

# P对过共晶A390合金铸态组织和力学性能的影响

石为喜, 鲁毅, 汤梦超, 李佳露, 李晓晨, 李贵茂

(辽宁科技学院 冶金工程学院, 辽宁本溪 117004)

**摘要:** 采用Cu-14%P对过共晶A390合金进行变质处理。结果表明, P对A390合金中的初生硅有明显的细化作用, 初生硅的晶粒尺寸从未变质的40~50 μm细化至10~20 μm, 其尖角钝化, 灰色CuAl<sub>2</sub>相明显增多, 共晶硅由长针状变为短棒状。XRD分析结果表明, 在变质后的A390合金中检测到AlP中间相。力学性能测试表明, 合金的抗拉强度从变质前的178 MPa提高到变质后的219 MPa, 提高了23.0%; 合金的伸长率从未变质0.28%提高到变质后的1.42%。

**关键词:** 过共晶铝硅合金; P变质; 初生硅; 力学性能

## 作者简介:

石为喜(1976-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为稀土在铸造合金中的应用及耐磨材料的制备工艺与性能。E-mail: jacksnow0822@qq.com

中图分类号: TG146.2;  
TG113

文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2022)  
03-0331-05

## 基金项目:

2021年辽宁科技学院大学生创新创业训练计划项目“基于过共晶铝硅合金变质处理的新型含稀土复合变质剂的研制”(202111430078); 辽宁省教育厅基本科研项目(面上项目)(LJKZ1066); 辽宁省自然科学基金(20180550265)。

## 收稿日期:

2021-05-24 收到初稿,  
2021-08-29 收到修订稿。

A390合金是一种美国常用的铝合金牌号, 其中硅含量为16%~18%, 还含有铜、镁等合金元素, 该合金属于典型的过共晶铝硅合金。A390合金以耐磨性好、耐腐蚀性优良、较低的密度、热膨胀系数低和良好的铸造性能等, 被广泛应用于制造发动机活塞等有较高耐磨性要求的汽车零部件<sup>[1-2]</sup>。在传统铸造条件下制得的A390合金, 在未经变质处理的A390合金中的初生硅组织一般以粗大的多角块状或板片状出现, 共晶硅组织则以长针状出现。未经细化处理的A390合金, 其耐磨性能和力学性能均较差, 需要对其进行变质细化处理<sup>[3-4]</sup>。

磷是一种被公认的能够细化过共晶铝硅合金中初生硅的优良的变质剂。在对过共晶铝硅合金中初生硅进行细化处理时大多以Al-P、Cu-P、赤磷和磷盐等中间合金形式加入其中<sup>[5-7]</sup>。因此, 本试验以Cu-14%P作为变质剂, 将其加入过共晶A390合金中对其进行变质处理, 研究其对合金的组织 and 力学性能的影响。

## 1 试验方法

**变质工艺过程:** 称取A390合金, 将其放置于井式电阻炉中的石墨坩埚内, 调节温控仪升温至780 ℃, 待其完全熔化后, 用石墨棒搅拌合金液, 除去表面浮渣, 将用铝箔包好的Cu-14%P合金于780 ℃加入石墨坩埚中, 变质保温30 min后, 用C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>对合金液进行除气精炼处理, 保温10 min后除渣, 将合金液于780 ℃下浇注到长方形铁质模具中, 得到合金铸锭。

利用线切割割成Φ15 mm × 15 mm的试样, 按金相制样程序制得样品, 其表面用0.5wt% HF酸腐蚀用于微观组织观察。用金相显微镜(型号为蔡司Axio Imager M2m型)、扫描电镜(型号为蔡司EVO18型扫描电镜, 装有牛津X-Max能谱仪)和X射线衍射仪(型号为布鲁克D8-ADVANCE型)对变质前后的A390合金样品表面形貌及物相的变化进行测试和分析。用车床将金属锭车成Φ15 mm × 150 mm标准拉伸试样用于力学性能测试。拉伸试验采用WAW100型电液伺服万能材料试验机, 在室温条件下以1 mm/min的位移速度进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微观组织

采用金相显微镜对过共晶A390合金变质前后的铸态组织形貌进行观察, P变质

剂的加入量为0.8%，如图1所示。

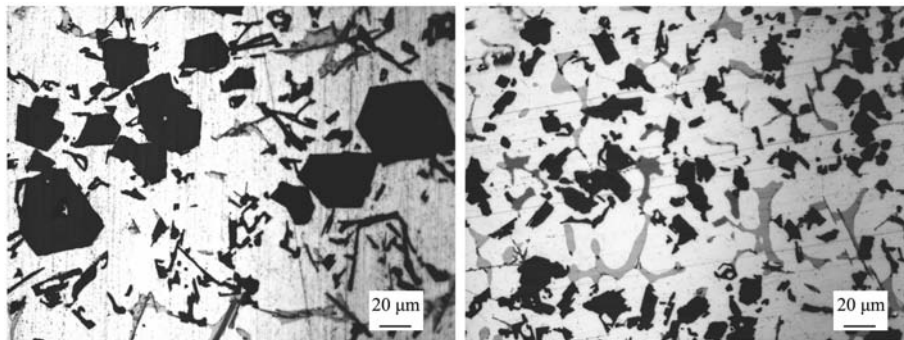
从图1可以看到，A390合金的铸态组织是由初生硅、共晶硅、(Al)和灰色的组织构成。图1中深黑色有棱角的板块状初生硅，黑色长针状共晶硅和灰色CuAl<sub>2</sub>相（由XRD和SEM证实存在该相组织）分布于白色铝基体组织上。经0.8%P变质处理后，A390合金中的初生硅的晶粒尺寸明显减小，从未变质的40~50 μm细化至10~20 μm，其尖角形状部分变得圆润，发生了钝化，灰色CuAl<sub>2</sub>相明显增多，共晶硅由长针状变为短棒

状。由此可得出，变质剂P对A390合金中初生硅相细化的同时，对其形态也有影响。

## 2.2 XRD 分析

采用X射线衍射仪对未变质和0.8%P变质后的A390合金试样进行XRD分析，研究A390合金变质前后相的变化情况，如图2所示。

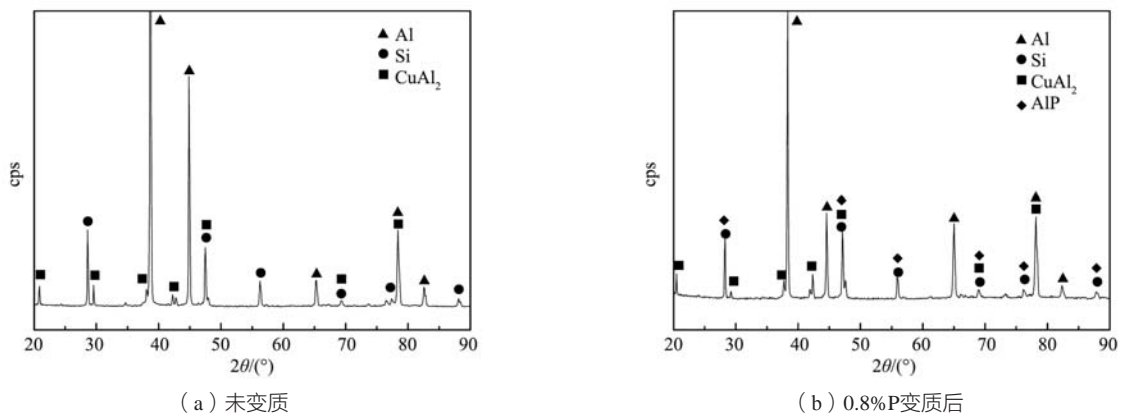
由图2可知，P变质前后的A390合金试样中均检测到了Al、Si和CuAl<sub>2</sub>的衍射峰。此外，在0.8%P变质后



(a) 未变质 (b) 0.8%P变质后

图1 A390合金变质前后的微观组织

Fig. 1 Microstructure of A390 alloy before and after modification



(a) 未变质

(b) 0.8%P变质后

图2 A390合金的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of A390 alloy

的试样中还检测到了AIP的衍射峰，如图2b所示。相对于Si相的衍射峰，图谱上显示出的六条不同角度的AIP化合物的衍射峰与Si相的衍射峰完全对应，AIP的晶格常数为0.542 nm，而Si的晶格常数为0.545 nm，两者非常接近。这说明在A390合金液中加入P变质剂后，P与Al可生成大量的AIP中间相，AIP的熔点为1 000 °C，可作为初生硅的异质形核核心，从而使初生硅得到细化。

## 2.3 SEM 分析

对0.8%P变质后的A390合金进行扫描电镜分析，如图3所示。

从图3可以看出三种组织，分别为不规则的浅灰色

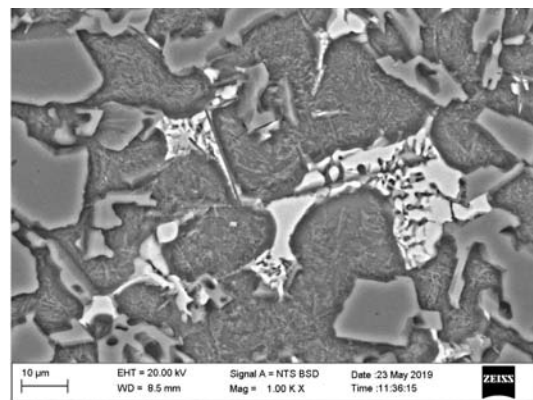


图3 0.8%P变质后的A390合金的SEM图

Fig. 3 SEM image of A390 alloy modified by 0.8% P

组织、深灰色板块状组织和深灰色针状组织。对图3中的浅灰色组织进行成分分析，如图4所示。

经扫描电镜EDS成分分析，浅灰色组织元素成分比例如表1所示。其中Si的原子分数只有0.78%，Al和Cu原子分数分别为38.39%和16.74%，Al和Cu的原子比大约为2：1左右，因此判断该浅灰色组织为CuAl<sub>2</sub>相。

对图3中的深灰色板块状组织进行成分分析，如图5所示。

经扫描电镜EDS成分分析，深灰色板块状组织元素成分比例如表2所示。其中Cu的原子分数只有0.66%，Al和Si原子分数分别为12.25%和51.15%，Al和Si的原子比大约为1：4左右，远高于A390合金的Si平均含量16%~18%，结合其组织形貌特征，可判定该板块组织即为初生硅相。

对图3中的深灰色针状组织进行成分分析，如图6

所示。

经扫描电镜EDS成分分析，深灰色针状组织元素成分比例如表3所示。其中Cu的原子分数只有1.66%，Al和Si原子分数分别为16.10%和56.00%，Al和Si的原子比大约为1：3.5左右，同样也远高于A390合金的Si平均

表1 浅灰色组织EDS成分  
Table 1 EDS composition of light gray microstructure

元素	质量分数/%	原子分数/%
C K	16.20	36.19
O K	4.72	7.91
Al K	38.61	38.39
Si K	0.82	0.78
Cu K	39.65	16.74
总量	100.00	

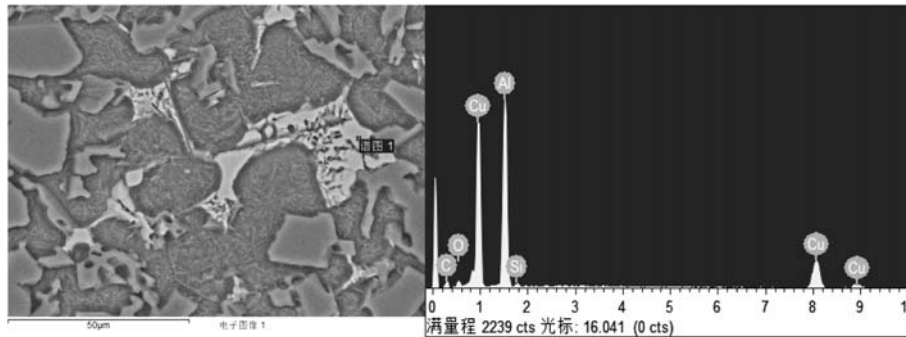


图4 浅灰色组织的EDS能谱  
Fig. 4 EDS spectrum of light gray microstructure

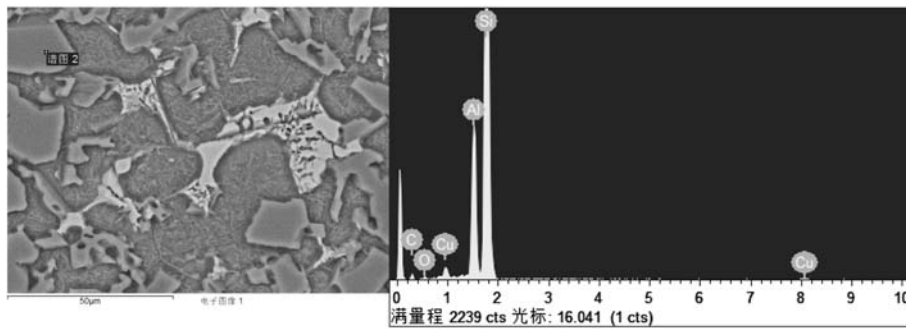


图5 深灰色板块状组织的EDS能谱  
Fig. 5 EDS spectrum of dark gray plate microstructure

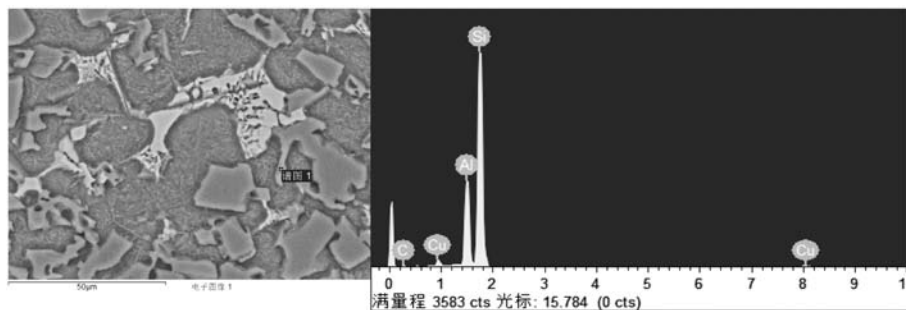


图6 针状组织的EDS能谱  
Fig. 6 EDS spectrum of needle like structure

表2 深灰色板状组织EDS成分  
Table 2 EDS composition of dark gray plate microstructure

元素	质量分数/%	原子分数/%
C K	17.60	33.00
O K	2.09	2.94
Al K	14.67	12.25
Si K	63.79	51.15
Cu K	1.85	0.66
总量	100.00	

表3 针状组织EDS成分  
Table 3 EDS composition of needle like microstructure

元素	质量分数/%	原子分数/%
C K	12.98	26.23
Al K	17.89	16.10
Si K	64.78	56.00
Cu K	4.34	1.66
总量	100.00	

含量, 结合其组织形貌特征, 可判定该深灰色针状组织即为共晶硅相。

## 2.4 拉伸试验

A390合金的抗拉强度和伸长率如图7所示。经0.8%P变质处理后, A390合金样品的力学性能提升较为明显。合金的抗拉强度从变质前的178 MPa提高到变质后的219 MPa, 提高了23.0%; 合金的伸长率也提升明显, 从未变质0.28%提高到变质后的1.42%。

未经变质细化处理的合金试样力学性能较低是由于合金中存在着粗大板状块的初生硅相和长针状的共晶硅相, 对基体产生严重的割裂作用, 在其硅相的棱边及尖角处往往易形成应力集中, 因此未变质合金的抗拉强度和伸长率均较差。变质后的合金, 其硅相

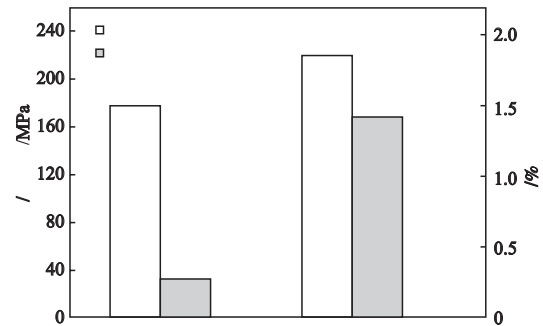


图7 A390合金的力学性能  
Fig. 7 Mechanical properties of A390 alloys

组织明显细化, 尖角钝化, 形状得到改善, 降低了其对基体的割裂作用, 同时以Cu-14%P作为变质剂加入合金中, 当P的加入量为0.8%时, Cu的加入量大约为4.91%。Cu含量增加, CuAl<sub>2</sub>相含量亦增加, 对于合金的力学性能的提升也有着积极的作用, 增强了合金的塑性, 因此合金的力学性能提升较为明显。

## 3 结论

(1) P对A390合金中的初生硅有着明显的细化作用, 初生硅的晶粒尺寸从未变质的40~50 μm细化至10~20 μm, 其尖角钝化, 其变质机理基本符合异质形核理论, 灰色CuAl<sub>2</sub>相组织明显增多, 共晶硅由长针状变为短棒状。

(2) XRD分析结果表明, 在变质后的A390合金中检测到AlP中间相。

(3) 力学性能测试表明, 变质后合金的力学性能提升较为明显。合金的抗拉强度从变质前的178 MPa提高到变质后的219 MPa, 提高了23.0%; 合金的伸长率也有较大变化, 从未变质0.28%提高到变质后的1.42%。

### 参考文献:

- [1] 曹明, 林继兴, 章海彪. 混合稀土变质对A390铝合金组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (23): 36-38.
- [2] 石为喜, 杜成武, 李贵茂, 等. LaCe混合稀土对过共晶A390合金微观组织和力学性能影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (9): 828-830, 835.
- [3] 段海丽, 张恒华, 邵光杰, 等. 铈对过共晶Al-Si合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2005, 54 (12): 1265-1268.
- [4] 刘扭参, 刘忠侠, 陈冲, 等. 复合变质对Al-20%Si合金耐磨性能的影响 [J]. 铸造, 2007, 56 (10): 1095-1097.
- [5] 张广安, 赵兴明, 张明昌, 等. Al-P变质剂制备及其变质效果研究 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (11): 2579-2581.
- [6] 元四华. Al-P中间合金细化变质过共晶铝硅合金显微组织研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (15): 101-102, 106.
- [7] 吴润铎, 王重仁, 吴伟宁, 等. P变质对过共晶Al-22%Si合金组织和性能的影响 [J]. 辽宁科技学院学报, 2019, 21 (5): 4-7.

---

## Effect of P on Cast Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic A390 Alloy

SHI Wei-xi, LU Yi, TANG Meng-chao, LI Jia-lu, LI Xiao-chen, LI Gui-mao

(Department of Metallurgy Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, Liaoning, China)

### Abstract:

The hypereutectic A390 alloy was modified by Cu-14%P. The results showed that P had an obvious refining effect on the primary silicon in the A390 alloy, and the grain size of unmodified primary silicon was refined from 40~50  $\mu\text{m}$  to 10~20  $\mu\text{m}$  after P modification. The sharp corner of the primary silicon was passivated, the gray  $\text{CuAl}_2$  phase structure increased obviously, and the eutectic silicon structure changed from long needle to short rod after P modification. The results of XRD analysis showed that AIP mesophase was detected in the modified A390 alloy. The mechanical properties test showed that the tensile strength of the alloy increased from 178 MPa before modification to 219 MPa after P modification, which increased by 23.0%. The elongation of the alloy increased from 0.28% to 1.42% after P modification.

### Key words:

hypereutectic Al-Si alloys; P modification; primary silicon; mechanical properties

---