

文章编号: 1004-0609(2004)04-0607-07

对 3 种典型铝硅合金熔体温度处理的对比分析^①

周 正, 陶静梅

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 对 3 种典型成分的铝硅合金(Al-20% Si、Al-12% Si 和 Al-7% Si) 进行了熔体温度处理凝固组织变化规律的比较研究。结果表明: 在 Al-12% Si 共晶合金熔体处理组织中存在 α 枝晶与初晶硅共存以及 α 枝晶在一定处理条件下可以完全消失的现象; 3 种成分 Al-Si 合金的 α 枝晶及初晶硅的形态尺寸随过热温度、静置时间增加出现周期性的变化规律, 出现最小尺寸的温度、时间并不完全一致; 熔体温度处理对 Al-7% Si 中枝晶大小、形态等有一定影响, 但细化效果不明显。在铝硅合金中, 硅原子微观有序团簇和铝有序偏聚原子团簇可能存在于不同的温度区间, 铝有序偏聚原子团簇存在的温度区间更靠近温度轴, 硅原子微观有序团簇具有比铝有序偏聚原子团簇更强的结合能。

关键词: 铝硅合金; 熔体温度处理; 共晶; 原子团簇; 凝固组织

中图分类号: TG 113

文献标识码: A

Comparison analysis of melt temperature treatment of three typical Al-Si alloy

ZHOU Zheng, TAO Jing-mei

(College of Materials Science and Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The solidification microstructures of hypoeutectic, eutectic and hypereutectic Al-Si alloys by melt temperature treatment were studied comparatively. The results show that, in the microstructures of Al-12% Si alloy, dendrites of α phase coexist with pre-precipitate silicon, and under a certain treatment condition, dendrites of α phase would disappear; the sizes of dendrite of α phase and pre-precipitated silicon change regularly with increasing temperature or time, the temperature and time that the smallest sizes of the phases appear among the alloys is not corresponded; the melt temperature treatment have certain effect on the sizes of dendrite of α phase, but the effect is limited. It is considered that in the TTT diagram of liquid structure and temperature of Al-Si alloys, silicon atom clusters and aluminum atom clusters would exist in different temperature zones, the position of aluminum atom clusters is closer to temperature axis than that of silicon atom clusters, the bond energy of the silicon atom clusters is the stronger than that of aluminum atom clusters.

Key words: Al-Si alloy; melt temperature treatment; eutectic; atom clusters; solidification microstructures

铝硅合金在工业上具有广泛应用背景, 人们对熔体温度处理凝固组织进行了较广泛的研究, 对亚共晶和过共晶铝硅合金熔体温度处理有较多研究^[1-5], 而对共晶铝硅合金熔体温度处理的研究则

比较少, 更缺乏对铝硅合金亚共晶、共晶和过共晶熔体温度处理组织的比较研究。作为工业上广泛应用的合金, 随着各种熔体温度处理工艺的研究进展, 已出现同成分及不同成分的混合熔体处理方

① 收稿日期: 2003-07-30; 修订日期: 2003-10-22

作者简介: 周 正(1963-), 男, 博士, 副研究员。

通讯作者: 周 正, 博士; 电话: 023-65106423; E-mail: zhzheng6423@hotmail.com

法^[6~10], 因此了解整个铝硅合金系的熔体温度处理的组织变化规律, 对铝硅合金熔体温度处理工艺及理论的深入研究具有重要的参考意义。

本文选取 3 种典型成分的铝硅合金 (Al-20% Si、Al-12% Si 和 Al-7% Si), 对其熔体温度处理组织变化规律进行了比较研究, 并在此基础上对其熔体温度处理理论进行分析研究。

1 实验

Al-7% Si、Al-12% Si 及 Al-20% Si 合金的熔体温度处理过程分别是: 在 750、800、900、1 000 和 1 100 °C 保温 10 min 后浇入 45# 钢金属型铸模, 金属型铸模保持预热温度为 100 °C, 合金空冷至凝固后取出铸锭。金属型铸模型腔尺寸 d 12 mm × 65 mm, 型腔壁厚 1 cm, 取样部位距铸锭下端 15 mm 处。取铸锭横截面制取金相试样。制样后在 OLYMPUS 型金相显微镜上观察组织, 其中 Al-7% Si 和 Al-12% Si 试样用 0.5% 的 HF 腐蚀, Al-20% Si 试样抛光后直接观察组织。

2 结果与分析

2.1 凝固组织与熔体处理温度间的相互关系

Al-20% Si 合金在 750 °C 时, 初晶硅颗粒不太规则, 以四边形居多, 个别晶粒有破碎现象; 800 °C 时, 初晶硅为大小均匀的四边形颗粒, 形态与 750 °C 时基本相同, 有明显偏聚现象; 900 °C 时, 初晶硅尺寸明显增大; 1 000 °C 时, 初晶硅颗粒尺寸进一步增大, 颗粒内部破碎严重; 1 100 °C 时, 初晶硅颗粒尺寸变小, 有球化趋势, 并呈偏聚状态 (图 1)。实验表明: 温度处理时初晶硅颗粒尺寸的变化随温度升高出现由小变大, 然后又变小的规律, 实验结果与已有研究结果吻合^[11]。

亚共晶 Al-7% Si 合金温度处理组织由 α (Al) 枝晶和枝晶间共晶组织组成, 共晶针状硅形态随温度变化不大, α (Al) 枝晶形状及尺寸也随温度变化不大, 在 1 100 °C 时, 枝晶尺寸有一定细化 (图 2)。

实验发现, 多数温度处理的 Al-12% Si 合金凝固组织表现为: 既存在有先析初晶硅颗粒, 又有 α (Al) 枝晶 (见图 3)。

初晶硅在 750、800 和 900 °C 时, 大小形态变化均不明显, 呈分散分布, 球形化趋势明显, 而在 1 000 °C 和 1 100 °C 时, 初晶硅相得到显著细化。

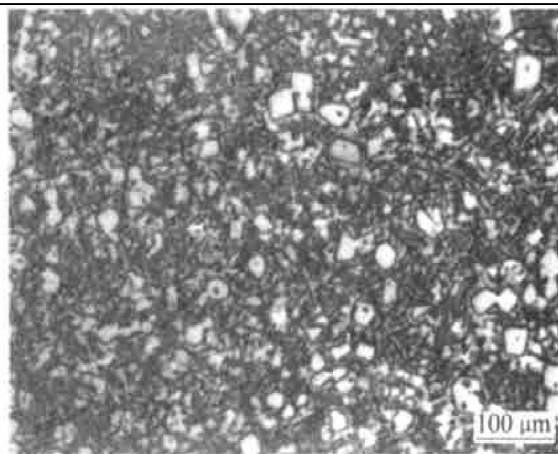


图 1 Al-20% Si 合金 1 100 °C 颗粒化初晶硅

Fig. 1 Granular silicon particle of Al-20% Si alloy at 1 100 °C

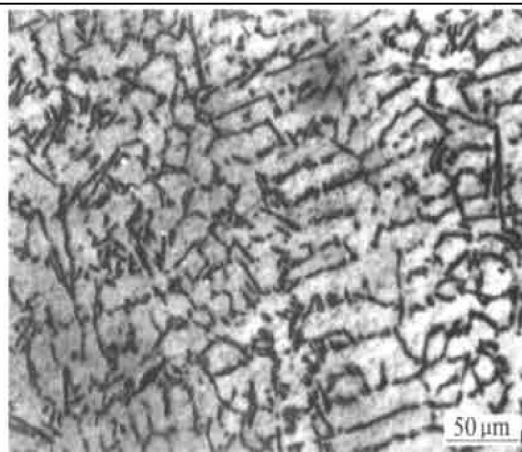


图 2 Al-7% Si 合金 1 100 °C 处理的 α (Al) 枝晶

Fig. 2 α (Al) dendrite of Al-7% Si alloy at 1 100 °C

共晶基体中的针状硅除在 800 °C 时稍粗大外, 在其他温度情况下均较细小。温度对 α (Al) 枝晶形态的影响则较明显: 750 °C 和 800 °C 时的一次枝晶很长, 二次枝晶均较完整; 处理温度为 900 °C 时, 枝晶变得较细小且不太完整, 一次、二次枝晶均较短; 1 000 °C 处理时, 枝晶已完全消失, 组织细化为颗粒状, 已无法与共晶组织 (α + Si) 区分, 此时整个组织十分均匀; 当处理温度升高到 1 100 °C 时, 枝晶组织又出现, 稍显明显, 但整体上仍较细小。先析初晶硅颗粒与 α (Al) 枝晶共存、且 α (Al) 枝晶在一定条件下可以消失的特殊现象在已往的研究中还没有涉及, 实验结果可能有助于完善 Al-Si 合金熔体温度处理的相关理论。

2.2 熔体处理时间对凝固组织的影响

为进一步分析熔体温度处理对 3 种成分合金凝固组织的影响, 比较研究了 800 °C 下它们的凝固组

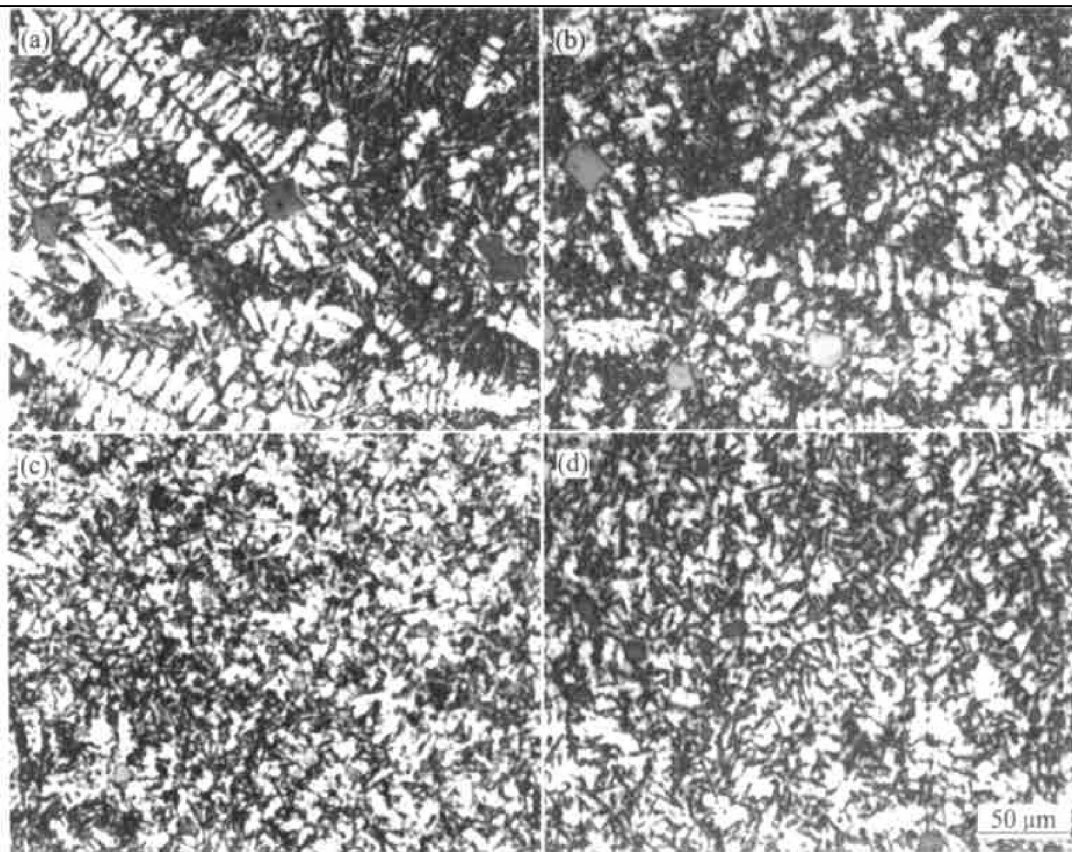


图 3 Al-12%Si 合金随温度变化的微观组织

Fig. 3 Microstructures of Al-12%Si alloy at different temperatures
(a) $-800\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $-900\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $-1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $-1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$

织变化规律(图 4、5 和 6)。

从图 4 中可以发现, Al-20%Si 合金组织在保温时间为 0 min 时, 初晶硅较完整, 多为四边形大小均匀的颗粒。保温时间达到 10 min 时, 初晶硅尺寸基本保持不变, 形状规则。保温时间为 45 min 时, 初晶硅尺寸明显增大, 中间有少许破碎现象, 颗粒排列粘连。保温时间达到 105 min 时, 初晶硅形状多为不规则多边形, 破碎现象严重。

Al-12%Si 合金保温时间为 0 min 时, 枝晶破碎, 较均匀分布在基体中, 而保温时间为 10 min 时, 已有较多单个完整枝晶出现。当保温时间达到 45 min 时, 枝晶数量明显减少, 并且每个枝晶均不完整, 零散状分布在基体中。当保温时间延长为 105 min 时, 枝晶再次变得较完整, 枝晶形态、分布与保温时间为 10 min 时相似。Al-12%Si 合金凝固基体组织中的共晶硅在等温过程中基本上都保持针状。初晶硅尺寸在 45 min 以前是逐渐增大, 在 105 min 时, 尺寸重新变小(图 5)。

如图 6 所示, Al-7%Si 合金保温时间为 0 min 时, 二次枝晶形貌相对较完整, 二次枝晶臂直径很大。保温时间为 10 min 时, 二次枝晶臂直径增大, 枝晶间共晶组织数量增加。保温时间为 45 min 时,

枝晶间共晶组织数量进一步增加, 二次枝晶臂直径变小。保温时间为 105 min 时, 短棒状二次枝晶分布均匀、有序, 可以注意到, 枝晶间基体共晶组织分散, 其中的针状硅已明显细化, 而 0, 10 和 45 min 3 个试样中, 基体中针状硅都较长, 且分布杂乱。

3 讨论

通过分析上述实验结果可以发现, 在本实验条件下, 3 种成分 Al-Si 合金的初晶硅尺寸随过热温度的升高以及随等温时间的延长, 出现由小到大的变化规律, 并且出现最小尺寸的温度、时间不完全一致。亚共晶的枝晶通过温度处理细化效果不明显。

用 D 来表示初晶硅和 α 枝晶的大小, 则 D 受 2 个因素影响, 第 1 是过热温度 $f(T)$, 第 2 是一定过热温度下的熔体静置时间 $f(t)$ 。综合 2 个因素, 可能存在下述关系:

$$D \propto f(T)f(t)$$

根据已有研究, D 与过热温度 $f(T)$ 的关系可

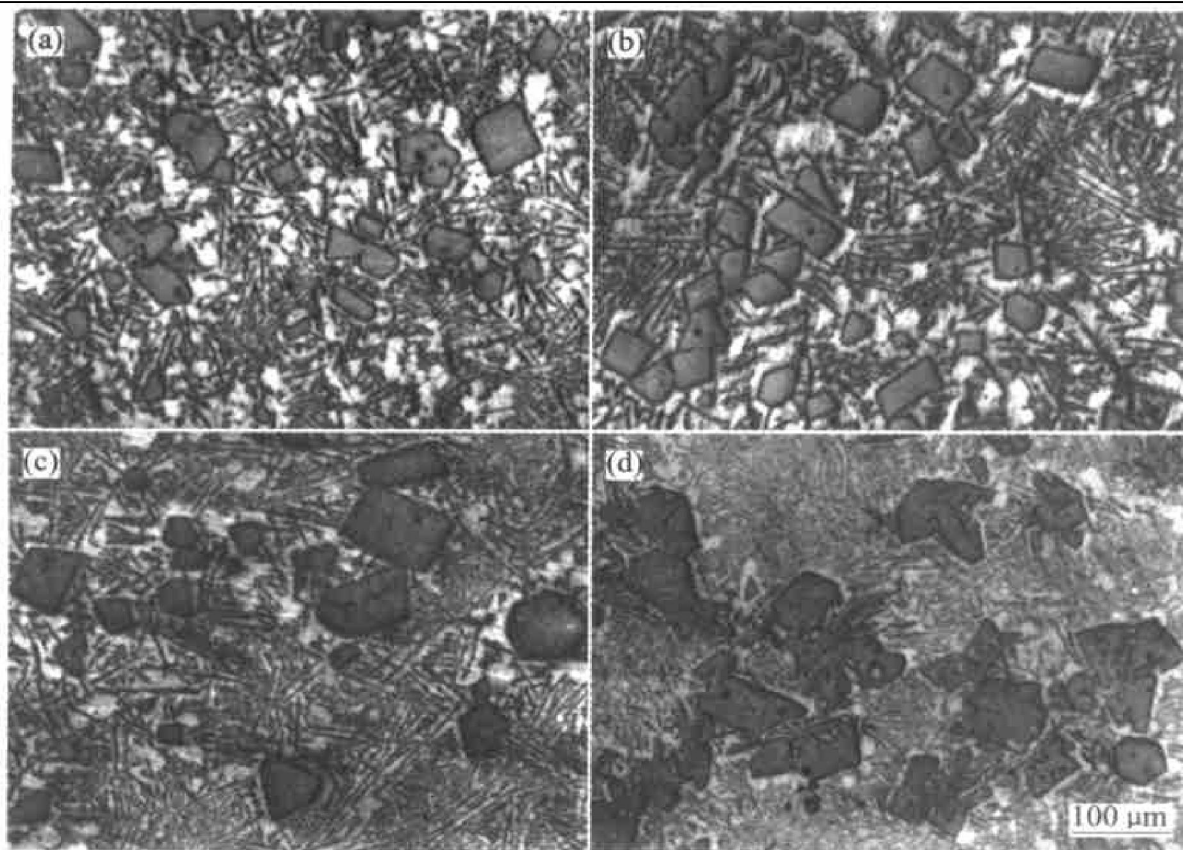


图 4 Al-20%Si 合金于 800 °C 不同时间处理组织

Fig. 4 Microstructures of Al-20%Si alloy with different durations of treatment at 800 °C
(a) —0 min; (b) —10 min; (c) —45 min; (d) —105 min

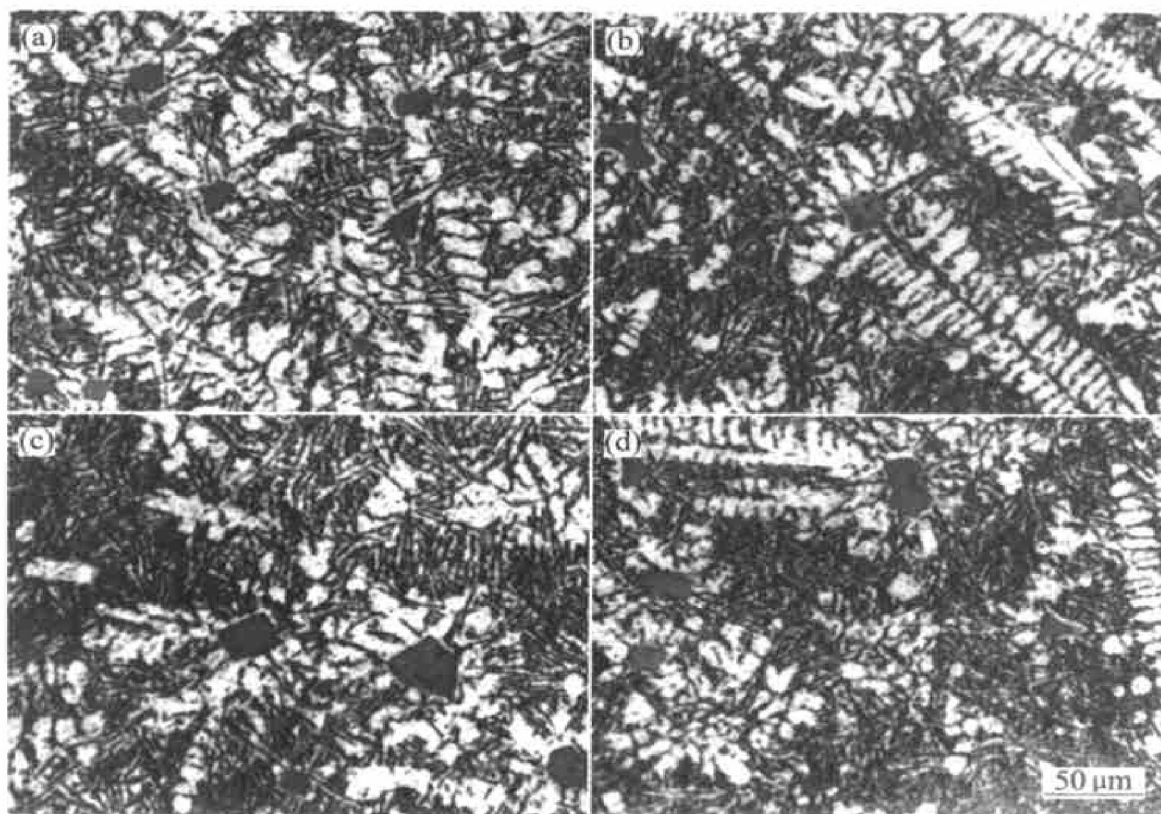


图 5 Al-12%Si 合金于 800 °C 不同时间处理组织

Fig. 5 Microstructures of Al-12%Si alloy with different durations of treatment at 800 °C
(a) —0 min; (b) —10 min; (c) —45 min; (d) —105 min

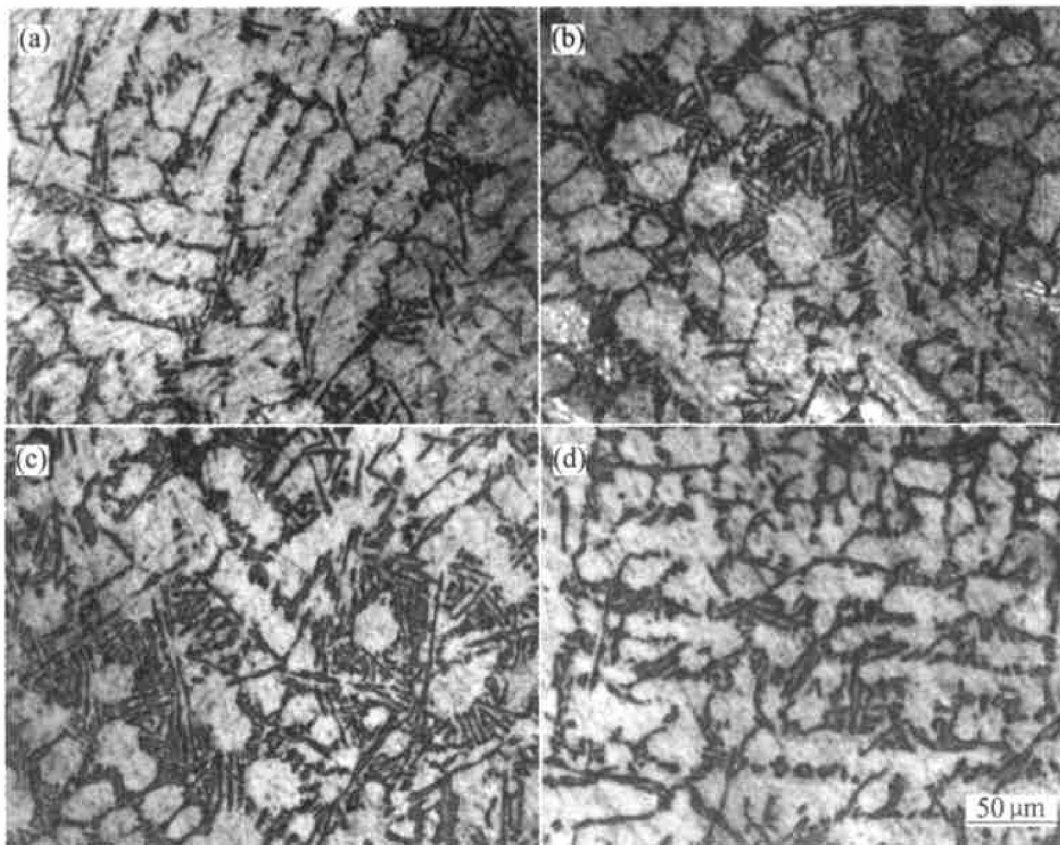


图 6 Al-7% Si 合金于 800 °C 不同时间处理组织

Fig. 6 Microstructures of Al-7% Si alloy with different durations of treatment at 800 °C
(a) 0 min; (b) 10 min; (c) 45 min; (d) 105 min

以用熔体结构的原子团簇理论及凝固形核理论加以解释^[12]。 D 与熔体静置时间 $f(t)$ 间的周期性关系目前还未有研究报道, 在没有掌握周期变化的确切规律以前, 现有模型和理论研究无法解释这一现象, 不同成分 Al-Si 合金等温组织与时间的关系以及完整表达式的进一步深入研究工作正在进行中, 我们初步分析认为这种现象可能是铝和硅间原子团簇间的竞争结果有关, 即 $f(t)$ 可能取决于熔体的原子团簇行为。

实验发现共晶合金 α 枝晶与初晶硅共存以及 α 枝晶在一定温度处理条件下可以完全消失的现象对完善熔体温度处理的理论可能具有重要提示意义。共晶合金 α 枝晶与初晶硅共存的现象可以用熔体结构的原子团簇理论和相关理论加以解释: Al-12% Si 合金在 1 000 °C 以下时, 合金熔体存在由铝和硅各自的有序偏聚原子团以及呈统计分布的铝和硅原子微观无序团簇, 合金凝固后就形成共晶合金 α 枝晶与初晶硅共存的组织现象; 在 1 000 °C 左右时, 铝有序偏聚原子团簇消失, 合金凝固后组织中就存在初晶硅与共晶组织共存的组织特征; 在 1 100 °C 以上时, 铝有序偏聚原子团簇又出现, 与此

同时, 硅原子微观有序团簇在实验的温度范围内始终存在, 合金凝固后又形成共晶合金 α 枝晶与初晶硅共存的组织现象。文献[13]对共晶 Al-Si 合金的研究表明, 无论是在升温还是降温过程, 合金液的电阻 R —温度 T 曲线均存在由 2 个拐点界定的转折区; 差热分析表明, ΔT — T 曲线在 980~870 °C 间存在微弱的驼峰, 说明在该温度范围内, 合金液的结构发生了某种转变。本实验结果可能就是合金液体结构改变的组织反映。

文献[11]总结了高温熔体结构与温度的关系, 并以 TTT 曲线的形式反映了不同凝固速率下凝固体系所沿循的变化历程。结合上述实验分析研究表明, 硅原子微观有序团簇的结合能应与铝有序偏聚原子团簇的结合能存在差异, 即硅原子微观有序团簇具有比铝有序偏聚原子团簇更强的结合能, 硅原子微观有序团簇和铝有序偏聚原子团簇存在于不同的温度区间。凝固组织中 α 枝晶的存在与否除与熔体的结构有关外, 还与合金凝固过程有关^[14]。文献[15]指出, 随着凝固速度的提高, Al-Si 合金的共生区变得狭窄, 共生区的复杂性相当于合金组织对凝固条件的敏感性, 而形貌的多样性取决于共晶体的

结晶学特点。因此,当过热温度高低决定熔体结构的同时,过热温度也改变了熔体凝固时的温度梯度大小,亦即改变了冷却速度,合金凝固过程就可能经过熔体的铝有序偏聚原子团簇微观不均匀区,形成类固型原子团簇,然后凝固形成 α 枝晶。亚共晶的枝晶通过温度处理细化效果不明显的事实又进一步说明,铝有序偏聚原子团簇存在的温度区间更靠近温度轴。因此,在文献[11]的 TTT 图中,不同温度区间的 C 曲线应对应不同的元素团簇。

4 结论

1) 实验发现,共晶合金存在 α 枝晶与初晶硅的共存以及 α 枝晶在一定温度处理条件下可以完全消失的现象,亚共晶的枝晶通过温度处理细化效果不明显。

2) 实验表明,3 种成分 Al-Si 合金的 α 枝晶及初晶硅形态尺寸随过热温度、静置时间增加出现周期性的变化规律,出现最小尺寸的温度、时间并不完全一致。亚共晶的枝晶通过温度处理细化效果不明显。尺寸与过热温度的关系可以用熔体结构的原子团簇理论及形核理论加以解释,尺寸与熔体静置时间的周期性关系无法用现有模型解释。

3) 铝硅合金中,硅原子微观有序团簇和铝有序偏聚原子团簇应存在于不同的温度区间,硅原子微观有序团簇具有比铝有序偏聚原子团簇更强的结合能,铝有序偏聚原子团簇存在的温度区间更靠近温度轴。

REFERENCES

- [1] WANG Jun, HE Shu-xian, SUN Bao-de, et al. Effects of melt thermal treatment on hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Mater Sci Eng A, 2002, A338: 101 - 107.
- [2] 常芳娥, 坚增运, 严文. 熔体温度处理对 Al-25% Si 合金显微组织的影响[J]. 西安工业学院学报, 2000, 20(1): 39 - 42.
CHANG Fang-e, JIAN Zeng-yun, YAN Wen. The effect of melt temperature treatment on the microstructure of Al-25% Si alloy [J]. Journal of XI AN Institute of Technology, 2000, 20(1): 39 - 42.
- [3] 陈忠伟, 介万奇. 熔体过热对 Al-7% Si-0.50% Mg 合金的显微组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2001, 50(12): 724 - 727.
CHEN Zhong-wei, JIE Wan-qi. Effect of melt superheating on microstructure and mechanical properties of Al-7% Si-0.50% Mg alloy [J]. Foundry, 2001, 50(12): 724 - 727.
- [4] 坚增运, 杨根仓, 周尧和. Al-18% Si 合金的温度处理 [J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(4): 13 - 136.
JIAN Zeng-yun, YANG Gen-cang, ZHOU Yao-he. Temperature treatment of Al-18% Si alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(4): 13 - 136.
- [5] 何树先, 孙宝德, 王 俊, 等. 熔体温度处理工艺对 A319 合金组织和性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 834 - 839.
HE Shu-xian, SUN Bao-de, WANG Jun, et al. Effect of melt temperature treatment on solidification structure of 319 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 834 - 839.
- [6] Ohmi T, Kudoh M. Effect of casting condition on refinement of primary crystals in hypereutectic Al-Si alloy ingots produced by duplex casting process [J]. J Japan Inst Metals, 1992, 56(9): 1064 - 1071.
- [7] GENG Hao-ran, MA Jia-ji, BIAN Xiu-fang. Thermal rate treatment and its effect on modification of Al-Si alloy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1997, 7(1): 137 - 141.
- [8] Ohmi T, Kudoh M. Formation of fine primary silicon crystals by mixing of semi-solid slurry of hypoeutectic Al-Si alloy and phosphorus-added hypereutectic Al-Si alloy melt [J]. J Japan Inst Metals, 1994, 58(3): 324 - 329.
- [9] 叶春生, 宋俊杰, 张新平, 等. 不同成分铝硅合金熔体混合对初生硅相细化的研究 [J]. 铸造, 2002, 51(3): 145 - 147.
YE Chun-sheng, SONG Jun-jie, ZHANG Xin-ping, et al. Investigation on refining granules of primary Si phase by melt mixing with different components of Al-Si alloys [J]. Foundry, 2002, 51(3): 145 - 147.
- [10] 何树先, 王 俊, 孙宝德, 等. 熔体温度处理对不同成分铝合金凝固组织和性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(4): 769 - 773.
HE Shu-xian, WANG Jun, SUN Bao-de, et al. Effect of composition on A356 alloy processed by melt temperature treatment [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(4): 769 - 773.
- [11] 陈 光, 蔡英文, 李建国, 等. 熔体热处理研究及其应用 [J]. 河北科技大学学报, 1998, 19(1): 6 - 12.

- CHEN Guang, CAI Ying-wen, LI Jian-guo, et al. Research and application of melt heat treatment[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 1998, 19(1): 6-12.
- [12] 周振平, 李荣德. 合金熔体过热处理研究的国内发展状况[J]. 铸造, 2003, 52(2): 79-83.
- ZHOU Zhen-ping, LI Rong-de. Development status of study on molten melt superheat treatment[J]. Foundry, 2003, 52(2): 79-83.
- [13] 张 林, 边秀房, 马家骥. 铝硅合金的液相结构转变[J]. 铸造, 1995(10): 7-12.
- ZHANG Lin, BIAN Xiou-fang, MA Jia-ji. Micro-structural transformation of Al-Si alloy in the liquid state[J]. Foundry, 1995(10): 7-12.
- [14] 赵爱民, 毛卫民, 甄子胜, 等. 冷却速度对过共晶铝硅合金凝固组织和耐磨性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 827-833.
- ZHAO Ai-min, MAO Wei-min, ZHEN Zi-sheng. Effects of cooling rate on solidification microstructures and wear resistance of hypereutectic Al-Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 827-833.
- [15] 李顺朴, 陈熙琛. Al-Si 合金的共晶共生区及组织形成规律[J]. 金属学报, 1995, 31(2): A47-A55.
- LI Shun-pu, CHEN Xi-chen. Growth rules of eutectic symbiotic region and microstructure of Al-Si alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31(2): A47-A55.
- (编辑 何学锋)