

# 液相线铸造 Al-18Si 合金的凝固组织与力学性能研究

刘细良<sup>1, 2</sup>, 王云飞<sup>1, 2</sup>, 杜福林<sup>1, 2</sup>, 王建华<sup>1, 2</sup>

(1. 常州大学江苏省材料表面科学与技术重点实验室, 江苏常州 213164;

2. 常州大学材料科学与工程国家级实验教学示范中心, 江苏常州 213164)

**摘要:** 采用光学显微镜、Image-Pro Plus软件、X射线衍射仪和万能拉伸试验机等研究液相线铸造Al-18Si合金的凝固组织与力学性能。结果表明, 随着液相线温度下保温时间的增加, Al-18Si过共晶铝硅合金中初生硅的尺寸呈现先减小后增大的趋势, 力学性能则呈现先增大后减小的趋势。与普通铸造相比, 液相线铸造可使Al-18Si合金中初生硅平均尺寸减小30.6%, 使该合金抗拉强度和伸长率分别提高27%和108%。因此, 液相线铸造是改善过共晶铝硅合金凝固组织和力学性能的有效方法。

**关键词:** 过共晶铝硅合金; 液相线铸造; 凝固组织; 力学性能

## 作者简介:

刘细良(1985-), 男, 工程师, 主要从事轻合金材料研究。电话: 18552266155, E-mail: liuxiliang@cczu.edu.cn

## 通讯作者:

王建华, 男, 教授, 博士生导师, 博士。电话: 15961165336, E-mail: wangjh@cczu.edu.cn

中图分类号: TG24;

TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

04-0509-05

## 基金项目:

国家自然科学基金项目(52071032)。

## 收稿日期:

2023-05-19 收到初稿,

2023-12-24 收到修订稿。

由于过共晶铝硅合金具有比强度高、热膨胀系数低和耐磨性好等优点, 被广泛应用于制备航空、船舶和汽车等零件<sup>[1-3]</sup>。但是, 过共晶铝硅合金中存在多角块状硬质初生硅相, 对基体产生割裂作用, 在施加载荷后, 容易出现局部的应力集中, 显著降低合金的力学性能<sup>[4-5]</sup>。为改善过共晶铝硅合金的凝固组织, 材料工作者进行了许多研究。Al-P中间合金对初生硅具有较强的变质细化作用<sup>[6-7]</sup>, 可提高合金的力学性能。Lin等<sup>[8]</sup>研究表明, La-Ce混合稀土对Al-18Si中初生硅具有较好地细化变质作用。Li等<sup>[9]</sup>研究了熔炼温度对Al-16Si过共晶铝硅合金凝固组织的影响, 增加熔体过热温度, 可使合金中初生硅的尺寸明显减小, 且初生硅形态由粗大的花朵状变成比较规则的正多边形。Ohmi等<sup>[10]</sup>采用950 °C熔炼Al-19Si合金, 使合金凝固组织中初生硅由原先的70~90 μm降低到40 μm。杨俊等<sup>[11]</sup>研究了高能超声处理对Al-20%Si合金凝固组织的影响, 发现通过超声处理能够明显细化组织中初生硅组织, 同时初生硅的分布更加均匀。Uzun等<sup>[12]</sup>通过甩带法研究了冷却速度对Al-16%Si合金凝固组织的影响, 发现快速冷却能消除初生硅并获得伪共晶组织。李静等<sup>[13]</sup>研究了Al-Cu-Mg-Ti合金固液混合近液相线铸造凝固组织, 发现合金凝固组织得到明显细化。刘丹等<sup>[14]</sup>研究了液相线铸造2618铝合金的显微组织, 结果表明, 一定冷却速度条件下在液相线温度铸造能获得适合于半固态加工的细小球形晶粒。闫洪等<sup>[15]</sup>研究表明, 通过加入稀土镧并在液相线附近进行保温处理, 能有效地细化ADC12铝合金枝晶, 促进近球状颗粒的形成。

目前, 未见采用液相线铸造改善过共晶铝硅合金凝固组织和力学性能的研究报道, 本文拟对其进行系统研究, 研究结果对进一步改善过共晶铝硅合金的凝固组织和力学性能具有较重要的参考价值。

## 1 试验材料与方法

试验中采用工业纯铝锭Al-00(99.9wt.%Al)与Al-50Si锭为原料, 使用金属带锯床将其切割成小块, 配置Al-18Si合金。覆盖剂配比为KCl:NaCl:Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>=4:5:1, 将混合物放入氧化铝坩埚中, 在电阻炉中加热到600 °C去除结晶水并完全熔化后冷却

至室温，碾碎成细小的粉末后过筛100目备用。将混合料放在坩埚电阻炉中在加热至900 °C使其充分熔化并保温1 h，采用覆盖剂对熔体进行保护，并采用六氯乙烷对熔体进行精炼处理，然后将合金熔体浇注成5 mm的薄板备用。

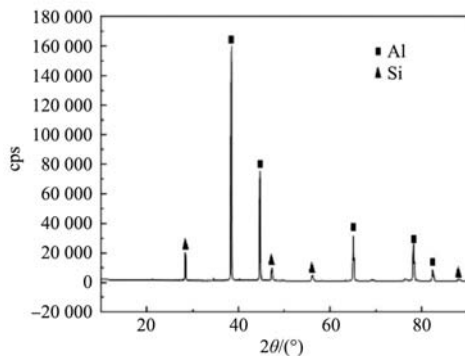
首先截取100g Al-18Si合金在780 °C进行重熔，合金完全熔化后撒上覆盖剂防止熔体氧化，采用六氯乙烷精炼后，保温10 min后浇注到内腔尺寸为 $\Phi 12$  mm  $\times$  120 mm的室温金属型中。根据铝硅二元相图和DSC试验得知，Al-18Si合金的液相线温度为665 °C，液相线铸造工艺参数见表1。在液相线铸造时，将上述覆盖剂保护的合金熔体在电阻炉中冷却到液相线温度分别保温不同时间，再浇注到内腔尺寸为 $\Phi 12$  mm  $\times$  120 mm的室温金属铸型中。

表1 液相线铸造试验方案

Table 1 Experimental plan for the liquidus casting

熔炼温度/°C	保温时间/min	铸型温度/°C
665	0	室温
665	5	室温
665	10	室温
665	15	室温
665	20	室温
665	25	室温
665	30	室温

在距离圆柱形合金试样底部15 mm处截取金相试样，试样高度约12 mm。在预磨机上分别用400、800和2 000目水砂纸对这些样品表面进行粗磨和精磨，然后在抛光机上抛光至镜面，使用Keller试剂对金相试样进行腐蚀，然后使用Leica DMI 3000光学显微镜观察分析圆柱试样1/2R处的凝固组织，采用Image-Pro Plus软件对合金凝固组织进行定量分析，采用常规广角模式的Smartlab X射线衍射仪对Al-18Si合金试样进行物相分析。



(a) XRD图谱

采用数控机床将 $\Phi 12$  mm  $\times$  120 mm圆柱形试样加工成如图1所示的拉伸试样，用WDW-300万能拉伸试验机按照ASTM E8的标准，对Al-18Si合金进行力学性能测试，拉伸速度为1 mm/min。

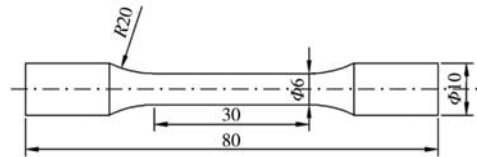


图1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of tensile specimen

## 2 试验结果与讨论

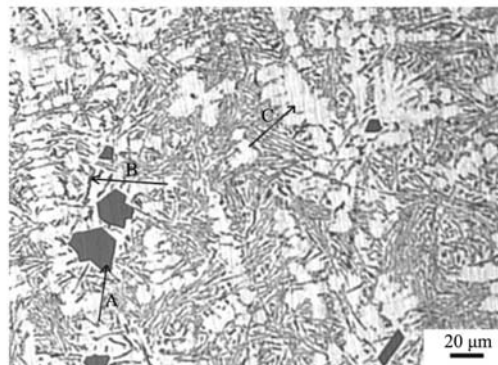
### 2.1 液相线铸造 Al-18Si 合金的凝固组织

图2为780 °C熔炼保温10 min浇注到室温金属型得到的Al-18Si合金的XRD图谱和凝固组织，表2为780 °C熔铸Al-18Si合金的EDS分析结果。结合图2和表2中EDS分析结果可以发现，合金组织中存在 $\alpha$ 和 $\beta$ 两种相，其中 $\alpha$ 相通常被称为 $\alpha$ -Al相，是硅溶于铝中的固溶体，呈树枝状分布； $\beta$ 相是铝溶于硅中的固溶体可分为初生硅相和共晶硅相，初生硅棱角分明且以不规则块状分布，共晶硅以针片状和短杆状分布于Al基体中。如图2b所示，A部位是初晶硅相，B部位共晶硅相，C部位则是 $\alpha$ -Al相。经过三个不同视场面扫描能谱分析得到不同相的硅含量分别为17.92%、17.86%和

表2 780 °C熔铸Al-18Si合金的EDS分析结果

Table 2 EDS analysis results of the Al-18Si cast alloy at 780 °C

选择位置	相的种类	元素质量分数 $w_B$ /%	
		Si	Al
A	$\beta$ (初生硅)	98.80	1.20
B	$\beta$ (共晶硅)	97.50	2.50
C	$\alpha$ ( $\alpha$ -Al)	1.65	98.35



(b) 凝固组织

图2 780 °C熔铸Al-18Si合金的XRD图谱和凝固组织

Fig. 2 XRD pattern and solidification microstructure of the Al-18Si cast alloy at 780 °C

18.02%，说明所熔炼的合金成分与设计成分18%基本相当。

图3为Al-18Si合金的凝固组织照片，图3a为Al-18Si合金在780℃熔炼保温10 min后浇注到室温金属型得到的合金（普通铸造）凝固组织照片，图3b为Al-18Si合金在780℃熔炼保温10 min、然后在炉内冷却到液相线

温度（665℃）后再保温10 min、再浇注到室温金属型得到的合金（液相线铸造）凝固组织照片。定量分析结果表明，普通铸造Al-18Si合金中初生硅平均尺寸为19.3 μm，液相线铸造Al-18Si合金凝固组织中初生硅尺寸减小为13.4 μm，减少幅度为30.6%，说明液相线铸造可明显细化合金中的初生硅。

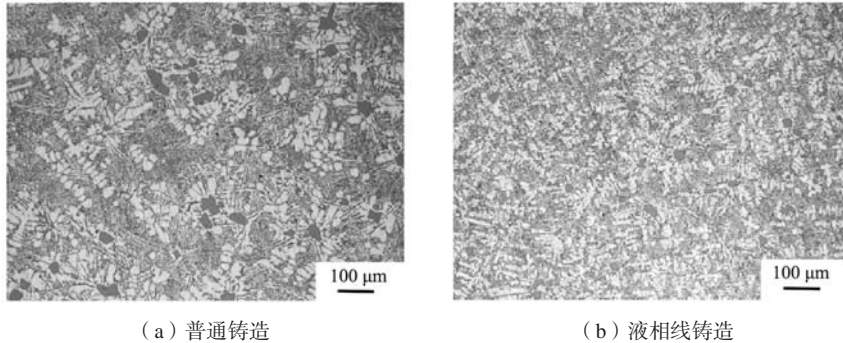


图3 Al-18Si合金凝固组织

Fig. 3 Solidification microstructures of the Al-18Si alloys

液相线铸造对初生硅的细化作用主要有如下两个原因：第一个原因是两者的凝固速度不同。Al-18Si合金普通铸造时的浇注温度为在780℃，当温度较高的熔体被浇注到室温金属型后，由于温差较大将造成金属型有较大的温度升高，导致合金的凝固速度降低，从而使初生硅有足够的时间进行长大，因此合金凝固组织中初生硅比较粗大。Al-18Si合金液相线铸造时，熔体的浇注温度仅为665℃，合金熔体与金属型温差较小，金属型温度升幅明显减小，导致合金的凝固速度明显增加，从而使初生硅只有较短的时间进行长大，因此合金凝固组织中初生硅比较细小。试验中将780℃和665℃的熔体浇注到室温金属型，发现金属液温度立刻分别下降约55℃和50℃，熔体分别经过约4 s和2 s冷却到共晶反应温度。因此，普通铸造时合金的凝固速度大约为15℃/s，液相线铸造时合金的凝固速度大约为20℃/s。其次，当Al-18Si合金在较高的温度熔炼后，在炉内缓慢降温到液相线附近温度的保温过程中，由于熔体温度在液相线附近波动，使得析出的残留初生硅相经历析出又熔化再析出的反复过程，从而使初生硅得到细化。

图4为Al-18Si合金在液相线温度保温不同时间后浇注到室温金属型凝固后得到的合金凝固组织照片。由图4a可见，将合金熔体降温到液相线后立刻浇注（保温时间为0）时，合金凝固组织中有比较粗大的初生硅；当将合金熔体降温到液相线温度保温5 min后浇注时，合金凝固组织中初生硅尺寸有所减小，如图4b所示。由图4c可知，当熔体在液相线保温10 min后，其凝固组织中初生硅尺寸进一步减小。但是，随着熔体在液相线保温时间的进一步增加，初生硅的尺寸反而有

所增加，如图4d和4e所示。

表3为不同保温时间液相线铸造Al-18Si合金凝固组织中初生硅尺寸。表3可知，Al-18Si合金凝固组织中初生硅的尺寸随着熔体在液相线温度下保温时间的增加先减小后增大，当在液相线保温10 min时，Al-18Si合金凝固组织中初生硅的最大尺寸和平均尺寸都达到最小值。与780℃熔炼浇注到室温金属型中的普通铸造Al-18Si合金凝固组织相比，初生硅最大尺寸减小了23.7%，初生硅平均尺寸减小了30.9%。

Al-18Si合金熔体液相线保温时间对初生硅尺寸影响的原因：由于Al-18Si合金开始是在780℃熔炼并保温10 min，由于中间合金中初生硅的组织遗传性，在合金熔体中会残留一些未熔的初生硅质点。随着Al-18Si合金熔体液相线保温时间的增加，熔体中未熔初生硅质点尺寸逐渐减小，合金凝固组织中初生硅尺寸有明显的减小，当保温时间为10 min时达到最小值。随着液相线保温时间进一步增加，熔体中残留的细小初生硅质点由于布朗运动发生相互碰撞聚集长大，反而使合

表3 不同保温时间液相线铸造Al-18Si合金凝固组织中初生硅尺寸

Table 3 Sizes of the primary silicon in solidification microstructures of the Al-18Si alloys heat preserved At liquidus temperature with different times

液相线保温时间/min	初生硅平均尺寸/μm	初生硅最大尺寸/μm
0	19.2	30.9
5	15.2	25.2
10	13.4	23.8
15	14.8	24.6
20	18.8	30.1

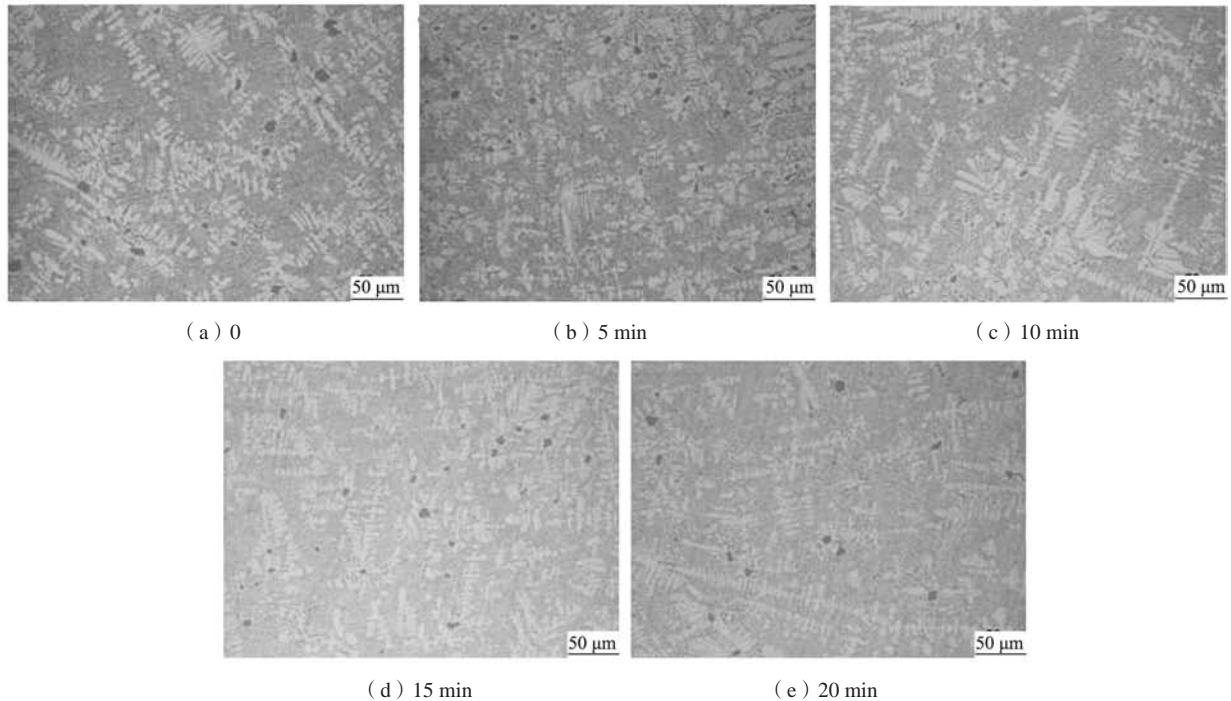


图4 液相线保温不同时间Al-18Si合金凝固组织

Fig. 4 Solidification microstructures of the Al-18Si alloys heat preserved at liquidus temperature with different times

金凝固组织中初生硅尺寸有所增加。

## 2.2 液相线铸造 Al-18Si 合金的力学性能

普通铸造Al-18Si合金的抗拉强度为167 MPa，伸长率为4%。表4为液相线温度保温不同时间液相线铸造Al-18Si合金拉伸力学性能结果，由表4结果可见，当熔体温度降温到液相线不进行保温时，Al-18Si合金的抗拉强度为203 MPa，伸长率为5.2%；随着在液相线保温时间上升至5 min时，抗拉强度和伸长率稍有提升，其抗拉强度为206 MPa，伸长率为6.7%；当在液相线保温时间为10 min时，液相线浇注的抗拉强度和伸长率达到最高，最大抗拉强度为212 MPa，最大伸长率为8.3%；随着液相线保温时间的进一步延长，当在液相线保温时间为15 min和20 min时，液相线浇注的抗拉强度和伸长率出现明显的下降，其抗拉强度分别为211 MPa和195 MPa，伸长率分别为7.5%和6.3%。综上所述，随着

表4 不同液相线保温时间Al-18Si合金的力学性能  
Table 4 Mechanical properties of the Al-18Si alloys with different liquidus holding times

液相线保温时间/min	抗拉强度/MPa	伸长率/%
0	203	5.2
5	206	6.7
10	212	8.3
15	211	7.5
20	195	6.3

Al-18Si合金熔体在液相线保温时间的增加，Al-18Si合金的抗拉强度和伸长率呈现先增大后减小的趋势。与普通铸造相比，液相线铸造可使Al-18Si合金的抗拉强度和伸长率分别提高27%和108%。

Al-18Si合金的力学性能与其凝固组织密切相关，随着合金熔体在液相线保温时间的延长，合金凝固组织中初生硅尺寸呈现先减小后增大的变化趋势。随着合金凝固组织中初生硅尺寸的增大，初生硅对基体的割裂作用越大，导致合金抗拉强度和伸长率的下降。因此，随着合金熔体在液相线保温时间的延长，Al-18Si合金的抗拉强度和伸长率呈现先增加后减小的变化趋势，与合金中初生硅尺寸的变化趋势刚好相反。

## 3 结论

(1) 与普通铸造相比，液相线铸造可使Al-18Si过共晶铝硅合金中初生硅平均尺寸从19.3 μm细化至13.4 μm，减少幅度为30.6%，并使Al-18Si合金的抗拉强度和伸长率分别提高27%和108%。

(2) 随着液相线温度下保温时间的增加，Al-18Si过共晶铝硅合金中初生硅的尺寸呈现先减小后增大的趋势，当将液相线温度保温10 min时，Al-18Si合金凝固组织中初生硅尺寸最小。

(3) 随着液相线温度下保温时间的增加，Al-18Si过共晶铝硅合金的抗拉强度和伸长率呈现先增大后减小的趋势。当将液相线温度保温10 min时，Al-18Si合金的抗拉强度最大。

## 参考文献:

- [1] OYA S, NUNOMURA J, MATSUSHIMA H, et al. Dissolution characteristics of Al-Si alloys in  $\text{AlCl}_3$ -NaCl-KCl molten salt at 423 K [J]. *Electrochemistry*, 2022, 90 ( 12 ) : 127001.
- [2] TOPTAN F, ALVES A C, KERTI I, et al. Corrosion and tribocorrosion behaviour of Al-Si-Cu-Mg alloy and its composites reinforced with  $\text{B}_4\text{C}$  particles in 0.05M NaCl solution [J]. *Wear*, 2013, 306 ( 1-2 ) : 27-35.
- [3] ZYKOVA A, KAZANTSEVA L, POPOVA N, et al. Influence of modifying mixtures on Si crystal formation in Al-7%Si alloy [J]. *Metals*, 2018, 8 ( 2 ) : 1-10.
- [4] ZHANG L, CHEN S Y, LI Q C, et al. Formation mechanism and conditions of fine primary silicon being uniformly distributed on single  $\alpha$  Al matrix in Al-Si alloys [J]. *Materials and Design*, 2020, 193: 1-12.
- [5] 史原脊. 半固态成形过共晶Al-Si-Cu-Mg合金热处理工艺研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- [6] CAO F Y, JIA Y D, PRASHANTH K G, et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of as-cast Al-50Si alloy due to heat treatment and P modifier content [J]. *Materials & Design*, 2015, 74: 150-156.
- [7] JIANG T, YU C, XU B Y, et al. A novel investigation on the influence of Cu-P modifier on the microstructure, mechanical performance, and melting process of Al-50Si alloys treated by overheating [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2021, 31 ( 3 ) : 461-470.
- [8] LIN G Y, LI K, FENG D, et al. Effects of La-Ce addition on microstructure and mechanical properties of Al-18Si-4Cu-0.5Mg alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29 ( 8 ) : 1592-1600.
- [9] LI P J, NIKITIN V I, KANDALOVA E G, et al. Effect of melt overheating, cooling and solidification rates on Al-16wt. %Si alloy structure [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 332 ( 1-2 ) : 371-374.
- [10] OHMI T, MINOGUCHIK, KUDOH M, et al. Control of primary silicon crystal size of semi-solid hypereutectic Al-Si alloy by slurry melt mixing process [J]. *Journal of Japan Institute of Metals*, 1994, 58 ( 11 ) : 1311-1317.
- [11] 杨俊, 程和法, 黄笑梅, 等. 高能超声对Al-20Si合金组织和力学性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2010, 30 ( 8 ) : 769-771.
- [12] UZUNO, KARAASLANT, GOGEBAKAN M, et al. Hardness and microstructural characteristics of rapidly solidified Al-8-16wt%Si alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, 376 ( 1-2 ) : 149-157.
- [13] 李静, 宋沅峰, 王建华, 等. Al-Cu-Mg-Ti合金固液混合近液相线铸造及凝固组织 [J]. *材料热处理学报*, 2013, 34 ( 1 ) : 64-69.
- [14] 刘丹, 崔建忠, 夏克农, 等. 液相线铸造铝合金2618显微组织 [J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 1999, 20 ( 2 ) : 173-176.
- [15] 闫洪, 贺儒, 李正华, 等. 近液相线铸造法制备稀土铝合金半固态浆料的研究 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42 ( 13 ) : 1-4.

---

## Study on Solidification Microstructure and Mechanical Properties of Liquidus Cast Al-18Si Alloy

LIU Xi-liang<sup>1,2</sup>, WANG Yun-fei<sup>1,2</sup>, DU Fu-lin<sup>1,2</sup>, WANG Jian-hua<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Material Surface Science and Technology, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China)

### Abstract:

The solidification microstructure and mechanical properties of liquidus cast Al-18Si alloy were studied using optical microscopy, Image-Pro Plus software, X-ray diffractometer, and universal tensile testing machine. The results indicated that with the increase of holding time at liquidus temperature, the size of primary silicon in Al-18Si hypereutectic aluminum silicon alloy showed a trend of first decreasing and then increasing, while the mechanical properties showed a trend of first increasing and then decreasing. Compared with ordinary casting, the liquidus casting reduced the average size of the primary silicon in the Al-18Si alloy by 30.6%, and increased the tensile strength and elongation of the alloy by 27% and 108%, respectively. Therefore, the liquidus casting was an effective method to improve the solidification microstructure and mechanical properties of hypereutectic aluminum silicon alloys.

### Key words:

hypereutectic Al-Si alloy; liquidus casting; solidification microstructure; mechanical properties