

# 浇注工艺对 AlSi9Cu3 合金凝固组织及力学性能的影响

郝春来, 李 振, 赫丽杰, 王晓民, 包鑫磊, 张家铭

( 营口理工学院材料科学与工程学院, 辽宁营口 115100 )

**摘要:** 采用直读光谱仪、金相显微镜、拉伸试验机、JMatPro软件、扫描电镜和X射线衍射仪研究了浇注温度和模具温度对AlSi9Cu3合金凝固组织及力学性能的影响。结果表明: 合金的凝固组织以初生 $\alpha$ -Al和针状共晶硅为主; 随浇注温度的降低, 合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸先减小后增大; 针状共晶硅含量逐渐增多; 合金的抗拉强度先升高后降低; 随模具温度的升高, 合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸逐渐增大, 针状共晶硅含量先减少后增加; 合金的抗拉强度先升高后降低。当浇注温度为680 $^{\circ}$ C、模具温度为100 $^{\circ}$ C时, AlSi9Cu3合金的力学性能最佳。

**关键词:** AlSi9Cu3合金; 浇注温度; 模具温度; 凝固组织; 力学性能

铸造Al-Si合金因生产成本较低、生产周期较短、同时兼具良好的铸造性能、抗腐蚀性和切削加工性能, 可用于制造变形铝合金难以生产的复杂零部件。AlSi9Cu3合金作为铝硅系合金的典型代表由于具有较高的强度、良好的耐腐蚀和疲劳性能, 常被应用于汽车结构件和电子电器等领域<sup>[1-3]</sup>。随着轻量化的快速发展, 汽车制造业对AlSi9Cu3合金的力学性能提出了更高的要求。因此, 如何实现其力学性能的进一步提高已成为众多科研学者研究的热点。

许志强等人研究了机械振动对AlSi9Cu3合金凝固组织的影响。研究发现, 当振幅为0.5 mm、振频为25 Hz时, 合金芯部等轴晶可细化至0.2 mm左右, 等轴晶占比高达80%<sup>[4]</sup>。Barbosa等人研究表明, AlSi9Cu3合金在620 $^{\circ}$ C下等温超声2 min后,  $\alpha$ -Al晶粒可细化至50  $\mu$ m以下, 共晶硅颗粒面积小于10  $\mu$ m<sup>2</sup>, 抗拉强度、屈服强度和断后伸长率可分别达到301 MPa、235 MPa和1.5%<sup>[5]</sup>。另外, 印厚尚等人在研究热处理和ZrB<sub>2</sub>+TiB<sub>2</sub>二元纳米颗粒对AlSi9Cu3合金组织及力学性能的影响时发现, 当ZrB<sub>2</sub>+TiB<sub>2</sub>加入量为3.14%时, 合金抗拉强度和伸长率分别可达到265 MPa和14.8%。合金进一步经T6和T7热处理后, 抗拉强度可提高至300 MPa, 伸长率稳定控制在13%~15%<sup>[6]</sup>。此外, 汪闵等人研究了Sr变质处理对AlSi9Cu3凝固组织及力学性能的影响<sup>[7]</sup>, 结果表明, 当Sr添加量为0.06%时, 合金的抗拉强度和伸长率较未变质合金分别提高25.2%和84.8%。

以上研究表明, AlSi9Cu3合金力学性能的强化手段目前仍多采用外场强化、热处理及变质处理。外场强化虽可通过细化AlSi9Cu3合金凝固组织达到改善力学性能的目的, 但目前工业化应用较难实现。热处理虽然对AlSi9Cu3合金的力学性能有着显著的强化效果, 但会导致冶炼成本增加。此外, Al-10Sr中间合金虽然具有较长的变质时间和变质效果, 但Sr元素的加入会严重加剧铝合金液的吸气倾向, 从而增加合金中气孔缺陷产生的几率, 进而导致精炼除气时间的延长和冶炼成本的增加<sup>[8-10]</sup>。众所周知, 浇注工艺调控不仅可以改善合金材料的力学性能, 同时也易于实现工业化应用。刘政等人研究了电磁搅拌与浇注温度对半固态A356合金凝固组织的影响<sup>[11]</sup>。结果表明, 随浇注温度的降低, A356合金中初生 $\alpha$ 相晶粒尺寸先减小后增大, 当浇

## 作者简介:

郝春来(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为功能材料及新型材料研究。

E-mail: haochunlai@163.com

通讯作者:

李振, 男, 博士, 讲师。

E-mail: 451794353@qq.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

06-0688-07

## 基金项目:

营口理工学院引进人才科研启动经费项目(YJRC202017)。

## 收稿日期:

2022-08-19 收到初稿,

2023-01-05 收到修订稿。

注温度降为630 ℃时,合金中初生 $\alpha$ 相平均等积圆直径和平均形状因子最小分别为76.87  $\mu\text{m}$ 和0.77。陈才等人认为适宜的浇注温度是保证电器外壳用铝合金力学性能的关键。过高和过低的浇注温度均不利于铝合金力学性能的改善<sup>[12]</sup>。此外,胡世平等发现,AZ31合金的晶粒尺寸随模具温度的降低先减小后增大,当模具温度为200 ℃时,初生相晶粒尺寸达到最小<sup>[13]</sup>。

目前关于浇注工艺对铝合金凝固组织及力学性能影响的研究多集中于半固态铸造领域,重力铸造下的相关报道较少。因此,本文在前人的研究基础上,通过浇注温度和模具温度调控研究了凝固组织对AlSi9Cu3合金力学性能的影响,这对其工业化生产有着重要的指导意义。

## 1 试验材料与方法

试验选用铝含量99.7%的重熔用铝锭、553工业硅、Al-Cu40中间合金、Al-Mn10中间合金、Al-Ti10中间合金、金属镁和金属锌。

将预先准备的重熔用工业铝锭和工业硅置于30 kg电阻炉中,由室温升至750 ℃,待铝锭和工业硅完全熔化后,将事先准备的Al-Cu中间合金、Al-Mn中间合金、金属镁、金属锌加入铝液并充分搅拌,采用QSG750-II铝镁基直读光谱仪检测合金成分(表1)。当合金成分达到目标要求后,将铝液温度降至730 ℃,采用99.99%的高纯氩气精炼除气20 min,同时向铝液添加Al-Ti10中间合金进行细化处理。细化处理结束后向铝液添加0.2%的精炼剂进行除渣。除渣结束后,分别调整铝液温度为720 ℃、700 ℃、680 ℃和660 ℃。将铝液分别浇至20 ℃、100 ℃、150 ℃、200 ℃和300 ℃的铁质 $\Phi 10$  mm试样型模具中并冷却至室温,每组试验浇注3个样品。

自拉伸试棒平行段中间位置取样,采用100目、

表1 AlSi9Cu3铝合金中主元素含量  
Table 1 Content of main elements of the AlSi9Cu3 aluminum alloy  $w_B/\%$

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
9.77	0.68	2.13	0.16	0.17	0.77	0.05

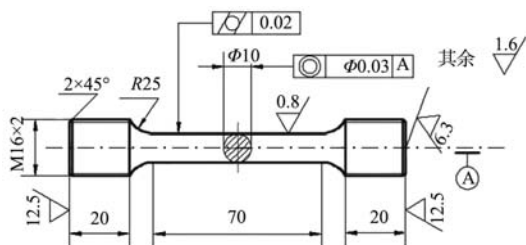


图1 拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tensile specimen

200目、600目和1200目SiC砂纸进行磨抛,磨抛结束后采用9  $\mu\text{m}$ 、3  $\mu\text{m}$ 、1  $\mu\text{m}$ 和0.02  $\mu\text{m}$ 抛光液对试样进行抛光。在ZEISS Imager A2m金相显微镜下观察合金的凝固组织。每个试样选取10个视场,采用ProImaging金相分析软件统计合金中 $\alpha$ -Al的晶粒尺寸和针状共晶硅含量,并对统计的结果取平均值。采用TD3500 X射线衍射仪对合金进行物相分析;通过WDW3100微控电子万能拉伸试验机检测合金样品的力学性能。最后,采用JMatPro13.2软件模拟计算合金中析出相情况并在ZEISS EVO18扫描电镜下进行观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 合金中析出相

图2为通过JMatPro13.2软件模拟计算得到的AlSi9Cu3合金中的析出相情况。可以看出,AlSi9Cu3合金室温下的析出相主要为AlFeSi相、Al<sub>2</sub>Cu相和Al<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub>相。

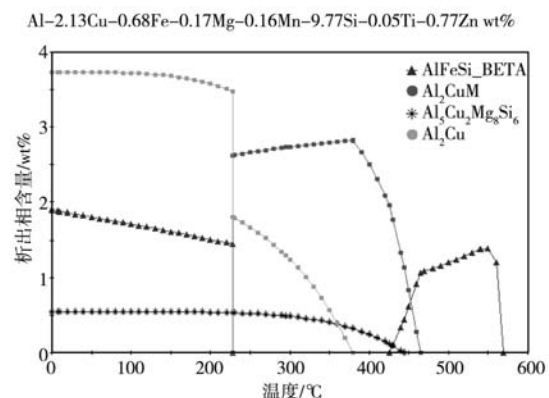


图2 AlSi9Cu3合金中析出相模拟结果

Fig. 2 Simulation results of precipitated phases of the AlSi9Cu3 alloy

图3和图4分别为AlSi9Cu3合金中析出相SEM和EDS分析结果。可以看出,在合金的凝固组织中存在少量骨骼状和针状浅灰色析出相,能谱结果显示,其成分主要为Al、Si、Fe元素。相关研究表明<sup>[14]</sup>,当合金中含量 $\text{Fe} > \text{Si}$ 时,铝合金中容易形成富Fe化合物 $\alpha$  (Al<sub>12</sub>Fe<sub>3</sub>Si)相,而当合金中含量 $\text{Si} > \text{Fe}$ 时,铝合金中容易形成富Si化合物 $\beta$  (Al<sub>9</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>)相。 $\beta$  (Al<sub>9</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>)相呈粗大针状,既硬又脆,使铝合金的塑性急剧下降。结合JMatPro13.2软件预测结果和EDS分析结果,该骨骼状析出相可能为 $\alpha$  (Al<sub>12</sub>Fe<sub>3</sub>Si)相,针状析出相可能为 $\beta$  (Al<sub>9</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>)相。

另外,SEM和EDS结果显示,在AlSi9Cu3合金中存在极少量深灰色骨骼状析出相,其成分主要为Al、Mg、Si、Cu元素。相关研究表明<sup>[14]</sup>,当铝合金中 $\text{Mg}/\text{Si}$ 小于1.08时,有利于Q相的形成,而本试验中 $\text{Mg}/\text{Si}$ 仅为0.0174。结合JMatPro软件预测结果,该深灰色骨骼

状析出相可能为Q ( $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ )相(图5)。

众所周知,当铝合金中存在Cu、Mg元素时,其极易与Al元素结合形成 $\theta$ - $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相或S- $\text{Al}_2\text{CuMg}$ 相<sup>[14]</sup>。根据能谱分析结果(图6),合金中白亮色骨骼状析

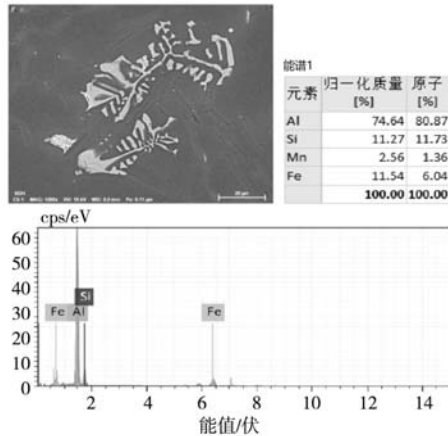


图3 AlSi9Cu3合金中 $\alpha$  ( $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$ )析出相

Fig. 3 Precipitated phase of  $\alpha$  ( $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$ ) in the AlSi9Cu3 alloy

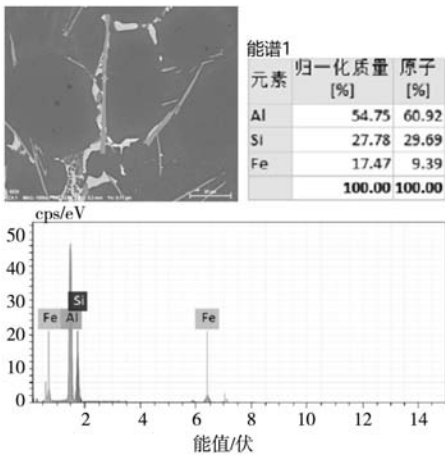


图4 AlSi9Cu3合金中的 $\beta$  ( $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ )析出相

Fig. 4 Precipitated phase of  $\beta$  ( $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ ) in the AlSi9Cu3 alloy

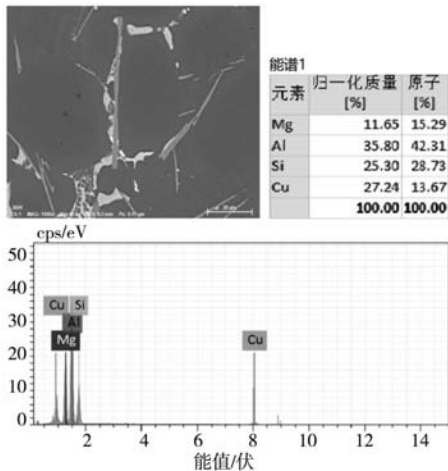


图5 AlSi9Cu3合金中的Q ( $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ )析出相

Fig. 5 Precipitated phase of Q ( $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ ) in the AlSi9Cu3 alloy

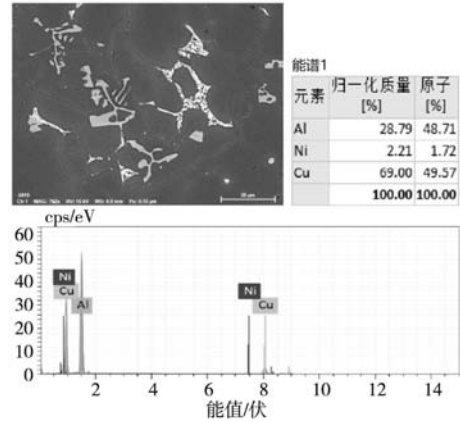


图6 AlSi9Cu3合金中的 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 析出相

Fig. 6 Precipitated phase of  $\text{Al}_2\text{Cu}$  in the AlSi9Cu3 alloy

出相为 $\theta$ - $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相。另外,结合JMatPro13.2软件预测结果,高温下合金中含Mg相主要为S- $\text{Al}_2\text{CuMg}$ 相和Q ( $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ )相。当合金温度降至228.10  $^{\circ}\text{C}$ 时,S- $\text{Al}_2\text{CuMg}$ 相瞬间消失,同时伴随 $\theta$ - $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相和Q ( $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ )相的逐渐增多。这可能是由于在此温度下,S- $\text{Al}_2\text{CuMg}$ 相由于相变全部转变为 $\theta$ - $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相和Q ( $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ )相。因此,室温下未发现S- $\text{Al}_2\text{CuMg}$ 相的存在。

图7为AlSi9Cu3合金的XRD分析结果。可以看出,AlSi9Cu3合金中的相主要包括 $\alpha$ -Al相、Si相、 $\theta$ - $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相和AlSiFe相。这与SEM、EDS检测结果及JMatPro13.2软件预测结果一致。另外,在XRD分析结果中未发现Q ( $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ )相谱峰的存在,这主要是由于合金中Q ( $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ )相的含量较少,同时检测设备的精度有限。

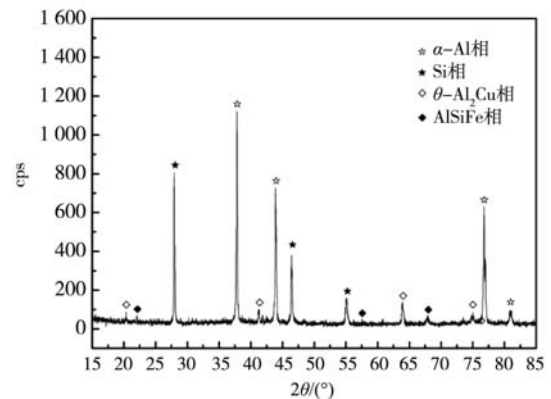


图7 AlSi9Cu3合金XRD分析结果

Fig. 7 XRD analysis results of the AlSi9Cu3 alloy

## 2.2 浇注温度对AlSi9Cu3合金凝固组织及力学性能的影响

图8为模具温度100  $^{\circ}\text{C}$ ,浇注温度分别为720  $^{\circ}\text{C}$ 、700  $^{\circ}\text{C}$ 、680  $^{\circ}\text{C}$ 和660  $^{\circ}\text{C}$ 下AlSi9Cu3合金的凝固组织。

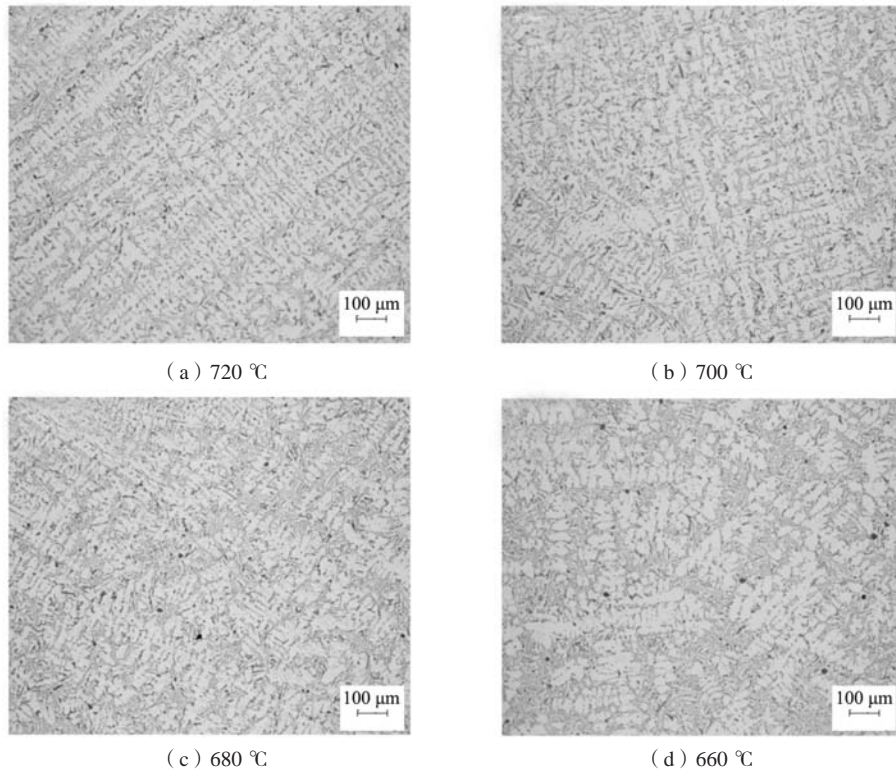


图8 AlSi9Cu3合金不同浇注温度下的凝固组织

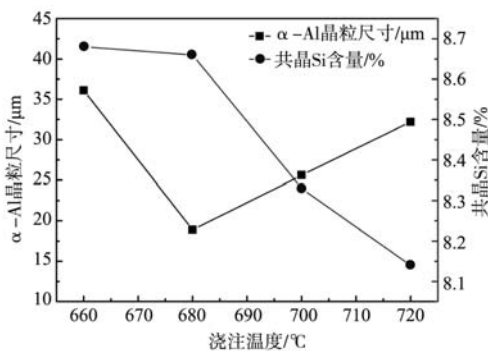
Fig. 8 Solidification microstructures of the AlSi9Cu3 alloy under different pouring temperatures

可以看出,合金的凝固组织以初生 $\alpha$ -Al枝晶组织和针状共晶硅为主。当浇注温度为720 $^{\circ}$ C时,合金组织主要为粗大的柱状枝晶,组织均匀性较差。当浇注温度降至680 $^{\circ}$ C时,合金中 $\alpha$ -Al晶粒分布最为均匀、细小,类等轴 $\alpha$ -Al晶粒数量最多。随浇注温度进一步降低至660 $^{\circ}$ C,合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸逐渐增大,组织均匀性逐渐恶化。

图9为合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸和针状共晶硅含量随浇注温度的变化规律。可以看出,随浇注温度的降低,合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸先减小后增大,针状共晶硅含量逐渐增多。当浇注温度为720 $^{\circ}$ C时,合金中 $\alpha$ -Al

晶粒尺寸为32.2 $\mu$ m,针状共晶硅含量最少为8.14%;当浇注温度降至680 $^{\circ}$ C时,合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸最小为18.9 $\mu$ m,针状共晶硅含量略微增大至8.66%;当浇注温度进一步降低至660 $^{\circ}$ C时,合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸急剧增大至36.1 $\mu$ m,针状共晶硅含量略增加至8.68%。

合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸随浇注温度的降低先减小后增大主要是由于:一方面,浇注温度过高,熔体冷却速度降低,合金过冷度减小,形核率减小,因此晶粒尺寸增大;另一方面,浇注温度过高,金属熔体过热度大,熔体倒入铸型后由于激冷作用,晶体体积自由能的降低足以补偿表面能的增加,使枝晶有足够的空间长大且不易互相抵触,从而形成粗大的枝晶组织;此外,熔体释放的热量使得铸型温度迅速升高,从而减小了合金的凝固速度,延长了合金的凝固时间,导致初生相长大时间增加,因此晶粒较为粗大<sup>[11, 15]</sup>。浇注温度过低,熔体冷却速度较快,铝熔体表面与空气接触,极易在浇注前就部分发生凝固,凝固后的组织继续长大、粗化。另外,由于温度较低,熔体粘度变得很大,表面张力随之增加,浇注时很容易卷入表面的凝固层,造成合金组织均匀性的下降<sup>[11, 16]</sup>。浇注温度的降低利于共晶硅相的析出可能是由于浇注温度低,冷却速度大,合金在凝固过程中 $\alpha$ -Al首先形核、长大,并将硅原子排向固液界面前沿,使液相中的硅出现富集,因此凝固后合金中针状共晶硅的数量相对

图9 不同浇注温度下 $\alpha$ -Al晶粒尺寸和针状共晶硅含量Fig. 9 Grain sizes of the  $\alpha$ -Al and acicular eutectic silicon contents under different pouring temperatures

较多<sup>[17]</sup>。

图10和图11为模具温度100℃，浇注温度分别为720℃、700℃、680℃和660℃下AlSi9Cu3合金的力学性能。结果表明，当浇注温度为720℃时，合金的抗拉强度为251 MPa；当浇注温度降至680℃时，合金的抗拉强度最大达到285 MPa；当浇注温度进一步降至660℃时，合金的抗拉强度急剧减小至236 MPa。这可能是因为当浇注温度为720℃时，由于浇注温度过高，金属液吸气倾向增大，同时由于晶粒较为粗大，因此抗拉强度相对较差；当浇注温度降至660℃时，试样内部晶粒较为粗大，组织均匀性较差，同时过低的浇注温度还会导致合金产生浇不足、冷隔等铸造缺陷及针状共晶硅数量的增多，因此抗拉强度急剧减小<sup>[12, 18]</sup>。

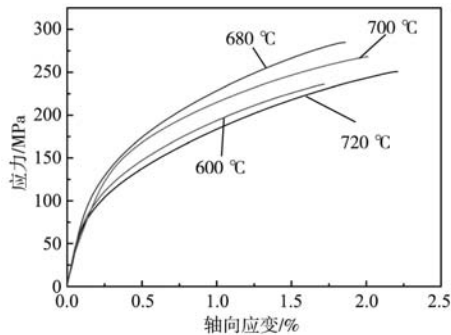


图10 不同浇注温度下拉伸试样的应力-应变曲线  
Fig. 10 Stress strain curves of the tensile specimens under different pouring temperatures

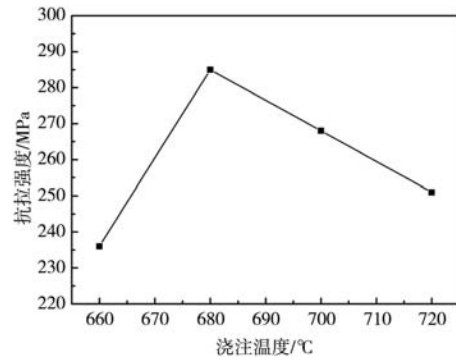


图11 不同浇注温度下AlSi9Cu3合金的力学性能  
Fig. 11 Mechanical properties of the AlSi9Cu3 alloy under different pouring temperatures

### 2.3 模具温度对 AlSi9Cu3 合金凝固组织及力学性能的影响

图12为浇注温度680℃，模具温度分别为20℃、100℃、150℃、200℃和300℃下AlSi9Cu3合金的凝固组织。可以看出，合金的凝固组织以初生 $\alpha$ -Al枝晶组织和针状共晶硅为主。随模具温度的升高，合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸逐渐增大。当模具温度为20℃时，初生 $\alpha$ -Al为细小的枝晶组织且轮廓清晰；当模具温度升高至100℃时，在合金中出现了少量类等轴 $\alpha$ -Al晶粒且组织分布较为均匀；随模具温度的进一步升高，粗大树枝状和块状 $\alpha$ -Al晶粒数量逐渐增多。

图13为合金初生 $\alpha$ -Al晶粒尺寸和共晶硅含量随模具温度的变化规律。可以看出，随模具温度的升高，

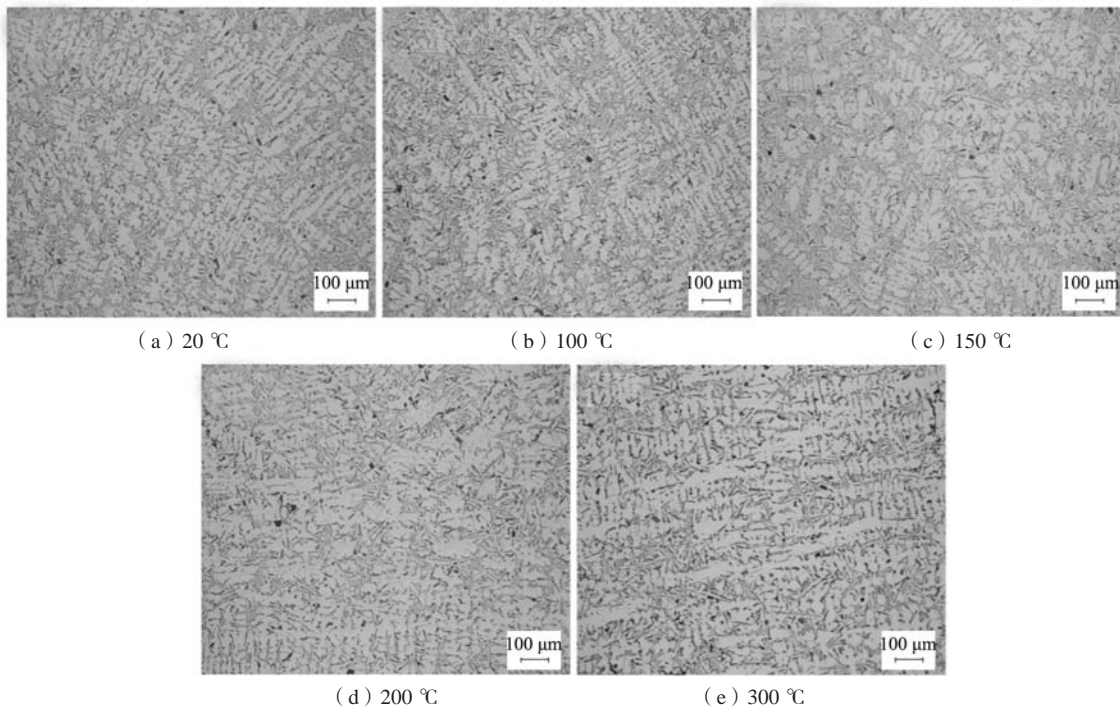


图12 AlSi9Cu3合金不同模具温度下的凝固组织  
Fig. 12 Solidification microstructures of the AlSi9Cu3 alloy under different mold temperatures

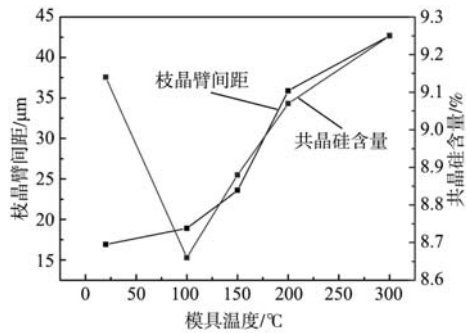


图13 不同模具温度下 $\alpha$ -Al晶粒尺寸和针状共晶硅含量  
Fig. 13 Grain sizes of the  $\alpha$ -Al and acicular eutectic silicon contents under different mold temperatures

初生 $\alpha$ -Al晶粒尺寸逐渐增大, 针状共晶硅含量先减少后增加。当模具温度为20℃时,  $\alpha$ -Al晶粒尺寸最小为16.9  $\mu\text{m}$ , 针状共晶硅含量最高达到9.14%; 当模具温度升高至100℃时,  $\alpha$ -Al晶粒尺寸略增大至18.9  $\mu\text{m}$ , 针状共晶硅含量减少至8.66%; 当模具温度进一步升高至300℃,  $\alpha$ -Al晶粒尺寸急剧增大至42.7  $\mu\text{m}$ , 针状共晶硅含量最高达到9.25%。

合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸随模具温度的降低逐渐减小主要是由于低模具温度下合金的凝固速率较大,  $\alpha$ -Al的形核温度、共晶反应温度和固相线温度较低, 合金在凝固过程中将获得更大的过冷度, 因此凝固后 $\alpha$ -Al晶粒尺寸较小<sup>[19-20]</sup>。针状共晶硅含量随模具温度的升高逐渐减少主要是由于溶质原子在固相中的反向扩散均质化以及晶粒长大的时间受到限制所导致。根据Al-Si二元共晶相图可知, 随着温度的缓慢降低, 液相中开始析出 $\alpha$ -Al固溶体, 液相和固相分别沿着液相线和固相线变化。模具温度较低, 合金冷却速度较大, 凝固过程将会偏离平衡凝固, 溶质原子的均质化和晶粒的长大都会受到限制, 形成一定量的伪共晶组织, 从而导致相同成分的合金在不同的冷却速率下其共晶组织体积分数有所差异<sup>[19-20]</sup>。然而, 随模具温度进一步升高至150℃以上时, 由于冷却速度较慢, 针状共晶硅将会有足够的时间析出, 因此其含量逐渐增多。

图14和图15为浇注温度680℃, 模具温度分别为20℃、100℃、150℃、200℃和300℃下AlSi9Cu3合金的力学性能。结果表明, 随模具温度的升高, 合金的抗拉强度先升高后降低。当模具温度为20℃时, 合金的抗拉强度为245 MPa; 当模具温度为100℃时, 合金的抗拉强度最高达到285 MPa; 随模具温度进一步升高至300℃, 合金的抗拉强度逐渐降低至239 MPa。这可能是由于当模具温度为20℃时, 合金 $\alpha$ -Al晶粒尺寸虽然最小, 但由于针状共晶硅含量较多, 其对基底的割裂倾向较为严重, 因此抗拉强度较差。当模具温度升高至100℃时, 合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸较小, 同时

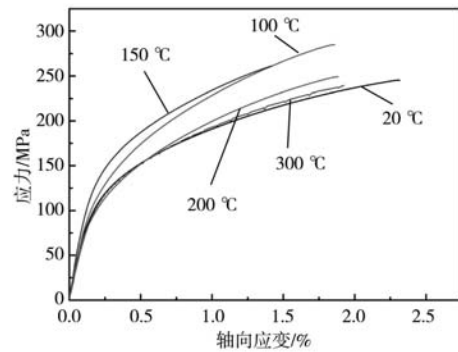


图14 不同模具温度下拉伸试样的应力-应变曲线  
Fig. 14 Stress strain curves of the tensile specimens under different mold temperatures

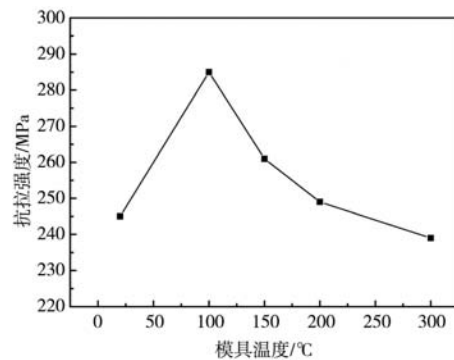


图15 AlSi9Cu3合金不同模具温度下的力学性能  
Fig. 15 Mechanical properties of the AlSi9Cu3 alloy under different mold temperatures

针状共晶硅含量较少, 因此抗拉强度达到最大。随模具温度的进一步升高, 合金中的 $\alpha$ -Al晶粒尺寸逐渐增大, 同时针状共晶硅数量逐渐增加, 从而加剧对基底组织的割裂倾向, 因此抗拉强度逐渐减小。

### 3 结论

(1) AlSi9Cu3合金中的析出相主要包括 $\alpha$ -Al<sub>12</sub>Fe<sub>3</sub>Si相、 $\beta$ -Al<sub>19</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>相、Al<sub>2</sub>Cu相和Q (Al<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub>)相, 其中Al<sub>2</sub>Cu相和Q (Al<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub>)相为合金中的主要强化相。

(2) 随浇注温度的降低和模具温度的升高, 合金中 $\alpha$ -Al晶粒尺寸先减小后增大, 针状共晶硅含量逐渐增多。当浇注温度为680℃、模具温度为100℃时, 合金 $\alpha$ -Al晶粒尺寸较小为18.9  $\mu\text{m}$ , 针状共晶硅含量为8.66%, 组织均匀性达到最佳。

(3) 随浇注温度的降低和模具温度的升高, 合金的抗拉强度先升高后降低; 当浇注温度为680℃、模具温度为100℃时, 合金的抗拉强度最大, 达到285 MPa。

## 参考文献:

- [1] TILLOVA E, CHALUPOVA M, HURTALOVA L. Evolution of the Fe-rich phases in recycled AlSi9Cu3 cast alloy during solution treatment [J]. Communications-Scientific Letters of the University of Zilina, 2010, 12 (4): 95-101.
- [2] GAIN S, SILVA T E F, JESUS AMP, CAVALEIRO A, et al. Mechanical characterization of the AlSi9Cu3 cast alloy under distinct stress states and thermal conditions [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 216: 106499.
- [3] CHARNNARONG S, WIENGWISSET S. Optimization of molding sand composition for quality improvement of iron castings [J]. Applied Clay Science, 2012, 67: 26-31.
- [4] 许志强, 安仲健, 雷振尧, 等. 机械振动对AlSi9Cu3亚快速凝固组织的影响 [J]. 铸造, 2015, 64 (12): 1209-1213.
- [5] BARBOSA J, PUGA H. Ultrasonic melt treatment of light alloys [J]. International Journal of Metalcasting, 2019, 13 (1): 180-189.
- [6] 印厚尚, 张松利, 梁智, 等. 热处理对原位 (ZrB<sub>2</sub>+TiB<sub>2</sub>) 增强AlSi9Cu3复合材料组织和性能的影响 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (7): 1554-1558.
- [7] 汪闵, 赵玉涛, 陶然, 等. Sr对AlSi9Cu3合金组织与力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (6): 1153-1157.
- [8] 赵忠兴, 赵慧, 耿德军, 等. 铝合金精炼与变质复合工艺的试验研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (6): 573-575.
- [9] 李干, 罗吉荣, 宋象军, 等. 高温铝液的Sr-RE复合变质研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2001 (5): 16-17.
- [10] 高丽娜, 马丽娟, 曹伟产. 变质剂对ZL101铝合金吸气量及力学性能影响 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (4): 804-807.
- [11] 刘政, 徐丽娜, 白光珠, 等. 电磁搅拌与浇注温度对半固态A356铝合金中微量稀土细化初生相的影响 [J]. 材料导报 B: 研究篇, 2016, 30 (3): 89-95.
- [12] 陈才, 陈建立. 铸造浇注温度对电器外壳用铝合金性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (3): 81-83.
- [13] 胡世平, 陈乐平, 周全, 等. 脉冲磁场对AZ31镁合金组织及压缩性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (5): 556-559.
- [14] 王群骄. 有色金属热处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [15] 苑高利, 钱伟涛, 葛素静, 等. ADC10 铝合金凝固组织调控及力学性能研究 [J]. 铸造, 2022, 71 (7): 833-838.
- [16] W MAO, Y BAI, G TANG. Preparation for semi-solid aluminum alloy slurry under weak electromagnetic stirring conditions [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2006, 22 (4): 447-451.
- [17] 黄龙辉, 邵光杰, 杨弋涛. 冷却速度对A356铝合金铸件组织影响的定量分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008年年会专刊: 165-167.
- [18] 石帅, 闫俊, 范卫忠, 等. 浇注温度对重力铸造Al-10Si-0.3Mg合金力学性能和热导率的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (6): 695-699.
- [19] CHEN R, SHI YF, XU QY, et al. Effect of cooling rate on solidification parameters and microstructure of Al-7Si-0.3 Mg-0.15 Fe alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (6): 1645-1652.
- [20] 刘颖卓, 党波, 刘峰. 冷却速率对A356铝合金显微组织和微观硬度的影响 [J]. 西安工业大学学报, 2013, 33 (2): 128-133.

## Effect of Pouring Process on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi9Cu3 Alloy

HAO Chun-lai, LI Zhen, HE Li-jie, WANG Xiao-min, BAO Xin-lei, ZHANG Jia-ming  
(College of Materials Science and Engineering, Yingkou Institute of Technology, Yingkou 115100, Liaoning, China)

### Abstract:

The effects of pouring temperature and mold temperature on the solidification microstructure and mechanical properties of AlSi9Cu3 alloy were studied by direct reading spectrometer, metallographic microscope, tensile testing machine, JMatPro software, scanning electron microscope and X-ray diffractometer. The results showed that the solidification microstructure of the alloy was primary  $\alpha$ -Al and acicular eutectic silicon. As the temperature of pouring decreased, the grain size of  $\alpha$ -Al first decreased and then increased. The content of acicular eutectic silicon gradually increased. The tensile strength of the alloy first increased and then decreased. With the temperature of the mold temperature increased, the grain size of the  $\alpha$ -Al increased gradually, the content of the acicular eutectic silicon decreased first and then increased. The mechanical properties of the AlSi9Cu3 alloy were the best when the pouring temperature was 680 °C and the mold temperature was 100 °C.

### Key words:

AlSi9Cu3 alloy; pouring temperature; mold temperature; solidification microstructure; mechanical properties