

[文章编号] 1004-0609(2002)S1-0236-05

二次加热和冷却方式对过共晶铝硅合金半固态组织的影响^①

叶春生¹, 叶康生², 张新平³, 潘冶⁴, 吴海棠¹

(1. 康佳集团股份有限公司, 深圳 518053; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084;

3. 吉林大学南岭校区 材料科学与工程学院, 长春 130025; 4. 东南大学 机械工程系, 南京 210096)

[摘 要] 过共晶 Al-17% Si-4.5% Cu-0.5% Mg 合金通过 Sr 优化变质处理获得初晶硅细小且有 α 枝晶的显微组织。在固液两相区保温, 结合金相分析研究组织的转变规律, 结果表明: 共晶硅经历着熔断、粒状化和粗化的过程, 初晶硅有长大的趋势; 随着保温时间的延长, 共晶体不断熔化成液相, 液相体积分数逐渐增加, 直至液相薄膜包围着 α 相, α 相由不规则形状向球状转化, α 相的粗化和合并几乎同时进行, 最终获得非常理想的半固态组织。从形状系数和等效直径两个方面评价了近球形 α 相的特征。

[关键词] 半固态; 过共晶铝硅合金; 二次加热; 近球形 α 相

[中图分类号] TG 146.2; TG 249

[文献标识码] A

半固态金属成型具有成型温度低、凝固收缩小、组织致密、晶粒尺寸细小、缺陷和偏析减少、模具寿命延长等特点, 被专家学者誉为 21 世纪新一代的金属加工方法^[1,2]。近年来, 世界各国广泛开展了铝合金、镁合金、锌合金和铁基合金的半固态加工技术研究^[3~5], 主要研究如何改变这些合金的亚共晶初生树枝晶结构, 获得球状初生晶组织, 而半固态过共晶 Al-Si 合金的研究报道相对较少。过共晶 Al-Si 合金具有铸造及焊接性能好, 热膨胀系数小, 耐磨性能高等特点, 是制造发动机活塞的理想材料。实践证明该合金的性能受到硅晶体的形状及分布的影响, 不论是共晶体中的硅还是初生晶的硅晶体, 如果既细又圆且分布均匀, 则合金具有较高的综合力学性能。因此该合金的 Si 相细粒化成为国内外研究的焦点^[6~8], 而对组织中共晶 α 相的形态变化研究鲜有报道。共晶 α 相是软基体相, 如果组织通过特殊处理, 细小弥散初晶硅作为硬质点镶嵌在软基体上, 类似于内生颗粒增强复合材料, 既简化工序, 又大大提高合金的耐磨性和高温强度。

本文作者主要研究二次加热和冷却方式对 Sr 变质的过共晶 Al-Si 合金半固态组织的影响, 研究 Si 相和 α 相的转变规律, 希望在一定的条件下获得理想的半固态组织, 为探索高性能、低成本的活塞材料组织提供理论和实践依据。

1 实验方法

实验用高纯铝、1[#] 工业结晶硅、纯铜、纯镁配制过共晶 Al-17% Si-4.5% Cu-0.5% Mg 合金(类似美国 A390 合金)。熔炼在 8 kW 电阻炉中进行, 先加入高纯铝, 720 °C 时分批加入粒度 8~12 mm 的 1[#] 工业结晶硅, 待结晶硅完全溶解后加入纯铜、纯镁, 升温至 820 °C 保温 5 min; 当炉温降至 780 °C 时加入变质剂, 5 min 后加入 0.6% 的无毒精炼剂, 保温 10 min 后降低炉温到 750 °C, 然后浇入预热到 250~300 °C 的金属型中。将铸态试样切割成 $d=18\text{ mm}$ $\times$ 15 mm 的圆柱形试样, 放入箱式电阻炉中进行二次加热, 加热温度控制在 580 °C, 分别保温 20, 40, 60 min, 然后进行空冷和水冷试验。

实验过程中采用标准热电偶测温, 取试样的同一位置经磨平抛光, 用 0.5% HF+99.5% H₂O 腐蚀后, 用带有标尺刻度的 OLYMPUS 显微镜进行金相组织观察, 在相互垂直方向分别测定同一个初晶硅的尺寸, 取其平均值作为该初晶硅的尺寸。每个试样随机测定 10 个初晶硅的尺寸, 取其平均值作为该试样的初晶硅尺寸。用金相分析软件检测近球形 α 相的等效直径、形状系数、面积率, 根据 α 相的面积率和初晶硅的百分含量来近似计算液相体积分数。

① [收稿日期] 2001-10-17; [修订日期] 2001-11-19

[作者简介] 叶春生(1970-), 男, 工程师, 硕士。

2 结果和讨论

2.1 Sr 变质后的组织

图 1 所示为 0.06% Sr 变质的组织, 共晶硅呈细小的纤维状, 同时初晶硅亦细小, 有大量树枝晶

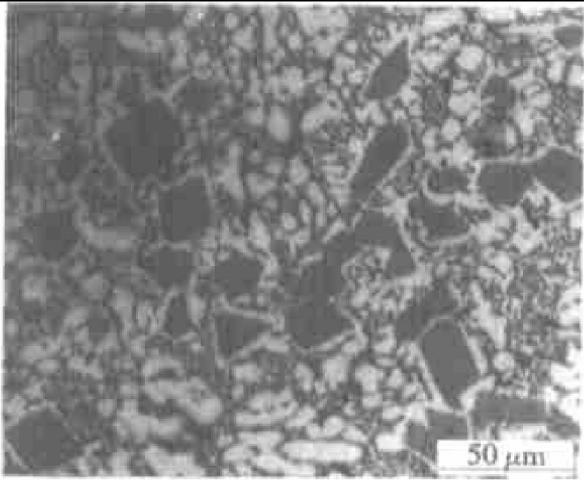


图 1 0.06% Sr 变质的金相组织

Fig. 1 Microstructure of sample modified by 0.06% Sr

α 相出现。图 2 所示为 Sr 含量与初晶硅尺寸的关系, 随着 Sr 含量的增加, 初晶硅的尺寸先降低后增大, Sr 含量为 0.06% 时, 初晶硅的平均尺寸为 20 μm 。

2.2 水冷和空冷试样的组织和性能分析

图 3 所示为 0.06% Sr 变质处理试样二次加热后的组织, 580 $^{\circ}\text{C}$ 保温 20, 40, 60 min, 空冷的组织分别如图 3(a), (b), (c) 所示。共晶体中共晶硅由

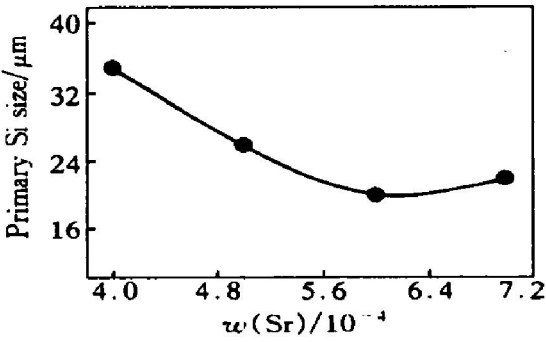


图 2 含 Sr 量与初晶硅尺寸的关系

Fig. 2 Primary Si size vs Sr content

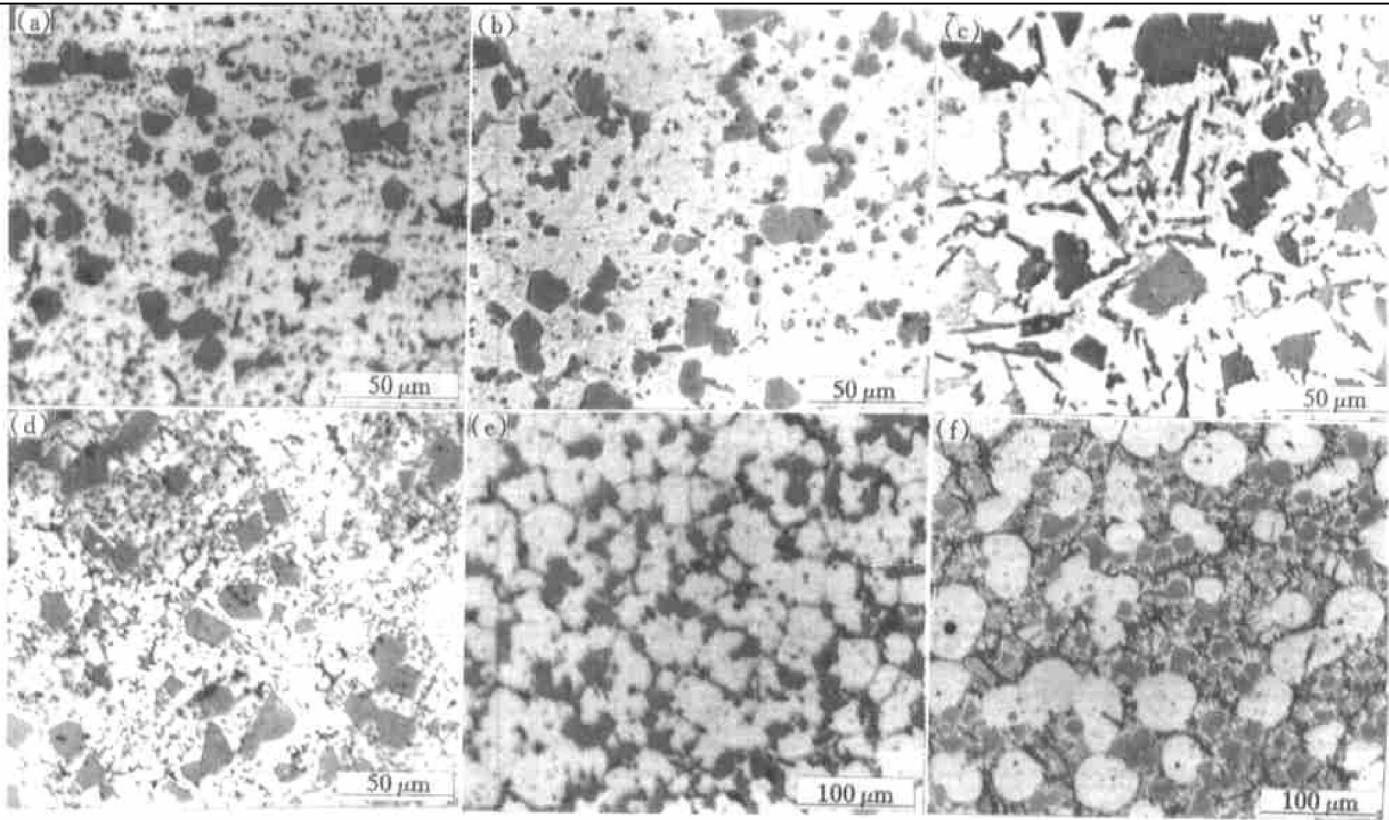


图 3 580 $^{\circ}\text{C}$ 组织演化与保温时间的关系

Fig. 3 Microstructure evolution of hypereutectic Al-Si alloy for different isothermal holding times

- (a) —Cooling in air, at 580 $^{\circ}\text{C}$ for 20 min; (b) —Cooling in air, at 580 $^{\circ}\text{C}$ for 40 min; (c) —Cooling in air, at 580 $^{\circ}\text{C}$ for 60 min;
(d) —Cooling in water, at 580 $^{\circ}\text{C}$ for 20 min; (e) —Cooling in water, at 580 $^{\circ}\text{C}$ for 40 min;
(f) —Cooling in water, at 580 $^{\circ}\text{C}$ for 60 min

细小的纤维状向点链状转化, 分布均匀, 粒状化的共晶硅有粗化的趋势。初晶硅有长大趋势且随着保温时间的延长, 棱角变得更加圆整, 因共晶硅与初晶硅具有相同的晶格常数, 在保温过程中, 部分粒状化的共晶硅原子发生剧烈的运动, 向初晶硅周围扩散, 促进初晶硅长大。

同样条件下水冷的组织如图 3(d), (e), (f) 所示, 在二次加热的初期, 共晶硅和初晶硅的转化规律跟空冷组织的类似; 保温 40 min 时组织如图 3(e) 所示, Si 相和 α 相已分离, 保温过程中当共晶硅粗化到一定的程度后, 部分共晶体 ($\alpha + \text{Si}$) 开始熔化成液相, 可以设想起初熔化成液相是相互独立的, 随着保温时间的延长, 更多的共晶体熔化成液相, 液相分数逐渐增大。文献[9]认为当液相分数为 20%, 如果液相恰好包围固相, 球形晶粒尺寸在 50 μm , 则此时液相薄膜的平均厚度为 1.8 μm 。随保温时间的延长, 共晶 α 相晶界不断被液相所渗透, 如果渗透的液相相互间连成一个连续的网状, 将共晶 α 相包围在其中, 则此时 α 相轮廓初步形成。保温 60 min 时组织如图 3(f) 所示, α 相近似球形, 与图 3(e) 相比, 此时 α 相的数量减少。原因分析如下: 保温 40 min 时, 虽然液相已形成连续的网状, α 相轮廓已形成, 但是部分 α 相的形态仍然不规则; 在液相分数不高时, 不规则 α 相主要是通过凹陷处熔断, 因在凹陷处界面能最低, 比较大的部分有继续长大趋势且球化, 比较小的部分则熔化。总之, 这需要一定的时间才能完成。另外还要考虑 α 相的粗化熟化和颗粒合并几乎同时进行, 据文献[10]报道颗粒合并的速度跟相邻颗粒的数量成正比, 随着液相分数的增加, 则相邻的颗粒数量减少。在低液相分数时, α 相晶界的迁移且合并占主导地位; 然而在液相分数较高和保温时间较长时, 粗化熟化占主导地位, 促使 α 相颗粒直径增大。

图 4 所示为初晶硅的尺寸与保温时间的关系, 二次加热后初晶硅的尺寸均大于铸态时初晶硅的尺寸, 说明在二次加热时, 初晶硅有粗化的趋势。保温相同时间时, 空冷组织中初晶硅的尺寸比水冷组织中初晶硅的尺寸略大。原因是水冷时对加热试样有强烈的激冷作用, 有利于细化组织, 而空冷时由于在空气中冷却缓慢, 初晶硅和共晶硅有继续长大的趋势。水冷和空冷试样的硬度与保温时间关系如图 5 所示, 随着保温时间的延长, 硬度均呈降低的趋势, 但空冷试样硬度降低没有水冷试样的硬度降低快, 保温 60 min 后水冷试样的硬度值跟近共晶成分 AlSi 合金硬度值非常接近, 这主要归功于水冷

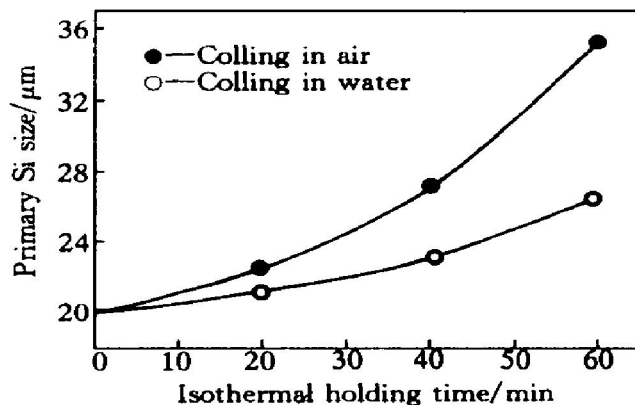


图 4 保温时间与初晶硅尺寸的关系

Fig. 4 Primary Si size vs holding time

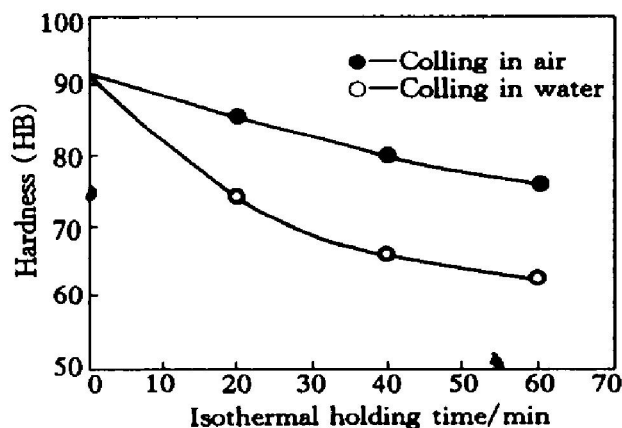


图 5 保温时间与硬度值的关系

Fig. 5 Hardness of sample vs holding time

组织中出现了大量近球形 α 相的缘故。

保温 60 min 水冷组织中 α 相形状系数分布图如图 6 所示, 形状系数几乎在 0.7~0.9 之间, 且形状系数在 0.8~0.9 之间超过 50%, 而此时的液相分数超过 50%, 说明当液相分数逐渐增加时, 更有利于 α 相球化。图 7 所示为保温 60 min 水冷组织中 α 相等效直径分布图, α 相的等效直径大部分在 60~100 μm 之间, 其中等效直径在 80~100 μm 之间的达

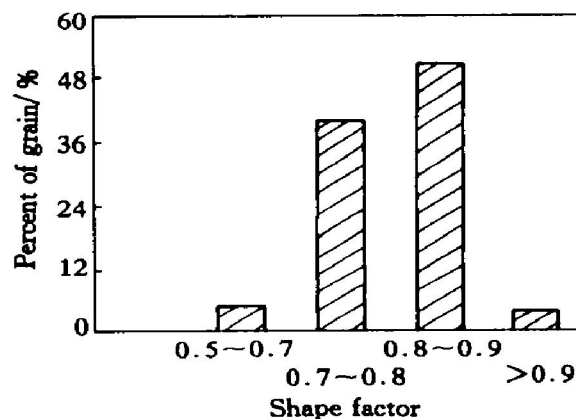
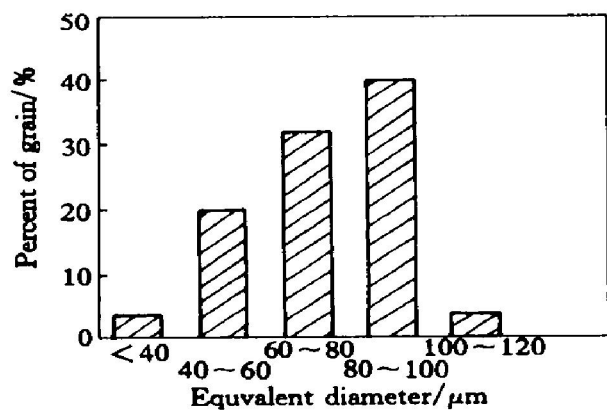


图 6 α 相形状系数分布图

Fig. 6 Distribution of shape factor of α phases

图 7 α 相等效直径分布图Fig. 7 Distribution of equivalent diameter of α phases

40%, 证明球化程度良好。

3 结论

1) 采用 0.06% Sr 变质处理后的试样, 在 580 °C 保温 60 min 时, 水冷试样中获得有近球形 α 相的半固态组织, 而空冷试样未得到此组织。

2) 过共晶 Al-Si 合金在固液两相区保温时, 共晶 Si 相通过向 α 相中扩散溶解, 经历着熔断、粒状化和粗化的过程, 初晶硅有长大的趋势, 棱角变得更加圆整。

3) 当共晶硅粗化到一定程度后, 和 α 相一起溶解成液相, 随着保温时间的延长, 共晶体不断熔化成液相, 液相分数逐渐增大。当液相形成一个连续的网状时, 将 α 相包围在其中, 通过晶界迁移和晶粒的合并, α 相逐渐长大且近似球形。

[REFERENCES]

[1] 叶春生, 潘 冶. 半固态加工工艺在汽车制造业中的应用与发展[J]. 汽车工艺与材料, 2000(12): 1- 4.
YE Chun-sheng, PAN Ye. The application and development of semi-solid processing in automobile industry [J]. Automobile Technology and Material, 2000(12): 1- 4.

[2] Brown S B, Flemings M C. Net-shape forming via semi-solid processing [J]. Advanced Material and Process, 1993(1): 36- 40.
[3] Decker R F, Carnahan R D, Babij E, et al. Magnesium semi-solid metal forming [J]. Advanced Materials and Processes, 1996(2): 41- 42.
[4] 毛卫民, 钟雪友. AlSi7Mg 非枝晶合金半固态重熔加热时的组织演变[J]. 铸造, 1998(8): 10- 12.
MAO Wei-min, ZHONG Xue-you. Microstructural evolution of AlSi7Mg non-dendritic alloys during semi-solid remelting [J]. Foundry, 1998(8): 10- 12.
[5] LI Shu-suo, ZHAO Ai-min, MAO Wei-min, et al. Mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloy by semi-solid processing [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2000(4): 441- 444.
[6] GEN Hao-yan, MA Jia-Ji, BIAN Xiu-fang. Thermal rate treatment and its effect on modification of Al-Si alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1997, 7(1): 137- 141.
[7] 王渠东, 丁文江. Al-Si 合金中初晶 Si 的台阶生长[J]. 上海交通大学学报, 1999(2): 142- 145.
WANG Qu-dong, DING Wei-jiang. Step growth of primary silicon in Al-Si alloy [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999(2): 142- 145.
[8] 桂满昌, 贾 均, 李庆春. 液态过热对高硅 Al-Si 合金组织及性能的影响[J]. 航空材料学报, 1996(1): 26- 31.
GUI Man-chang, JIA Jun, LI Qing-chun. Influence of liquid superheating treatment on the structure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloys [J]. Journal of Aeronautical Materials, 1996(1): 26- 31.
[9] Tzimas E, Zavaliangos A. Evolution of near-equiaxed microstructure in the semi-solid state [J]. Materials Science & Engineering, 2000(A289): 228- 240.
[10] Jung H K, Kang C G. Reheating process of cast and wrought alloy for thixoforging and their globularization mechanism [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000(104): 244- 253.

Influence of partial reheating and cooling method on semi-solid microstructure of hypereutectic Al-Si alloy

YE Chun-sheng¹, YE Kang-sheng², ZHANG Xin-ping³, PAN Ye⁴, WU Hai-tang¹

(1. Konka Group Co., LTD., Shenzhen 518053, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Nanling Campus, Changchun 130025, China;

4. Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] Microstructures with fine primary Si and a number of dendrite α phases were obtained by Sr optimizing modification. Microstructure evolution during partial reheating through the liquidus-solidus range was investigated by optical metallography. Eutectic Si experiences the course of dissolution, granular and coarsening, and the primary Si has a tendency of growth. With the extending of isothermal holding times, the eutectic melts down partially, and the liquid content increases gradually up until liquid film surrounds α phases. α phases tend to be changed into sphericity. The coarsening and bending of α phases go on homogeneously. The sphere-like α phases obtained are quantitatively characterized by shape factor and equivalent diameter.

[Key words] semi-solid; hypereutectic Al-Si alloy; partial reheating; sphere-like α phases

(编辑 吴家泉)