

## 过热温度和时间对 Al-21%Si 合金凝固组织的影响

文滔<sup>1,2</sup>, 王建华<sup>1,2,3</sup>, 杨志增<sup>2</sup>, 郭启强<sup>2</sup>, 李雪梅<sup>2</sup>, 苏旭平<sup>1,3</sup>

(1. 常州大学材料科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 湘潭大学机械工程学院, 湖南 湘潭 411105;  
3. 常州大学常州市先进金属材料重点实验室, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 将 0.5 g 初始铸态 Al-21%Si 合金真空封装于  $\phi 14$  mm 的石英管中, 分别在 750、800、850 和 900 °C 温度下重熔并保温不同时间后水冷, 采用光学显微镜分析 Al-21%Si 合金凝固组织。结果表明: Al-21%Si 合金在 750~850 °C 重熔保温 20 min 后初晶硅比初始铸态合金中的更大, 但随着重熔温度的升高, 初晶硅的颗粒尺寸逐渐减小, 900 °C 温度下重熔时效果最好; 在 750 °C 重熔后初晶硅反而变粗, 保温时间对初晶硅颗粒的尺寸影响不明显; 在相对较慢的石英管水冷条件下, Al-21%Si 合金中的共晶硅比初始铸态组织中的共晶硅更加细小; 在 750~900 °C 温度范围内保温不同的时间后, 初晶硅的颗粒尺寸基本在 25~43  $\mu\text{m}$  范围内波动; 在 800、850 和 900 °C 保温时均出现了不同生长程度的五瓣星形初晶硅组织。

**关键词:** 过热温度; 保温时间; Al-21%Si 合金; 初晶硅; 凝固组织

**中图分类号:** TG166.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2012)04-0033-05

### Influence of overheating temperature and holding time on solidification microstructure of Al-21%Si alloy

WEN Tao<sup>1</sup>, WANG Jian-hua<sup>1,2,3</sup>, YANG Zhi-zeng<sup>1</sup>, GUO Qi-qiang<sup>1</sup>, LI Xue-mei<sup>1</sup>, SU Xu-ping<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 3. Key Laboratory of Advanced Metal Materials of Changzhou City, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** As-cast Al-21% alloy with the weight of 0.5 g was encapsulated into a  $\phi 14$  mm evacuated quartz tube, and then the quartz tubes were heated at 750, 800, 850 and 900 °C for different time. The solidification microstructure of the treated Al-21% Si alloy was analyzed by optical microscopy. The results show that when overheated at 750~850 °C for 20 min, the primary Si is larger than that in the as received alloy. But the size of primary Si in the Al-21% Si alloy gradually decreases with the increasing of temperature, and the solidified alloy with finest primary Si is achieved at 900 °C. While overheated at 750 °C, the primary Si grows bigger than that in the as received alloy, and the effect of holding time on the size of primary Si is quite little. The eutectic Si in the alloy becomes smaller than that in the as received alloy because of lower cooling velocity. Most of the primary Si is with the size of 25~43  $\mu\text{m}$  after overheating at 750~900 °C for different holding time. Five petal star-shaped primary Si with different growth level is observed for the alloy after overheating at 800, 850 and 900 °C, respectively.

**Key words:** overheating temperature; holding time; Al-21% Si alloy; primary Si; solidification microstructure

过共晶 Al-Si 合金具有密度小、强度高、铸造成形性好以及耐磨耐蚀等优良性能, 是航空、航天、汽车、造船工业上重要的结构材料<sup>[1-3]</sup>。过共晶 Al-Si 合金

按含 Si 量可分为 3 组, 含 Si 量 17%~19%、含 Si 量 20%~23% 和含 Si 量 24%~26%, 其铸造组织由  $\alpha$ -Al 枝晶、共晶 Si 和初晶 Si 组成, 初晶 Si 可作为硬质点有效提高合金的耐磨性能。但是过共晶铝硅合金中大块的初晶 Si 会严重地割裂合金基体, 导致合金的强度、塑性和切削性能降低。

在细化铝硅合金组织方面的研究甚多, 对过共晶铝硅合金进行变质处理可以细化晶粒组织和初晶硅<sup>[4]</sup>, 采用强流脉冲电子束对过共晶铝硅合金表面进行改性可以提高合金表面耐磨性<sup>[5]</sup>, 管仁国等提出了一种震荡波形斜板工艺(VWSP), 可使铝硅合金

收稿日期: 2011-03-26; 修订日期: 2011-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(51074030); 湖南省大学生创新基金, 青蓝工程资助

作者简介: 文滔(1985—), 男, 主要从事铝合金熔体处理方面研究, E-mail: toweralvin@126.com。

通讯作者: 王建华(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事铝合金组织与性能研究, 发表论文 50 余篇, 电话: 15961165336, E-mail: wangjh@cczu.edu.cn。

组织球状化<sup>[6]</sup>。

根据金属凝固理论, 液态熔体在微小区域内存在着有序、规则的排列<sup>[7]</sup>, 其结构状态对晶粒的形核、生长及最终的组织、性能有直接的影响。在生产中, 各种不同成分的过共晶铝合金熔炼温度与保温时间对初晶硅的溶解和凝固过程中的析出影响很大, 合适的熔炼温度和保温时间可以消除组织遗传性, 得到最佳的凝固组织和合金力学性能<sup>[8]</sup>。熔体经过不同温度和时间的过热处理后可以得到不同的显微组织与力学性能<sup>[9-10]</sup>, 熔体温度处理后的冷却速度对合金的组织与力学性能也有很大的影响<sup>[11-12]</sup>。目前, 对过共晶铝硅合金的最佳熔炼温度与保温时间的确定缺乏详细报道。本文重点研究过热温度和保温时间对过共晶 Al-21% Si 合金凝固组织的影响, 为实际生产中确定该合金的最佳熔炼温度和保温时间提供参考。

## 1 试验材料及方法

采用工业纯铝, Al-30% Si 中间合金配制 Al-21% Si 合金, 将合金混合料装入石墨坩埚并在井式电阻炉中加热至 850 °C 熔炼 30 min, 之后降温至 780 °C 浇注到内腔高度为 14 mm、预热到 100 °C 左右的金属型(铁模)中, 制成厚度约为 13 mm 的合金块。将合金块切割成 4 mm × 4 mm × 12 mm 质量约为 0.5 g 的小试样, 将这些小试样真空封装于 φ14 mm 的石英管内, 分别在 750、800、850 和 900 °C 的管式电阻炉中保温 20、40、60、80、100 和 120 min, 然后将装有合金液的石英管进行水冷。采用光学显微镜观察 Al-21% Si 合金在各种熔炼工艺条件的凝固组织, 分析过热温度和保温时间对 Al-21% Si 合金凝固组织中初晶硅和共晶硅的尺寸和形态的影响。

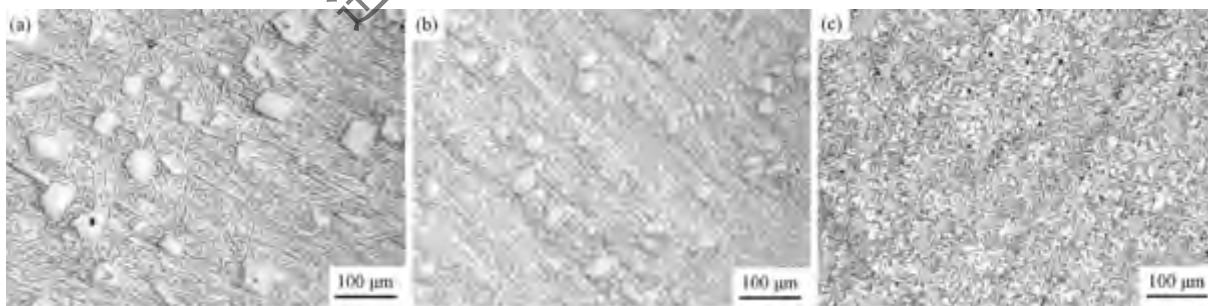


图 2 Al-21% Si 在不同温度下保温 20 min 后的凝固组织

Fig. 2 Solidification microstructure of as-cast Al-21% Si alloy re-melted at different temperatures for 20 min  
(a) 750 °C; (b) 850 °C; (c) 900 °C

## 2 试验结果及分析

### 2.1 过热温度对 Al-21% Si 合金凝固组织的影响

由 Al-Si 合金二元相图<sup>[13]</sup>可知共晶温度为 577 °C, 过共晶 Al-21% Si 合金的液相线温度为 700 °C。图 1 所示为 Al-21% Si 合金初始铸态组织。从图 1 可以看出, 合金凝固组织由颗粒状初晶硅, 粗大的针片状的共晶硅和 α-Al 组成, 合金凝固组织中初晶硅的平均尺寸约为 28 μm。

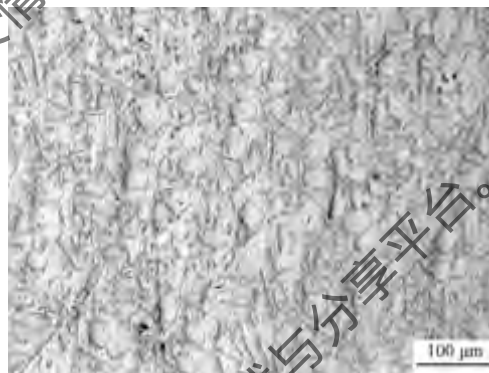


图 1 Al-21% Si 初始铸态组织

Fig. 1 Microstructure of as-cast Al-21% Si alloy

图 2 为初始铸态 Al-21% Si 合金分别在 750、850 和 900 °C 下重熔保温 20 min 后的凝固组织形貌。从图 2 中可以看出, Al-21% Si 合金经过不同温度重熔处理后, 共晶硅都有不同程度的细化。随着重熔温度的升高, 共晶硅越细小。在 750 和 850 °C 重熔保温 20 min 后, 合金凝固组织中初晶硅的尺寸比初始铸态组织中初晶硅大。但是, 随着过热重熔温度的升高, 合金组织中块状初晶硅的颗粒尺寸逐渐减小, 棱角逐渐变圆钝。Al-21% Si 合金在 900 °C 重熔保温 20 min 后, 凝固组织中初晶硅的尺寸比初始铸态组织中初晶硅明显减小。

由于 Al-21% Si 合金熔炼温度不是很高, 且保温时间较短, 初晶硅未得以完全溶解, 合金液中存在未熔的初晶硅核心, 加之石英管和水的导热系数均远远小于铁的导热系数<sup>[14-15]</sup>, 故石英管水冷试样的冷却速度远比铁模的慢, 导致在 750 ~ 850 °C 范围内, 实验所得的合金凝固组织中初晶硅的尺寸比初始铸态组织中的初晶硅大。当 Al-21% Si 合金在 900 °C 重熔保温 20 min 时, 由于初晶硅溶解比较充分, 合金液中未熔的初晶硅核心非常小, 凝固时来不及充分长大, 因此凝固组织中初晶硅的尺寸比初始铸态合金组织中的更细小。由于铁模冷却速度较快, 合金液中的 Si 原子来不及向初晶硅聚集长大, 所以合金液中的 Si 含量比较高, 导致凝固组织中的共晶硅比较粗大。而

采用石英管水冷却时 Al-21% Si 合金液的冷却速度比较慢, 合金液中的硅原子有足够的时间扩散到正在长大的初晶硅上, 使得合金液中的 Si 含量降低, 导致凝固组织中的共晶硅变得更加细小。

### 2.2 过热时间对 Al-21% Si 合金组织的影响

图 3 为初始铸态 Al-21% Si 合金在 750 °C 温度重熔后分别保温 20、80 和 120 min 后的合金凝固组织。从图 3 可以看出, 在 750 °C 过热重熔温度下, 随着保温时间的延长, 初晶硅和共晶硅的形态和尺寸变化较小, 初晶硅颗粒的平均尺寸都维持在 42 μm 左右。但是与初始铸态组织相比, 初晶硅的平均尺寸增大了 50% 左右, 针状共晶硅则略为细小且分布更均匀。

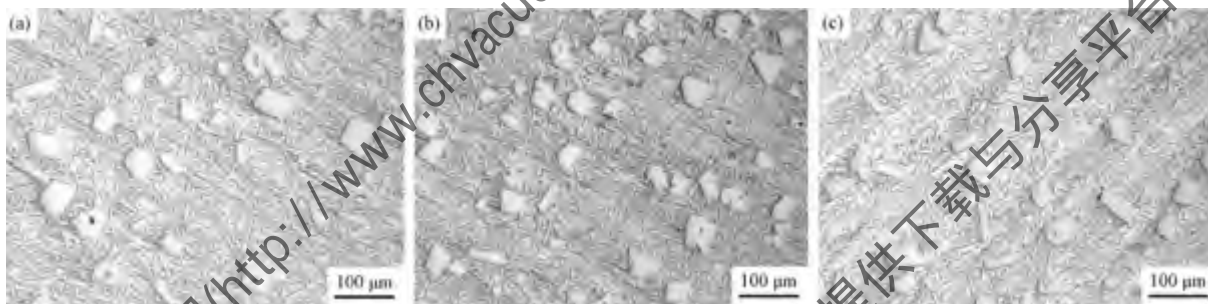


图 3 Al-21% Si 在 750 °C 下保温不同时间后的凝固组织

Fig. 3 Solidification microstructure of as-cast Al-21% Si alloy re-melted at 750 °C for different holding time (a) 20 min; (b) 80 min; (c) 120 min

初晶硅是一个高温稳定相, 由于其组织遗传性的影响, 在过热度只有近 50 °C 的温度 (750 °C) 过热重熔时, 由于初晶硅的溶解速度很慢, 因此随着保温时间的延长, 合金熔液中初晶硅的颗粒尺寸变化较小。在相对较慢的石英管水冷条件下, 合金液中的 Si 原子向未熔的初晶硅充分沉淀析出, 使其颗粒尺寸反而增大。由于合金液中的硅含量降低的缘故, 使合金重熔后共晶硅比初始铸态组织中的共晶硅稍有细化。

### 2.3 过热温度和保温时间对合金中初晶硅的影响

图 4 为 Al-21% Si 合金在 750 ~ 900 °C 范围内保温时, 初晶硅颗粒平均尺寸与保温时间的关系曲线。由图 4 可见, 在 750 ~ 900 °C 范围内保温不同的时间后, 初晶硅的颗粒尺寸基本在 25 ~ 43 μm 范围内波动。在 800、850 和 900 °C 分别保温 120、100 和 60 min 时, 合金组织中出现了不同生长程度的五瓣星形初晶硅 (如图 5), 导致初晶硅尺寸不同幅度急剧增大。为了以示区别, 本文将不同生长程度的五瓣星形初晶硅分为粗大态、中间态和初始态 3 种。粗大态五瓣星形初晶硅 (如图 5a) 生长得很充分, 最大块的长度尺寸

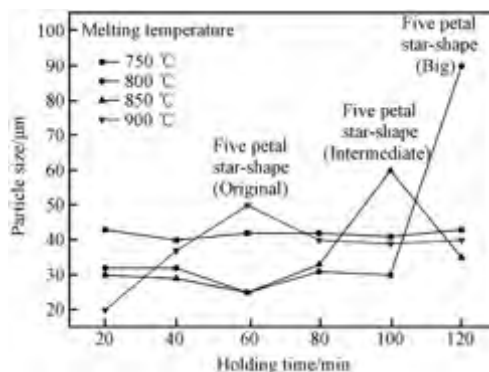


图 4 不同温度下初晶硅平均颗粒尺寸与保温时间的关系曲线

Fig. 4 Relationship between the average size of primary Si and holding time at different melting temperatures

高达 250 μm 以上。由于尺寸差异巨大, 故该类初晶硅的颗粒尺寸在图 4 中未按实测值给出, 取值 90 μm 以便作综合定性分析。中间态 (如图 5b) 则生长不够充分, 尺寸较小, 且组织中其余的初晶硅处于五瓣星形半成形态和未成形态 (即块状初晶硅)。初始态

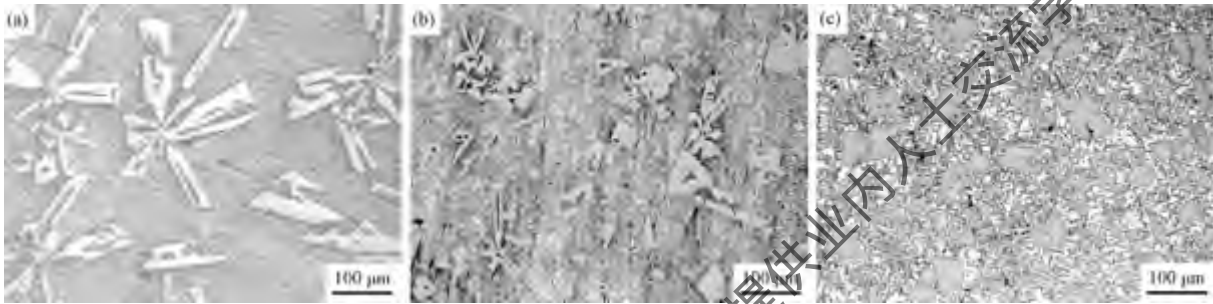


图 5 不同生长程度的五瓣星状初晶硅 (a) 粗大态; (b) 中间态; (c) 初始态

Fig. 5 Morphology of five petal star-shaped primary Si with different growth level (a) big; (b) intermediate; (c) original

(如图 5c) 组织中多数是块状初晶硅, 另外少数初晶硅则聚合在一起, 形成五瓣星形的初始生长形态。

熔体过热温度越高, 过共晶铝硅合金中初晶硅的溶解速度越快。Al-21% Si 合金在 750 °C 重熔保温不同时间后, 合金中初晶硅的溶解速度很慢, 未熔初晶硅的颗粒尺寸较大, 组织遗传现象难以消除。当该合金在 750 °C 重熔且慢速凝固后初晶硅得以充分长大, 因此其平均尺寸较初始铸态组织中的初晶硅反而有所增大, 保温时间对初晶硅的尺寸影响较小。

当过热温度为 800 和 850 °C 时, 初晶硅的溶解速度有所加快。随着保温时间的增加, 未熔初晶硅的颗粒尺寸进一步减小。在保温 20 ~ 60 min 内随着保温时间的延长, Al-21% Si 合金凝固后初晶硅的平均尺寸逐渐减小, 并在保温时间为 60 min 时, 均获得了各自过热温度下初晶硅颗粒最细小的组织。当过热温度为 900 °C 时, 初晶硅的溶解速度进一步加快, 在该温度下保温 20 min 即可得到细小的初晶硅组织。在此阶段, 初晶硅的溶解程度成为控制凝固组织中初晶硅尺寸大小的主要因素, 即初晶硅的溶解越充分, 凝固后的初晶硅越细小。

随着保温时间的进一步延长 (800、850 和 900 °C 分别保温 80 和 40 min 以上), 未熔初晶硅溶解更充分, 其颗粒尺寸减小、数量减少, 此时熔液中溶解的 Si 原子增多, 使在随后的凝固过程中析出的初晶硅量越多。由于合金液中析出初晶硅时会放出大量的结晶潜热, 因此熔体保温时间越长, 溶液中 Si 含量越多, 随后冷却过程中将释放出更多的结晶潜热, 使合金液的冷却速度下降, 导致熔液中初晶硅长大较充分, 因此更长的保温时间使得初晶硅颗粒较 800、850 和 900 °C 保温 60 和 20 min 时反而增大。

在 800、850 和 900 °C 分别保温 80 和 40 min 以后, 随着保温时间的增加, 除个别保温时间点由于出现五瓣星状初晶硅而导致异常外, 初晶硅尺寸基本稳

定。在此阶段, 重熔时初晶硅溶解程度和凝固时初晶硅长大程度的作用达到一种平衡, 使初晶硅的尺寸保持基本稳定。但随着过热温度的升高, 熔液中 Si 原子含量增加, 使凝固时释放的结晶潜热量增加, 导致凝固速度的下降, 反而使初晶硅的尺寸增大。

在 800、850 和 900 °C 分别保温 120、100 和 60 min 时, 合金熔体中预存的四面体和八面体团簇, 在实验条件的冷却速度下以五重孪晶关系凝并, 形成了文献 [16] 报道的五瓣星状初晶硅。由于五瓣星状初晶硅形核过程受动力学限制, 更快的冷却速度反而不利于五瓣星状初晶硅的形核<sup>[13]</sup>, 故随着过热温度的升高, 冷却速度加快, 五瓣星状初晶硅的生长速度下降, 尺寸变小。由于初晶硅的溶解速度随着过热温度的升高而加快, 故出现五瓣星状初晶硅所需的保温时间随过热温度的升高而缩短。

### 3 结论

1) Al-21% Si 合金在 750 ~ 900 °C 范围内重熔保温 20 min 时, 随着重熔温度的升高, 初晶硅的尺寸逐渐减小; 在 900 °C 重熔保温后, 初晶硅尺寸明显小于初始铸态合金中的初晶硅;

2) Al-21% Si 合金在 750 °C 过热重熔后初晶硅反而更加粗大, 随着保温时间的延长, 合金熔液中初晶硅平均尺寸变化较小, 因此在 750 °C 重熔对初晶硅的细化不利;

3) 在相对较慢的石英管水冷条件下, Al-21% Si 合金中的共晶硅比初始铸态组织中的共晶硅更加细小, 因此 Al-21% Si 合金重熔后慢速冷却将有利于共晶硅的细化;

4) 在 750 ~ 900 °C 范围内保温不同的时间后, 初晶硅的颗粒尺寸基本在 25 ~ 43 μm 范围内波动。在 800、850 和 900 °C 分别保温 120、100 和 60 min 时出现了不同生长程度五瓣星形初晶硅组织。

参 考 文 献

[ 1 ] 胥 锴,刘徽平,袁帮谊,等. 过共晶铝硅合金变质处理的研究进展[J]. 热加工工艺, 2009, 38( 3 ): 32-35.  
 XU Kai ,LIU Hui-ping ,YUAN Bang-yi ,et al. Development of modification of hypereutectic Al-Si alloy[J]. Hot Working Technology ,2009 ,38( 3 ) : 32 - 35.

[ 2 ] 彭 涛. 内燃机活塞材料的发展与前景[J]. 山西科技, 2007 ( 3 ): 91 - 92.  
 PENG Tao. Development and future of materials for the piston of internal combustion[J]. Shanxi Science and Technology ,2007 ( 3 ): 91 - 92.

[ 3 ] 潘连明,朱正锋,张国荣,等. Al-Si 系铸造铝合金材料的研究[J]. 机车车辆工艺, 2007 ( 1 ): 5 - 7.  
 PAN Lian-ming ,ZHU Zheng-feng ,ZHANG Guo-rong ,et al. Research of Al-Si series aluminum casting materials[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology ,2007 ( 1 ): 5 - 7.

[ 4 ] 邱亚东. 铝硅系铸造铝合金的晶粒细化处理[J]. 金属热处理, 2010, 35( 11 ): 79 - 80.  
 QIU Ya-dong. Grain refined treatment of Al-Si series casting alloys[J]. Heat Treatment of Metals ,2010 ,35( 11 ) : 79 - 80.

[ 5 ] 高 波,郝 仪,王 震,等. 过共晶铝硅合金 Al-17. 5Si 强流脉冲电子束表面改性[J]. 材料热处理学报, 2010, 31( 9 ): 115 - 118.  
 GAO Bo ,HAO Yi ,WANG Zhen ,et al. High current pulsed electron beam treatment of hypereutectic Al-17. 5Si alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment ,2010 ,31( 9 ) : 115 - 118.

[ 6 ] Guan R G ,Cao F R ,Chen L Q ,et al. Dynamical solidification behaviors and microstructural evolution during vibrating wavelike sloping plate process [J]. Journal of Materials Processing Technology ,2009 ,209( 5 ): 2592 - 2601.

[ 7 ] 潘金生,仝健民,田民波. 材料科学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.

[ 8 ] 刘相法,边秀房,马家骥,等. 铝合金组织遗传现象及其利用的研究[J]. 铸造, 1994 ( 10 ): 18 - 22.  
 LIU Xiang-fa ,BIAN Xiu-fang ,MA Jia-ji ,et al. The structure heredity phenomenon and its application of aluminum alloy[J]. Foundry ,1994 ( 10 ) : 18 - 22.

[ 9 ] Mondolfo L F ,Barlock J G. Effect of superheating on structure of some aluminum alloys[J]. Metall Trans-B ,1975 ,6( 4 ): 565 - 572.

[ 10 ] 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.

[ 11 ] 魏朋义,傅恒志. 熔体温度处理对快凝 Al-Si 过共晶合金条带微观组织及性能的影响[J]. 金属学报, 1996, 32( 8 ): 817 - 822.  
 WEI Peng-yi ,FU Heng-zhi. Effects of melt temperatures on microstructure and mechanical properties of rapid solidified Al-( 14% ~ 18% ) Si ribbons [J]. Acta Metallurgica Sinica ,1996 ,32( 8 ) : 817 - 822.

[ 12 ] Gui M C ,Jia J ,Song G S ,et al. Microstructure of Al-Si alloys rapidly solidified from the different temperature melts[J]. J. Mater Sci Tech. ,1999 ,15 ( 3 ): 225 - 228.

[ 13 ] Murray J L ,McAlister A J. Al-Si ( Aluminum-Silicon ) [J]. Bull. Alloy Phase Diagrams ,1984 ,5( 1 ): 36 - 37.

[ 14 ] Touloukian Y S ,Powell R W ,Ho C Y ,et al. Thermophysical Properties of Matter[M]. Vol. 1 ,IFI/Plenum ,New York-Washington ,1970.

[ 15 ] D. 皮茨, L. 西索姆. 传热学[M]. 葛新石,等. 第二版. 北京: 科学出版社, 2002.

[ 16 ] 桂满昌,贾 均,李庆春. 五瓣星状初晶硅形核机制[J]. 金属学报, 1996, 32( 11 ): 1177 - 1183.  
 GUI Man-chang ,JIA Jun ,LI Qing-chun. Nucleating mechanism of five petal star-shaped primary silicon[J]. Acta Metallurgica Sinica ,1996 ,32( 11 ) : 1177 - 1183.