

微量 Sc 和 Zr 对 Al-Mg 合金铸态组织的晶粒细化作用^①

尹志民 高拥政 潘青林 张永红 尹松波
(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

摘 要 制备了 Al-5Mg、Al-5Mg-0.2Sc、Al-5Mg-0.1Zr 和 Al-5Mg-0.2Sc-0.1Zr 四种铸态合金, 采用金相显微镜和扫描电镜观察分析了微量 Sc 和 Zr 对 Al-Mg 合金铸态组织的晶粒细化作用及其机理。结果发现, 0.2% 的 Sc 并未使 Al-Mg 合金产生晶粒细化作用, 而 0.2% 的 Sc 与 0.1% 的 Zr 复合添加则使 Al-Mg 合金产生了极其强烈的晶粒细化作用。这一作用的产生, 是由于 Sc、Zr 与 Al 在合金熔体中生成了 Al₃Sc 和 Al₃Zr 复合粒子, 这种粒子在合金凝固过程中, 起到了非均质晶核细化晶粒的作用。

关键词 钪 Al-Mg 合金 非均质晶核 细化作用

含钪铝合金具有高的强度和韧性、良好的抗蚀性和可焊性, 是新一代航天航空用结构材料^[1-3]。细晶强化、亚结构强化及弥散强化是这种合金强化的主要原因, 其中晶粒细化又是合金韧性好的主要原因。关于添加 Sc 对铝合金晶粒细化现象的研究, 已经发表了一些文章^[4-5], 但是, 有关 Sc 对铝合金、特别是 Sc 与 Zr 一起对铝合金的晶粒细化及其机理, 仍缺乏有力的实验证据, 问题有待深入研究。本文拟研究微量 Sc、Zr 分别单独添加和复合添加对 Al-Mg 合金铸造组织的晶粒细化作用, 探讨了其晶粒细化的机理。

1 材料制备与实验方法

为了研究 Sc 和 Zr 分别添加和复合添加对 Al-Mg 合金铸态组织的影响, 采用逐步添加法设计了成分不同的四种合金, 化学成分见表 1。合金熔炼时, Al 和 Mg 以纯金属的形式加入, Sc 和 Zr 分别以 Al-Sc 和 Al-Zr 中间合金的形式加入。在电阻坩埚炉内的石墨坩埚中进行熔化

和精炼, 采用铁模铸造, 模温 150℃, 浇铸温度 720~730℃。

表 1 合金的化学成份(%)

合金	Mg	Sc	Zr	Al
1 [#]	5	—	—	余量
2 [#]	5	0.2	—	余量
3 [#]	5	—	0.1	余量
4 [#]	5	0.2	0.1	余量

采用光学金相和扫描电子金相观察, 分析了铸态合金的显微组织和非自发晶核相的成份。金相样品有经电解抛光后阳极复膜和机械抛光后混合酸腐蚀两种, 前者用来在光学金相偏振光下观察合金的晶粒度, 后者用来在光学金相显微镜和扫描电镜能谱下观察合金晶粒内非均质晶核的形貌和成份。

2 实验结果

四种铸态合金晶粒形貌和大小见图 1。比较图 1(a) 和图 1(b) 可见, Al-5Mg 合金

① 国家自然科学基金项目 (59671003) 收稿日期: 1997-04-18; 修回日期: 1997-08-28
尹志民, 男, 51 岁, 博士, 教授, 博士生导师

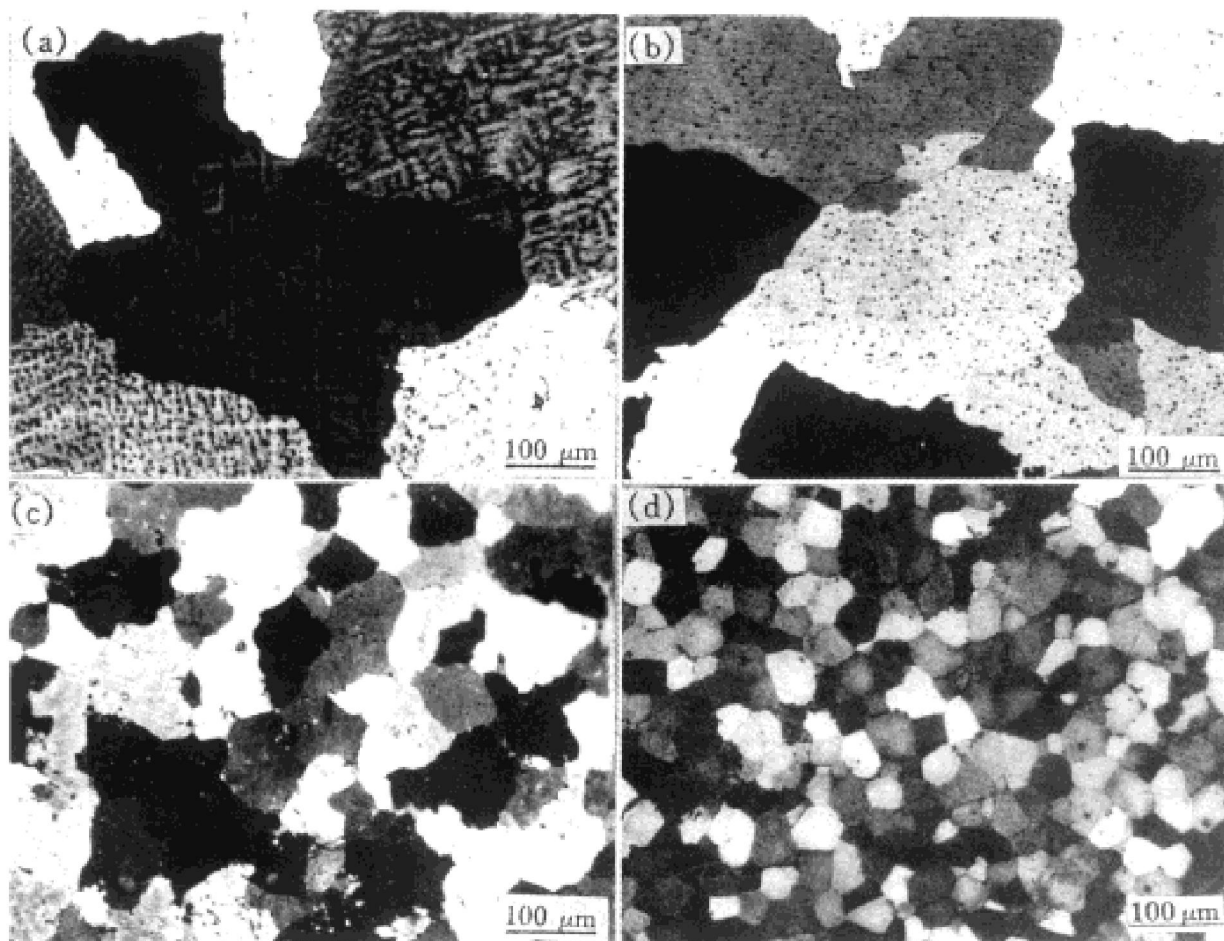


图1 铸态合金的晶粒形貌

(a) 1[#] 合金; (b) 2[#] 合金; (c) 3[#] 合金; (d) 4[#] 合金

中添加 0.2% 的 Sc, 除在一定程度上消除了合金的枝晶组织外, 晶粒尺寸并无明显变化; Al-5Mg 合金中添加 0.1% 的 Zr, 晶粒有较明显的细化, 添加有 0.2% Sc 和 0.1% Zr 的合金, 晶粒组织最为细小。这一现象说明, 单独添加 0.2% 的 Sc 对 Al-Mg 合金并无晶粒细化效果, 而只有与 0.1% 的 Zr 复合添加时, 才产生了极强烈的晶粒细化作用。

另外, 将铸态合金经混合酸腐蚀后, 观察其金相组织。结果发现, 在 4[#] 合金中, 部分晶粒内部存在有正方形、长方形和三角形的第二相粒子(图 2(a)), 其尺寸约在 7~10 μm 左右。图 2(b) 为这种第二相粒子在 X-650 型扫描电镜下的高倍图象。由图可见, 该方块相为双重复合结构: 内部呈暗色的四方形, 外部包裹着一层亮色的外壳。能谱分析发现, 这些相主要由 Al、Sc、Zr 三种元素组成(图 2(c)); 复合粒

子成份的原子百分比为 Al: Sc: Zr = 75.15: 16.74: 8.11, 说明该相中的 Sc、Zr 原子之和与 Al 原子的比例接近 1:3 ($\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$); 另外, 采用波谱分析发现, 该方块相内部富 Zr, 外部富 Sc。因此, 可以认为该相为 Al_3Sc 和 Al_3Zr 的复合粒子。

3 分析与讨论

有关微量 Sc 对铝合金的晶粒细化作用机理, 目前只有推论性的说法, 还未见到有说明细化晶粒机制的具体实验证据。大部分文献^[1-5]认为, 在铝合金中, Sc 能与 Al 发生反应, 会从熔体中优先析出一次 Al_3Sc 相不熔性质点; 从已有的 X 射线衍射卡片数据知道, 该质点为 AuCu_3 型立方结构, 点阵常数 $a =$

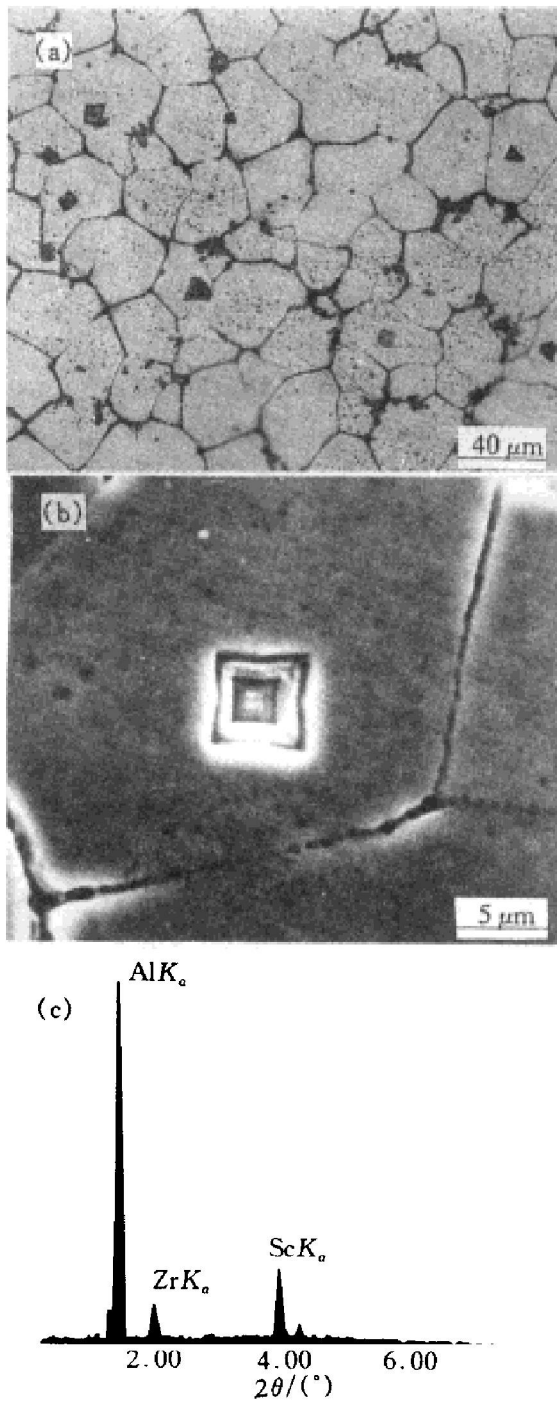


图2 4#合金晶粒内非均质晶核的形貌和成份

0.410 nm, 无论晶体结构还是晶格常数均与基体 Al (面心立方结构, $a = 0.405$ nm) 极为相近, 合金凝固时, 这种质点是 α (Al) 结晶时的理想晶核, 可以起到非均质晶核的作用。为什么添加 0.2% 的 Sc 未能对 Al-5Mg 合金产生晶粒细化作用呢? 作者认为, 可以根据 Al-Mg-Sc 三元合金相图进行解释。图 3 为 Al-Mg-Sc 三元合金相图的富铝端^[6], 由图可见, Al-5Mg-0.2Sc 合金的成分点落在 α (Al) 相区内, 说明 Sc 主要是以固溶体的形式存在于 α (Al) 中, 在

合金体系中不可能有 Al_3Sc 质点的存在, 所以也就不会产生晶粒细化作用; 从图 3 可以看出, 只有当 Sc 含量越过共晶线时, 合金体系中才有可能出现 Al_3Sc 质点。

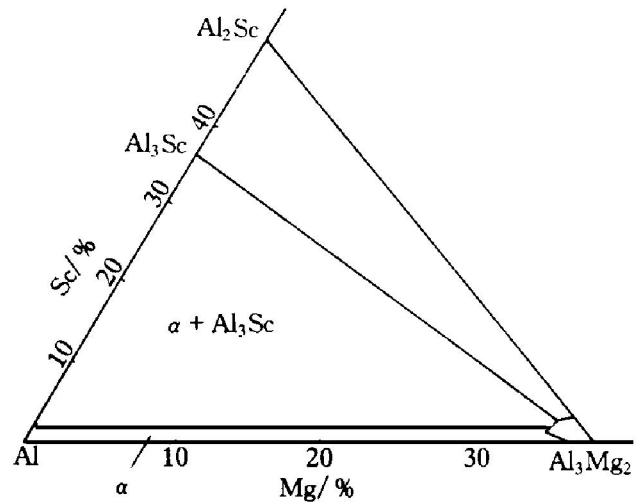


图3 Al-Mg-Sc 三元合金相图的富铝端

当 0.2% 的 Sc 与 0.1% 的 Zr 复合添加时, Al-Mg 合金产生了极强烈的晶粒细化效果。这是由于 Sc 和 Zr 的相互作用, 使得合金在钪含量较低的情况下从熔体中析出了 Al_3Sc 和 Al_3Zr 复合粒子 (图 2), 由于 Al_3Sc 附在 Al_3Zr 上析出, 故该复合粒子仍保持了 Al_3Sc 粒子所具有的上述非均质晶核作用, 从而强烈地细化了合金铸态的晶粒组织。有关 Al-5Mg-0.2Sc-0.1Zr 合金在凝固时从熔体中析出 Al_3Sc 和 Al_3Zr 复合粒子这一现象, 作者认为, 也可在有关的相图上得到解释。在 Al-5Mg-0.2Sc-0.1Zr 四元合金中, Mg 不与 Al、Sc 及 Zr 形成化合物, Mg 主要是固溶在 α (Al) 中, 所以讨论这四种元素之间形成中间相时, 可以参考 Al-Sc-Zr 三元合金相图。图 4 为 Al-Sc-Zr 三元合金相图的富铝端^[7], 可以看出, Al-0.2Sc-0.1Zr 合金体系的成分点落在 α (Al) + Al_3Sc + Al_3Zr 三相区域内, 合金凝固时会从熔体中析出 Al_3Sc 和 Al_3Zr 复合粒子, 该粒子是 α (Al) 固溶体结晶时理想的非均质晶核, 这就是实验结果中图 2 所示的情况。至于图 2(a) 中为何只

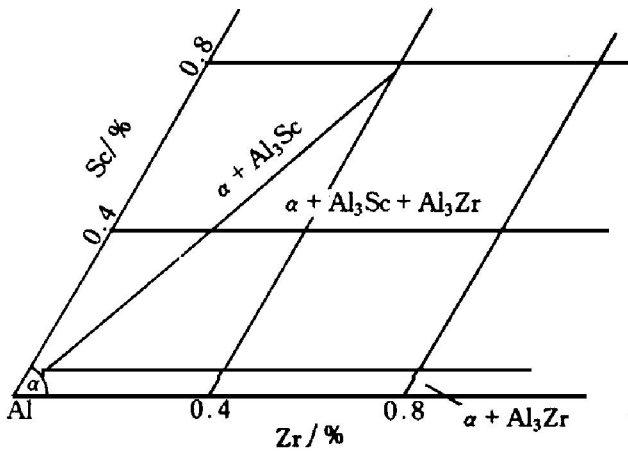


图4 Al-Sc-Zr 三元合金相图的富铝端

有部分晶粒内能看到非均质晶核以及非均质晶核为何呈现出正方形、长方形和三角形等不同形状, 作者认为, 是由于金相磨面与非均质晶核交截的结果。如果非均质晶核刚好处在磨面上, 则会依其与磨面的交截部位不同而呈现不同的形状。如果非均质晶核未能与磨面交截, 则在磨面上看不到这种非均质晶核。

4 结论

(1) 单独添加 0.2% 的 Sc 未能使 Al-5Mg

EFFECT OF TRACE Sc AND Zr ON GRAIN REFINEMENT OF AS-CAST Al-Mg ALLOYS

Yin Zhimin, Gao Yongzhen, Pan Qinglin, Zhang Yonghong, Yin Songbo
Central South University of Technology, Changsha 410083

ABSTRACT Al-5Mg, Al-5Mg-0.2Sc, Al-5Mg-0.1Zr and Al-5Mg-0.2Sc-0.1Zr cast alloys have been prepared. The effect of trace Sc and Zr on grain refinement of Al-5Mg cast alloy was studied using optical microscopy and scanning electron microscopy with EDS. The results showed that adding 0.2% Sc and 0.1% Zr to Al-5Mg alloy leads to strong grain refinement but adding only 0.2% Sc to Al-5Mg alloy has no grain refinement phenomenon. This is because, during solidification, Al₃Sc/Al₃Zr composite particles were formed in the melt playing a role of the nuclei of inhomogenized crystallization.

Key words scandium aluminium alloy grain refinement

合金产生晶粒细化作用, 而 0.2% Sc 与 0.1% Zr 复合添加后 Al-5Mg 合金却产生了极强烈的晶粒细化作用。

(2) Al-5Mg-0.2Sc-0.1Zr 合金凝固时熔体中析出 Al₃Sc 和 Al₃Zr 复合粒子, 这种粒子在凝固过程中起非均质晶核和晶粒细化的作用。

参考文献

- 1 刘可群. 见: 第二届全国铝锂合金研讨会论文集. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993: 265.
- 2 Елагин В И, Вахаров В В(著), 谢燮揆译. 轻金属, 1992 (2): 54.
- 3 李汉广, 尹志民, 刘静安等. 铝加工, 1996, 19(1): 45.
- 4 Toropova L S, Kamardinkin A N *et al.* Phys Met Metall, 1990, 70(8): 106.
- 5 Sawtell R R, Jensen C L. Metallurgical Transactions A, 1990, 21A (2): 421.
- 6 Red book (Phase Diagram of Metallic Systems). Materials Science International Service GmbH, D-7000 Stuttgart Germany. 1979, 24: 127.
- 7 Изотермические Сечения Системы, Al-Sc-Zr Камардинкин А. Н, И ДР, Изв. АН СССР Мет, 1991, (2): 214.

(编辑 朱忠国)