

Mg-7Sm-4Al 细化剂对 Mg-6Al 合金细化的研究

郭二军, 张 志, 冯义成, 王丽萍

(哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 针对稀土化合物对 Mg-Al 合金的细化问题, 通过向纯 Mg 中复合添加 Al 和 Sm 元素制得 Mg-7Sm-4Al 细化剂, 研究了细化剂对 Mg-6Al 合金的细化效果, 并设计了直接添加同等量 Al 和 Sm 的对照实验。讨论了这两种添加方式对 Mg-6Al 合金晶粒尺寸的影响。实验结果表明: 外添加 Mg-7Sm-4Al 细化剂可以很好的细化 Mg-6Al 合金。当 Mg-7Sm-4Al 细化剂的添加量质量分数为 36.4% 时, Mg-6Al 合金的平均晶粒尺寸由原始的 126.12 μm 细化到 75.68 μm 。细化机制是 Mg-7Sm-4Al 中未溶解的 Al_2Sm 颗粒起到了异质形核作用, 溶解的 Al 和 Sm 元素的溶质效应, 二者协同作用使合金细化。从直接添加 Al 和 Sm 的对照实验可以得出, 添加质量分数为 0.64% Sm 会使 Mg-6Al 合金晶粒粗化, 因为 Sm 元素具有去除氧化物杂质的作用, 带走 Mg-Al 合金中富氧异质形核质点, 降低形核率。当 Sm 的添加量达到质量分数的 2.55% 时, Sm 和 Al 生成具有异质形核能力的 Al_2Sm 颗粒, 使合金细化。

关键词: Mg-7Sm-4Al 细化剂; Mg-6Al 合金; 晶粒细化; 晶粒粗化

DOI: 10.15938/j.jhust.2020.06.017

中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2020)06-0119-07

Study on Refining of Mg-6Al Alloy by Mg-7Sm-4Al Refiner

GUO Er-jun, ZHANG Zhi, FENG Yi-cheng, WANG Li-ping

(School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: The Mg-7Sm-4Al refiner was prepared by adding Al and Sm elements to pure Mg, and the refining effect of the refiner on Mg-6Al alloy was studied. The comparative experiment was designed to directly add the same amount of Al and Sm. The effects of these two addition methods on the grain size of Mg-6Al alloy were discussed. The results showed that the addition of the Mg-7Sm-4Al refiner can refine the Mg-6Al alloy very well. When the addition amount of the Mg-7Sm-4Al was 36.4%, the average grain size of the Mg-6Al alloy was refined from the original 126.12 μm to 75.68 μm . The refiner mechanism was that the undissolved Al_2Sm particles in the Mg-7Sm-4Al alloy act as a heterogeneous nucleation, soluble Al and Sm elements cause solute effects, and the two reasons together make the alloy refine. From the comparative experiment results of directly adding Al and Sm, it can be concluded that adding 0.64% Sm could coarsen the grain of Mg-6Al alloy, due to Sm element removed oxide impurities, and took away the oxygen-rich heterogeneous in Mg-Al alloy, thus reducing the nucleation rate. When the addition amount of Sm reaches 2.55%, the alloy is refined, because Sm and Al formed Al_2Sm particles with heterogeneous nucleation ability.

Keywords: Mg-7Sm-4Al refiner; Mg-6Al alloy; grain refinement; grain coarsening

收稿日期: 2019-03-03

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E2018045)。

作者简介: 张 志(1991—), 男, 硕士研究生;

冯义成(1978—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 郭二军(1963—), 男, 教授, 博士研究生导师, E-mail: guoerjun@126.com。

0 引言

镁合金作为目前最轻的金属结构材料,具有较高的比强度、比刚度、良好的阻尼性能、易加工等优点^[1],广泛应用于汽车零部件以及航空航天领域。但是镁合金也存在一些缺点,如力学性能偏低、成型性能差、高温蠕变性能低、抗腐蚀性能差。众所周知,晶粒细化是提高金属材料强度和塑性的一种重要方法。镁合金具有较高的 Hall-Petch 系数^[2-3],所以晶粒细化对提高合金强度的影响更大^[4]。近年来,由于 E2EM 模型的发展^[5-6],一些新的晶粒细化剂得到预测和实验验证。Qiu 等^[7]是在 Mg-10% Y 合金中添加质量分数为 0.6~1.0% 的 Al,并且在合金晶粒内部有 Al_2Y 化合物出现。Dai 等^[8]在 Mg-10Gd 合金中,添加 0.8~1.3% 的 Al,可显著细化合金晶粒,并在晶粒内部发现 Al_2Gd 颗粒,认为晶粒细化是由于 Al_2Gd 颗粒的异质形核作用。Dai 等^[9]还将 0.6~1.0% 的 Al 添加到 Mg-10Gd-3Y 合金中,结果发现合金晶粒从 187 μm 细化到 25 μm ,组织分析表明是由于合金中原位形成了与 Al_2Gd 晶体结构相似的 $Al_2(Gd_{0.5}Y_{0.5})$ 化合物颗粒,起到异质形核的作用。Wang 等^[10]研究了 Al 对 Mg-Sm 合金的组织性能的影响,随着 Al 含量的添加,晶粒尺寸逐渐减小,分析认为是由于合金中形成的 Al_2Sm 颗粒的异质形核作用,并且还研究了 Mg-Al-Sm 合金中起到有效形核核心的 Al_2Sm 颗粒尺寸、数密度与晶粒尺寸的关系,得出起到异质形核作用的 Al_2Sm 颗粒尺寸大约为 3~7 μm 。但是以上研究的具有异质形核能力的化合物颗粒都是原位自生的,这种化合物对其他镁合金有没有细化效果,还有待研究。本实验通过向纯 Mg 中复合添加 Al 和 Sm 元素,制备出含 Al_2Sm 颗粒的细化剂。研究了细化剂对 Mg-6Al 合金的细化效果,并设计添加同等量的 Al 和 Sm 对 Mg-6Al 合金细化的对照试验,详细的讨论了这种细化剂对 Mg-Al 合金的细化机制。

1 实验过程

1.1 Mg-7Sm-4Al 合金的制备

实验制得 Mg-7Sm-4Al 合金所用的原材料为纯 Mg (Mg $\geq$ 99.8%)、纯 Al (Al $\geq$ 99.8%) 和质量分数为 Mg-30% Sm 中间合金。合金熔炼之前,将所需的相关工具和原料在 200℃ 下进行烘干预热。升温至

740℃ 放入纯 Mg 和纯 Al,为了防止镁燃烧,在放入纯 Mg 和纯 Al 后加入 RJ-2 覆盖剂,待其充分熔化后放入质量分数为 Mg-30% Sm 中间合金。在 740℃ 下保温 15 min,然后搅拌 2 min 并静置 10 min,随后取出扒渣,再浇注到事先 200℃ 预热好的金属型模具中,模具型腔尺寸为 $\Phi 60\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 。

1.2 细化实验

将 Mg-7Sm-4Al 细化剂添加到 Mg-6Al 合金中,合金成分设计如表 1 所示。为了观察添加 Mg-7Sm-4Al 细化剂与直接添加同等量的 Sm 元素和 Al 元素的区别,设计对照组如表 2 所示。合金熔炼首先将纯 Mg 和纯 Al 在 740℃ 下充分熔化,然后再加入 Mg-7Sm-4Al 细化剂,在 740℃ 下保温 10 min 后搅拌 2 min,然后直接浇注在 200℃ 预热好的金属型模具中。对照组的熔炼过程和添加 Mg-7Sm-4Al 细化剂的熔炼过程一样,首先添加纯 Mg 和纯 Al 在 740℃ 下熔化后,再添加 Mg-30% Sm 中间合金,740℃ 保温 10 min,然后搅拌 2 min 直接浇注在 200℃ 预热好的金属型模具中。

表 1 添加 Mg-7Sm-4Al 细化剂对 Mg-6Al 细化实验的成分设计 (wt. %)

Tab. 1 Composition design of Mg-6Al refining experiment by adding Mg-7Sm-4Al refiner

Number	Mg/%	Al/%	Mg-7Sm-4Al/%	(Al + Sm) / %
1#	84.9	6	9.1	1
2#	71.3	6	22.7	2.5
3#	57.6	6	36.4	4

表 2 添加 Al 和 Sm 对 Mg-6Al 细化实验的成分设计 (wt. %)

Tab. 2 Composition design of Mg-6Al refinement experiment by adding Al and Sm

Number	Mg-6Al/%	Al/%	Sm/%	(Al + Sm) / %
4#	99	0.36	0.64	1
5#	97.5	0.91	1.59	2.5
6#	96	1.45	2.55	4

1.3 表征测试

将试样研磨抛光后,采用腐蚀剂(10 mL 乙酸、6 g 苦味酸、8 mL 水、70 mL 乙醇)腐蚀。用 OLMPUS-GX71 型立式光学显微镜观察晶粒尺寸和组织形貌,采用附带能谱分析的 FEI sirion 2000 型热场发射扫描电子显微镜观察微观组织和相成分分析。利用截线法测量晶粒的平均尺寸和统计不同位置的五张 SEM 图像中颗粒状相的尺寸分布并取平均值。

合金的相组成分析是使用 X'pert PRO 型 X 射线衍射仪,扫描速度是 $8^\circ/\text{min}$,扫描角度为 $15^\circ \sim 85^\circ$ 。

2 实验结果与分析

2.1 Mg-7Sm-4Al 合金组织与相组成。

图 1 为 Mg-7Sm-4Al 合金的组织形貌,从图中可以看出,组织中含有大量的颗粒状相和少量的不规则的针状相,为了确定合金中的相组成,对合金进行 XRD 衍射分析,如图 2 所示,从图中可以看出合金中除了 $\alpha\text{-Mg}$ 相外还含有 Al_2Sm 相和 $\text{Al}_{11}\text{Sm}_3$ 相。这与 Wang^[14] 等人研究结果相一致,在 Mg-Sm 合金中添加一定量的 Al 会生成颗粒状的 Al_2Sm 相和针状的 $\text{Al}_{11}\text{Sm}_3$ 相。图 3 是 Mg-7Sm-4Al 合金中 Al_2Sm 颗粒的尺寸分布,由图可知 Al_2Sm 颗粒的平均尺寸为 $7.70\text{ }\mu\text{m}$,颗粒尺寸主要分布在 $5 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 之间。

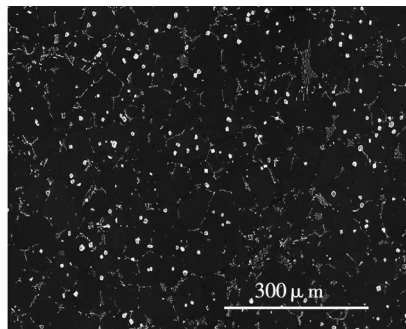


图 1 Mg-7Sm-4Al 合金的铸态组织扫描图

Fig. 1 As-cast microstructure scan of Mg-7Sm-4Al alloy

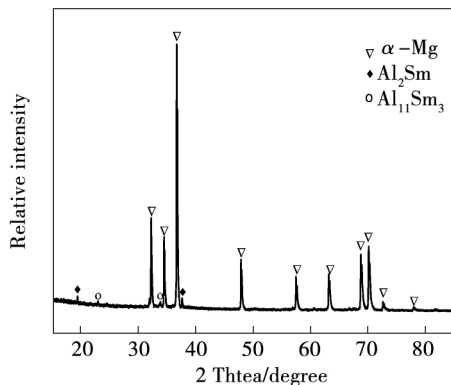


图 2 Mg-7Sm-4Al 合金的 XRD 图

Fig. 2 XRD pattern of Mg-7Sm-4Al alloy

2.2 Mg-7Sm-4Al 细化剂和对照组对 Mg-6Al 合金组织影响

图 4 为铸态 Mg-6Al 合金和 1#~6#合金金相照片。图 5 为相应的晶粒尺寸统计结果。由图可以看出,添加细化剂和直接添加 Al 和 Sm 对铸态 Mg-6Al

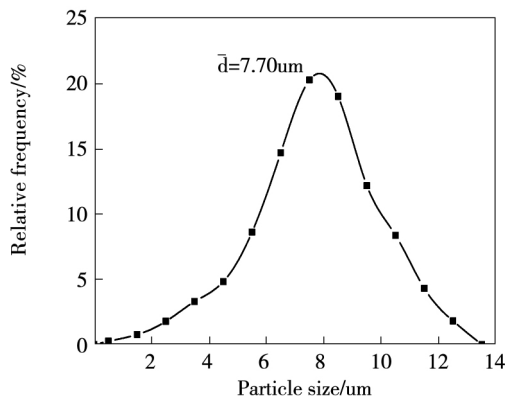


图 3 Mg-7Sm-4Al 合金中 Al_2Sm 颗粒的尺寸分布

Fig. 3 Size distribution of Al_2Sm particles in Mg-7Sm-4Al alloy

合金的晶粒尺寸影响有所不同。当加入细化剂时,随着细化剂的含量增多晶粒尺寸逐渐减小。Al + Sm 元素的添加量为 1% 时, Mg-6Al 合金的平均晶粒尺寸由 $126.12\text{ }\mu\text{m}$ 细化到 $90.09\text{ }\mu\text{m}$,添加量增加到 2.5% 时,平均晶粒尺寸细化到 $85.99\text{ }\mu\text{m}$,继续添加到 4% 时,晶粒尺寸进一步细化到 $75.68\text{ }\mu\text{m}$ 。而直接添加 Al 和 Sm 时,合金的平均晶粒尺寸经历先增大后减小的变化趋势,当 Al + Sm 元素的添加量为 1% 时, Mg-6Al 合金的平均晶粒尺寸由开始的 $126.12\text{ }\mu\text{m}$ 粗化到了 $210.21\text{ }\mu\text{m}$,当添加到 2.5% 时,平均晶粒尺寸变为 $157.66\text{ }\mu\text{m}$,虽然晶粒尺寸有所减小,但是相比原始 Mg-6Al 合金的晶粒尺寸仍然较粗,当继续添加到 4% 时,晶粒尺寸细化到 $87.44\text{ }\mu\text{m}$,相对原始 Mg-6Al 晶粒尺寸有所细化。

为了研究细化的原因,有必要分析合金的组织变化,图 6 为 Mg-6Al 合金及 1#~6#合金的扫描照片,图 6 中 (a) 可以看出原始 Mg-6Al 合金中除了 Mg 基体外,主要是由粗大骨骼状第二相组成。图 6 中 (b)、(d)、(f) 可以看出添加 Mg-7Sm-4Al 细化剂后,合金中的骨骼状相变得更加细小均匀,并且合金中还弥散分布着小颗粒状的第二相,这些小颗粒状相弥散分布在晶粒内部和晶界处。图 6 中的 (c)、(e)、(g) 可以看出直接添加 Al 和 Sm 后,在含量较少时,合金中除了骨骼状相外,只生成了很少的细小颗粒状相,随着添加量增多,合金中骨骼状相的周围析出了很多颗粒状和短棒状相,且在晶粒内部发现了少量的颗粒状相,当添加量继续增多时,在合金的晶粒内部和晶界处生成了尺寸较大的颗粒状和不规则的块状相。为了进一步确定合金中的相组成,进行 XRD 衍射分析,分析结果如图 7 所示,从图中可以看出 Mg-6Al 合金中除了 $\alpha\text{-Mg}$ 相外还含有 $\beta\text{-}$

$Mg_{17}Al_{12}$ 相, 可以确定合金中不规则的骨骼状相为 $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ 相。添加 $Mg-7Sm-6Al$ 细化剂后, 1#合金中只观察到了 $\alpha-Mg$ 相和 $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ 相的衍射峰, 但

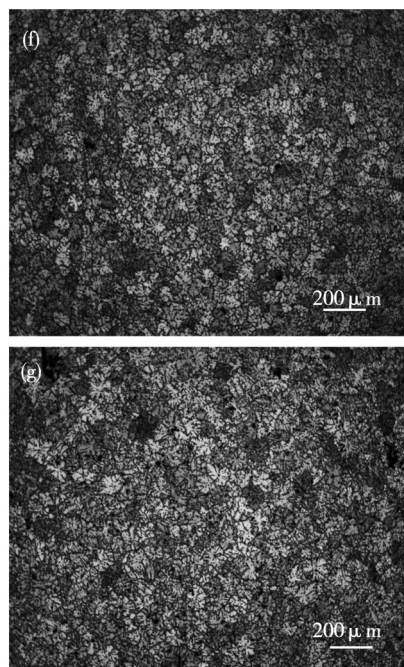
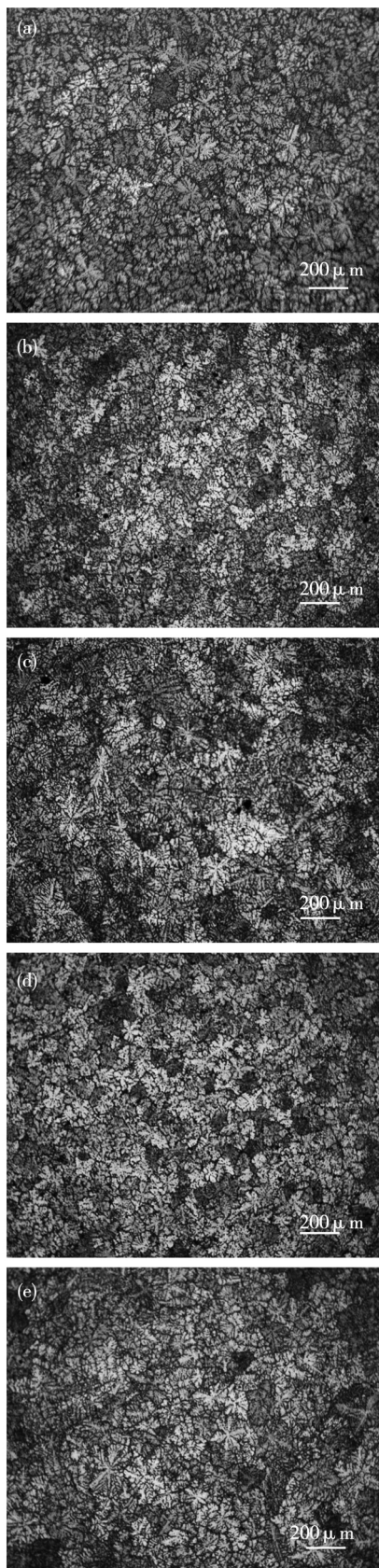


图4 不同合金铸态金相组织

Fig. 4 Optical micrographs of different alloys

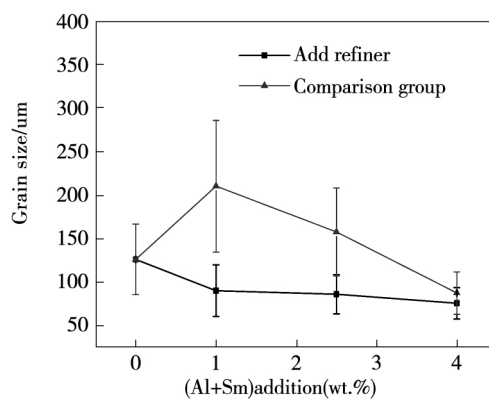


图5 平均晶粒尺寸变化

Fig. 5 Average grain size change

是由扫描照片上可以看到一些颗粒状的第二相存在, 推测可能是细化剂的添加量较少, 因此 XRD 没有检测出 $Al-Sm$ 相衍射峰。而在 2#和 3#合金中可以观察到除了 $\alpha-Mg$ 相和 $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ 相的衍射峰外还出现了 Al_2Sm 相的衍射峰, 可以证明添加细化剂后组织中的颗粒状相为 Al_2Sm 相。而在直接添加 Al 和 Sm 元素的 4#合金中也只观测到了 $\alpha-Mg$ 相和 $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ 相的衍射峰, 扫描照片上可以看到在晶界处存在一些颗粒状第二相, 推测可能是由于此时 Sm 的添加量较少, 因此 XRD 没有检测出 $Al-Sm$ 相衍射峰。随着 Sm 含量的增加, 在 5#和 6#合金中可以发现除了 $\alpha-Mg$ 相和 $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ 相的衍射峰外还出现

了 Al_2Sm 相的衍射峰,可以证明 5#合金中的颗粒状和短棒状的相为 Al_2Sm 相,6#合金中的颗粒状和不规则块状相为 Al_2Sm 相。

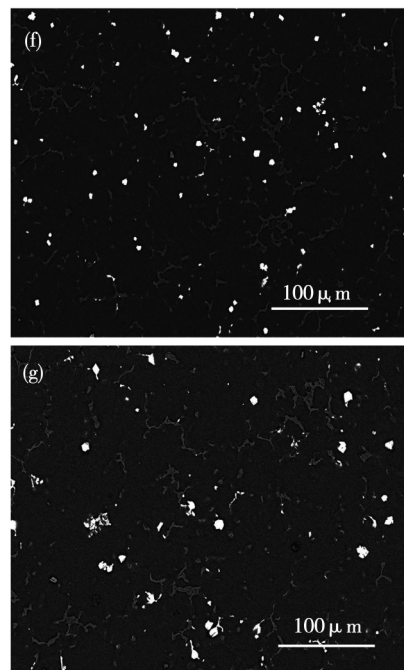
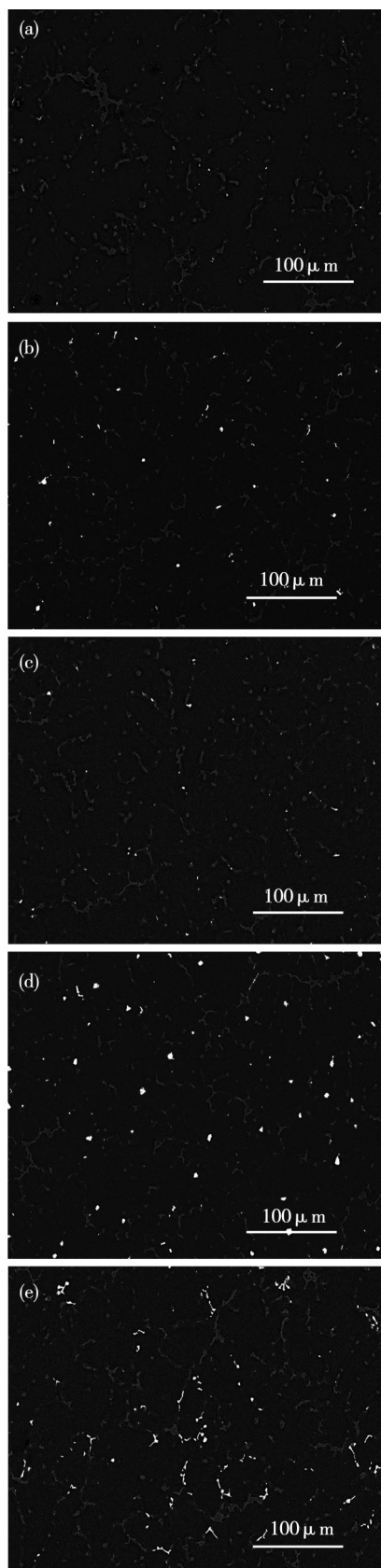


图6 不同合金的 SEM 图

Fig. 6 SEM images of different alloys

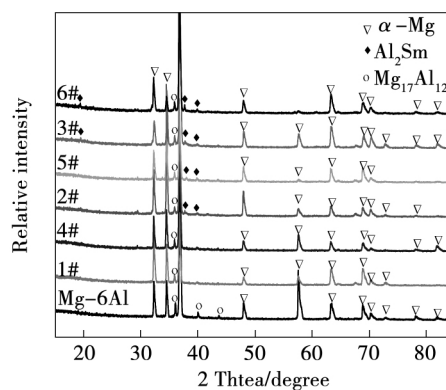


图7 不同合金的 XRD 图

Fig. 7 XRD pattern of different alloys

2.3 Mg-7Sm-4Al 细化剂和对照组对 Mg-6Al 合金的细化机理讨论

由 2.2 节的组织分析可知, Mg-7Sm-4Al 细化剂能够很好的细化 Mg-6Al 合金,并且随着添加量增加细化效果越好。在添加细化剂后,合金组织中出现了许多颗粒状 Al_2Sm 相,但是没有发现针状 $\text{Al}_{11}\text{Sm}_3$ 相,可以说明 Mg-7Sm-4Al 合金中的 $\text{Al}_{11}\text{Sm}_3$ 相为高温不稳定相,在熔炼过程中会分解成 Al 和 Sm 元素,而 Al_2Sm 相不会全部溶解,若是全部溶解则组织形貌会和直接添加 Al 和 Sm 的对照组一样,但是也不能说明 Al_2Sm 相在熔炼过程中完全稳定,因此,为了研究 Al_2Sm 相是否完全稳定,对添加细化剂后的

3#合金中的颗粒状 Al_2Sm 相的尺寸进行了统计,结果如图8所示,从图中可以看出颗粒尺寸主要分布在3~5 μm ,颗粒的平均尺寸为4.12 μm ,由2.1节可知 Mg-7Sm-4Al 合金中 Al_2Sm 颗粒的平均尺寸为7.7 μm ,可见 Al_2Sm 颗粒在熔炼过程中发生了部分溶解,使得颗粒尺寸有所减小。因此可以推测出在 Mg-6Al 合金中添加 Mg-7Sm-4Al 细化剂后,合金中出现的颗粒状 Al_2Sm 相有俩方面来源,一是原始 Mg-7Sm-4Al 细化剂中未溶解的 Al_2Sm 颗粒。二是 Mg-7Sm-4Al 细化剂中针状 $\text{Al}_{11}\text{Sm}_3$ 相分解为 Al 和 Sm 后再生成了颗粒状的 Al_2Sm 相。Wang^[14] 等人利用边边匹配模型计算并证明了 Al_2Sm 颗粒与 $\alpha\text{-Mg}$ 基体具有良好的晶格匹配度,是一种有效异质形核核心。通过与对照组实验对比可知细化剂中的颗粒状 Al_2Sm 相在熔炼过程中不会完全溶解掉,因此,在添加 Mg-7Sm-4Al 细化剂后的 Mg-6Al 合金中,颗粒状 Al_2Sm 相存在于 $\alpha\text{-Mg}$ 基体凝固之前。所以添加 Mg-7Sm-4Al 细化剂对 Mg-6Al 合金的细化机制为:细化剂中大量未溶解的 Al_2Sm 颗粒起到了异质形核作用,大大提高了形核率。而溶解在基体中的 Al 和 Sm 元素具有很强的偏析能力,造成成分过冷,抑制了晶粒的长大,二者协同作用使合金得到细化。

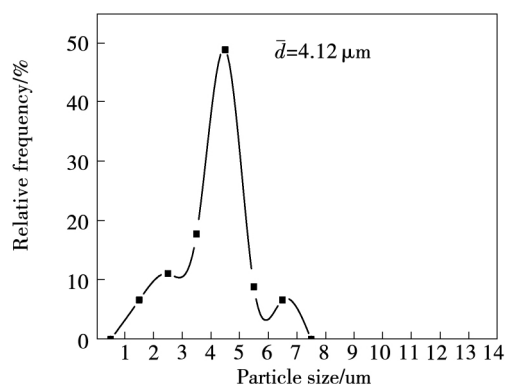


图8 3#合金中 Al_2Sm 颗粒尺寸分布

Fig. 8 Size distribution of Al_2Sm particles in 3# alloy

而相应的对照组,在 Al 和 Sm 的添加量较少时合金组织发生了粗化,只有在 Al 和 Sm 的含量较多时才会对 Mg-6Al 合金起到细化作用。添加微量的 Sm 会使 Mg-Al 合金粗化已经有很多学者报导过, Hu 等^[11] 向 Mg-3Al 合金中添加微量的 Sm 时会使合金粗化,认为粗化原因是添加微量 Sm 后, Mg-3Al 合金中起到有效异质形核质点的 Al-Fe-C-O 相转变成了不具有有效异质形核质点的 Al-Fe-Sm-C-O 相,使合金中有效形核质点减少,从而导致合金晶粒粗化。朱守茹^[12] 等人向 Mg-9Al 合金中添加 2% Sm 后合金

晶粒粗化,认为 Mg-9Al 合金中存在 Al-Fe-Mn, Al-Fe-O-Mn-Ca 等具有异质形核质点的颗粒,在添加 Sm 后会大量消除这些颗粒,并且合金中形成的 Al-Sm 相的形核能力较弱,从而导致晶粒粗化。同理推测 Mg-6Al 中也存在自生的异质形核颗粒。图9为4#合金和 Mg-6Al 合金经过 $420^\circ\text{C} \times 24\text{h}$ 固溶处理的扫描照片。从图中可以看出固溶态 Mg-6Al 合金中存在较大的颗粒状杂质,而4#合金中也存在颗粒状质点,但是尺寸相对较小。表3为 Mg-6Al 合金和4#合金中颗粒状质点的 EDS 能谱分析,由 EDS 分析可知 Mg-6Al 合金中的质点为 Mg-Al-C-O 颗粒,推测此颗粒质点为 Mg-6Al 合金中的异质形核质点。而在4#合金中颗粒相为 Al-Sm 相,但是由于颗粒的尺寸较小,形核的能力较弱。根据自由生长理论^[13-14],形核过冷度和形核颗粒的尺寸成反比。因此尺寸越小的形核质点则需要更大形核过冷度,晶粒也就越难在其上长大。所以形核颗粒的大小必须高于一定的阈值,才能保证晶粒的连续生长。4#合金的晶粒尺寸粗大是由于添加少量的 Sm 后,稀土元素 Sm 与 O 的亲合力更大,具有去除氧化物夹杂的作用^[15],因此在镁溶液中的 Sm 元素会向富氧颗粒状 Mg-Al-C-O 质点聚集,并且 Sm 元素的相对原子质量较大,导致 Mg-6Al 合金中的具有异质形核能力的 Mg-Al-C-O 质点下沉,从而减少了合金中有效异质形核质点的数量,然而此时生成的 Al-Sm 相由于颗粒太小,不具有异质形核能力或异质形核能力较弱,从而使晶粒粗化。随着 Sm 含量的增加合金晶粒尺寸逐渐减小,如6#合金,从中可以看出晶粒内部生成了尺寸较大的颗粒状 Al_2Sm 相,具有较强的异质形核能力,提高了形核率,随着 Al 和 Sm 元素的增多,溶质效应增强,两种机制协同作用从而使合金晶粒得到细化。

综上所述,添加 Mg-7Sm-4Al 细化剂相对于直接添加 Al 和 Sm 具有显著的优势,主要体现在俩个方面,一是在添加量较少时, Mg-7Sm-4Al 细化剂就能很好的起到细化作用,而直接添加 Al 和 Sm 的方式只有在添加量较多时才能起到细化效果,二是添加 Mg-7Sm-4Al 细化剂的细化效率更高,对比3#和6#合金可以发现,在 Al + Sm 的添加量相同时,以细化剂方式添加的3#合金细化效果更好,虽然3#合金中的颗粒状 Al_2Sm 尺寸相对较小,但仍然具有较强的异质形核能力,并且颗粒的数量较多,分部更加均匀,因此,具有异质形核的质点就越多,细化效率越高。

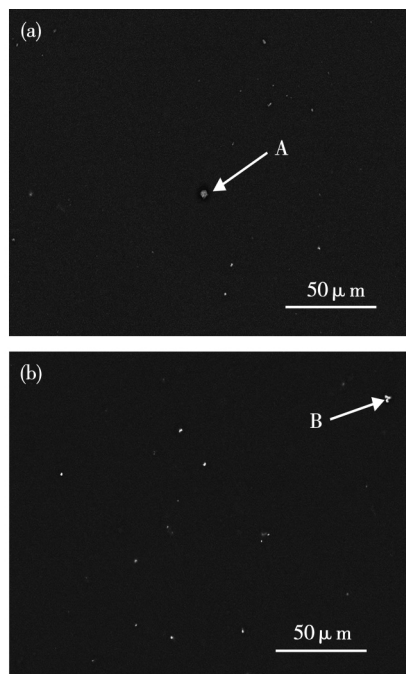


图 9 固溶态 Mg-6Al 合金和 4#合金扫描图
Fig. 9 SEM images of Mg-6Al and 4# alloy
by solution treatment

表 3 图 9 中 A 和 B 点的 EDS 能谱分析(at. %)
Tab. 3 EDS spectrum analysis of points A
and B in Figure 9 (at. %)

Position	C	O	Mg	Al	Sm
A	45.94	29.27	21.74	3.05	0
B	3.76	8.05	42.88	31.09	14.22

3 结 论

1) Mg-7Sm-4Al 细化剂中含有针状 $Al_{11}Sm_3$ 相和颗粒状 Al_2Sm 相, Al_2Sm 颗粒的平均尺寸为 $7.70 \mu m$, 尺寸主要分布在 $5 \sim 10 \mu m$ 之间。

2) Mg-7Sm-4Al 细化剂能够很好的细化 Mg-6Al 合金, 当 Al + Sm 添加量达到 4% 时, Mg-6Al 合金的平均尺寸由原始的 $126.12 \mu m$ 细化到 $75.68 \mu m$, 细化机制是由于细化剂中未溶解的 Al_2Sm 颗粒具有很强的异质形核作用, 大大提高了形核率。而溶解在基体中的 Al 和 Sm 元素具有较强的偏析能力, 造成成分过冷, 抑制了晶粒的长大, 二者协同作用使合金得到细化。

3) 添加少量的 Sm 元素 (0.64% Sm 和 1.59% Sm) 会使 Mg-6Al 合金粗化, 粗化原因是由于 Sm 元素具有去除氧化物杂质的作用, 加入微量 Sm 后带走 Mg-6Al 合金中原有的富氧异质形核质点, 降低了

形核率, 使合金粗化。当 Sm 含量较多时 (2.55% Sm), 合金中生成了大量具有异质形核能力的 Al_2Sm 颗粒, 并且 Al 和 Sm 的溶质效应也会抑制晶粒长大, 从而使合金细化。

参 考 文 献:

- [1] 戴吉春. Al 及微量元素对 Mg-Gd(-Y) 合金晶粒细化行为、组织及力学性能影响的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [2] SHEPELEV D, KLEMPF J, BAMBERGER M, et al. Grain Refinement and Mechanical Properties Enhancement of AZ91E Alloy by Addition of Ceramic Particles [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(17): 5798.
- [3] CACERES C H, MANN G E, GRIFFITHS J R. Grain Size Hardening in Mg and Mg-Zn Solid Solutions [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2011, 42(7): 1950.
- [4] CHEN T J, WANG R Q, MA Y, et al. Grain Refinement of AZ91D Magnesium Alloy by Al-Ti-B Master Alloy and Its Effect on Mechanical Properties [J]. Materials & Design, 2012, 34: 637.
- [5] ZHANG M X, KELLY P M. Crystallography and Morphology of Widmanstätten Cementite in Austenite [J]. Acta Materialia, 1998, 46(13): 4617.
- [6] ZHANG M X, KELLY P M, EASTON M A, et al. Crystallographic Study of Grain Refinement in Aluminum Alloys Using the Edge-to-edge Matching Model [J]. Acta Materialia, 2005, 53(5): 1427.
- [7] QIU D, ZHANG M X, TAYLOR J A, et al. A New Approach to Designing a Grain Refiner for Mg Casting Alloys and Its Use in Mg-Y-based Alloys [J]. Acta Materialia, 2009, 57(10): 3052.
- [8] DAI J, EASTON M, ZHU S, et al. Grain Refinement of Mg-10Gd Alloy by Al Additions [J]. Journal of Materials Research, 2012, 27(21): 2790.
- [9] DAI J, ZHU S, EASTON M A, et al. Heat Treatment, Microstructure and Mechanical Properties of a Mg-Gd-Y Alloy Grain-refined by Al Additions [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 576(4): 298.
- [10] WANG C, DAI J, LIU W, et al. Effect of Al Additions on Grain Refinement and Mechanical Properties of Mg-Sm Alloys [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2015, 620: 172.
- [11] HU X Y, FU P H, PENG L M, et al. On Grain Coarsening and Refining of the Mg-3Al Alloy by Sm [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016, 663: 387.
- [12] 朱守茹. Mg-9Al-2Sm (wt. %) 铸造合金显微组织与力学性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [13] GREER A L, BUNN A M, TRONCHE A, et al. Modelling of Inoculation of Metallic Melts: Application to Grain Refinement of Aluminium by Al-Ti-B [J]. Acta Materialia, 2000, 48(11): 2823.
- [14] QUESTED T E, GREER A L. The Effect of the Size Distribution of Inoculant Particles on As-cast Grain Size in Aluminium Alloys [J]. Acta Materialia, 2004, 52(13): 3859.
- [15] 杨素媛, 张丽娟, 张堡垒. 稀土镁合金的研究现状及应用 [J]. 稀土, 2008, 29(4): 81.

YANG Suyuan, ZHANG Lijuan, ZHANG Baolei. Research Status of RE-Mg Alloy [J]. Chinese Rare Earths, 2008, 29(4): 81.

(编辑: 温泽宇)