

磁感应强度-分级压差对 ZL114A 合金中共晶 Si 形貌和性能的影响

周泽远 芦 刚 陈义斯 曾扬帆 李 勇 徐 翩 严青松
(南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室)

摘 要 在真空差压铸造过程施加交变磁场以强化复杂薄壁铝合金铸件的力学性能,研究了磁场-压力协同场对 ZL114A 合金共晶 Si 形貌和力学性能的影响。结果表明,交变磁场能有效破碎粗大块状共晶 Si,在合金基体中形成细小纤维状组织,同时破碎的 Si 相受压力场挤滤渗流影响进一步细化,共晶 Si 长宽比随着分级加压压差增大而减小。随着磁感应强度增加,合金的抗拉强度和伸长率先增大后减小,而分级压差增大,铸件抗拉强度增大,但伸长率先增大后减小。压差为 135 kPa,磁感应强度为 24 mT,此时铸件的抗拉强度为302.67 MPa,伸长率为 3.8%。磁感应强度为 24 mT,分级加压压差提升至 160 kPa,协同场处理的 ZL114A 合金抗拉强度达 312.31 MPa,相较于 60 kPa 低压差协同场下合金性能,提升了约 59.31%。

关键词 交变磁场;分级压差;力学性能;共晶 Si

中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of the Magnetic Intensity and Stepwise Pressurization on Silicon Morphology and Properties for ZL114A Alloy

Zhou Zeyuan, Lu Gang, Chen Yisi, Zeng Yangfan, Li Yong, Xu Pian, Yan Qingsong
(National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,
Nanchang Hangkong University)

Abstract: The mechanical properties of complex thin-walled aluminum alloy castings were strengthened by applying the alternating magnetic field during vacuum counter-pressure casting process. The effects of alternating magnetic-pressure synergistic field on morphology of eutectic silicon and mechanical properties of ZL114A alloy were systematically analyzed. The results indicate that the alternating magnetic field can effectively break the coarse bulk eutectic silicon and form a fine fibrous structure in the alloy matrix. Meanwhile, the broken silicon phase is further refined due to the squeeze infiltration effects of the pressure field. Thus, the aspect ratio of eutectic silicon is decreased with the increase of the pressure difference. Additionally, the tensile strength and elongation of the alloy are increased firstly and then decreased with the increase of the magnetic field strength. However, the tensile strength of the castings is increased with the increase of the stepwise pressurization pressure, while the elongation is increased firstly and then decreased. With magnetic field strength of 24 mT and the pressure difference of 135 kPa, the tensile strength of the casting reaches 302.67 MPa with the elongation of 3.8%. The tensile strength of ZL114A alloy samples treated by the synergistic field reaches the maximum value of 312.31 MPa under the magnetic at 24 mT with the stepwise pressurization of 160 kPa, which is about 59.31% higher than that of one under the low pressurization of 60 kPa.

Key Words: Alternating Magnetic Field, Stepwise Pressurization, Mechanical Properties, Eutectic Si

Al-Si 系合金具有良好的力学性能和铸造性能,适用于各种铸造工艺生产高性能铸件^[1]。ZL114A 合金凭借优异的耐蚀性、比强度被广泛应用于汽车、高铁及航空航天领域^[2-3]。然而,在凝固过程中 ZL114A 合金

收稿日期:2023-01-13;修改稿收到日期:2023-03-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52265051)
第一作者简介:周泽远,男,1998 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1852795467@qq.com
通信作者:芦刚,男,1982 年出生,副教授,南昌(330063),E-mail: aimulag@163.com
引用格式:周泽远,芦刚,陈义斯,等. 磁感应强度-分级压差对 ZL114A 合金中共晶 Si 形貌和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(12): 1 674-1 679.
ZHOU Z Y, LU G, CHEN Y S, et al. Effects of the magnetic intensity and stepwise pressurization on silicon morphology and properties for ZL114A alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 674-1 679.

基体内易形成粗大针片状共晶 Si, 这些不规则共晶 Si 组织对合金有着严重的割裂作用, 造成应力集中, 严重恶化力学性能^[4]。近年来, 航空航天铝合金铸件呈复杂化、薄壁化、整体化发展趋势, 对铸造成形工艺及方法提出了新需求。因此, 在改善 ZL114A 合金组织结构的同时, 实现铸件致密化完整成形, 是当前的研究重点^[5]。

工业上常用的共晶 Si 细化方法主要是通过向铝合金中添加含 Na、Sr、Ba 等^[6-8] 元素的变质剂来对其进行变质细化。LU L 等^[9] 研究发现, 常用的 Na 盐变质有效性仅有 0.5~1 h, 使其无法应用到大批量连续生产中。耿浩然^[10] 研究 Na、Sr 等变质元素对 ZL101 合金致密度的影响, 发现使用 Na 盐变质的合金组织中会形成较大的密集气缩孔区, 而使用 Sr 处理的合金试样中则会生成较多的分散性气孔。Al-Si 系合金盐类变质剂使用便利, 但变质的有效时间不足, 并且会因吸气引起致密化不足的问题。

磁场^[11]、超声^[12]、机械振动^[13] 等物理场因具有高效、无污染, 并且可有效细化合金组织而被关注。在铸造过程中施加磁场对于 Al-Si 系合金中的初生 Si、共晶 Si 组织形貌变化有着显著影响, 外加磁场产生的洛伦兹力会引发熔体强制对流和反复震荡。在细化晶粒、减少铸造偏析缺陷及改善铝合金铸件表面质量等方面效果显著, 具有其他化学、物理场等熔体处理技术无法比拟的优点^[14-15]。王强等^[16] 在利用强磁场控制过共晶 Al-Si 合金的凝固组织时发现, 在强磁场下合金初晶 Si 形态发生了明显细化, 由板片状转变为块状。徐振湖^[17] 对 Al-Si 合金施加旋转磁场时发现, 外加旋转磁场后原本长条状的初生 Si 尺寸变小, 并诱发颗粒状硅相生成。闫春雷^[18] 在对 Al-Si-Cu-Mg-Ni 活塞合金的液相线温度以上施加矩形脉冲电磁场时发现, 随着电流增加, 初生 Si 的平均尺寸减小, 且当电流参数为 40 A 时, 初生 Si 呈圆形。

BALEVSKI A T^[19] 对不同压力下铝合金铸件差压铸造的凝固过程及组织和性能进行研究, 发现压力具有使铝合金液通过凝固枝晶间的狭窄通道向补缩区流动的驱动作用, 具有良好的补缩效果, 使合金组织晶粒细化、组织致密。随着对真空差压铸造的进一步研究与应用, 有力证实真空下充型、高压下凝固的铸造过程适合生产大型复杂薄壁件, 并在此基础上引入物理场进行协同铸造研究。严青松等^[20] 使用超声处理真空差压 ZL114A 合金铸件, 发现共晶 Si 形貌和生长取向出现显著变化。超声功率的增加导致共晶 Si 由粗大片状转变为细小、分布均匀的短棒状共晶 Si, 而在施加超声振动的同时增加凝固压力, 共晶 Si 细化效果更显著。黄

朋朋等^[21] 研究发现, 对真空差压铸造的 ZL205A 合金充型和凝固过程中施加交变磁场, 当励磁电流增加至 15 A 时, θ -Al₂Cu 相只存在 (110) 和 (211) 晶面, 其他生长取向被完全抑制, 由连续的树枝晶转变为细小的碎片状, 且随着凝固压力增加, θ -Al₂Cu 相的细化效果越来越显著。真空差压铸造工艺中施加交变磁场, 铝合金熔体会受电磁力与凝固压力的协同作用, 电磁力引发的熔体强迫对流与压力场产生的挤滤渗流作用耦合, 进一步改善铸件的微观组织, 进而提高铸件的力学性能。

因此, 本研究以 ZL114A 合金为对象, 结合交变磁场和真空差压铸造的特点, 制备交变磁场-分级加压协同铸造 ZL114A 合金试样, 分析共晶 Si 相的形貌变化, 研究交变磁场作用下 ZL114A 合金中共晶 Si 形貌和力学性能, 为获得组织致密、性能优异的薄壁复杂铝合金铸件提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 ZL114A (ZAlSi7Mg1A) 合金, 其化学成分见表 1。

表 1 ZL114A 合金主要的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZL114A alloy							%
ω_B							
Si	Mg	Ti	Be	Fe	Zn	Cu	Al
6.5~7.5	0.4~0.7	0.04~0.2	0.04~0.07	<0.2	<0.1	<0.01	余量

采用自主研发的 VCPC 型真空差压铸造设备, 并在此基础上引入交变磁场发生器, 设备和工艺曲线见图 1。抽真空结束时, 开启交变磁场发射器, 使其在充型、升压以及保压阶段持续施加交变磁场, 直到卸压阶段再关闭交变磁场发射器, 实施交变磁场-真空差压协同作用。

铸型采用砂型铸造, 铸型材质为酚醛树脂覆膜砂, 浇注温度为 720 ℃。预热温度设为 120 ℃, 采用试验工艺参数见表 2。浇注真空差压铸造 ZL114A 合金试样, 试验过程中抽取真空度为 20 kPa。试验时设置 6 种磁感应强度, 先在分级加压压差为 135 kPa 下确定最佳磁感应强度。随后设置 5 种不同的分级加压压差, 见表 3, 在理想磁感应强度下确定最佳分级加压压差。

交变磁场-真空差压协同铸造合金试样相同位置分别取金相试样和拉伸试样, 金相试样经研磨、抛光后, 采用体积分数为 0.5% 的 HF 腐蚀, 腐蚀时间为 10~15 s。采用 Quanta 200 型扫描电镜对试样中共晶 Si 相的形貌进行观察。采用 WDW-50Y 型微机控制电子万能试验机测试拉伸试样力学性能。

布,见图 3b。分级加压压力作用于凝固末期,已形成枝晶骨架的间隙内熔体受磁场和压力场影响,经碎断挤压的共晶 Si 呈椭球状生长。当分级加压压力达到 160

kPa 时,共晶 Si 长宽比大幅减小,见图 3c。在初生相晶界处共晶 Si 的聚集进一步被破坏,表明此时共晶 Si 在熔体中趋向于非连续性生长,有效减小了 Si 相对

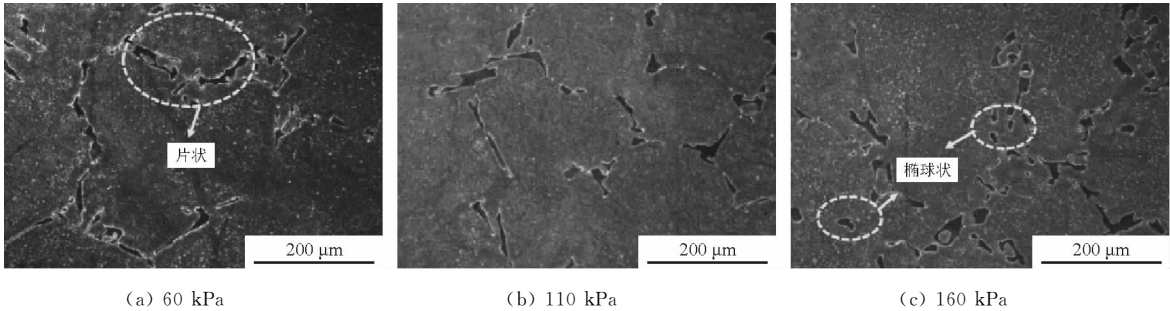


图 3 复合场工艺下不同分级加压压力中 ZL114A 合金共晶 Si 形貌

Fig.3 Eutectic silicon morphologies in ZL114A alloy with different stepwise pressures under the composite field process ZL114A 合金基体的割裂作用。

2.2 协同场下真空差压 ZL114A 合金的力学性能

2.2.1 交变磁感应强度对合金力学性能的影响

图 4 为不同交变磁感应强度下真空差压 ZL114A 合金的力学性能。可以看出,随着磁感应强度增加, ZL114A 合金的抗拉强度先显著增加随后减小,而伸长率波动较大。其中,合金试样在 24 mT 时获得最大抗拉强度,为 302.67 MPa,较未施加磁场时提升约 39.2%。同时伸长达 3.8%,提升了 153.3%。这是因为施加磁场处理后,合金中晶粒尺寸显著减小,共晶 Si 形貌由块状转变为丝状。晶粒细化和 Si 相形貌的转变,改善了合金的力学性能。为进一步明晰磁场处理真空差压 ZL114A 合金的拉伸断裂行为,合金的断口形貌见图 5。由图 5a 可知,未施加交变磁场处理的 ZL114A 合金断口中分布大量撕裂棱、解理台阶与块状光滑的解理面,仅出现少量浅韧窝,呈准解理脆性断裂特征。从图 5b 可知,8 mT 磁场处理试样断面局部细小韧窝分布变多。随着磁场进一步加强,图 5c 中可见解理台阶和解

理面数量下降,韧窝显著增加,出现大量撕裂棱。证实施加交变磁场有效抑制了 ZL114A 合金脆性断裂趋势,转向韧性断裂。磁场作用下,熔体发生强迫对流,破碎相析出枝晶,细化晶粒并改善 Si 相生长和分布。同时,磁场的热效应导致了局部熔体过热,影响铸件凝固补缩。从图 5d 可以看出,断口中暴露的二次枝晶臂归因于铸件内显微缩孔。组织中的微孔易成为合金裂纹源,导致了过高磁感应强度处理后合金的抗拉强度显著下降。

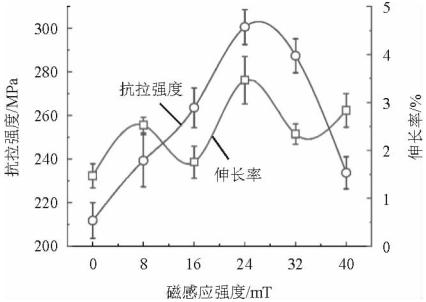


图 4 不同磁感应强度下 ZL114A 合金的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of ZL114A alloy under different alternating magnetic field

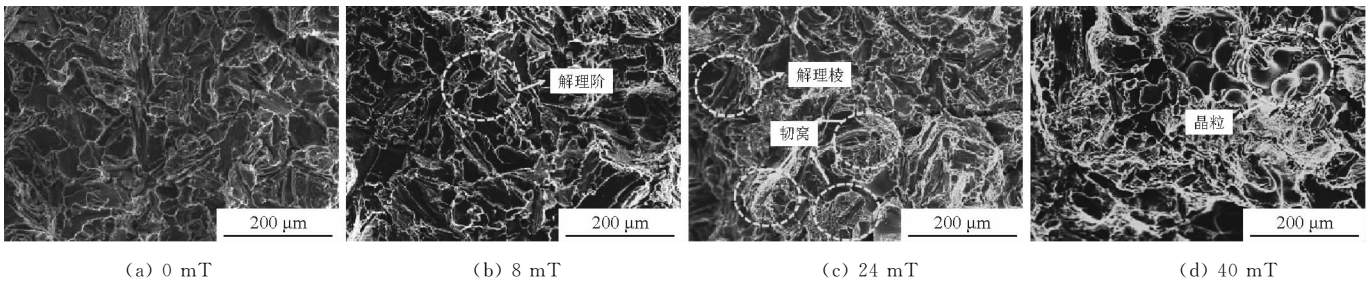


图 5 不同交变磁感应强度中 ZL114A 合金断口形貌

Fig.5 Fracture morphologies of ZL114A alloy in different alternating magnetic field

2.2.2 分级加压压差对 ZL114A 合金力学性能的影响

图 6 是磁感应强度为 24 mT 时,不同分级加压压差下 ZL114A 合金的力学性能。结果表明,分级加压压差越大,铸件的力学性能越高,由 60 kPa 增加到 160 kPa 后,抗拉强度从 196.03 MPa 增加至 312.31 MPa,

提升了约 59.32%,伸长率最高为 3.4%,此时压差值为 135 kPa。图 7 为对应断口形貌的 SEM 图。由图 7a 可见,在 60 kPa 的压差下,断口内河流状解理台阶及冰糖状解理断口并存,同时在局部区域存在纤维状蜂窝形断裂窝坑。随着凝固压差增大到 160 kPa,在高压差作用

下,金属液强大的挤渗力导致合金中粗大针片状共晶 Si 断裂。这些破碎的细小共晶 Si 组织能够在枝晶间流动并形成非均质形核核心,晶粒被细化,基体中粗大的共晶 Si 组织大量减少^[24]。由图 7b 可以看出,呈蜂窝状的细小断裂窝坑逐渐变多,拉伸试样由最初的沿晶脆性解理与穿晶混合断裂特征转变为以韧窝状形貌为主的延性断裂,此时 ZL114A 合金试样的伸长率最大。高压差作用于凝固熔体有利于促进组织致密化,故随着压差进一步提升,合金抗拉强度达到最大值。同时,凝固前沿溶质原子同时受到磁场和压力协同场影响,发生剧

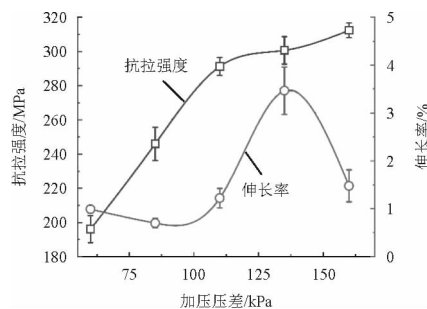


图 6 不同加压压差下 ZL114A 合金的力学性能

Fig.6 Mechanical properties of ZL114A alloy under different differential pressures

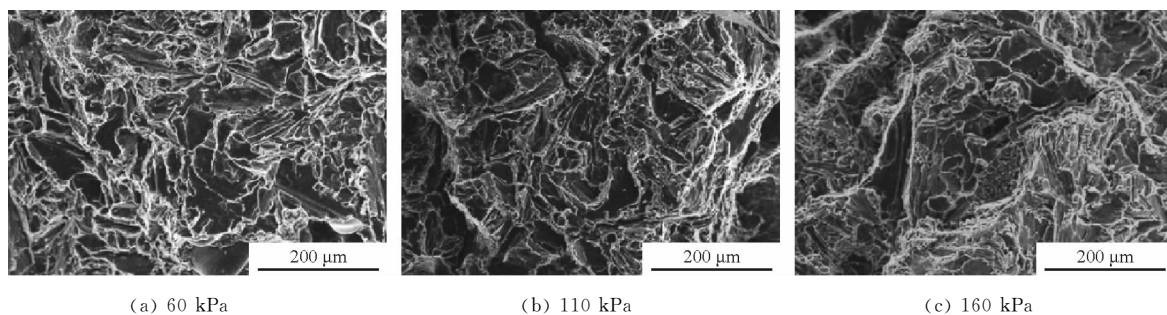


图 7 不同加压压差下 ZL114A 合金的断口形貌

Fig.7 Fracture morphologies of ZL114A alloy under different differential pressures

烈运动,影响元素分布提升固溶强化效果。因此,在 160 kPa 时合金的伸长率下降,但仍然高于低压差下的。

3 结 论

(1)磁场-压力协同场对真空差压铸造 ZL114A 合金微观组织影响显著。磁场强迫铝熔体对流,扰乱凝固前沿溶质分布,破碎先析出枝晶。细化晶粒的同时,共晶 Si 相不连续析出,磁场处理后共晶 Si 由粗大团块状转变为丝状结构。24 mT 磁场和 160 kPa 分级压差压力场下,共晶 Si 呈离散椭球状,有效减小了 Si 相对 ZL114A 合金基体的割裂作用

(2)ZL114A 合金的抗拉强度随磁感应强度先增大后减小,高强磁场的热效应导致了局部熔体过热,易影响铸件凝固补缩。磁感应强度为 24 mT 时,相较于无磁场的合金,抗拉强度提升 39.2%。进一步提升分级加压压差至 160 kPa,合金的抗拉强度最大值为 312.31 MPa。

参 考 文 献

[1] 张令柱. 微合金化及细化变质处理对 ZL114A 合金组织和性能的影响[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2019.

[2] 林麟. ZL114A 熔体处理及叶轮离心铸造工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2012.

[3] 肖文丰. ZL114A 合金整体铸件力学性能稳定性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.

[4] CHANG Y J. High temperature mechanical properties of Al-Si-Mg-

(Cu) alloys for automotive cylinder heads[J]. Materials Transactions, 2013, 54(4): 588-594.

[5] 何磊东, 仲召军, 李鹏鹏. 高硅铝合金变质处理的研究现状及发展趋势[J].铸造技术, 2021, 42(1): 65-68.

[6] FATAHALLA N, HAFIZ M, ABDULKHALEK M. Effect of microstructure on the mechanical properties and fracture of commercial hypoeutectic Al-Si alloy modified with Na, Sb and Sr[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(14): 3 555-3 564.

[7] SHA X, CHEN X, NING H, et al. Modification of eutectic Si in Al-Si-(Ba) alloy by inducing a novel 9R structure in Twins[J]. Materials, 2018, 11(7): 1 151-1 156

[8] 闫鹏宇, 毛卫民, 范菁, 等. Sr 对铜质蛇形通道制备半固态 A390 铝合金初生 Si 细化机制的影响[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(4): 474-477.

[9] LU L, NOGITA K, DAHLEA K. Combining Sr and Na additions in hypoeutectic Al-Si foundry alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 399(1): 244-253.

[10] 耿浩然. Na、Sr、Sb、P 对铝硅合金致密性的作用[J].特种铸造及有色合金, 1996(3): 3-6.

[11] 刘文斌, 梁琛, 张彭超, 等. 电磁悬浮过共晶 Al-Si 合金初生相偏聚行为研究[J].中国科学: 技术科学, 2022(9): 1-12

[12] NATORI K, UTSUNOMIYA H, TANAKA T. Improvement in formability of semi-solid cast hypoeutectic Al-Si alloys by equal-channel angular pressing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 240-248.

[13] 谭喜平. 再生 A356 铝合金净化处理技术研究[D].长沙:中南大学, 2014.

[14] 连峰. 磁场对铝硅合金凝固组织和变质处理的影响[D].辽宁大连:大连理工大学, 2007.

Sc 对 A356 合金热处理组织及力学性能的影响

黄笑梅 程和法 黄 吉
(合肥工业大学机械工程学院)

摘 要 研究了 0.2%~0.3% 的 Sc 对热处理 A356 合金微观组织和力学性能的影响。结果表明,加入 Sc 后显著细化了合金中的初生 α 相,树枝状的初生 α 相转变为细小的短枝晶和颗粒状形态。同时,共晶 Si 也产生分枝和细化,形态由针片状变为纤维状和短棒状。加入 Sc 的 A356 合金经过 530℃×6 h 固溶+200℃×7 h 时效处理后,共晶 Si 形态进一步演变成颗粒状,形状变得钝化; α -Al 基体中弥散析出了 Mg_2Si 、 Al_3Sc 等强化相,显著提高了 A356 合金的力学性能。加入 0.2% 的 Sc 的 A356 合金经过热处理后,抗拉强度由不含 Sc 的 213.9 MPa 提高到 292.2 MPa,伸长率由 5.4% 上升到 7.6%。

关键词 A356 合金;稀土 Sc;微观组织;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Sc on Microstructure and Mechanical Properties of A356 Alloy
after Heat Treatment

Huang Xiaomei, Cheng Hefa, Huang Ji

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology)

Abstract: Effects of Sc on microstructure and mechanical properties of A356 alloy modified by adding 0.2%~0.3% Sc were investigated. The results indicate that primary α dendrites are significantly refined, and the morphology is transformed from dendritic to short dendrite and spherical granular after Sc addition. Meanwhile, eutectic Si is branched and refined, of which the morphology is converted from needle sheet to fibrous and short rod shape, and further evolved into a granular shape and passivated after heat treatment of 530℃×6 h+200℃×7 h. Strengthening phase including Mg_2Si and Al_3Sc are dispersively precipitated in α -Al matrix, leading to the significant enhancement of mechanical properties. The tensile strength of the A356 alloy with 0.2%Sc is increased from 213.9 MPa to 292.2 MPa after the heat treatment, and the elongation of the alloy is increased from 5.4% to 7.6%.

Key Words: A356 Alloy, Rare Earth Sc, Microstructures, Mechanical Properties

收稿日期:2023-03-31;修改稿收到日期:2023-05-19

第一作者简介:黄笑梅,女,1967 年出生,副教授,合肥(230009),E-mail: huangxm12505@163.com

通信作者:程和法,男,1962 年出生,教授,合肥(230009),E-mail: Chf796@163.com

引用格式:黄笑梅,程和法,黄吉. Sc 对 A356 合金热处理组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 679-1 682.

HUANG X M, CHENG H F, HUANG J. Effects of Sc on microstructure and mechanical properties of A356 alloy after heat treatment[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 679-1 682.

[15] 陈志俊,高桂丽,张立鑫,等. 旋转磁场对 Al-4.5Cu 合金凝固组织的影响[J].铸造,2017,66(3):238-241.

[16] 王强,王春江,庞雪君,等.利用强磁场控制过共晶铝硅合金的凝固组织[J].材料研究学报,2004(6):568-576.

[17] 徐振湖.对旋转磁场作用下的 Al-Si 合金的研究[J].铸造,2000(2):115-117.

[18] 闫春雷.电磁能对半连续铸造 Al-Si-Cu-Mg-Ni 活塞合金微观组织与成分偏析的影响[D].内蒙古包头:内蒙古科技大学,2021.

[19] BALEVSKI A T. Counter-pressure casting. The processes which occur during casting and crystallization[J]. Foundry Trade Journal, 1989(10):744-750.

[20] 严青松,杨普超,芦刚,等. 超声振动-真空差压协同场下 ZL114A 合金共晶硅的生长特性[J].中国有色金属学报,2018,28(8):1 507-1 515.

[21] 黄朋朋,芦刚,严青松. 等.交变磁场-真空差压协同场下 ZL205A 合金 θ - Al_2Cu 相的生长特性[J].中国有色金属学报,2020,30(11):2 540-2 549.

[22] HU S, DAI Y, GAGNOUD A, et al. Effect of a magnetic field on macro segregation of the primary silicon phase in hypereutectic Al-Si alloy during directional solidification[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 722: 108-115.

[23] SU X, XU G M, JIANG D H. Abatement of segregation with the electro and static magnetic field during twin-roll casting of 7075 al-loy sheet[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A599: 279-285.

[24] 黄普英,芦刚,严青松,等. 分级加压压差对真空差压铸造 ZL114A 合金微观组织及显微硬度的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(4):494-497.

(编辑:张正贺)