

Mg-Nd-Gd-Zn-Zr-xY 合金的组织及力学性能

李泽华¹ 李春晖² 苏鑫¹ 冯志军¹ 辛仕伟¹ 李宇飞¹ 刘文龙¹

(1. 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室; 2. 北京新风航天装备有限公司)

摘 要 采用气体保护熔炼 Mg-Nd-Gd-Zn-Zr-xY 镁合金 ($x=0, 1.4, 2.2, 3.4$, 质量分数, %)。通过光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)等手段研究了 Y 元素对合金的铸态组织、元素分布及热处理后力学性能的影响, 并对其拉伸断口进行分析。结果发现, 向 Mg-2.7Nd-1.5Gd-0.4Zn-0.5Zr 合金中加入 3.38% 的 Y 后, 合金的平均晶粒尺寸由 56 μm 减小至 48 μm , 表明 Y 元素对合金组织有一定的细化效果。此外, Y 含量增加, 合金晶界附近元素富集区域面积增大, 合金热处理后的抗拉强度、屈服强度及硬度随 Y 含量增加而上升, 伸长率在 Y 含量为 1.4% 时达到最高, 然后随着 Y 含量进一步升高而降低。当 Y 含量为 2.2% 时, 合金综合力学性能较高, 其抗拉强度为 327 MPa, 屈服强度为 184 MPa, 伸长率为 5.5%。

关键词 稀土镁合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.04.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Nd-Gd-Zn-Zr-xY Alloy

Li Zehua¹, Li Chunhui², Su Xin¹, Feng Zhijun¹, Xin Shiwei¹, Li Yufei¹, Liu Wenlong¹

(1.State Key Laboratory of Light Alloy Foundry Technology for High-end Equipment;

2.Beijing Xinfeng Machinery Factory)

Abstract: Mg-Nd-Gd-Zn-Zr-xY ($x=0, 1.4, 2.2, 3.4$, %, mass fraction) alloy was melted and prepared by gas protection. The effects of yttrium addition on the as-cast microstructure, element distribution and mechanical properties of the alloy after heat treatment were analyzed by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results reveal that average grain size of Mg-2.7Nd-1.5Gd-0.4Zn-0.5Zr alloy is decreased from 56 μm to 48 μm with 3.38% yttrium addition, which indicates that yttrium can refine the microstructure of the alloy to some extent. The tensile strength, yield strength and hardness of the alloy can be improved along with the increase of yttrium after heat treatment as a result of the increase of enrichment element area at grain boundary. When yttrium addition reaches 1.4%, the elongation of the alloy reaches the maximum value. With the Y addition of 2.2%, the comprehensive mechanical properties of the alloy present desirable, where the tensile strength, yield strength and elongation of the alloy reach 327 MPa, 184 MPa and 5.5%, respectively.

Key Words: Rare Earth Magnesium Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

镁合金具有密度低、比强度与比刚度高的特点, 在航空航天、交通运输、电子通信等领域受到国内外广泛关注。自 20 世纪 30 年代起, 国外已经开发出 AZ 系列铸造镁合金^[1], 并应用于航空领域。随着装备技术水平不断提高, 尤其是航空航天领域对镁合金材料强度、伸长率及耐热性能等提出了更高的要求。稀土元素的原子结构特殊, 作为合金元素加入后对镁合金的相关性能影响较大, 因此稀土镁合金的研究和开发日益受到关注, 并陆续开发出以 WE43 和 WE54 等为代表的高性能稀土镁合金^[2]。但高稀土镁合金成本高, 熔炼和铸造

过程易形成氧化渣, 合金铸造性能较差。因此, 降低稀土镁合金中的稀土含量, 开发低成本、高性能稀土镁合金已经成为主要研究方向之一。

本课题首先采用气体保护熔炼 Mg-2.7Nd-1.5Gd-0.4Zn-0.5Zr 镁合金, 以该合金作为基体, 加入 Mg-25Y 中间合金, 研究 Y 含量对 Mg-Nd-Gd-Zn-Zr 合金组织和性能的影响, 旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

合金熔炼所用原料为工业纯 Mg、Mg-25Y、Mg-

收稿日期: 2020-10-23; 修改稿收到日期: 2020-12-01

第一作者简介: 李泽华, 男, 1991 年出生, 工程师, 沈阳(110022), E-mail: 407222678@qq.com

引用格式: 李泽华, 李春晖, 苏鑫, 等. Mg-Nd-Gd-Zn-Zr-xY 合金的组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(4): 462-465.

LI Z H, LI C H, SU X, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-Nd-Gd-Zn-Zr-xY[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4): 462-465.

25Nd、Mg-25Gd、Mg-30Zr 中间合金及纯 Zn 锭,原料纯度均达到 99.95% 以上,采用 30 kg 小型电阻炉熔炼,保护气体为 CO₂+SF₆。首先采用气体保护熔炼合金 1,目标成分为 Mg-2.7Nd-1.5Gd-0.4Zn-0.5Zr,其中 Mg-25Nd、Mg-25Gd 及 Zn 锭的加料温度为 760 ℃,Mg-30Zr 的加料温度为 780 ℃,待合金完全熔化后搅拌 10 min,静置并降温至 730 ℃,将部分合金液浇注到砂型中,制成砂型试样。再次将坩埚中剩余合金液升温至 760 ℃,向合金中分批加入 Mg-25Y 中间合金,调节 Y 含量,依次浇注成合金 2~4 的砂型试样。随后,分别从砂型试样中切取 φ15 mm 圆棒以及圆形试块,加工成拉伸试样、成分检测试样及金相检测试样,腐蚀剂采用体积分数为 1% 和 5% 的硝酸酒精溶液。各合金的成分检测结果见表 1。

表 1 试验合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the alloy %						
编号	w_B					
	Y	Nd	Gd	Zn	Zr	Al
1	—	2.71	1.52	0.45	0.57	余量
2	1.40	2.76	1.48	0.42	0.50	余量
3	2.24	2.75	1.52	0.43	0.56	余量
4	3.38	2.72	1.50	0.42	0.59	余量

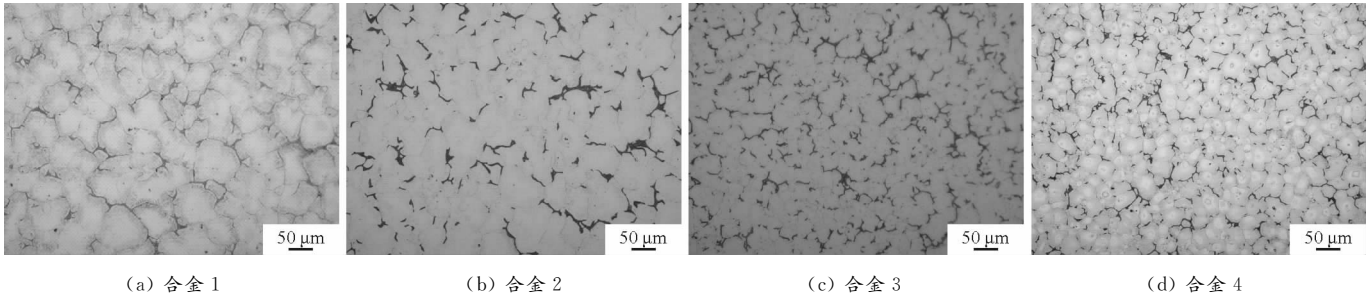


图 1 浅腐蚀条件下不同 Y 含量合金的铸态显微组织

Fig.1 As-cast optical microstructure of alloys with different Y element under shallow corrosion condition

形式存在。

采用体积分数为 5% 硝酸酒精加深合金试样的化学腐蚀程度以后,在光学显微镜下观察合金的金相组织,见图 2。对比图 1 可以看出,深腐蚀条件下合金晶界区域明显粗化,且随着 Y 含量增加,粗化区域面积增加。采用扫描电镜观察粗化区域的形貌,发现该粗化区

域由密布的线条样腐蚀坑构成,从线扫描结果可以看出,Y、Nd、Gd 的含量由晶粒中心向粗化区域升高,而 Zr 在粗化区域的含量极低,Zn 含量不沿直线变化,见图 3。表明 Y、Nd、Gd 在凝固过程中发生了溶质再分配,导致元素不断被推移并最终富集于晶界共晶相及其附近,形成了晶界粗化区域。Zr 作为镁合金异质形核

2 试验结果及分析

2.1 Y 对 Mg-Nd-Gd-Zn-Zr 合金显微组织的影响

图 1 为合金的铸态金相组织。可以看出,随着 Y 添加量增加,合金的组织细化。经统计,合金 1 平均晶粒尺寸为 56 μm,当 Y 含量上升至 3.38% 时,合金 4 平均晶粒尺寸减小到 48 μm,说明 Y 元素有一定的晶粒细化作用。根据凝固原理和 Mg-Y、Mg-Gd、Mg-Nd 合金二元相图可知,Y、Nd、Gd 元素的平衡分配系数 $k < 1$,凝固过程中除部分 Y、少量的 Nd、Gd 进入合金基体中以外,有大量的 Y、Nd、Gd 元素被排挤到固液界面前沿并富集于 α-Mg 周边,对晶粒的生长起抑制作用。此外,溶质再分配导致的成分过冷提高了形核率,最终使晶粒细化。结果发现,Y 加入后,晶界处共晶组织的体积分数增加,原因在于 Y 加入合金中会降低 Nd、Gd 在 Mg 基体中的固溶度,使更多的 Nd 以晶界共晶组织的

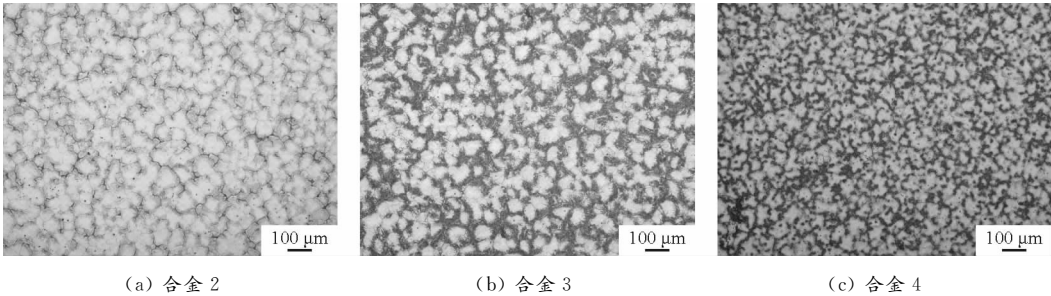
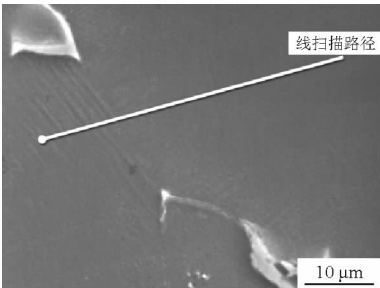
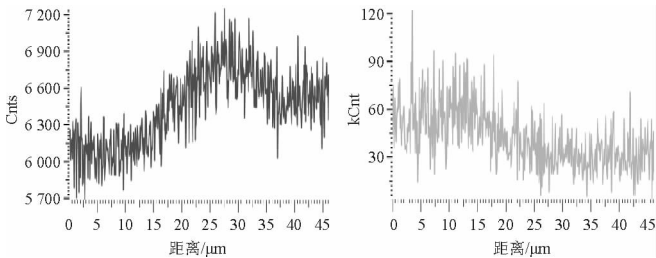


图 2 深腐蚀条件下不同 Y 含量合金的铸态显微组织

Fig.2 As-cast optical microstructure of alloys with different Y element under deep corrosion condition

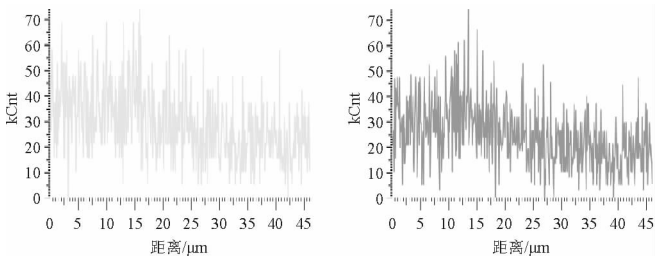


(a) SEM



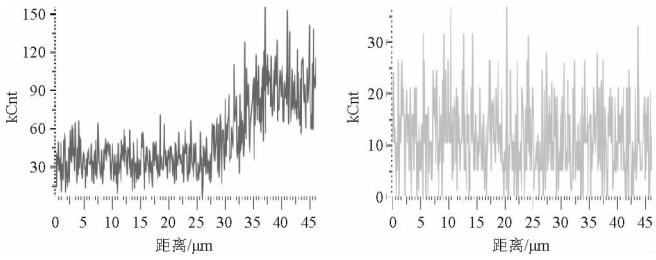
(b) Mg 线扫描

(c) Y 线扫描



(d) Nd 线扫描

(e) Gd 线扫描



(f) Zr 线扫描

(g) Zn 线扫描

图 3 合金晶界附近粗化区域线扫描检测结果

Fig.3 Line scan results of coarsening area near grain boundary of the alloy

核心,在晶粒内部含量较高,在晶界附近粗化区域含量很低。

图 4 为合金 3 中晶界共晶相 SEM 照片。可更清晰地观察到合金 3 铸态晶界处分布的共晶组织及晶界粗化区域形貌。分别选取晶界共晶相中灰白色区域(谱图 1)、灰暗色区域(谱图 2)、亮白色点状区域(谱图 3、谱图 5)以及晶界附近粗化区域(谱图 4)进行 EDS 分析,结果见表 2。结果表明,共晶组织中均含有大量的 Mg 及 Nd 元素,其 Mg、Nd 摩尔比约为 12 : 1,推测共晶相主要为 $Mg_{12}Nd$ 。此外 Y、Gd、Zn 等元素均较晶界以外区域(图谱 4)高。相对而言,谱图 3、谱图 5 中 Y、Zn 元素

较高,其中 Y 含量(质量)为 6.13% (谱图 3)和 5.46% (谱图 5),Zn 含量(质量)分别为 7% (谱图 3)和 6.16% (谱图 5)。图谱 6 中 Y 和 Zn 含量(质量)为 6.13%、3.6%。图谱 2 中各元素含量相对较低。Gd 摩尔分数在晶界组织内分布较均匀,含量在 0.88%~1.05% 之间,根据能谱检测结果结合相关文献资料判断晶界区域中可能存在着 $Mg_{24}Y_5$ 、 $Mg_5(GdYZn)$ 、 $Mg_{24}(GdY)_5$ 、 $Mg_{12}(GdY)Zn$ 、 $Mg_{12}(NdZn)$ 、 $Mg_{12}(NdYZn)$ 等多种多元化合物^[3~5]。谱图 3 及谱图 5 表明 Zn 在 $Mg_{12}Nd$ 相中的分布不均匀,存在局部富集区域,在 SEM 图中以亮白色点状形式存在。谱图 4 中 Y、Nd、Gd 含量(质量分数)分别为 2.36%、2.07% 及 1.67%,远高于晶粒内部 Y、Nd、Gd 含量(EDS 检测结果为 $Mg-0.85Y-0.70Nd-0.81Gd$)。除此以外,谱图 4 中 Zn 含量(质量分数)为 0.58%,远低于晶界共晶相组织中 Zn 含量,而晶粒内部区域 EDS 结果中未检测出 Zn。依据凝固原理及 Mg-Zn 相图可知,溶质分配系数 $k<1$,表明 Zn 在晶粒生长过程中易被排挤到固液界面前沿,导致 Zn 富集于晶界附近,而在晶粒内部含量较低。

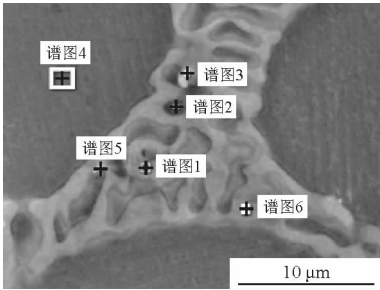


图 4 合金 3 晶界共晶相及粗化区域 SEM 检测结果

Fig.4 SEM results of eutectic phase and coarsening area at grain boundary of alloy 3

表 2 不同区域 EDS 分析结果

位置	w _B					x _B					%
	Y	Nd	Gd	Zn	Mg	Y	Nd	Gd	Zn	Mg	
谱图 1	5.78	20.95	4.73	3.35	52.61	1.90	4.24	0.88	1.50	63.23	
谱图 2	3.51	20.78	5.00	2.75	61.48	1.20	4.39	0.97	1.28	77.08	
谱图 3	6.13	20.88	5.27	7.00	46.83	2.06	4.32	1.00	3.19	57.45	
谱图 4	2.36	2.07	1.67	0.58	85.07	0.63	0.34	0.25	0.21	83.46	
谱图 5	5.46	17.06	5.31	6.16	61.33	1.75	3.36	0.96	2.68	61.33	
谱图 6	6.30	23.73	5.49	3.60	49.82	2.20	5.10	1.08	1.71	63.59	

2.2 不同 Y 含量对合金力学性能的影响

采用相同的 T6 热处理对 4 种合金进行热处理后,再进行拉伸试验,合金力学性能结果见表 3。可以看出,当向合金 1 中加入 1.4% 的 Y 后,合金抗拉强度提高了 13 MPa,同时伸长率从 4% 提升至 7.5%。当 Y 含量进一步提升至 2.2% 时,合金抗拉强度及屈服强度继续提高,其中抗拉强度增幅明显,达到 327 MPa,但伸长

率下降至 5.5%，继续增加 Y 含量至 3.4%，伸长率降低至 3%，但屈服强度大幅提升。

表 3 不同 Y 含量合金热处理后力学性能
Tab.3 Mechanical Properties of alloys with different Y content after T6 heat treatment

编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度(HB)
1	284	185	4.0	85.3
2	297	180	7.5	94.0
3	327	184	5.5	97.2
4	337	243	3.0	108.0

4 种合金热处理后的拉伸断口 SEM 结果见图 5。可见合金 1 断面上主要由光滑的晶粒组成，同时有少量的撕裂棱，二次裂纹沿着晶界发展，表现出明显的脆性沿晶断裂特征。合金 2 断面存在少量的韧窝，仍然存在少数二次裂纹沿晶界发展的现象，合金断裂模式为沿晶和穿晶共同存在的混合断裂；进一步提高 Y 含量至

2.2%，合金 3 断面上的韧窝数量减少，解理面和撕裂棱数量增加，表明合金断裂方式由混合断裂逐渐向沿晶断裂改变，当 Y 含量达到 3.4% 时，合金 4 断口处出现了大量的解理面，韧窝数量大幅减少，断裂模式属于典型的沿晶断裂。图 6 为对合金 2 断裂面二次裂纹附近区域 SEM，对其进行 EDS 分析见表 4。表明该裂纹区域脆性相主体为沿晶界分布的 $Mg_{12}Nd$ 平衡相，同时内部含有少量 Zn、Y 等元素，裂纹起源于易产生应力集中的晶界处，然后沿晶界处的脆性相扩展。张波^[6]的研究表明，Y 元素加入 Mg-Nd-Zn-Zr 合金后，合金固溶后析出相形态会由片状 β' 相向更能阻碍位错滑移的 β' 相转变，并且在晶界形成稳定相 $Mg_{24}Y_5$ ，减少 $Mg_{12}Nd$ 相裂纹形成，进而使合金性能提升。但当 Y 含量进一步提升，则会使晶界处的平衡相迅速粗化，降低晶界上的原子结合力，使晶界处大量裂纹萌生，并沿晶发展，从而导

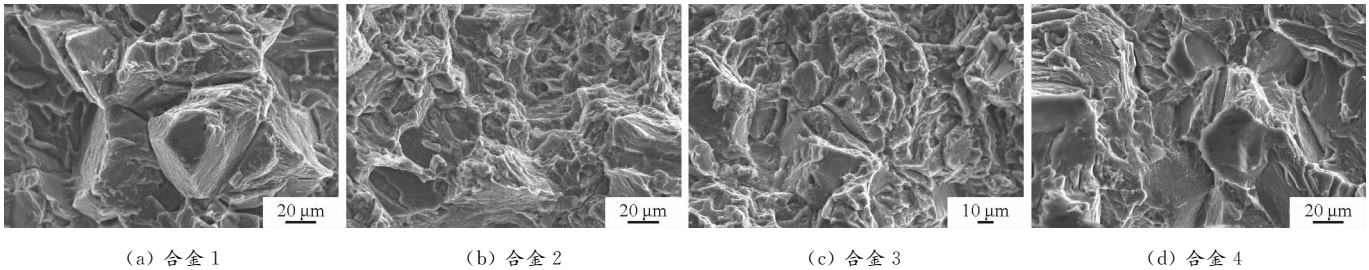


图 5 4 种合金热处理后拉伸断口 SEM 断口形貌

Fig.5 SEM fracture morphology of tensile fracture offour kinds of alloys after heat treatment

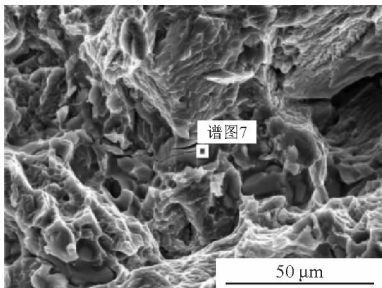


图 6 合金 2 二次裂纹区域 EDS 分析

Fig.6 EDS analysis of crack area of alloy 2

表 4 谱图 7 元素分析结果

Tab.4 Results of energy spectrum analysis in area 7 %											
w_B						x_B					
C	O	Mg	Zn	Y	Nd	C	O	Mg	Zn	Y	Nd
7.71	1.03	56.47	2.01	1.04	30.08	19.47	1.96	70.48	0.93	0.35	6.33

致合金力学性能降低。

3 结 论

(1)向 Mg-2.7Nd-1.5Gd-0.4Zn-0.5Zr 合金中加入 3.38% 的 Y 后，合金铸态晶粒尺寸由 62 μm 缩小到 48 μm ，Y 元素有一定的细化组织效果。

(2)合金铸态晶界共晶相成分为固溶有 Y、Gd、Zn

等元素的 $Mg_{12}Nd$ 相，在深腐蚀条件下，合金铸态晶界出现粗化，随着 Y 加入量增加，粗化区域面积增大，粗化区域为 Y、Gd、Nd 元素富集区域。

(3)Mg-2.7Nd-1.5Gd-0.4Zn-0.5Zr-*x*Y 合金热处理后抗拉强度、屈服强度随着 Y 加入量提高而逐步上升，而伸长率则先上升后降低，当 Y 含量为 2.2%，合金力学性能较好，其抗拉强度为 327 MPa，屈服强度为 184 MPa，伸长率为 5.5%。

参 考 文 献

[1] 兴成尧. Mg-Y-Nd-*x*Gd 稀土镁合金的组织与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
[2] 苏再军, 杨树忠, 刘楚明, 等. Zn 对铸态 Mg-Y-Nd-Zr 合金组织和力学性能的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 116-122.
[3] 苏再军. 高强 Mg-Y-Nd-Zn-Zr 系铸造镁合金组织与性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
[4] 孙亚肖. Gd 含量对 Mg-Nd-Y-Zn 合金组织与力学性能的影响[D]. 太原: 中北大学, 2014.
[5] 黄志伟, 黄静, 邓天泉, 等. Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 镁合金铸造组织性能研究[A]. 重庆铸造行业年会[C]. 重庆, 2013.
[6] 张波. Mg-Y-Nd-Zr 和 Mg-Nd-Zn-Zr 基高强铸造镁合金的显微组织和力学性能研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2017.

(编辑: 张正贺)