

磷变质处理对 Al-12.68Mg-7.32Si 合金组织和力学性能的影响

杜 阳¹, 索忠源², 姜 峰², 景 卫³, 郭兆东³, 付 星³

(1. 吉林化工学院材料科学与工程学院, 吉林省 吉林 132022; 2. 吉林化工学院机电工程学院, 吉林省 吉林 132022;

3. 吉林江机特种工业有限公司计量测试中心, 吉林省 吉林 132021)

摘要: 研究了P变质处理对过共晶Al-12.68Mg-7.32Si合金组织和力学性能的影响。结果表明: 随着P添加量的增加, 合金中初生Mg₂Si形貌由铸态时粗大树枝状和板块状转变为细小的近球状和多边形, 棱角完全钝化, 尖角消失, 其尺寸得到了显著细化, 最小平均尺寸为13.91 μm; 共晶Mg₂Si形貌由长片层状向短片层状、细杆状和颗粒状转变。当P添加量为0.1%时, 合金抗拉强度和伸长率达到最大值, 分别为151.9 MPa和3.12%, 同铸态相比, 抗拉强度提升了96%, 伸长率提升了136%, 合金断裂形式为韧-脆混合断裂。

关键词: Al-12.68Mg-7.32Si合金; 初生Mg₂Si; P变质; 抗拉强度

铝合金因其优异的物理、化学性能被广泛的应用于汽车和船舶等领域^[1-2]。Al-12.68Mg-7.32Si合金属于过共晶Al-Mg₂Si合金, 合金结晶过程中Mg和Si结合形成高熔点的Mg₂Si金属间化合物, Mg₂Si颗粒作为增强体具有熔点高、硬度高、热膨胀系数低和弹性模量高等特点。但铸态Al-12.68Mg-7.32Si合金组织中初生Mg₂Si多以粗大树枝状、板条状和块状形式存在, 合金在受外力作用下, 粗大的初生Mg₂Si相极易割裂基体, 产生应力集中, 严重降低力学性能。变质处理是改善初生Mg₂Si相的常用方法, 常用变质剂有磷^[3]、铋^[4]、锶^[5]、稀土元素(如Y^[6]、Ce^[7]、La^[8]等)或盐类化合物^[9]。同种变质剂对不同成分铝合金的影响效果和作用机理也不尽相同^[10]。目前关于变质处理过共晶Al-Mg₂Si合金的研究相对较少, 关于变质处理过共晶Al-Mg₂Si的变质剂的选择和用量的研究仍有待优化。本文研究P变质剂的添加量对Al-12.68Mg-7.32Si合金组织及力学性能的影响, 并探讨了P变质处理Al-12.68Mg-7.32Si合金的作用机制。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验用Al-12.68Mg-7.32Si合金采用工业纯铝(>99.7%)、纯硅(>99.9%)和工业纯镁(>99.8%)熔炼而成, 合金各成分质量分数见表1所示, Si和P分别以Al-20%Si和Al-3.5%P中间合金的形式加入, 精炼除气剂为六氯乙烷。

1.2 试验方法

合金熔炼前将原材料和工具进行预热, 预热温度为300℃。将纯铝和Al-20%Si

表1 Al-12.68Mg-7.32Si合金化学成分

Table 1 Chemical composition of Al-12.68Mg-7.32Si alloy

w_B/%

Mg	Si	P	Al
12.68	7.32	0.05~0.2	余量

作者简介:

杜 阳(1995-), 男, 在读研究生, 从事变质处理铝合金的组织与性能等方面的研究。E-mail: 1498919339@qq.com

通讯作者:
索忠源, 男, 副教授, 博士。
E-mail: zhy_suo@126.com

中图分类号: TG146.21
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2021)08-0928-05

收稿日期:
2021-02-05 收到初稿,
2021-03-25 收到修订稿。

中间合金放入石墨坩埚中,在井式电阻炉中加热至780℃,待原料完全熔化,降温至750℃取出进行第一次精炼除气。将铝箔包裹的六氯乙烷(加入量为熔体总量的0.3%)用钟罩压入熔体底部,并沿坩埚底部顺时针缓缓转动,除气后,捞出表面浮渣。重新加热至700℃,将铝箔包裹的工业纯镁用钟罩压入熔体底部,轻轻搅拌熔体,静置2 min,升温至780℃,将用铝箔包裹的Al-3.5%P中间合金用钟罩压入合金熔体中(磷的加入量为0~0.2%,间隔0.05%),保温时间为20 min。保温结束后,将温度降至750℃进行第二次除气精炼,扒渣后升温至750℃,浇注到预热300℃的石墨型中,得到金属试棒。采用MPC-400型金相显微镜进行金相组织拍照分析。使用PTI SOFT软件对初生 Mg_2Si 尺寸进行分析。利用D8 FOCUS型X射线衍射仪(扫描速度为0.5 s/step)进行物相分析。采用WDW-100H万能拉伸试验机进行室温拉伸试验,拉伸试样尺寸如图1所示。使用JEOL-JSM-6490LV型扫描电子显微镜进行拉伸断口分析与拍照。

2 试验结果与分析

2.1 金相组织分析

图2a-e为不同P含量处理的Al-12.68Mg-7.32Si合金显微组织。图中可见,铸态组织中,初生 Mg_2Si 形貌为粗大树枝状或板块状,同时初生 Mg_2Si 周边出现尖锐的棱角(图2a)。当加入0.05%的P后合金中初生 Mg_2Si 相形貌发生明显变化,由粗大树枝状转变为多边形(见

图2b)。当P的量达到0.1%时,初生 Mg_2Si 相棱角部位明显钝化,部分初生相呈现近球形(图2c)。继续增加P的含量达到0.15%~0.2%时,合金中初生 Mg_2Si 形貌几乎均为近球形,少部分为多边形,棱角完全钝化,尖角消失,但存在明显偏聚现象;共晶 Mg_2Si 相由长片层状结构向短片层状、细杆状和点状转变(图2d、e所示)。

不同P含量变质对Al-12.68Mg-7.32Si合金中初生 Mg_2Si 相尺寸影响如图3所示。图中可见,随着P的增加,合金组织中初生 Mg_2Si 颗粒尺寸不断减小;当P达到0.2%时,初生 Mg_2Si 相的尺寸达到最小,平均为13.91 μm 。

2.2 晶体结构和成分分析

图4所示为P变质前后Al-12.68Mg-7.32Si合金的X射线衍射图。对比图4a和b后发现,经P变质处理后除了Al和 Mg_2Si 相的衍射峰外,还发现了AlP相的衍射峰。

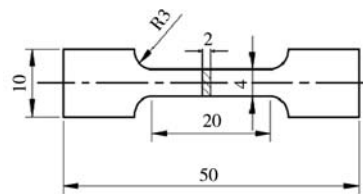
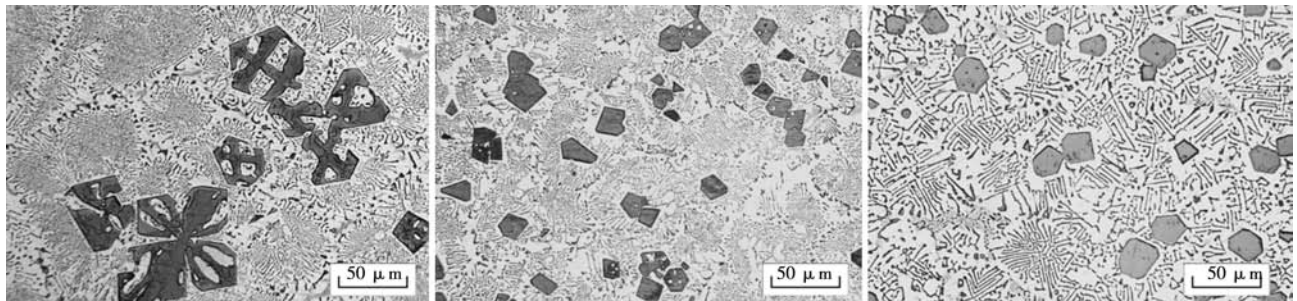


图1 拉伸试样尺寸

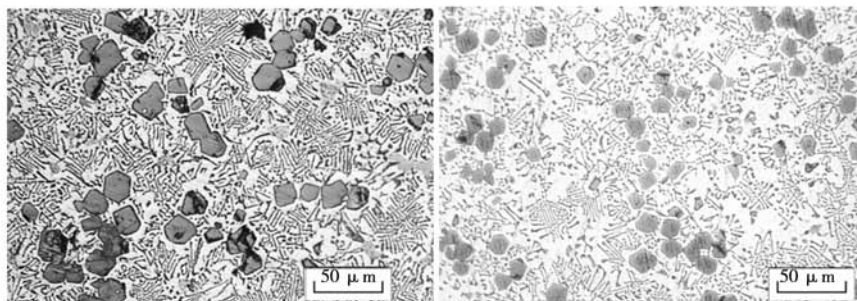
Fig. 1 Dimensions of tensile sample



(a) 铸态

(b) 0.05%P

(c) 0.1%P



(d) 0.15%P

(e) 0.2%P

图2 P含量对Al-12.68Mg-7.32Si合金显微组织的影响

Fig. 2 Effect of P content on microstructure of Al-12.68Mg-7.32Si alloy

当前关于铝合金变质处理作用机制的研究中,普遍接受的机制有异质形核机制^[11]、成分过冷机制^[12]和吸附-毒化机制^[13]。为了进一步探讨P变质处理Al-12.68Mg-7.32Si合金的作用机制,对0.1%P变质处理的Al-12.68Mg-7.32Si合金进行了EDS分析(图5)。从图5的EDS线扫描结果看出,初生Mg₂Si相的中间位置出现了Al和P的波峰,说明此处存在Al元素和P元素,结合图4b中XRD图谱的物相分析,推断形成了AlP电子化合物。因此,P变质处理初生Mg₂Si相的变质机制可以认为是Mg₂Si结晶形核的数目增加,从而细化了初生Mg₂Si相^[3]。

2.3 拉伸试验

图6为不同P含量变质Al-12.68Mg-7.32Si合金的拉伸性能曲线。由图可见,随着P添加量增加,合金的抗拉强度和伸长率呈现先增大后减小的趋势。铸态Al-12.68Mg-7.32Si合金中初生Mg₂Si呈粗大树枝状和板状形式存在,且棱角尖锐,在外力作用下极易割裂基体,引发应力集中,导致合金拉伸性能低。当加入P进行变质处理之后,初生Mg₂Si相的尺寸得到了明显的细化,减弱了初生Mg₂Si相对基体的割裂作用,使合金拉伸性能得到提高。当P的加入量达到0.1%时,抗拉强度和伸长率达到最大值,分别为151.9 MPa和3.12%,此时初生Mg₂Si分散良好,且靠近初生Mg₂Si周围生长出的共晶 α -Al更加圆润,使得初生Mg₂Si相和共晶Mg₂Si相的协同性更好,在合金受力变形过程中表现出更好的拉伸性能。当P的量增加至0.15%~0.2%时,初生Mg₂Si相发生了明显的偏聚现象,在受力变形过程中,在偏聚位置产生应力集中,造成合金拉伸性能下降。

2.4 断口形貌

图7为P变质处理前后Al-12.68Mg-7.32Si合金的扫描断口形貌图。从图7a中可看出,未变质Al-12.68Mg-7.32Si合金的拉伸断口形貌上出现较大的解理刻面和河

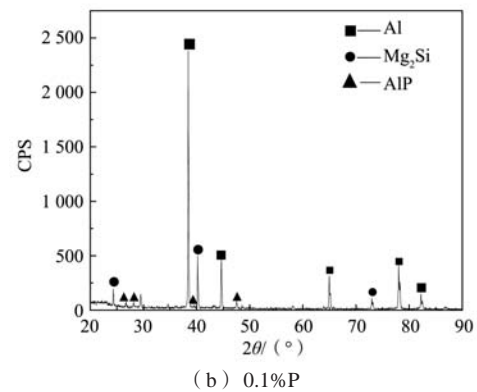
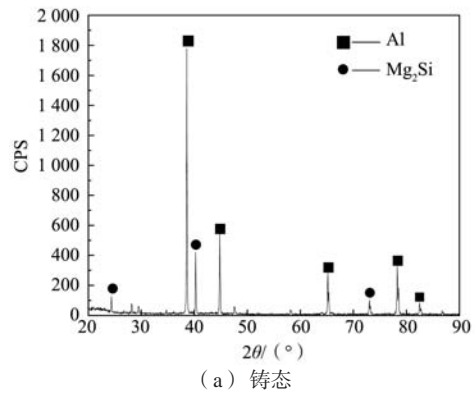


图4 P变质前后Al-12.68Mg-7.32Si合金的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of Al-12.68Mg-7.32Si alloy before and after P modification

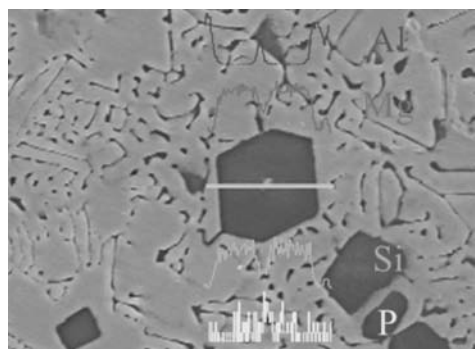


图5 0.1%P变质Al-12.68Mg-7.32Si合金EDS线扫描图

Fig. 5 EDS scanning diagram of Al-12.68Mg-7.32Si alloy with 0.1% P addition

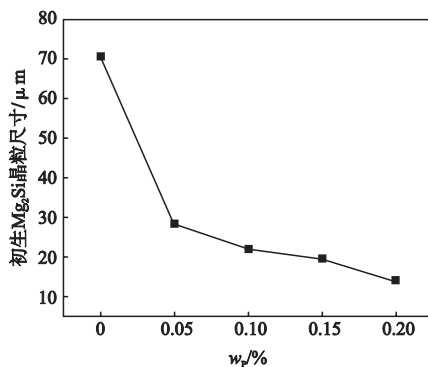


图3 P含量对合金中初生Mg₂Si晶粒尺寸的影响

Fig. 3 Influence of P content on grain size of primary Mg₂Si phase in alloy

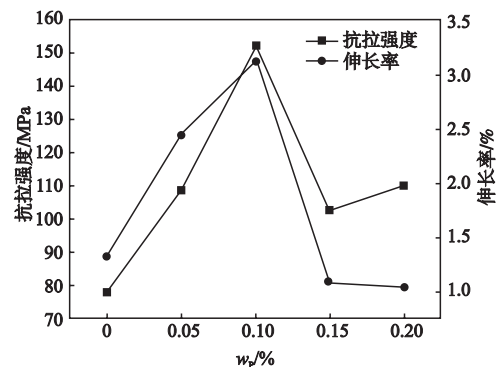


图6 P含量对Al-12.68Mg-7.32Si合金力学性能的影响

Fig. 6 Influence of P content on mechanical properties of Al-12.68Mg-7.32Si alloy

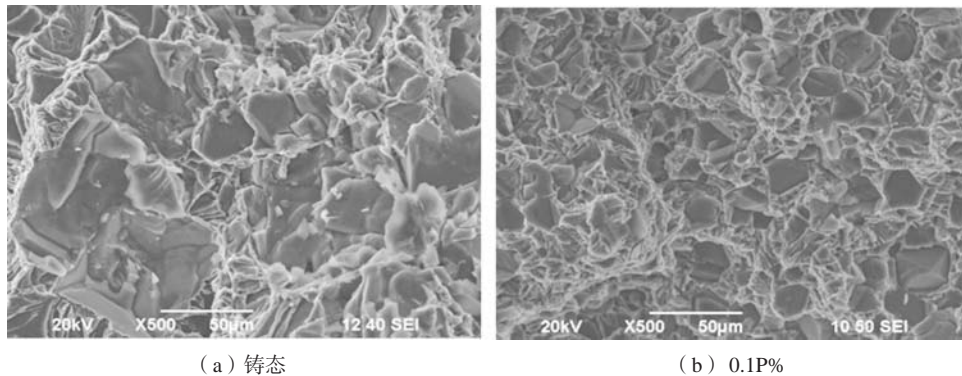


图7 P变质前后Al-12.68Mg-7.32Si合金的拉伸断口图

Fig. 7 Tensile fracture morphologies of Al-12.68Mg-7.32Si alloy before and after P modification

流花样，是典型的解理脆性断裂特征。经过0.1P变质处理后（图7b），断口形貌上的解理面的面积显著减小，同时出现了较多的韧窝，断裂方式变为韧-脆混合断裂。

3 结论

（1）随着P含量增加，初生 Mg_2Si 形貌由粗大树枝

状或板块状向近球状和多边形转变，晶粒尺寸由 $70.66 \mu m$ 细化为 $13.91 \mu m$ ；共晶 Mg_2Si 形貌由长片层状向短片层状、细杆状和颗粒状转变。

（2）当P量为0.1%时，合金抗拉强度和伸长率达到最大值，分别为151.9 MPa和3.12%，同铸态相比，抗拉强度提升了96%，伸长率提升了136%，合金断裂形式为韧-脆混合断裂。

参考文献：

- [1] 钱东伶, 芦富敏, 余忠土, 等. 汽车底盘用铸造铝合金的研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (10): 1077-1082.
- [2] 陈延伟, 刘佳琳, 赵亚鹏. 铸造铝合金在舰船装备应用中存在的问题及发展趋势 [J]. 铸造, 2020, 69 (4): 329-334.
- [3] 郭富强, 陈冲. P对原位合成 $20Mg_2Si/Al-Si$ 复合材料组织与性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (9): 998-1001.
- [4] 任玉艳, 刘桐宇, 李英民. Bi对Al-40% Mg_2Si 复合材料组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2015, 64 (3): 247-250, 255.
- [5] 赵兴明, 赵荣达, 何力佳, 等. Al-Sr变质剂对Al-18 Mg_2Si 合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 金属功能材料, 2014, 21 (2): 12-15.
- [6] 任玉艳, 刘桐宇, 李英民. 稀土元素钇对Al-30wt% Mg_2Si 复合材料组织和力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2015, 32 (5): 1367-1373.
- [7] 朱文杰, 李德江, 曾小勤, 等. Ce对铸造Mg-5Al-2Si合金中 Mg_2Si 相改性及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (7): 679-683.
- [8] 吴晗, 周全, 王俊, 等. P和La对Al-20 Mg_2Si 合金凝固组织及力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (10): 59-62.
- [9] 李少华, 张春香, 关绍康, 等. Ca对Mg-8Zn-3.2Al-0.9Si-0.3Mn合金显微组织及性能的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30 (4): 562-566.
- [10] 潘利文, 罗涛, 林覃贵, 等. 稀土铝合金最新研究进展 [J]. 轻合金加工技术, 2016, 44 (9): 12-16.
- [11] 李艳霞, 李忠磊, 王倩, 等. Al-Si-P中间合金对Al-25%Si合金变质细化机理研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (1): 35-39.
- [12] 魏伯康, 林汉同, 刘俊明, 等. 稀土在过共晶Al-Si合金中的变质作用 [J]. 特种铸造及有色合金, 1993 (3): 6-9, 26.
- [13] 林益雄, 王连登, 杜安栋, 等. 稀土磷复合变质剂对Al-20%Si合金的细化处理研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (10): 1065-1071.

Effect of P Modification on Microstructure and Mechanical Properties of Al-12.68Mg-7.32Si Alloy

DU Yang¹, SUO Zhong-yuan², JIANG Feng², JING Wei³, GUO Zhao-dong³, FU Xing³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, Jilin, China; 2. School of materials science and Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, Jilin, China; 3. Measuring and Testing Center, Jilin Jiang Ji Special Industrial Co., Ltd., Jilin 132021, Jilin, China)

Abstract:

The paper is a study on the effect of P modification on the microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-12.68Mg-7.32Si alloy. The study results show that with increasing the content of P, the morphology of primary Mg₂Si changed from coarse dendritic and plate shape to fine spherical and polygonal shape. The edges completely passivated and the sharp angles disappeared. The size of primary Mg₂Si was remarkably refined and the minimum average size was about 13.91 μm; the morphology of eutectic Mg₂Si changed from long lamellar to short lamellar, fine rod-shaped and granular. When the P content was 0.1%, the tensile strength and elongation of the alloy reached their maximum values: 151.9 MPa and 3.12%, respectively. As comparison with the as-cast alloy, the tensile strength and the elongation were increased by 96% and 136%, respectively. The fracture form of alloy was ductile-brittleness mixed fracture.

Key words:

Al-12.68Mg-7.32Si aluminum alloy; the primary Mg₂Si; P modification; tensile strength
