

电磁连铸和微合金化对 5356 铝合金组织性能的影响

邢清源¹, 孟令刚¹, 邓亮¹, 杨洪硕¹, 甄立玲², 刘红伟², 房灿峰¹, 樊建勋², 张兴国¹

(1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

(2. 兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315000)

摘要: 研究了不同电源功率、拉坯速率和冷却水量等参数以及微量 Sc 元素对 5356 铝合金组织和性能的影响。结果表明, 在电源功率 10 kW, 拉坯速率 8 cm/min, 冷却水量 1.7 m³/h 的工艺条件下, 5356 铝合金具有最优的表面和内部质量以及综合力学性能, 抗拉强度、伸长率分别可达 310.0 MPa 和 16.3%, 且铸锭表面无明显铸造缺陷, 边部组织基本为等轴晶, 心部组织呈破碎枝晶形态, 第二相分布均匀。5356 铝合金合理的均匀化处理工艺参数为 440 °C, 30 h, 空冷, 均匀化处理后合金元素 Mg 的微观偏析基本消除, 在晶界连续分布的 Al₈Mg₅ 相明显回溶。微量的 Sc 元素显著提高 5356 铝合金的强度和塑性。实验证明, 5356Al+0.4%Sc(质量分数)合金晶粒明显细化, 第二相数量减少, 抗拉强度和伸长率达 330.0 MPa 和 29.0%, 分别提高 6.5%和 77.9%。

关键词: 5356 铝合金; 电磁连铸; 显微组织; Sc 元素

中图分类号: TG146.2^{†1}

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)02-0487-06

5356 铝合金是一种通用型焊材, 属于不可热处理强化合金, 具有较高的强度和优异的抗腐蚀性能, 在 Al-Mg、Al-Mg-Si 及 Al-Zn-Mg 系铝合金结构材料的焊接中均得到广泛的应用, 其中最主要应用于焊接 Mg 元素含量超过 3% (质量分数, 下同) 的 Al-Mg 合金^[1]。

目前, 世界范围内只有 VAW、KOK、Alcoa 等少数几家公司掌握有完善的大型铝合金型材及其配用焊丝的生产技术, 美国铝业公司 Alcoa 的产品基本垄断了国内的铝合金焊丝市场, 包括 ER4043、ER5183、ER5356 等, 其中 ER5356 铝合金焊材由于具有较好的通用性, 约占焊材总销量的 70%左右^[2]。但对于诸如高速列车、航空航天、军工等特殊行业, 却无法通过进口满足自身的需要, 因此在一定程度上限制了此类行业的快速发展。可见, 高品质铝合金焊丝的制备技术研究迫在眉睫。与此同时, 稀土元素微合金化已成为全球科研热点, 其中, 含 Sc 元素铝合金由于具有优异的综合力学性能, 并大量应用于航天结构材料, 从而受到材料领域的广泛关注^[3,4], 我国作为氧化钪的主要输出国, 资源十分丰富, 因此研究含 Sc 元素铝合金的意义重大。梅飞强等^[5]研究证明了稀土元素微合金化对合金组织性能的影响, 向 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金中添加 0.25%的 Gd 元素, 合金铸态组织细化效果最为明显, 综合力学性能最佳, 抗拉强度和伸长率分别可达 624.54 MPa 和

13.3%。

本研究主要针对国内铝合金焊材制造商多采用的铸造-挤压-拉拔工艺路线^[2]中的铸造环节, 采用软接触电磁连续铸造技术代替传统直冷连铸制备 5356 铝合金焊丝铸坯, 将电磁场作用于金属熔体从而形成电磁力, 熔体依靠电磁力的约束作用在初始凝固过程中可以在一定程度上减少与结晶器内壁的接触和摩擦^[6,7], 使得电磁连铸铸锭表面质量得以改善, 而电磁净化和电磁搅拌作用可以细化晶粒、消除偏析, 从而使铸锭的内部质量得到提高。本实验通过优化电源功率、拉坯速率和冷却水量等工艺参数, 并在最优实验参数条件下添加适量 Sc 元素, 以期制备更加优质的 5356 铝合金电磁连铸铸锭, 不仅对今后的实际生产具有一定指导意义, 也为低 Sc 元素 5356 铝合金在军工领域的开发应用提供实验依据。

1 实验

实验原料选用较高品质的纯铝锭、纯镁锭及优质的 Al-Ti、Al-Mn、Al-Cr 和 Al-Sc 中间合金配制而成, 微合金化研究部分 Sc 元素添加量为 0.4%。采用 XRF、OM、DSC、SEM、EDS 对试样进行测试分析。经 XRF 检测, 各种条件下的试样均符合合金成分设计要求, 5356 铝合金的名义成分和实际成分如表 1 所示, 表中 Fe、Si、Zn、Cu 含量为杂质元素的控制规范。

收稿日期: 2015-02-01

基金项目: 国家自然科学基金 (51375071); 中央高校基本科研业务费专项资金 (DOT12ZD205)

作者简介: 邢清源, 男, 1989 年生, 硕士, 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024, E-mail: 395312927@qq.com

表 1 5356 铝合金名义成分和实际成分

Table 1 Nominal and actual composition of 5356-Al alloy (ω/%)

Element	Al	Mg	Cr	Ti	Mn	Fe	Si	Zn	Cu
Nominal	Bal.	4.7~5.5	0.05~0.20	0.06~0.20	0.05~0.20	≤0.2	≤0.2	≤0.1	≤0.1
Actual	Bal.	4.7~5.1	0.13~0.20	0.11~0.19	0.15~0.20	≤0.18	≤0.13	≤0.01	≤0.01

5356 铝合金的熔炼采用 RXQ-30-10 型电阻炉，具体熔炼工艺过程如下：配料→干燥处理（300 °C，1 h）→添加纯铝锭→扒渣→添加中间合金→扒渣→添加纯镁锭→搅拌均匀（720 °C）→扒渣→覆盖剂保护→熔体精炼净化处理（735 °C）→扒渣→覆盖剂保护→静置（5 min）→氩气吹洗处理（720 °C，5 min）→扒渣→覆盖剂保护→浇铸（715 °C）。其中，精炼剂选用高纯 C₂Cl₆，添加量占炉料总量的 1.00%；覆盖剂选用质量比为 2:2:1 的 KCl、MgCl₂ 和 CaF₂ 的混合物，在保护熔体的同时，吸附溶解部分氧化物夹杂^[8]。

合金的浇铸过程采用软接触电磁连续铸造技术，配备中频电磁场及割缝式结晶器，以提高结晶器的透磁率，实验装置如图 1 所示。拉坯实验分别在电源功率为 0, 8, 10 和 12 kW 的条件下进行，铸锭尺寸为 Φ125 mm×600 mm；结合实验结果，在最佳的电源功率工艺参数条件下，通过选取不同的拉坯速率和冷却水量，进一步提高电磁连铸铸锭的表面质量。

由于熔体在凝固过程中的过冷度较大，晶粒和枝晶臂边界均将富集有强化相、金属间化合物和过饱和固溶体，其中，金属间化合物和过饱和固溶体会导致合金组织的不稳定性，降低合金的综合力学性能。而均匀化处理工艺不仅可以消除合金铸态组织中的枝晶偏析，释放内应力，也可以使合金的成分和组织趋于均匀^[9]。本实验采用的均匀化处理工艺：440 °C，30 h。

2 结果与分析

2.1 电源功率的影响

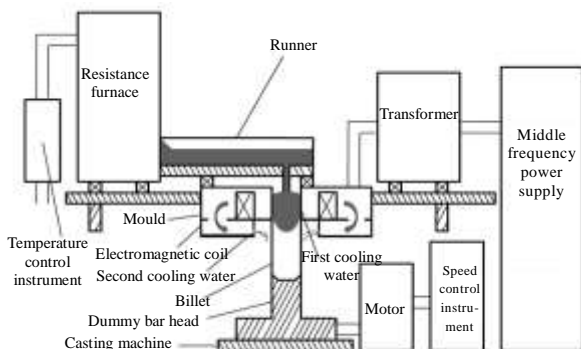


图 1 软接触电磁连铸装置图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic casting equipments

图 2 所示为 5356 铝合金直冷连铸(DCC)与电磁连铸(EMC)铸锭表面对比图。相比于普通直冷连铸铸锭，电磁连铸铸锭表面无明显铸造缺陷，划痕呈断续状，且痕迹较轻，这主要是源于熔体受到的电磁力的约束作用，电磁约束力在凝固的初始阶段可以减少坯壳与结晶器的摩擦^[6,7]，从而有效减轻铸锭表面划痕；但电源功率为 8, 10 和 12 kW 的电磁连铸铸锭表面质量并无明显差异，说明本实验条件下电源功率的变化对铸锭表面质量无明显影响。

图 3 所示为不同功率条件下电磁连铸铸锭边部显微组织。由图可见，相比于普通直冷连铸，电磁连铸铸锭边部组织呈一定程度的等轴化趋势，晶粒大小和第二相分布均趋于均匀，这主要是由于电磁场对熔体有附加搅拌作用^[6]，熔池内的溶质场和温度场分布较为均匀，使得过饱和和凝固潜热的驱散加速，糊状区面积减小，凝固前沿温度梯度增加^[10]；此外，随着电源功率的增加，晶界第二相数量相对减少，枝晶臂间第二相数量相对增加。结果表明：等轴化效果在电源功率 10 kW 条件下最理想。

图 4 所示为不同功率条件下电磁连铸铸锭心部显微组织。结果表明，相比于普通直冷连铸，电磁连铸铸锭心部组织呈现破碎枝晶态，晶粒更细小均匀，无第二相聚集现象，大量第二相析出于枝晶臂之间，且

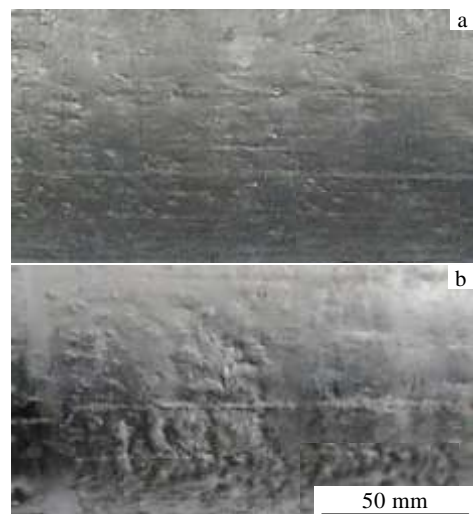


图 2 5356 铝合金直冷连铸与电磁连铸铸锭表面对比

Fig.2 Surface qualities of DCC (a) and EMC (b) billets

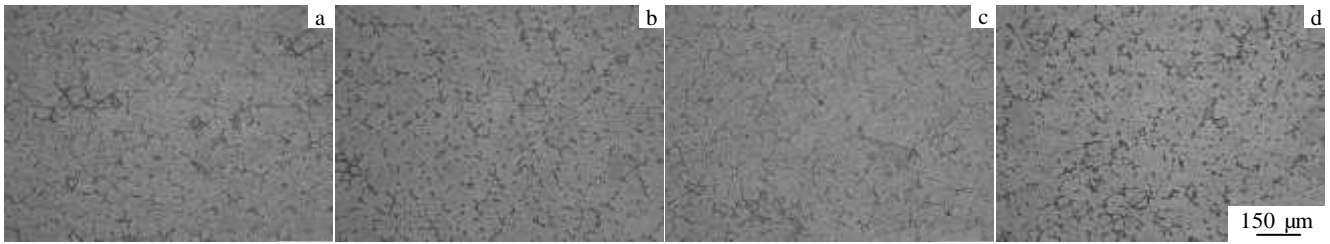


图 3 不同功率条件下电磁连铸铸锭边部显微组织

Fig.3 Microstructures of the edge of EMC billets under different powers: (a) 0 kW, (b) 8 kW, (c) 10 kW, and (d) 12 kW

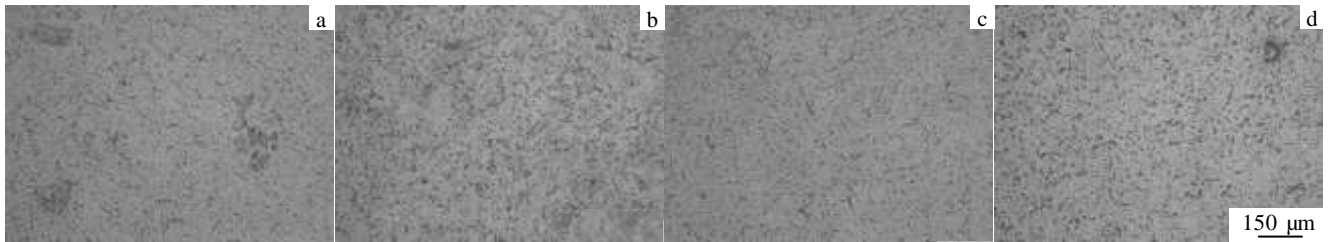


图 4 不同功率条件下电磁连铸铸锭心部显微组织

Fig.4 Microstructures of the center of EMC billets under different powers: (a) 0 kW, (b) 8 kW, (c) 10 kW, and (d) 12 kW

呈弥散点状分布状态,这主要是由于在电磁场作用下,铸锭心部组织趋于同时凝固状态,更易形成枝晶态,电磁场的引入加速了熔体自身的传热和传质,并对初始形成的枝晶产生冲刷、折断和熔蚀作用,被打碎的枝晶臂为异质形核过程提供了新的核心,与此同时,电磁力产生的电磁搅拌作用同样促进了第二相的弥散分布^[10];此外,随着电源功率的增加,电磁连铸铸锭心部组织并无明显差异。

图 5 所示为不同功率条件下电磁连铸铸锭综合力学性能曲线。由图可知,随着电源功率的增加,电磁连铸铸锭的抗拉强度和伸长率均呈现先上升再下降的趋势,并均在电源功率为 10 kW 时达到最大值,抗拉强度为 310.0 MPa,伸长率为 16.3%。综上所述,最佳电源功率为 10 kW。

2.2 电磁场的作用机理分析

软接触电磁连铸技术采用交变磁场,熔体表面在磁场的作用下将产生感应电流,该感应电流受磁场作用将形成电磁压力 ($F=J \times B$),从而使得熔体受到电磁约束力的作用。熔体侧表面的压强 P_e 为:

$$P_e = \frac{B_0^2}{2\mu} \quad (1)$$

其中, B_0 为磁感应强度, μ 为真空磁导率。

由热力学理论^[11]可知体系自由能为:

$$dG = -SdT + VdP \quad (2)$$

其中 S 为系统的熵, T 为温度, V 为体积, P 为压强。

因此,液固两相自由能变化为:

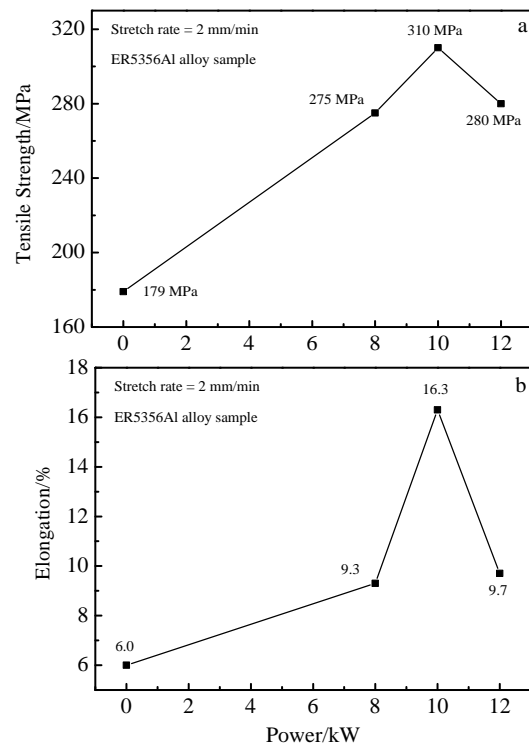


图 5 不同功率条件下电磁连铸铸锭综合力学性能

Fig.5 Tensile properties of EMC billets under different powers:

(a) tensile strength and (b) elongation

$$\Delta G_L = -S_L \Delta T + V_L \Delta P \quad (3)$$

$$\Delta G_S = -S_S \Delta T + V_S \Delta P \quad (4)$$

其中 S_L , S_S 分别为液固两相的熵, V_L , V_S 分别为液固

两相的体积。

$$\text{在平衡条件下: } \Delta G_L = \Delta G_S \quad (5)$$

$$\text{整理得: } \Delta P \Delta V = \Delta T \Delta S \quad (6)$$

其中 ΔS 和 ΔV 分别为液固两相的熵和体积之差。

$$\text{当 } T = T_m \text{ (金属熔点) 时: } \Delta G = \Delta H_m - T_m \Delta S = 0 \quad (7)$$

其中 ΔH_m 为凝固潜热。

$$\text{结合式(7)和(6)解得: } \Delta H_m \Delta T = T_m \Delta P \Delta V \quad (8)$$

凝固是由液态原子不断向固液界面堆砌的过程, 凝固驱动力可用式(9)表示^[12]:

$$\Delta G_m \approx \frac{\Delta H_m \Delta T}{T_m} \quad (9)$$

由于金属熔体会产生焦耳热, 结合式(8), 将 $\Delta H_m' = \Delta H_m - \Delta H_J$ 对式(9)进行修正得:

$$\Delta G_m' \approx \frac{\Delta H_m' \Delta T}{T_m} = \Delta P \Delta V \quad (10)$$

由此可见, 金属熔体由于受电磁压力的作用, 使得 ΔP 增大, 由式(10)可知 $\Delta G_m'$ 随之变大, 导致了 ΔG_b 变小(凝固过程需克服的势垒), ΔG_b 的变小有利于熔体大量形核^[13], 使得凝固过程趋于同时凝固, 从而达到细化组织的效果。

2.3 拉坯速率和冷却水量的影响

为获得具有较高表面质量的 5356 铝合金电磁连铸铸锭, 分别选取不同的拉坯速率(8、12 cm/min)和冷却水量(1.6、1.7 m³/h)进行实验。实验证明, 当选取冷却水量为 1.6 m³/h, 拉坯速率为 12 cm/min 时, 会导致初始坯壳厚度较薄, 强度较低, 随着电磁连铸铸锭中心液穴深度不断加深, 直至对坯壳产生的压力超过坯壳自身强度时, 便会出现“拉漏”现象; 当保持冷却水量不变, 将拉坯速率降至 8 cm/min 时, 初始坯壳强度依然无法达到强度要求, 只是延缓了“拉漏”现象出现的时间节点。可见, 电磁连铸过程需综合考虑初始坯壳强度和中心液穴深度之间的关系。当维持拉坯速率为 8 cm/min, 将冷却水量提高至 1.7 m³/h 时, 5356 铝合金电磁连铸铸锭稳定成形, 并具有较高表面质量, 如图 2 所示。该实验条件下的电磁连铸铸锭表面无明显铸造缺陷, 仅伴有轻微的断续状划痕以及偏析瘤现象。偏析瘤的形成主要是由于铸造过程中, 熔体在结晶器内急冷凝固收缩, 使得铸锭表面与结晶器内壁形成气隙, 界面换热能力下降, 从而导致初始坯壳部分 2 次重熔, 此时, 金属静压力将和坯壳凝固收缩压力共同作用, 迫使低熔点共晶体沿着晶间及枝晶臂间缝隙冲破原结晶时形成的氧化膜, 渗透到铸锭表面从而凝结形成偏析瘤^[14]。

综上所述, 冷却水量对电磁连铸铸锭质量的影响十分显著。由 Boton、Prim 和 Slichter 推导得出的有效

分配系数 k_e 如式(11)所示:

$$k_e = \frac{\rho_s}{\rho_L} = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) e^{-R\delta/D}} \quad (11)$$

其中, ρ_s 为固相中某溶质浓度, ρ_L 为液相中某溶质浓度, k_0 为平衡分配系数, R 为凝固界面移动速度, δ 为边界层厚度, D 为扩散系数^[15]。

若提高冷却水量, 冷却速度、凝固速度和固-液界面移动速度均会随之增大, 式(11)中 $e^{-R\delta/D}$ 项将变小, k_e 项将变大, 即固相中溶质浓度增大, 晶内固溶度提高, 大量的溶质将固溶于晶内, 这不仅使基体的畸变程度得以提高, 晶内的固溶强化效果得到增强; 同时也降低了合金元素在晶界的偏聚程度, 使得晶界处共晶组织尺寸和数量均得以减小, 从而也增强了晶界的强度, 减小微裂纹在晶界萌生的可能^[16]。

2.4 均匀化热处理

由于铸造凝固过程中过冷度较大, 在晶粒和枝晶臂边界上将富集生成导致铸锭的塑性加工性能和材料的最终组织性能下降的金属间化合物、强化相及过饱和固溶体, 因此合金的均匀化处理十分必要, 它可以消除铸态组织中的枝晶偏析, 使合金的成分和组织变得均匀, 也可为后续的热加工等工艺过程做准备。

图 6 所示为 5356 铝合金电磁连铸铸锭 DSC 测试曲线。由图可知, 在温度为 450.9 和 566.9 °C 处均存在一个吸热峰, 分别为 Al₈Mg₅ 相及 Al₇Cr 相的熔化吸热峰。合金在 448.9 °C 之前未出现明显的吸热峰, 可见 5356 铝合金电磁连铸铸锭中未生成低于熔点 448.9 °C 的共晶相。综合考虑, 制定 5356 铝合金的均匀化处理工艺为 440 °C, 30 h, 空冷。

图 7 所示为 5356 铝合金均匀化处理前后的显微组织。由图可见, 经均匀化处理后, 合金元素 Mg 的微观偏析基本消除, 晶界连续网状 Al₈Mg₅ 相明显回溶,

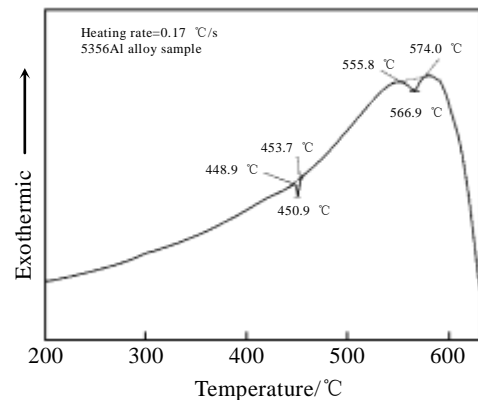


图 6 5356 铝合金 DSC 测试结果

Fig.6 DSC analysis of 5356-Al alloy

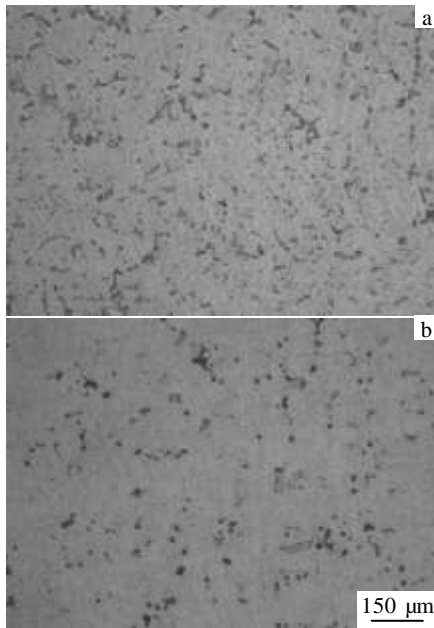


图 7 5356 铝合金均匀化处理前后显微组织

Fig.7 Microstructures of 5356-Al alloy: (a) before heat-treatment and (b) after heat-treatment

避免了对合金的加工性能产生不良影响, 晶内弥散分布的 Al_3Mg_5 颗粒相数量同样明显减少, 块条状 Al_7Cr 第二相部分固溶, 其数量较均匀化之前的组织也相应减少, 由此可见, 均匀化处理的效果十分显著。

2.5 微量 Sc 元素对组织性能的影响

图 8 所示为电源功率 10 kW, 拉坯速率 8 cm/min, 冷却水量 1.7 m³/h 实验条件下, 添加和未添加稀土 Sc (0.4%) 的 5356 铝合金电磁连铸铸锭的显微组织对比图。由图可知, Sc 元素使显微组织晶粒明显细化, 第二相数量相对减少。原因是在非平衡凝固条件下, 固-液界面上溶质将不断排出 ($k_0 < 1$), 部分 Sc 元素以初生 Al_3Sc 相的形式析出, Al_3Sc 相与 α -Al 基体在晶格结构和尺寸方面非常接近, 因此可作为 Al 原子堆积过程的良好衬底, 为非均质形核提供了形核核心, 从而有效地细化晶粒组织; 其余部分 Sc 元素以次生 Al_3Sc 相形式析出, 具有良好的热稳定性, 对位错和亚晶界均有很强钉扎作用, 从而有效地阻碍位错和亚晶界移动, 提高合金的综合力学性能^[17]。

拉伸实验结果表明, 0.4%Sc 元素的添加使电磁连铸铸锭的抗拉强度从 310.0 MPa 提高到 330.0 MPa, 伸长率从 16.3% 提高到 29.0%, 2 项指标分别提高了 6.5% 和 77.9%, 说明 Sc 元素对提高 5356 铝合金的强度和塑性的作用效果显著。

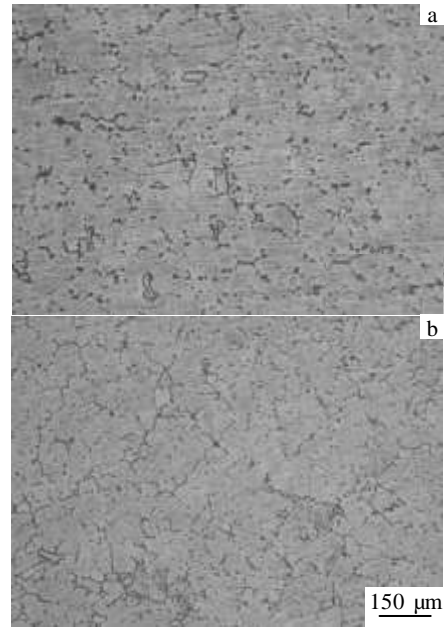


图 8 不同成分 5356 铝合金显微组织对比图

Fig.8 Microstructures of 5356-Al alloy with different compositions: (a) 5356Al+0.4%Sc alloy and (b) 5356 Al alloy

3 结 论

1) 电磁连铸铸锭表面具有金属光泽, 无明显铸造缺陷; 边部组织基本呈等轴晶, 心部组织呈破碎枝晶形态, 晶粒大小和第二相分布均较为均匀。

2) 5356 铝合金电磁连铸最佳工艺参数为电源功率 10 kW, 拉坯速率 8 cm/min, 冷却水量 1.7 m³/h。合金抗拉强度、伸长率分别可达 310 MPa 和 16.3%。

3) 5356 铝合金电磁连铸铸锭均匀化处理制度为 440 °C, 30 h, 空冷。Mg 元素晶界偏析基本消除, 大量第二相重新回溶, 铸造应力得到释放。

4) 含 0.4%Sc 元素电磁连铸铸锭的抗拉强度和伸长率达 330.0 MPa 和 29.0%, 分别提高 6.5% 和 77.9%, 表明 Sc 元素对提高 5356 铝合金的强度和塑性效果显著。

参考文献 References

- [1] Pan Fusheng (潘复生), Zhang Dingfei (张丁非). *The Application of Aluminum Alloy* (铝合金及应用)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 57
- [2] Guo Yuefei (郭飞跃), Yin Zhiming (尹志明), Jiang Feng (姜峰) et al. *Technology for Electric Locomotives*(电力机车技术)[J], 2001, 24(3): 35

- [3] Lin Zhaoqi (林肇琦). *Materials Review* (材料导报)[J], 1992, 3: 10
- [4] Fu Le(傅乐), Lei Xuefeng (雷学锋), Yin Zhimin (尹志民) *et al. Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺)[J], 2012, 6: 34
- [5] Mei Feiqiang (梅飞强), Wang Shaohua (王少华), Fang Shanfeng (房灿峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(2): 258
- [6] Vives C. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 1989, 20B(10): 631
- [7] Vives C. *Light Metals*[J], 1987, 7: 769
- [8] Wang Zhutang (王祝堂), Tian Rongzhang (田荣璋). *The Processing Manual of Aluminum Alloy* (铝合金及其加工手册)[M]. Changsha: Central South University Press, 2000: 405
- [9] Zhou Guxi (周古昕), Liu Lingxia (刘玲霞), Wang Sheng (王生) *et al. Ordnance Material Science and Engineering* (兵器材料科学与工程)[J], 2011, 34(1): 62
- [10] Fang Canfeng (房灿峰). *Research on Electromagnetic Modified Technology of High-performance Magnesium Alloy* (高性能镁合金电磁改性技术研究)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006
- [11] Xu Zuyao (徐祖耀), Li Lin (李麟). *Material Thermodynamics* (材料热力学)[M]. Beijing: Science Press, 2001: 32
- [12] Hu Hanqi (胡汉起). *The Principle of Metal Solidification* (金属凝固原理)[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 68
- [13] Ma Xiaodong (马晓东), Zhang Xingguo (张兴国), Ren Zheng (任政) *et al. Foundry* (铸造)[J], 2007, 56(9): 914
- [14] Li Yumei (李玉梅), Zhang Xingguo (张兴国), Jia Fei (贾非) *et al. Foundry Technology* (铸造技术) [J], 2002, 23(2): 111
- [15] Hu Gengxiang(胡赓祥), Cai Xun (蔡殉). *Fundamentals of Material Science*(材料科学基础)[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2004: 189
- [16] Wang Shaohua (王少华). *Study of Electromagnetic Casting and Strengthening-Toughening of High Strength Aluminum Alloy* (高强铝合金电磁铸造及强韧化研究)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009
- [17] Zhao Zhihao (赵志浩), Xu Zhen (徐振), Wang Gaosong(王高松). *Chinese Journal of Materials Research* (材料研究学报)[J], 2013, 27(3): 287

Effects of EMC and Micro-alloying on Microstructure and Properties of 5356-Al Alloy

Xing Qingyuan¹, Meng Linggang¹, Deng Liang¹, Yang Hongshuo¹, Zhen Liling², Liu Hongwei², Fang Canfeng¹,
Fan Jianxun², Zhang Xingguo¹

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315000, China)

Abstract: 5356-Al alloy billets were prepared by an electromagnetic casting (EMC) technique and micro-alloying of Sc was also applied. The effects of power, casting rate, quantity of cooling water and Sc content on the microstructure and properties of 5356-Al alloy were investigated. The results show that the optimal EMC parameters of 5356-Al alloy are the power 10 kw, the casting speed 8 cm/min, and the quantity of cooling water is 1.7 m³/h, when the alloy has the best surface and internal quality and tensile properties. The tensile strength and elongation of the 5356-Al alloy can be up to 310.0 MPa and 16.3%, respectively, and the surface has no obvious casting defects. The microstructure of the edge is equiaxed crystals basically, while the center is broken dendrite crystals with a uniform distribution of the second phases. Besides, the homogenization heat-treatment of 5356-Al alloy has also been established: 440 °C×30 h with the air cooling. After the homogenization heat-treatment, the micro-segregation of Mg has been eliminated basically and the phase Al₈Mg₅ which is distributed along the grain boundaries continuously dissolves. In addition, trace amount of Sc can improve the strength and plasticity of 5356-Al alloy. The experiment proves that 0.4 wt% Sc alloy can refine the grain size and reduce the number of the second phase of the 5356-Al alloy. At the same time, the tensile strength and elongation can be up to 330.0 MPa and 29.0%, which are increased by 6.5% and 77.9%, respectively.

Key words: 5356-Al alloy; EMC; microstructure; Sc

Corresponding author: Zhang Xingguo, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China, Tel: 0086-411-84706183, E-mail: zxgwj@dlut.edu.cn