

固溶处理对 Mg-2Nd-1Gd-0.5Zn-0.5Zr 镁合金显微组织和力学性能的影响

李蒙¹, 邹文兵¹, 张旭亮¹, 潘龙¹, 李宝辉², 褚杰¹

(1. 新江科技(江苏)有限公司, 江苏南通 226100; 2. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

摘要: 通过光学显微镜、扫描电镜、透射电子显微镜以及室温拉伸机等仪器设备研究了固溶处理对Mg-2Nd-1Gd-0.5Zn-0.5Zr (wt.%) 镁合金显微组织和力学性能的影响。结果表明: 铸态显微组织主要由 α -Mg基体和晶界上的共晶组织组成。固溶处理过程中, Zn含量较高的共晶 β 相消失, 出现了Zn含量较低的第二相, 540 °C固溶20 h后, 第二相完全回溶, 所以最佳的固溶处理制度为540 °C × 20 h。经过200 °C × 18 h的时效处理, α -Mg基体内部出现了均匀弥散分布新型沉淀相, 该相的惯习面为 $\{11\bar{2}0\}_{\text{Mg}}$ 晶面, 提高了合金强度。经过540 °C × 20 h+200 °C × 18 h热处理后, 合金的力学性能最佳, 平均抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为275 MPa, 156 MPa和4.9%。

关键词: 显微组织; 力学性能; 共晶组织; 固溶处理; 时效处理

镁合金具有密度小、比强度高和易于切削加工等优点, 已经广泛应用于航空航天、汽车和电子等领域^[1-6]。新一代航空发动机要求镁合金构件兼具良好的强度和塑性、高低周疲劳性能以及优异的耐腐蚀性能, Mg-RE系合金的应用将越来越广泛。近年来, 以EV31为代表的Mg-Nd系合金在国外航空发动机上得到了广泛应用, 该合金具有优异的力学性能、高低周疲劳性能以及优异的耐腐蚀性。为了使合金具有良好的力学性能和铸造性能, 同时降低成本, 本文设计了新型Mg-2Nd-1Gd-0.5Zn-0.5Zr (质量分数) 镁合金, 研究了固溶处理对Mg-2Nd-1Gd-0.5Zn-0.5Zr镁合金显微组织和力学性能的影响。

1 试验方法和步骤

镁合金试样采用粘土砂重力浇注工艺。以纯Mg、纯Zn、Mg-30Nd、Mg-20Gd和Mg-30Zr中间合金为原材料。熔炼过程: 将纯Mg放入规格为 $\Phi 200$ mm × 600 mm的铁制熔炼坩埚内熔化, 熔化量为200 kg, 采用四氯乙烯和氩气混合气体进行保护; 待熔体温度升至750 °C, 加入纯Zn、Mg-30Nd、Mg-20Gd中间合金, 静置5 min后然后进行搅拌; 待熔体升至850 °C后, 加入Mg-30Zr中间合金, 待中间合金熔化后进行充分搅拌使得合金成分均匀; 当熔体温度降至750 °C后, 采用舀包进行浇注。

切取试样, 进行固溶热处理工艺优化, 参考类似成分合金的文献报道数据, 固溶热处理温度设计为520 °C、530 °C和540 °C, 热处理时间为12 h、16 h和20 h; 时效热处理制度为200 °C × 15 h。采用马弗炉进行固溶处理, 炉温精度 ± 5 °C; 在鼓风炉中进行时效处理, 炉温精度 ± 5 °C; 冷却方式均为空冷。从辅助试棒上加工拉伸试样用于室温力学性能测试, 试样标距长度为25 mm, 拉伸试样直径为5 mm。采用光学显微镜、扫描电镜和透射电子显微镜对不同状态下的显微组织进行分析。

作者简介:

李蒙(1987-), 男, 工程师, 主要研究方向为轻合金材料铸造成形技术。E-mail: 13506204632@163.com

中图分类号: TG113;
TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)
07-0833-05

收稿日期:

2023-03-23 收到初稿,
2023-05-16 收到修订稿。

2 试验结果

2.1 铸态显微组织

铸态显微组织由 α -Mg 基体和晶界上不连续的共晶组织组成 (图1a), 晶界上共晶组织分为两类, 一类是鱼骨状的共晶组织, α -Mg 和 β 相相间分布; 另一类是离异共晶, α -Mg 和 β 相互独立, β 相的形貌为条状或不规则块状 (图1b)。

或不规则块状 (图1b)。

图2和图3为试验合金铸态组织的能谱图, 表1为分析结果。鱼骨状共晶组织和离异共晶组织中的 β 相的元素含量基本相同 (Spectrum 1和2), 主要是Mg和Nd元素。从表1可以看出: Mg和Nd的原子百分比分别为 $91.29/6.14=14.87\%$ 和 $91.60/5.84=15.68\%$, 与 $Mg_{12}Nd$

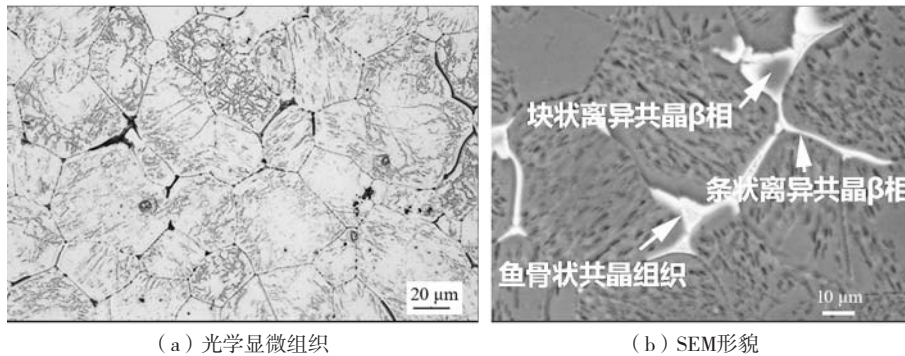


图1 铸态显微组织

Fig. 1 The microstructure of the as-cast alloy

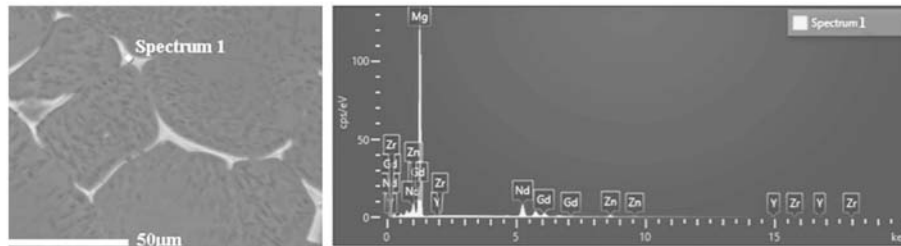


图2 晶界上共晶组织的能谱分析

Fig. 2 The element distribution of the eutectic structure at grain boundaries

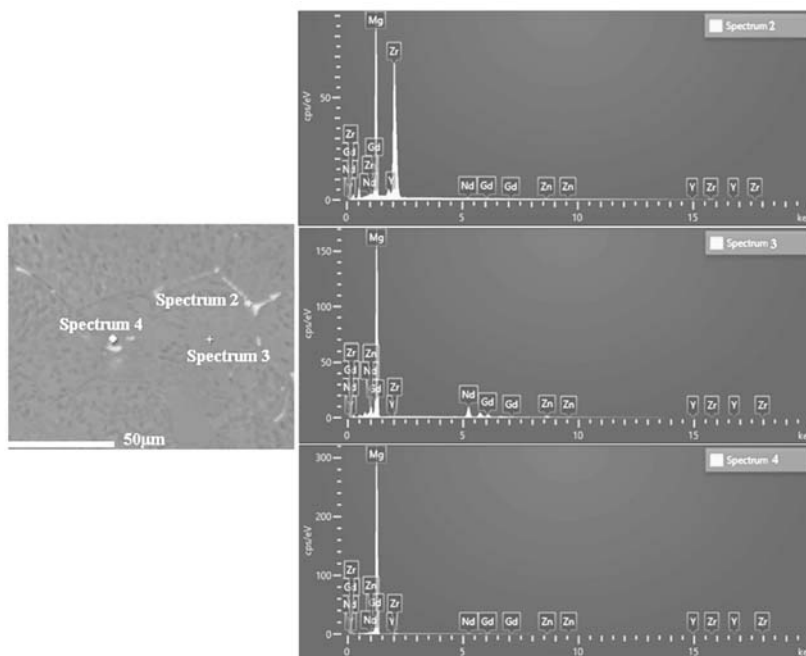


图3 晶粒内部不同区域的能谱分析

Fig. 3 The element distribution of the different areas within α -Mg

表1 铸态组织的能谱分析结果
Table 1 The energy spectra analysis results of as-cast microstructure at%

| 测试位置 | Mg | Nd | Gd | Zn | Zr |
|------|-------|------|------|------|-------|
| 1 | 91.29 | 6.14 | 0.76 | 1.80 | 0.01 |
| 2 | 91.60 | 5.84 | 0.70 | 1.83 | 0.04 |
| 3 | 98.96 | 1.49 | 0.59 | 0.10 | 0.57 |
| 4 | 64.41 | 0.27 | 0.09 | 0.22 | 34.98 |

相中的Mg和Nd原子百分比接近,与付彭怀等人^[7]的研究结果相一致。 α -Mg基体内部的第二相颗粒主要是 α -Zr颗粒。

2.2 热处理过程中的显微组织演变

2.2.1 固溶处理过程中的显微组织演变

图4为试验合金固溶处理过程中的显微组织演变。520 °C固溶处理过程中,晶界上始终分布着未溶的不规则块状第二相;530 °C固溶处理20 h后,显微组织内仍然存在未溶第二相颗粒;540 °C固溶处理20 h,显微组

织内的第二相完全回溶,所以最佳的固溶热处理制度为540 °C × 20 h。

2.2.2 沉淀析出相分析

图5为试验合金经过540 °C × 20 h+200 °C × 18 h热处理后的沉淀相的透射电子显微镜分析。图10a为沿着 $[0002]_{\text{Mg}}$ 晶带轴的电子衍射花样,电子衍射斑点为典型的密排六方结构晶体的衍射花样,没有附加的电子衍射斑点出现,为 α -Mg基体的衍射斑点。从明场像可知:这些沉淀相均匀、细小、弥散分布在 α -Mg基体中,形貌为短棒状(图5b、c),沿着 $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\text{Mg}}$ 晶向出现了多种变体(图10d);在HAADF-STEM图像下,这些沉淀相的衬度明显高于基体。一般来讲,原子序数越大,HAADF-STEM图像中的衬度越亮,Nd、Gd和Zn的原子序数远高于Mg原子,这说明沉淀相中偏聚着Nd、Gd和Zn元素,同时还可以看到这些沉淀相是由更微小的环状结构组成,环之间的间距约为1.13 nm左右(图5d)。

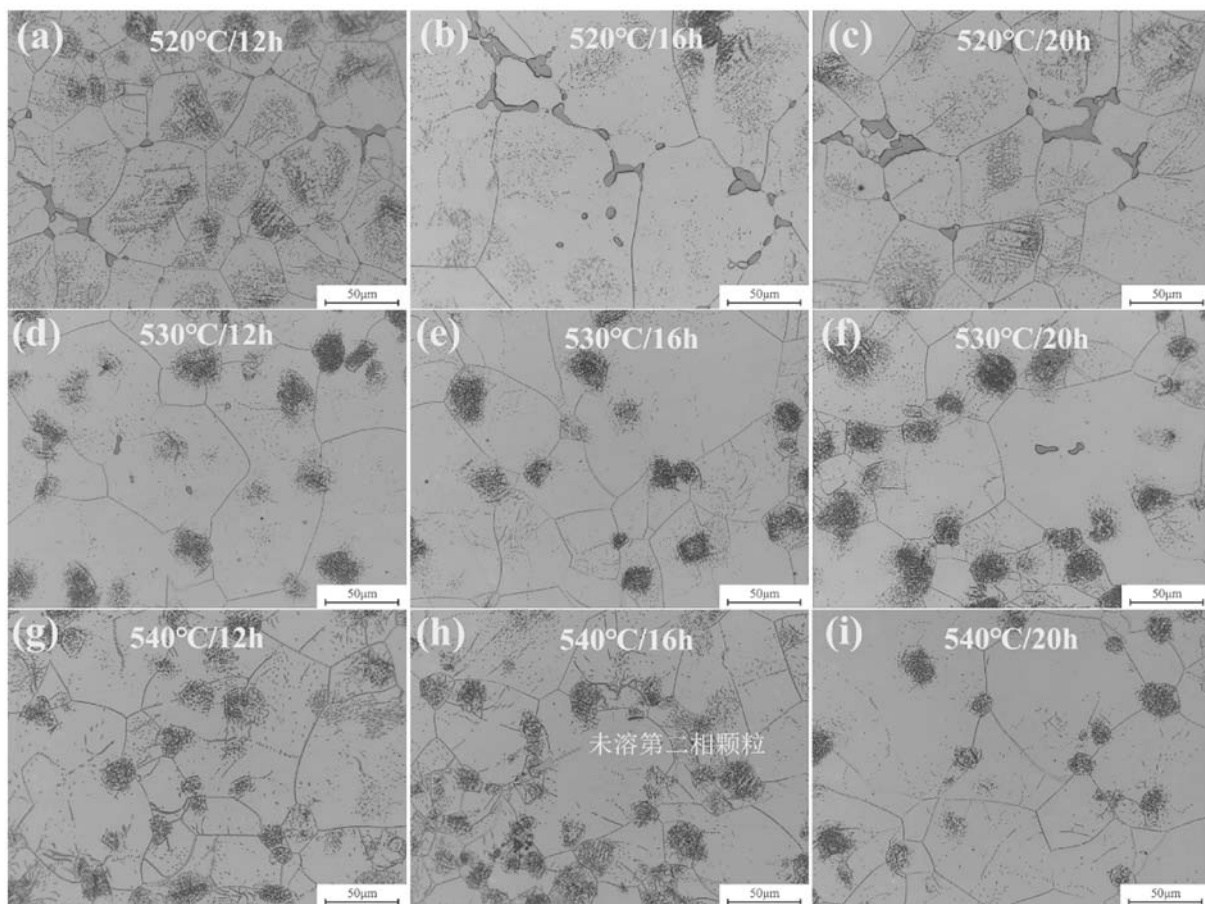


图4 固溶处理过程中的显微组织变化

Fig. 4 The microstructure evolution during solution treatment

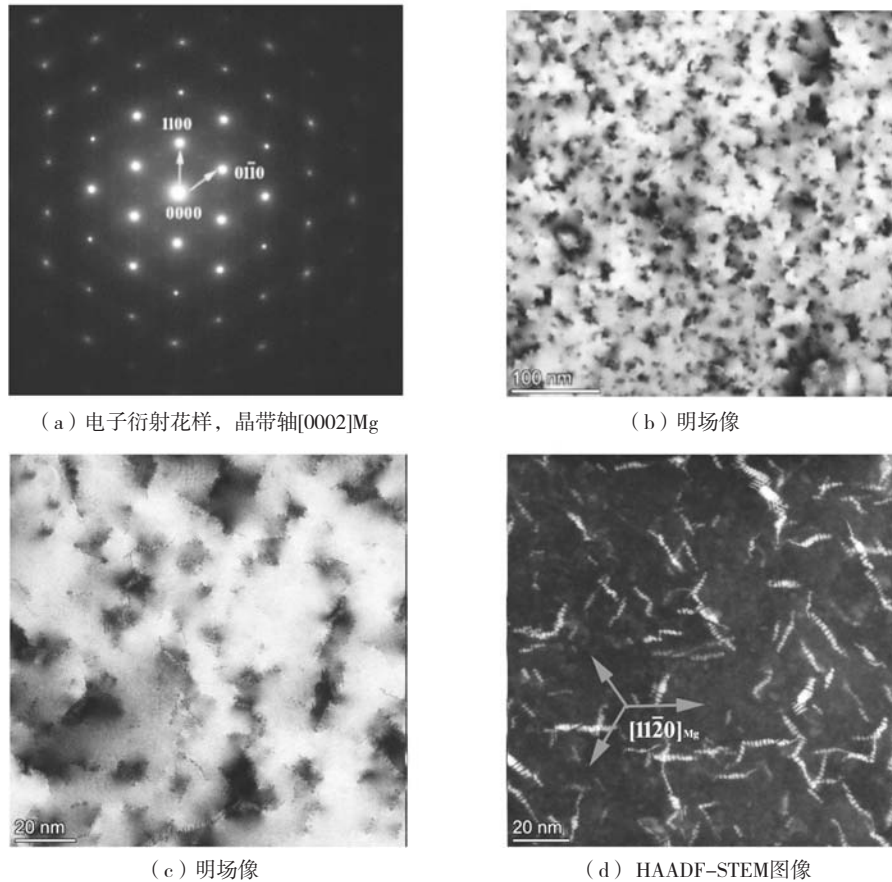


图5 沉淀相分析

Fig. 5 The analysis of the precipitation phase

2.3 力学性能

图6为试验合金室温力学性能测试结果，每个状态测试3根拉伸试样，取3根试样力学性能平均值作为

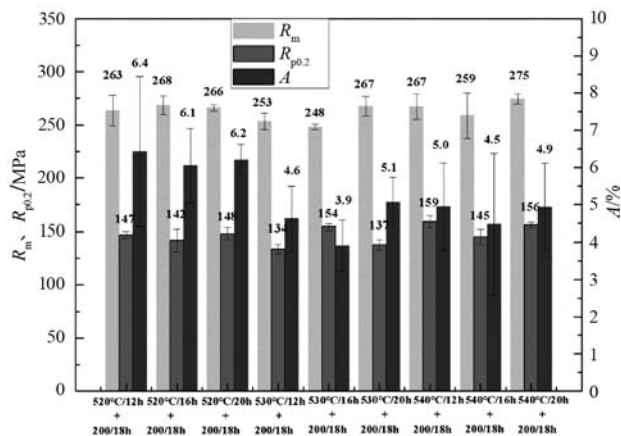


图6 力学性能柱状图

Fig. 6 The histogram of mechanical properties

最终测试结果。经过540 °C × 20 h + 200 °C × 18 h热处理后，综合力学性能最高，平均抗拉强度为275 MPa、平均屈服强度为156 MPa、断后伸长率为4.9%。

3 结论

(1) 铸态显微组织主要由 α -Mg基体和晶界上的共晶组织组成，共晶组织分为 α 和 β 相相间排列的鱼骨状共晶和不规则块状的离异共晶。

(2) 固溶处理过程中，共晶 β 相会逐渐消失。在520 °C和530 °C固溶处理20 h后，晶界上的第二相仍然无法完全回溶；540 °C固溶20 h后，高Nd第二相完全回溶，最佳的固溶处理制度为540 °C × 20 h。

(3) 540 °C × 20 h + 200 °C × 18 h热处理后，合金最有最佳的力学性能，平均抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为274.58 MPa，155.94 MPa和4.94%。

(4) 时效后的沉淀相以晶面为惯习面，并且该相有由微小且相互平行的环状结构组成。

参考文献:

- [1] LI Jilin, CHEN R S, WEI K E. Microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy cast by metal mould and lost foam casting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21 (4) : 761-766.
- [2] LI J, HE Z, FUP, Peng L, et al. Heat treatment and mechanical properties of a high-strength cast Mg-Gd-Zn alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 651 (1) : 745-752.
- [3] 汤伊金, 章桢彦, 靳丽, 等. 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) : 9-24.
- [4] 丁文江, 吴国华, 李中权, 等. 轻质高性能镁合金开发及其在航天航空领域的应用 [J]. 上海航天, 2019, 36 (2) : 1-8.
- [5] 刘祚时, 谢旭英. 镁合金在汽车工业中的应用 [J]. 江西冶金, 1998, 18 (5) : 3-7.
- [6] 杨程, 杜红星, 刘晓平. 镁合金在3C产品中应用现状及前景展望 [J]. 铸造设备与工艺, 2005 (6) : 47-49.
- [7] 付彭怀. Mg-Nd-Zn-Zr合金微观组织、力学性能和强化机制的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

Effect of Solution Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-2Nd-1Gd-0.5Zn-0.5Zr Magnesium Alloy

LI Meng¹, ZOU Wen-bing¹, ZHANG Xu-liang¹, PAN Long¹, LI Bao-hui², CHU Jie¹

(1. Xinjiang Technology (Jiangsu) Co., Ltd., Nantong 226100, Jiangsu, China; 2. Shanghai Aerospace Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600, China)

Abstract:

The effect of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of Mg-2Nd-1Gd-0.5Zn-0.5Zr magnesium alloy was studied using optical microscopy, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, and room temperature tensile machines. The results showed that the microstructure of the as-cast alloy was mainly composed of α -Mg matrix and eutectic microstructure at grain boundaries. During solution treatment, the eutectic β phases with high Zn content were disappeared, while the second phases with low content of Zn were observed, it was completely disappeared after solution treatment at 540 °C for 20 h. Therefore, the optimal solution treatment system was 540 °C \times 20 h. After solution and subsequent aging treatment, a new fine precipitates were observed within the α -Mg matrix, and its habit plane was $\{11\bar{2}0\}_{Mg}$ crystal face, which helped to achieve more better strengthening effect. The optimum mechanical properties of the alloy could be gained after heat treatment at 540 °C \times 20 h + 200 °C \times 18 h, the average tensile strength, yield strength, and elongation after fracture were 274.58 MPa, 155.94 MPa, and 4.94%.

Key words:

microstructure; mechanical properties; eutectic microstructure; solution treatment; aging treatment
