

Sm 对 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr 合金组织与力学性能的影响

吴海¹ 李蒙² 孙明珠¹ 张泽³ 李长青¹ 董喜旺^{1,4} 黄鑫垚¹ 杨唯一¹ 龚政轩¹ 肖旅¹

[1. 上海航天精密机械研究所, 上海 200235; 2. 新江科技(江苏)有限公司, 南通 226141; 3. 上海航天技术研究院, 上海 200090; 4. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001]

摘要 针对铸造镁稀土合金综合强塑性难以协同提升的难题, 提出在塑性表现较好的 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr 合金的基础上, 引入微量高时效硬化能力的 Sm 元素, 可保证合金在塑性不显著下降的情况下提升强度, 最终获得强塑性较高的合金。在航天大型复杂构件砂型慢冷铸造条件下, 设计并对比研究了 4 种成分 Mg-6Gd-3Y- x Sm-0.4Zr ($x=0, 0.5, 1.5, 2.5, \%$, 质量分数) 合金的铸态、固溶态、时效态的微观组织及力学性能演变规律。结果表明, Mg-6Gd-3Y- x Sm-0.4Zr 合金铸态组织主要由 α -Mg、Mg₅Gd、Mg₂₄(Gd, Y)₅、Mg₄₁Sm₅ 组成。随着 Sm 含量由 0 提升至 2.5%, T6 态合金抗拉强度呈先升高后下降趋势, 在 Sm 含量为 1.5% 时合金综合强塑性达到最优, 抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 345 MPa、220 MPa 和 4.5%。

关键词 镁稀土合金; 砂型铸造; 时效硬化; 固溶时效

中图分类号 TG146.22

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.Z20250004

Effects of Sm on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-6Gd-3Y-0.4Zr Alloy

WU Hai¹, LI Meng², SUN Mingzhu¹, ZHANG Ze³, LI Changqing¹, DONG Xiawang^{1,4}, HUANG Xinyao¹, YANG Weiyi¹, GONG Zhengxuan¹, XIAO Lü¹

[1. Shanghai Aerospace Precision Machinery Institute, Shanghai 200235; 2. Xinjiang Technology (Jiangsu) Co., Ltd., Nantong 226141; 3. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 200090; 4. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001]

Abstract: In response to the challenge of synergistically enhancing the comprehensive strength and toughness of rare-earth cast magnesium alloys, a small amount of Sm element with high aging hardening capability was introduced into Mg-6Gd-3Y-0.4Zr alloy, which exhibits desirable plasticity. The approach ensures the enhancement of strength while maintaining the plasticity, achieving alloys with high strength and high toughness. Under the conditions of sand mold slow cooling casting for aerospace large-scale complex components, the microstructure evolution and mechanical properties of Mg-6Gd-3Y- x Sm-0.4Zr ($x=0, 0.5, 1.5, 2.5$) alloys in as-cast, solution-treated, and as-aged states were designed and comparatively investigated. The results indicate that the microstructure of as-cast Mg-6Gd-3Y- x Sm-0.4Zr ($x=0.5, 1.5, 2.5$) alloys mainly consists of α -Mg, Mg₅Gd, Mg₂₄(Gd, Y)₅, and Mg₄₁Sm₅. As Sm content is increased from 0 to 2.5%, the tensile strength of T6-treated alloy is firstly increased and then decreased, reaching the optimal at 1.5%, where the tensile strength, yield strength and elongation are 345 MPa, 220 MPa, and 4.5%, respectively.

Key Words: Mg-RE Alloys, Sand Casting, Aging Hardening, Solution Aging

镁及镁合金具有轻质、比强度和比刚度高、减震效果好和电磁屏蔽能力良好等特性。同时我国是世界上镁资源最为丰富的国家, 可利用的镁储量占世界总储量的 70%, 因此镁合金是我国重要的战略新兴材料和重要的绿色材料, 其研究和应用受到广泛关注^[1-3]。铸造镁稀土合金相对其他铸造镁合金具有更高的绝对强度、耐热性、耐蚀性、抗氧化性等多重特点, 因此在航空

航天领域得到了更加广泛的应用^[4-5]。

为满足航天飞行器与武器装备领域对轻质高强镁合金材料的迫切需求, 当前针对铸造镁稀土合金最重要研究目标之一是提高其强塑性。国内研究者通过添加较高含量稀土元素, 即提升固溶和时效强化作用, 使得合金强度达到了较高水平。如开发的 Mg-10Gd-3Y-0.4Zr、Mg-15.6Gd-1.8Ag-0.4Zr 等合金, 其

收稿日期: 2025-02-13; 修订日期: 2025-04-16

第一作者简介: 吴海, 男, 1995 年出生, 工程师, E-mail: 370597797@qq.com

通信作者: 肖旅, 男, 1983 年出生, 研究员, E-mail: 9075986@qq.com

引用格式: 吴海, 李蒙, 孙明珠, 等. Sm 对 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr 合金组织与力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(6): 827-832.

WU H, LI M, SUN M Z, et al. Effects of Sm on microstructure and mechanical properties of Mg-6Gd-3Y-0.4Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 827-832.

稀土总添加量已超过13%,时效态抗拉强度可分别达到350 MPa和400 MPa^[6-9]。然而,其伸长率均低于3%,主要是由于过高稀土含量损害了合金塑性。此外,航空航天大型复杂铸件一般在砂型铸造条件下冷却,具有总热量高、冷却速度慢的特点,过高稀土含量将导致合金易产生离异共晶相,这将进一步影响产品的塑性。当前开发的Mg-6Gd-3Y-0.4Zr合金,稀土总量为9%,时效态抗拉强度达到310~330 MPa,伸长率为4%~6%^[10],是目前综合强塑性表现较好的一种合金,也是目前航天产品应用最为成熟的镁合金,但其绝对强度仍有待提升。

综上,高稀土含量虽然在合金强度提升上效果较为显著,但是严重损害了合金塑性,且在大型复杂铸件体现得更为显著。低含量稀土随合金塑性提升上具备一定优势,但其抗拉强度处于较低水平。因此,镁合金综合强塑性协同提升仍需进一步研究。本研究在现有塑性表现较好的低稀土含量Mg-6Gd-3Y-0.4Zr合金体系的基础上,引入微量相对Gd和Y时效硬化能力更高效的Sm元素,使得合金中稀土元素总量增加不大,从而保证合金在塑性不显著下降的情况下提升强度,最终获得强塑性较高的合金,旨在为相关应用提供参考。

1 合金成分设计

Gd和Y元素在Mg基体中的固溶度呈高温高固溶、低温低固溶特征,在时效温度下,析出有效阻碍位错运动的沉淀相,析出强化作用明显,是良好的沉淀强化镁合金体系。图1为Mg-Sm二元相图,可见Sm在Mg中的最大固溶度为5.7%,对应温度为537.1℃,固溶度随温度降低的速率远超Gd、Y,说明其时效硬化作用的潜力相对Gd、Y更高。以Mg-6Gd-3Y-0.4Zr合金作为基本框架体系,同时添加Sm元素,形成Mg-6Gd-

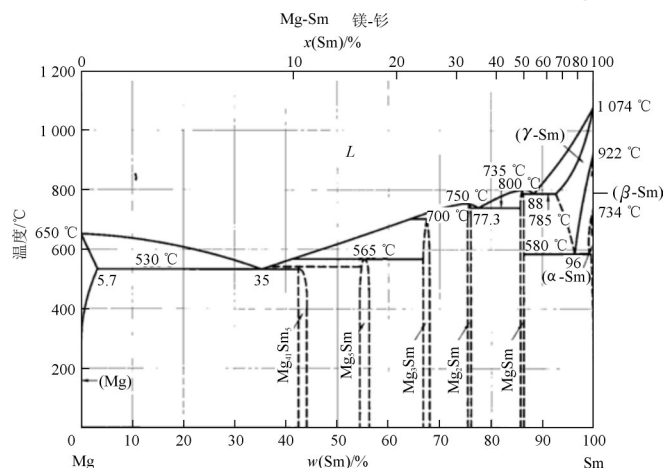


图1 Mg-Sm二元相图

Fig.1 Binary phase diagram of Mg-Sm

3Y- x Sm-0.4Zr体系。同时为精准调控Sm含量,实现低溶质含量的合金性能有效提升,对比研究了不同Sm含量($x=0, 0.5\%, 1.5\%, 2.5\%$, 质量分数,下同)对Mg-6Gd-3Y- x Sm-0.4Zr体系组织及力学的影响。

2 试验材料及方法

采用砂型铸造制备镁合金,熔炼设备为坩埚式电阻炉(GR-150-9),浇注尺寸为200 mm×100 mm×15 mm的板状试样。原材料为纯Mg(质量分数≥99.95%)、Mg-20Sm、Mg-20Gd、Mg-20Y中间合金,辅助材料为覆盖剂JDMF、精炼剂JDMJ,并选用Mg-30Zr中间合金作为晶粒细化剂。制备过程为:在300℃预热原材料5 h,按顺序分别放置于坩埚炉中熔炼,在熔液上铺撒JDMF覆盖剂进行阻燃,再使用JDMJ精炼剂进行精炼除渣、除杂。熔液静置25~40 min后捞除坩埚底部废渣,在700℃时采用重力浇注至砂型模具中。在CO₂保护循环炉中对铸态合金分别进行温度为490、500和510℃的固溶处理,再利用井式回火炉对合金铸件进行200℃时效热处理。

采用等离子体发射光谱仪(ICP, Perkin Elmer Plasma 400)对合金成分进行测定。切取尺寸为10 mm×10 mm×10 mm的镁合金试样,依次采用400、800、1 500、3 000目的砂纸打磨,并抛光至镜面。采用质量分数为3.5%的硝酸酒精溶液腐蚀5~10 s,酒精清洗风干后制得金相试样和SEM表征试样。采用GX60-DS金相分析系统对合金显微组织进行观察,同时使用FEI QUANTA 450扫描电镜及其配备的能谱仪对合金显微组织进行观察。利用晶界截点法统计各状态下合金的平均晶粒尺寸。采用CMT5305电子万能材料试验机进行拉伸试验,拉伸速率为2 mm/min,单次拉伸试样选取尺寸为M8 mm× ϕ 5 mm的铸件本体无缺陷试样3根,测试结果取平均值。

3 结果分析与讨论

3.1 化学成分

铸态合金的实际成分见表1。可以看出,不同成分合金的实际成分与名义成分接近,说明在本试验熔炼浇注工艺下,合金元素的烧损与沉降得到了有效控制。

表1 合金实测化学成分

Tab.1 Chemical composition of alloy

编号	合金名义成分	$w_B/\%$				
		Gd	Y	Sm	Zr	Mg
1	Mg-6Gd-3Y-0.4Zr	6.10	3.15	0	0.43	余量
2	Mg-6Gd-3Y-0.5Sm-0.4Zr	5.92	3.08	0.45	0.40	余量
3	Mg-6Gd-3Y-1.5Sm-0.4Zr	6.08	2.96	1.53	0.49	余量
4	Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr	5.90	3.02	2.66	0.46	余量

3.2 铸态合金的显微组织与力学性能

3.2.1 显微组织

不同成分合金的铸态金相组织见图2。可以看出,随着Sm含量由0提升2.5%,合金组织中呈黑色的第二相含量逐渐增多,体积分数分别为0.5%、0.8%、2.0%和3.5%,这意味着含Sm的第二相逐渐增多。在晶粒细化

剂的作用下,合金整体的晶粒尺寸处于较低水平,平均晶粒尺寸为40~60 μm。随着Sm含量从0升高至1.5%,合金的晶粒尺寸小幅降低,分别为58.91、47.12、46.61和42.84 μm,这可能是由于在凝固初期首先形成了含Sm、Gd和Y等元素第二相,其为晶粒形核提供了形核质点的同时,剩余第二相在一定程度上抑制了晶粒进一步长大,即稀土第二相含量升高,其细化作用更为显著。

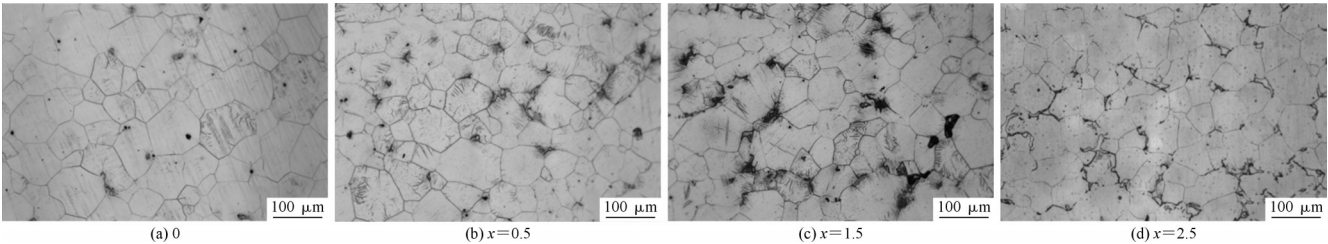


图2 Mg-6Gd-3Y-xSm-0.4Zr合金铸态金相组织

Fig.2 As-cast microstructure of Mg-6Gd-3Y-xSm-0.4Zr alloys

选取4号合金铸态组织进行SEM与EDS表征,结果见图3和表2。图3a中黑色区域为合金基体,白色为第二相,整体呈不连续的网状分布。白色网状结构整体呈现较为“模糊”的状态,这主要是大型铸件在砂型慢凝固过程中,组织中稀土合金元素Gd、Y等未充分扩散,致使晶粒心部与外部稀土元素含量不一致。根据EDS结果,心部稀土总含量为5.5%,外侧的稀土总含量为12%,二者存在较大的差异,这在后续固溶处理中稀土元素均匀扩散后会得到显著改善。

合金熔炼过程的晶粒细化剂,充当主要的形核质点。

3.2.2 力学性能

对4种铸态合金进行了拉伸力学性能测试,结果见表3。可以看出,随Sm含量由0升高至2.5%,合金的抗拉强度由210 MPa提升至235 MPa,这是由于基体中包含更多稀土合金元素,同时晶界上逐渐增多的第二相强化效果逐渐明显。合金伸长率整体相对较低,随Sm含量增加伸长率由6.5%下降至4.0%,呈小幅下降趋势,这主要取决于铸态组织中离异共晶相的分布,根据图2,离异共晶相含量升高且分布逐渐趋于网状,这与合金伸长率的下降规律相吻合。

表3 Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr合金铸态力学性能

Tab.3 Mechanical properties of as-cast Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr alloys

合金编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
1	210	125	6.5
2	221	132	5.9
3	226	149	5.2
4	235	156	4.0

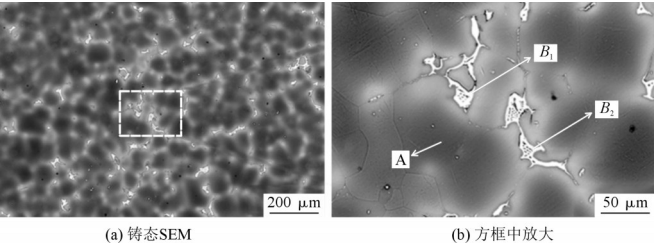


图3 Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr铸态合金SEM

Fig.3 SEM images of as-cast Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr alloys

表2 Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr铸态合金EDS结果

Tab.2 EDS results of as-cast Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr alloys %

位置	w_B				x_B			
	Gd	Y	Sm	Mg	Gd	Y	Sm	Mg
A	5.45	2.87	1.56	90.12	0.91	0.84	0.27	97.98
B ₁	20.25	9.45	20.14	50.16	5.24	4.32	5.46	84.98
B ₂	28.71	7.75	22.67	40.87	8.61	4.10	7.12	80.17

从表2可发现B₁、B₂处的第二相同时包含Mg、Gd、Y和Sm元素,其摩尔分数从大到小为Gd、Sm、Y,结合陈志^[11]和付三玲^[12]对铸态GY121、GY123、GY125等Mg-Gd-Y-Sm-Zr系合金的XRD表征结果,离异共晶相基本确认为Mg₅Gd、Mg₂₄(Gd,Y)₅和Mg₄₁Sm₅的离异共晶相混合物。基体内部的白色细小颗粒相为纯Zr,为

3.3 固溶态合金的显微组织与力学性能

为改善合金组织状态与提升合金性能,对4种合金进行固溶处理,探究各自成分下最佳的固溶温度与固溶保温时间。汪泉^[13]研究表明,铸态Mg-6Gd-3Y合金在490℃保温12h可实现彻底固溶且晶粒不过分长大。Sm在Mg中最大固溶度为5.8%,对应温度为530℃。为保证本合金体系中的Sm尽可能充分固溶,选用的固溶保温温度区间为490~510℃。

3.3.1 显微组织

图4为Mg-6Gd-3Y-0.4Zr合金在不同固溶态工艺

($490\text{ }^{\circ}\text{C}\times 10\text{ h}$, $500\text{ }^{\circ}\text{C}\times 10\text{ h}$, $500\text{ }^{\circ}\text{C}\times 14\text{ h}$)下的金相组织。可以看出,经固溶处理后合金组织中的第二相均无残留,固溶程度良好,晶粒尺寸分别为 78.54 、 83.78 和 $119.68\text{ }\mu\text{m}$, $500\text{ }^{\circ}\text{C}\times 14\text{ h}$ 固溶处理后,晶粒显著长大。根据组织判别, $490\text{ }^{\circ}\text{C}\times 10\text{ h}$ 可作为 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr 合金最佳的固溶工艺。

图 5 为 Mg-6Gd-3Y-0.5Sm-0.4Zr 合金在不同固溶态工艺($490\text{ }^{\circ}\text{C}\times 10\text{ h}$, $500\text{ }^{\circ}\text{C}\times 10\text{ h}$, $510\text{ }^{\circ}\text{C}\times 12\text{ h}$)下的固溶态金相组织。可以看出,不同固溶工艺状态下,合金组织中的第二相残留较少,固溶程度良好,晶粒尺寸分别为 50.27 、 59.84 和 $97.68\text{ }\mu\text{m}$,整体合金组织的演变规律与 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr 合金相同。因此, $500\text{ }^{\circ}\text{C}\times 10\text{ h}$ 可作为 Mg-6Gd-3Y-0.5Sm-0.4Zr 合金最佳的固溶工艺。

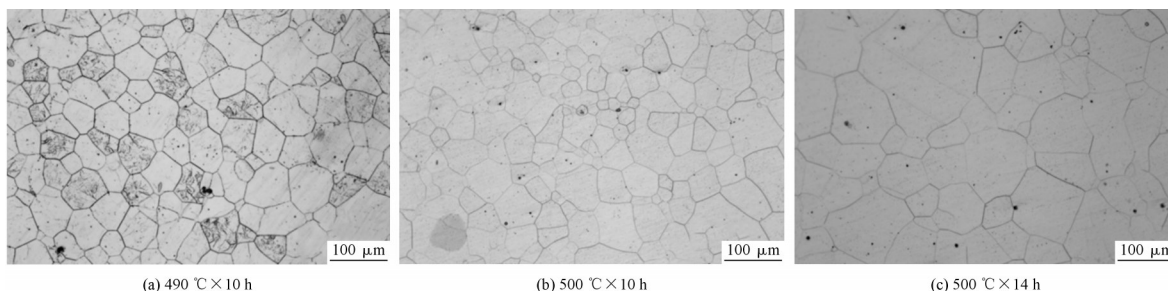


图 4 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr 合金固溶态金相组织

Fig.4 OM images of as-solubilized Mg-6Gd-3Y-0.4Zr alloy

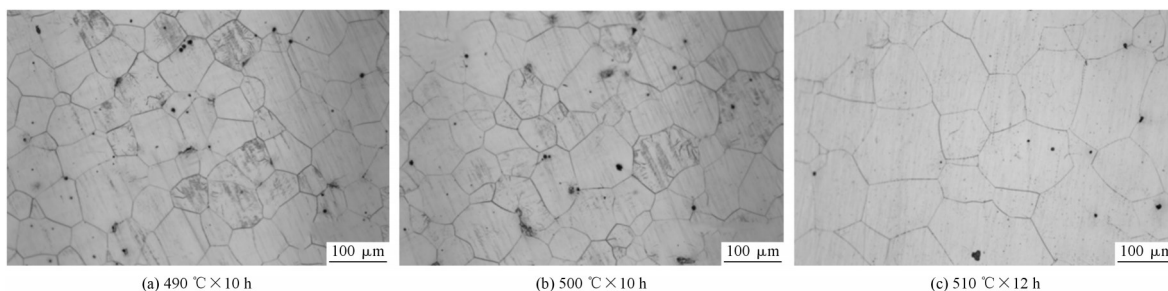


图 5 Mg-6Gd-3Y-0.5Sm-0.4Zr 合金固溶态金相组织

Fig.5 OM images of as-solubilized Mg-6Gd-3Y-0.5Sm-0.4Zr alloy

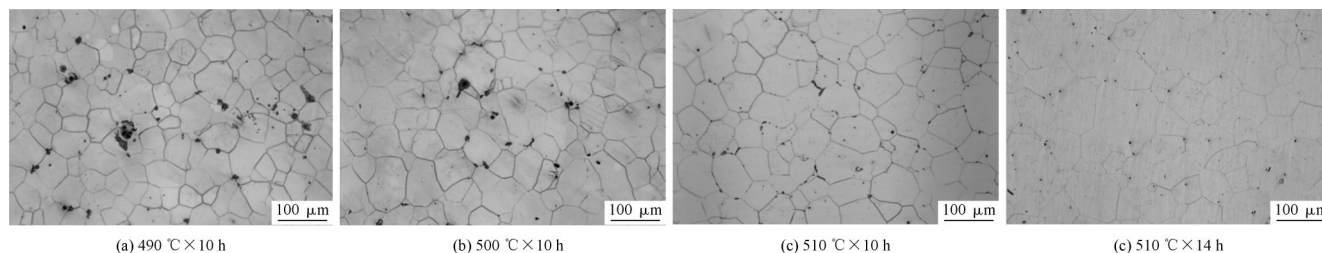


图 6 Mg-6Gd-3Y-1.5Sm-0.4Zr 合金固溶态金相组织

Fig.6 OM images of as-solubilized Mg-6Gd-3Y-1.5Sm-0.4Zr alloy

图 7 为 Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr 合金在不同固溶工艺($490\text{ }^{\circ}\text{C}\times 10\text{ h}$, $500\text{ }^{\circ}\text{C}\times 10\text{ h}$, $510\text{ }^{\circ}\text{C}\times 12\text{ h}$, $510\text{ }^{\circ}\text{C}\times 16\text{ h}$)下的金相组织。可以看出,晶粒尺寸分别为 50.12 、 54.16 、 75.65 和 $117.52\text{ }\mu\text{m}$ 。随着固溶温度与时间增加,晶粒尺寸存在长大趋势,第二相固溶程度显

著增加。合金铸态组织中包含的第二相较多,当固溶温度和时间提升至 $510\text{ }^{\circ}\text{C}\times 16\text{ h}$ 时,可实现绝大部分第二相溶入基体,此时晶粒尺寸已长大至 $117.52\text{ }\mu\text{m}$,因此, $510\text{ }^{\circ}\text{C}\times 16\text{ h}$ 可作为 Mg-6Gd-3Y-1.5Sm-0.4Zr 合金最佳的固溶工艺。

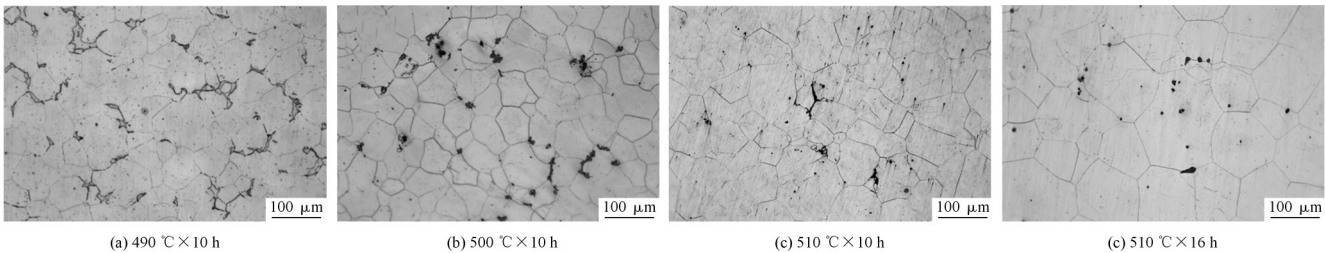


图7 Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr合金固溶态金相组织

Fig.7 OM images of as-solubilized Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr alloy

3.3.2 力学性能

表4为合金在不同固溶工艺下的室温力学性能。可以看出,1~4号合金在最优的热处理制度下抗拉强度分别为230、233、240和230 MPa,伸长率分别为12.0%、12.4%、12.5%和11.5%,主要差异体现在抗拉强度。最佳T4态1~3号合金组织中,第二相固溶均较为彻底且晶粒尺寸水平相当,但基体中固溶的稀土元素含量逐渐上升,固溶强化效果增强,因此合金抗拉强度小幅上升。当Sm含量提高至2.5%时,4号合金相对3号合金抗拉强度下降,主要是由于4号合金的最佳T4态组织中依然有少量第二相残留,且合金平均晶粒已长大至117.5 μm,二者均对合金强度改善不利。

表4 固溶态Mg-6Gd-3Y-xSm-0.4Zr合金力学性能

Tab.4 Mechanical properties of as-solubilized Mg-6Gd-3Y-xSm-0.4Zr alloys

合金	固溶工艺	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
1	490 °C×10 h	230	135	12.0
2	500 °C×10 h	233	137	12.4
3	510 °C×10 h	240	145	12.5
4	510 °C×16 h	230	135	11.5

3.4 时效态合金的力学性能

在4种合金各自最佳固溶工艺的基础上进行200 °C的时效处理,测得不同时间段的维氏硬度值,得出的时效态硬化曲线见图8。可以看出,4种合金分别在50、70、80和80 h达到峰值时效态,将峰值时效态的合金试样进行拉伸力学性能测试,结果见表5。分析4种合金整体的T6态力学性能可知,随着Sm由0提升至2.5%,合金强度的趋势呈先升高后下降的趋势,在Sm含量为1.5%时取得最大值;合金整体的伸长率变化不大,Sm含量为2.5%时伸长率较低,这是Mg-6Gd-3Y-2.5Sm-0.4Zr晶粒尺寸与残留第二相综合作用的结果。综上,Mg-6Gd-3Y-1.5Sm-0.4Zr时效态合金综合强塑性最优,在本体系中Sm含量不应超过1.5%。Mg-6Gd-3Y-1.5Sm-0.4Zr合金稀土元素总量为10.5%,相较于稀土总含量相近的T6态铸造镁稀土合金,如Mg-10.5Gd-0.4Zr^[14]、Mg-9Gd-3Y-0.4Zr^[15]、Mg-10Gd-0.2Zn-0.4Zr^[16]等均具有显著的抗拉强度优势,因此微量Sm即可显著强化合金。

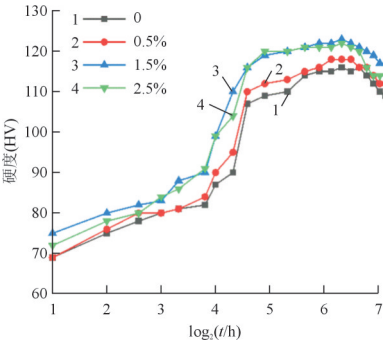


图8 200 °C下不同Sm含量合金时效硬化曲线

Fig.8 Aging hardening curves of alloys with different Sm contents at 200 °C

表5 Mg-6Gd-3Y-xSm-0.4Zr合金峰值时效态的力学性能

Tab.5 Mechanical properties of Mg-6Gd-3Y-xSm-0.4Zr alloys at peak aging state

合金	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
1	320	200	5.0
2	323	210	4.5
3	345	220	4.5
4	335	215	3.5

4 结 论

- (1)铸态Mg-6Gd-3Y-xSm-0.4Zr($x=0, 0.5, 1.5$ 和 $2.5, \%$)合金晶粒尺寸处于40~60 μm之间,且随Sm含量升高,合金晶粒尺寸小幅下降;Mg-6Gd-3Y-xSm-0.4Zr($x=0.5, 1.5$ 和 2.5)合金铸态组织主要由 α -Mg、Mg₅Gd、Mg₂₄(Gd,Y)₅、Mg₄₁Sm₅组成。
- (2)铸态Mg-6Gd-3Y-xSm-0.4Zr($x=0, 0.5, 1.5$ 和 2.5)合金分别在490 °C×10 h、500 °C×10 h、510 °C×10 h和510 °C×16 h的固溶工艺下取得最优组织与力学性能,其中Mg-6Gd-3Y-1.5Sm-0.4Zr合金强塑性理想,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为240 MPa、145 MPa和12.5%。
- (3)Mg-6Gd-3Y-xSm-0.4Zr($x=0, 0.5, 1.5$ 和 2.5)合金分别在50、70、80和80 h达到峰值时效态;随着Sm含量由0提升至2.5%,合金T6态强度的趋势呈先升高后下降的趋势,Sm含量为2.5%时伸长率明显下降。Sm含量为1.5%时合金综合强塑性最佳,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为345 MPa、220 MPa和4.5%。