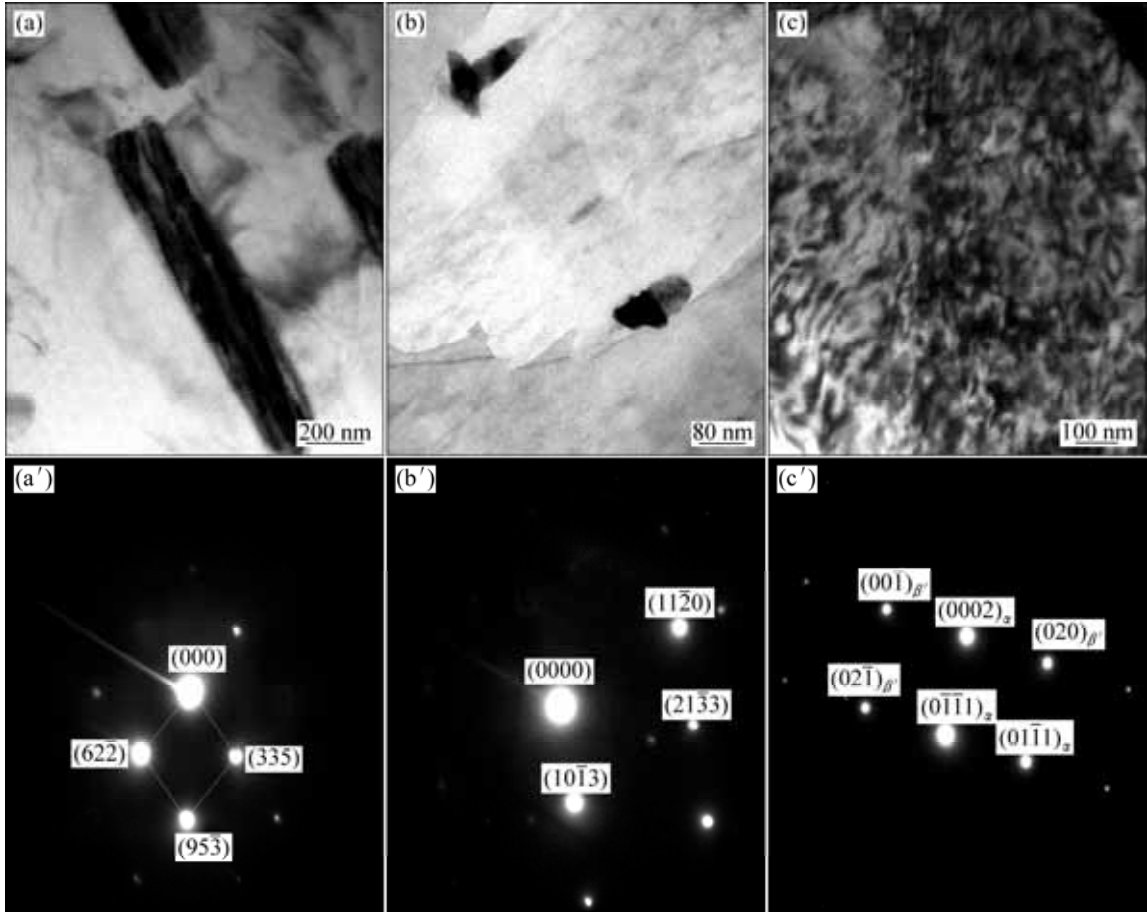


图 5 合金的 TEM 像及选区电子衍射谱
Fig. 5 TEM images and SAED patterns of Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy: (a), (a') As-cast; (b), (b') Solid solution state; (c), (c') Aging state

系, 在此位向下, β' 相具有周期结构。

2.2 合金的力学性能及强化机理

表 1 所列为不同状态的 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金在室温下的拉伸试验结果。由表可知: 合金的抗拉强度经过固溶态处理后略有增大, 提高了 6.4%, 而经过

时效处理后则显著提高了 32.6%, 这说明该合金具有良好的时效强化效果。合金的屈服强度和伸长率在固溶态经过时效处理后有明显上升趋势。

一般来说, 镁合金的力学性能与微观组织的均匀性和强化相的数量及分布情况有密切关系。对于 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金而, 而强化机理如下:

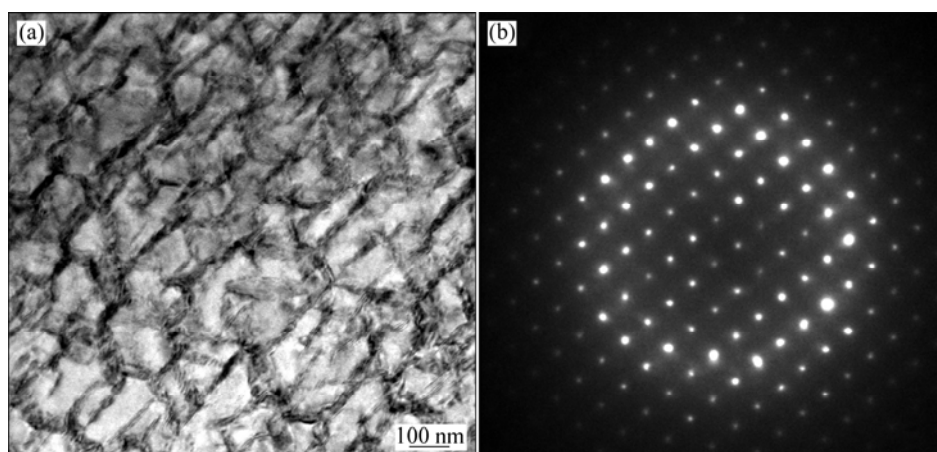


图6 时效态合金的TEM明场像及选区电子衍射谱

Fig. 6 Bright-field TEM image (a) and SAED pattern (b) of aged alloy

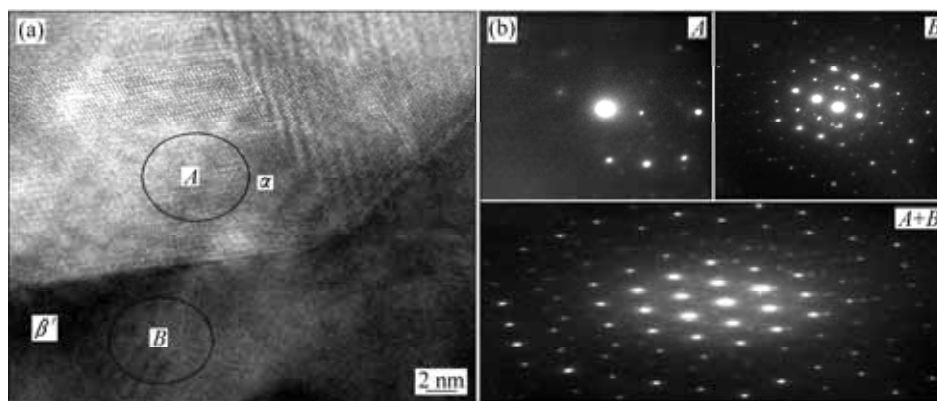


图7 时效态合金高分辨图像及傅立叶变换谱

Fig. 7 HRTEM images (a) and Fourier transform spectrum (b) of aged alloy

表1 合金室温下的力学性能

Table 1 Mechanical properties of alloy at room temperature

Treatment process	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
As-cast	189.3	171.6	2.91
Solid solution	201.4	168.2	2.78
Aging state	251.1	228.7	3.55

1) 金属间化合物 Mg_5Gd 和 $Mg_{12}Nd$ 具有较高的硬度和热稳定性, 这对增加材料的室温和高温力学性能及热稳定性有积极作用。

2) 经热处理后的合金内部组织均匀、晶粒细化, 析出的方块状颗粒相弥散度较高, 可以有效地阻碍位错运动, 这为材料的细晶强化和弥散强化提供了重要途径。

3) 稀土元素 Gd 原子半径($r(Gd)=0.18$ nm)较大, 能明显提高合金元素的固溶强化效果。合金在凝固时易形成过饱和固溶体, 经过时效处理后, 合金内析出

均匀分布的强化相, 与镁基体呈共格关系^[17-18], 相当于在较软的镁基体上嵌入一些不规则的方块状的硬质颗粒。在拉伸载荷的作用下, 这些位向各异的硬质颗粒将发生转动来协调变形, 从而使晶粒内部产生新的位错; 继续施加载荷, 位错开始移动, 当位错移动到析出相界面时会产生位错塞积, 造成应力集中效应; 当应力集中达到析出相的强度极限时, 析出相将会开裂。显然, 这种硬质颗粒的阻碍作用会随着析出相的数量增多而增大, 虽然会在一定程度上提高合金强度, 但会对基体造成一定的割裂损伤, 进而降低合金塑性, 这与拉伸力学性能测试得到的结果一致。

3 结论

1) $Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr$ 合金铸态组织呈现粗大枝状晶, 且呈断续网状分布, 经固溶处理后大部分枝晶

溶入镁基体, 只有少量颗粒、方块状相未溶, 再经过时效处理后方块相有逐步长大趋势, 尤其是晶界处方块相的数量显增多。

2) XRD 分析得到 Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金的物相包括: 铸态有 α -Mg、Mg₅Gd 相和 Mg₁₂Nd 相, 固溶态有 α -Mg、Mg₅Gd 和方块相, 时效态只有 α -Mg 和方块相。经 TEM 和选区电子衍射分析确定 β' 析出相形态类似多个纺锤形结构相连接, 具有相互间夹角为 120°的对称结构。

3) Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr 合金经过固溶时效处理后, 力学性能有明显改善, 铸态、固溶态和时效态合金的室温拉伸强度分别为 189.3、201.4 和 251.1 MPa, 合金的固溶强化和析出强化效果明显。

REFERENCES

- [1] 付三玲, 李全安, 井晓天, 张清, 陈君, 李克杰. 热处理对 Mg-12Gd-2Y-0.5Sm-0.5Sb-0.5Zr 显微组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(4): 47-52.
FU San-ling, LI Quan-an, JING Xiao-tian, ZHANG Qing, CHEN Jun, LI Ke-jie. Effects of heat treatment on microstructure of Mg-12Gd-2Y-0.5Sm-0.5Sb-0.5Zr alloy[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(4): 47-52.
- [2] 袁武华, 齐欣, 黄巧玲. 轧制工艺对 Mg-10Gd-4.8Y-0.4Zr 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(12): 3275-3281.
YUAN Wu-hua, QI Xing, HUANG Qiao-king. Effect of rolling process on microstructure and mechanical properties of Mg-10Gd-4.8Y-0.4Zr alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(12): 3275-3281.
- [3] WANG Jiao-jiao, PHILLION A.B, LU Gui-ming. Development of a viscoplastic constitutive modeling for thixoforming of 6061 in semi-solid state[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 609: 290-295.
- [4] WANG Jiao-jiao, SHANG Shu-zhen, LU Gui-ming. Viscosity estimation of semi-solid alloys based on thermal simulation compression tests[J]. International Journal of Materials Research, 2013, 104(3): 255-259.
- [5] LI Quan-an, LI Ke-jie, ZHANG Qing. Effects of Sm on microstructure and mechanical properties of aged Mg-12Gd-2Y-0.5Zr alloy[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(12): 84-90.
- [6] 汤伊金, 章桢彦, 靳丽, 董杰, 丁文江. Mg-Gd 系合金时效析出研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(1): 8-24.
TANG Yi-jing, ZHANG Zhen-yan, JIN Li, DONG Jie, DING Wen-jiang. Research process on aging precipitation of Mg-Gd alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(1): 8-24.
- [7] XIA Xiang-sheng, CHEN Qiang, ZHAO Zu-de, MA Ming-long, LI Xing-gang, ZHANG Kui. Microstructure, texture and mechanical properties of coarse-grained Mg-Gd-Y-Nd-Zr alloy processed by multidirectional forging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 623: 62-68.
- [8] FRONZI M, KIMIZUKA H, OGATA S. Atomistic investigation of vacancy assisted diffusion mechanism in Mg ternary (Mg-RE-M) alloys[J]. Computational Materials Science, 2015, 98: 76-82.
- [9] MOKDAD F, CHEN D L. Strain-controlled low cycle fatigue properties of a rare-earth containing ZEK100 magnesium alloy[J]. Materials & Design, 2015, 67: 436-447.
- [10] 李全安, 李克杰, 张清. Sm 对时效 Mg-12Gd-2Y-0.5Zr 合金组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(12): 84-90.
LI Quan-an, LI Ke-jie, ZHANG Qing. Effects of Sm on microstructure and mechanical properties of aged Mg-12Gd-2Y-0.5Zr alloy[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(12): 84-90.
- [11] 李克杰, 李全安. Sm 和 Sb 对时效态 Mg-12Gd-2Y-0.5Zr 合金组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(5): 110-115.
LI Ke-jie, LI Quan-an. Effects of addition of Sm and Sb on microstructure and mechanical properties of aged Mg-12Gd-2Y-0.5Zr alloy[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(5): 110-115.
- [12] 肖宏超, 刘楚明, 徐璐, 王潇, 万迎春. Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 镁合金热变形行为与加工图[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(2): 3011-3016.
XIAO Hong-chao, LIU Chu-ming, XU Lu, WANG Xiao, WAN Ying-chun. Deformation behavior and processing map of Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(2): 3011-3016.
- [13] MOVAHEDI A R, MAHMUDI R, JAFARI NODOOSHAN H R. Enhanced superplasticity in an extruded high strength Mg-Gd-Y-Zr alloy with Ag addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 626: 309-313.
- [14] 付三玲, 李全安, 井晓天, 陈君. 热处理对 Mg-12Gd-3Y-Sm-0.5Zr 合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(5): 44-48.
FU San-ling, LI Quan-an, JING Xiao-tian, CHEN Jun. Effects of heat treatment on microstructure and properties of Mg-12Gd-3Y-Sm-0.5Zr alloy[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(5): 44-48.
- [15] GUO Yong-chun, LI Jian-ping, LI Jin-shan, ZHANG Jiao. Mg-Gd-Y system phase diagram calculation and experimental clarification[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 450(1/2): 446-451.
- [16] ZHANG Zhen-yan, PENG Li-ming, ZENG Xiao-qin.

- Characterization of phases in a Mg-6Gd-4Sm-0.4Zr (wt.%) alloy during solution treatment[J]. Mater Charact, 2009, 60(6): 555–559.
- [17] ROKHLIN L L, DOBATKINA T V, NIKITINA N I. Constitution and properties of the ternary magnesium alloys containing two rare-earth metals of different subgroups[J]. Materials Science Forum, 2003, 419/422(1): 291–296.
- [18] WU Luo-yi, YANG Zhong. Oxidation behaviour of Mg-2.1Gd-1.1Y-0.82Zn-0.11Zr alloy at high temperatures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 626: 194–202.

Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy

WEI Xiao-jia, LIU Qiu-zu, HAN Shi-ping

(College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Microstructure and mechanical properties of Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr (mass fraction, %) alloy after solid solution and aging treatment were studied by OM, XRD, TEM, SEM and tensile experiment. The results show that the microstructure of as-cast alloy is composed of α -Mg matrix and crystal containing Mg₅Gd and Mg₁₂Nd phases. After heat treatment, more cuboid-shaped particles are founded. The nanoscale stripe phase is precipitated out, and the alloy is strengthened effectively. The β' phase of aged alloy is multiple spindle with periodic structure, and the mutual angle is 120°. The tensile strength of the alloy are 189.3MPa (as-cast), 201.4 MPa (solid solution state) and 251.1 MPa (aging state), respectively.

Key words: Mg-8Gd-2.5Nd-0.5Zr alloy; heat treatment; microstructure; mechanical property

Foundation item: Project (20140321014-02) supported by the Natural Science Foundation of Shanxi Province

Received date: 2015-11-01; **Accepted date:** 2016-06-01

Corresponding author: WEI Xiao-jia; Tel: +86-351-6010010; E-mail: wswang222@126.com

(编辑 何学锋)