

Sc 含量对 AlSiFeMnMg 合金的组织 and 力学性能的影响

范晓明¹ 罗世旭¹ 卢晓斌² 谭 俭¹ 黄刚福²
(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院; 2. 高安市璐克斯机械有限公司)

摘 要 采用金相显微镜、扫描电镜、电子探针和电子万能材料试验机等研究了不同 Sc 加入量 [$w(\text{Sc})=0.1\%, 0.2\%, 0.3\%, 0.4\%, 0.5\%$] 的 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg 合金压铸试棒的微观组织和力学性能。结果表明, Sc 能有效改善原始合金的显微组织, 对初生 α -Al 相、共晶 Si 相和 Fe 相具有明显的细化、变质作用。随着 Sc 加入量增加, 合金的力学性能均呈现出先上升后下降的趋势。当加入 0.3% 的 Sc 时, 合金的细化变质效果和力学性能最佳。其显微组织主要为细小均匀的 α -Al 等轴晶, 大部分为颗粒状、少量为蠕虫状的共晶 Si 相, 以及团块状 α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂+ 汉字状 Al₁₂Si₆Fe₂(Mg, Sc)₅ 的 Fe 相。合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度 (HV) 分别为 273.0 MPa、183.6 MPa、6.4% 和 83.6, 此时合金的断裂方式为韧性断裂。

关键词 Al-Si 压铸合金; Sc; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG146.21; TG113.25 **文献标志码** A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2023.08.022 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Effects of Sc Content on Microstructure and Mechanical Properties of AlSiFeMnMg Alloy
Fan Xiaoming¹, Luo Shixu¹, Lu Xiaobin², Tan Jian¹, Huang Gangfu²
(1. School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology;
2. Gao'an Luxe Machinery Co., Ltd.)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg alloy die casting testing bars with different Sc content [$w(\text{Sc})=0.1\%, 0.2\%, 0.3\%, 0.4\%, 0.5\%$] were investigated by metallographic microscope, scanning electron microscope, electron probe and electronic universal material testing machine. The results indicate that Sc can effectively modify the microstructure of initial alloy, which has obvious refining and metamorphic effects on the primary α -Al phase, eutectic Si phase and Fe phase. With Sc content increase, the mechanical properties of the alloy present a trend of increasing firstly and then decreasing. After adding 0.3% Sc, the refining modification effect and mechanical properties of the alloy are desirable. The microstructure of the alloy is composed of fine and uniform α -Al equiaxed crystals, eutectic Si phase in which most are granular and a small amount are worm-like, and some Fe phases including massive α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ and Chinese character Al₁₂Si₆Fe₂(Mg, Sc)₅. The tensile strength, yield strength, elongation and microhardness of the alloy are 273.0 MPa, 183.6 MPa, 6.4% and 83.6, respectively, and the fracture mode is dominated by ductile fracture.

Key Words: Al-Si Die Casting Alloy, Sc, Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期: 2022-11-05; 修改稿收到日期: 2023-04-20
第一作者简介: 范晓明, 男, 1963 年出生, 副教授, 武汉(430070), E-mail: fanxm@whut.edu.cn
引用格式: 范晓明, 罗世旭, 卢晓斌, 等. Sc 含量对 AlSiFeMnMg 合金的组织 and 力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(8): 1126-1131.
FAN X M, LUO S X, LU X B, et al. Effects of Sc content on microstructure and mechanical properties of AlSiFeMnMg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8): 1126-1131.

[9] ERAY Y, LILIANA Z V, BENOIT T O. New-generation biocompatible Ti-based metallic glass ribbons for flexible implants[J]. Materials & Design, 2022, 223: 111-139.

[10] 索忠源, 王毅坚, 石纯芳, 等. 生物医用 Ti 基非晶合金的研究进展[J]. 金属功能材料, 2012, 19(1): 55-58.

[11] OAK J J, INOUE A. Attempt to develop Ti-based amorphous alloys for biomaterials[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A449: 220-224.

[12] 索忠源, 宋艳玲, 邱克强. Ti-Zr-Cu-Fe 非晶合金制备及生物相容性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(9): 2289-2292.

[13] HU T, CHU C L, YIN L H, et al. In vitro biocompatibility of titanium nickel alloy with titanium oxide film by H₂O₂ oxidation[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2007, 17(3): 553-557.

[14] XUE W C, VAMSI K B, BANDYOPADHYAY A, et al. Processing and biocompatibility evaluation of laser processed porous titanium[J]. Acta Biomater., 2007(3): 1007-1018.

[15] ARMITAGE D A, PARKER T L, GRANT D M. Biocompatibility and hemocompatibility of surface-modified NiTi alloys[J]. J. Biomed Mater Res., 2003, A66: 129-137.

(编辑: 刘晨辉)

Al-Si 合金流动性好、比强度高、易加工成形、收缩率和热裂倾向小,被广泛应用于航空航天、交通运输、机械制造等领域^[1]。近年来,随着大型一体化压铸技术的兴起,免热处理的压铸 Al-Si 合金材料引起广泛关注。对于普通压铸而言,压铸 Al-Si 合金因为含气,一般不宜采用热处理强化,在相关标准中,铸态 Al-Si 系压铸合金的伸长率大多小于 4%,难以满足企业的实际需求^[2]。相对金属型重力铸造而言,压铸具有尺寸精度、表面光洁度高,材料利用率高,机加工少,组织致密,强度和表面硬度高,工序简单,生产效率高等特点,因此,研发新型的压铸 Al-Si 合金对于部分铝合金产品的优质高效低成本制造具有积极意义。

Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg 合金综合力学性能尚待进一步提高。普通压铸 Al-Si 合金主要是通过引入细化剂、变质剂和强化元素对合金熔体进行细化和变质处理使材料改性,以提高其铸态综合力学性能^[3-4]。近年来,研究发现,Sc 对 α -Al 相和共晶 Si 相都有明显的细化和变质作用,同时 Sc 还可以改变富 Fe 相的形态^[5]。XU C 等^[6]认为 Sc 对铸态 Al-Si-Mg 合金中晶粒有明显的细化作用,加入 0.8% 的 Sc 可以使得合金中 α -Al 相形态转变为等轴晶。PRAMOD S L 等^[7]发现在 A356 合金中加入 0.4% 的 Sc 后使共晶 Si 相的形貌由针状变为细小的颗粒状,且 Sc 具有很好的长效变质效果。TZENG Y C 等^[8]发现在 Al-11.6Si 合金中加入 Sc 使针状 Fe 相转变为块状相。

目前,俄罗斯已开发出含 Sc 铝合金体系,而其他国家注册的含 Sc 铝合金中只有 4 个常用合金和 1 个非常用合金^[9]。开发新型含 Sc 系列铝合金,对于扩大其应用领域和市场规模具有积极意义。因此,本研究采用普通压铸工艺制备拉伸试样,探究 Sc 含量对 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg 合金组织的晶粒细化与变质的影响,并分析其对铸态合金力学性能的影响,以确定最佳 Sc 含量并探讨其影响机理。

1 试验材料与方法

原材料采用 99.9% 的工业纯 Al(质量分数,下同)、99.9% 的工业纯 Mg, Al-20Si、Al-10Fe、Al-10Mn 和 Al-2Sc 中间合金, Al-5Ti 细化剂和 Al-10Sr 中间合金变质剂;精炼剂为 ZS-AJ_{01c} 型铝合金除气除渣剂。

采用石墨坩埚电阻炉熔制合金。将配置称量好的纯 Al、Al-20Si、Al-10Fe、Al-10Mn、Al-2Sc 置于电阻炉内的石墨坩埚中,然后将电阻炉加热至 750 °C 熔化后,将纯 Mg 压入铝液中熔化,再加入 Al-5Ti 和 Al-10Sr 中间合金进行细化和变质处理。待其完全熔化后采用

钟罩将精炼剂压入铝合金熔体进行精炼除气 3 min,静置 5 min 后扒渣。最后,将 Al-Si 合金熔体舀入预热好的 DC280T 卧式冷室压铸机压室内压铸拉伸试样,浇注温度为 680 °C,压射压力为 40 MPa,保压时间为 5 s,模具预热温度约为 280 °C。每炉次压铸 3 组以上拉伸铸件试样,待其凝固后取出试样备用,见图 1。

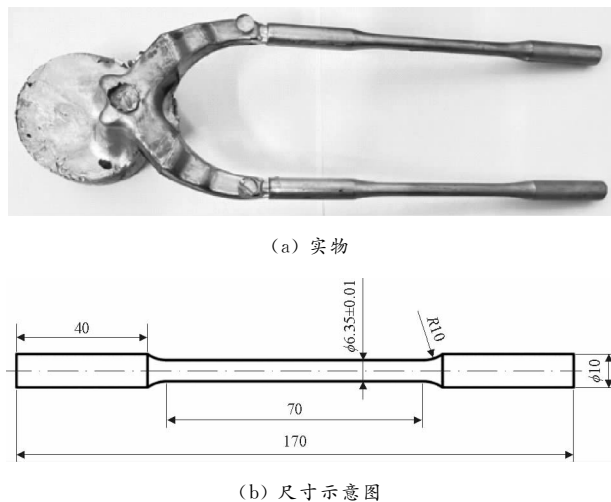


图 1 压铸拉伸试样的实物照片及尺寸示意图
Fig.1 Object and dimension diagram of die-casting tensile specimen

截取压铸拉伸试样,在电子万能材料试验机(WAW-100)上进行拉伸性能测试,拉伸加载速率为 2 mm/min。在拉伸试样端部切取金相试样,制备好后用 Keller 试剂腐蚀抛光面 15 s,在金相显微镜(Olympus-BHM 363U)和扫描电镜(Zeiss Ultra Plus)下进行组织观察和图像采集。采用显微硬度计(DHV-1000Z)进行硬度测试。利用电子探针分析仪(JXA-8230)对金相试样进行物相成分分析。

2 试验结果与分析

2.1 Sc 对合金显微组织的影响

图 2 为铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg-xSc 合金的金相组织。可以看出,合金主要由 α -Al 初生相+(α -Al+Si)共晶相+富 Fe 相等组成。其中,初生 α -Al 相为白色,共晶 Si 相为深灰色,富 Fe 相为银灰色。

可以看出,Sc 含量为 0.1% 时,初生 α -Al 相主要呈粗大树枝晶状且分布不均,少部分树枝晶破碎,见图 2a。Sc 含量为 0.2% 时,粗大树枝晶状初生 α -Al 相变得短小,有圆整化的趋势,主要呈花朵状,Sc 对合金中初生 α -Al 相的细化作用逐渐显现,见图 2b。Sc 含量增加至 0.3% 时,初生 α -Al 相基本转变为细小的等轴晶状且分布均匀,晶粒细化最为明显,见图 2c。Sc 含量增加至 0.4% 时,合金晶粒逐渐变得粗大,由等轴晶状变为树

枝晶状,细化效果减弱,见图 2d;Sc 含量为 0.5% 时,晶粒进一步粗化。可见 Sc 对初生 α -Al 相晶粒的细化作用有一个最佳值,并且 Sc 不宜添加过量。这主要归因于 Sc 的加入使得基体中形成了大量 Al_3Sc 相颗粒, Al_3Sc 和 α -Al 均为 $L1_2$ 型,且两者的晶格错配度仅为 1.5% 左右,因此其可以作为 α -Al 相有效异质形核质点,促进

α -Al 相晶粒的细化^[10]。但是,过量的 Sc 会和 Al、Si、Mg 等原子发生反应生成富 Sc 金属间化合物,造成 Si 和 Mg 溶质原子流失,致使过冷度降低,凝固时间延长,导致 α -Al 相晶粒长大变粗。

图 3 为铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 压铸合金中共晶 Si 的 SEM 形貌。可以看出,当 Sc 含量

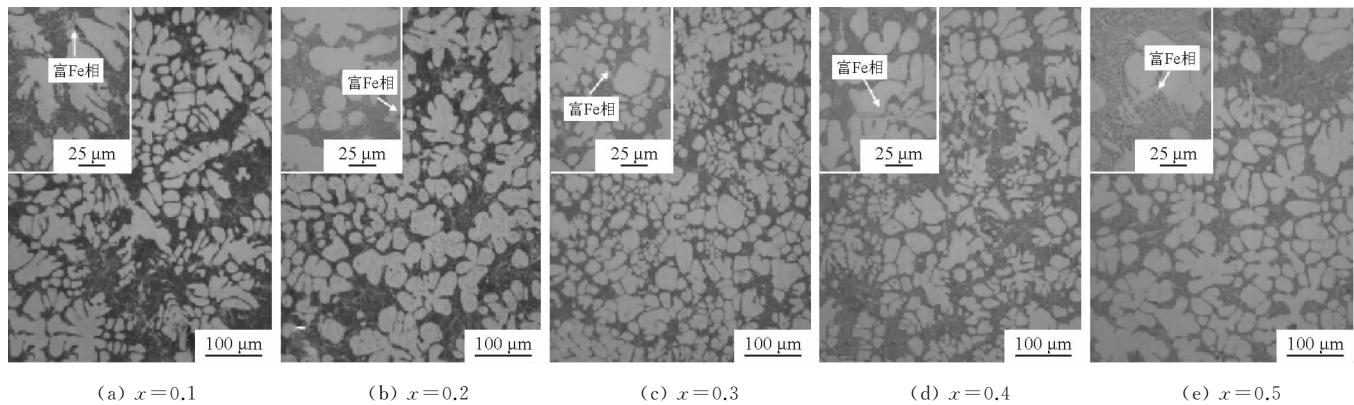


图 2 铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 压铸合金的金相组织

Fig.2 Metallographic microstructure of as-cast Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc die-casting alloys

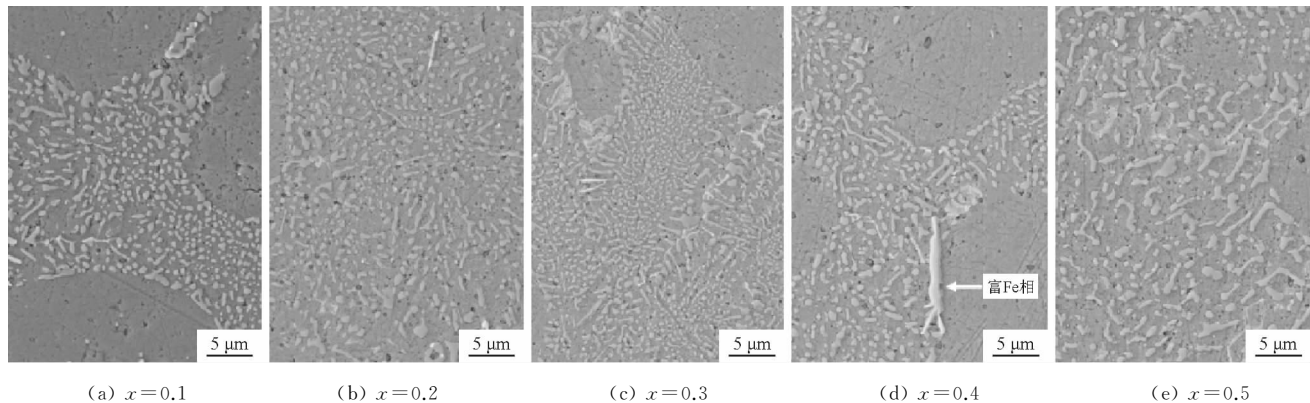


图 3 铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 压铸合金中共晶 Si 相的 SEM 图

Fig.3 SEM images of eutectic Si phase in as-cast Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc die-casting alloys

为 0.1% 时,共晶 Si 相只有少部分呈颗粒状,大部分呈蠕虫状。随着 Sc 含量增加,长蠕虫状的共晶 Si 相变逐渐变得短小,且分布较为均匀。当 Sc 含量增至 0.3% 时,共晶 Si 的形貌进一步改善,部分共晶 Si 相进一步被熔断,其形貌基本被变质为细小的颗粒状,并均匀地弥散分布,见图 3c。但当继续增加 Sc 含量时,共晶 Si 相又逐渐团聚,变成粗大的蠕虫状。结果表明,Sc 可以对共晶 Si 相产生有效的变质作用,但需要将其添加量控制在合适范围内。这主要是由于 Sc 和 Si 的原子半径比为 1.43,由杂质诱发孪晶理论可知,发生共晶反应时,Sc 会嵌入共晶 Si 相晶格中引起晶格畸变,致使共晶 Si 相中出现大量的孪晶^[11]。同时,吸附在孪晶沟槽处的 Sc 并不会随固液界面而推移,导致孪晶沿 $\langle 110 \rangle$ 方向紧密堆积,最终表现为各向同性并停止生长,从而使其在形貌上表现为细小的颗粒状^[12]。

图 4 为铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 压铸合金中富 Fe 相的 SEM 形貌。从图 4a~图 4c 可以看出,随着 Sc 含量从 0.1% 增至 0.3%,合金中银灰色富 Fe 相形貌逐渐从细针状转变为短板状,再转变为多边形和汉字状。然而,随着 Sc 添加量继续增加,富 Fe 相的形态最终转变为不规则的块状或较厚的板片状,见图 4d 和图 4e。

通过电子探针对铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 合金中的第二相进行了检测,结果见图 5。从图 5a 和图 5d 可以看出,白色针状相含有 Al、Si、Fe 元素,且 $w(\text{Al}) : w(\text{Si}) : w(\text{Fe}) \approx 5 : 1 : 1$,可以推断其为 β - Al_5FeSi 相^[13]。此外,合金中还存在粗棒状富 Fe 相,并检测到 Mn 元素,部分 Mn 原子会进入到富 Fe 相中,取代部分 Fe 原子,形成 δ - $\text{Al}_4(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Si}_2$ 相^[14]。当添加 0.3% 的 Sc 时,出现了形态更加规则和圆整的富 Fe 相,

这种团块状的富 Fe 相为 $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ^[14]。同时合金中还存在另一种汉字状的富 Fe 相,其主要元素为 Al、Si、Fe、Sc、Mg,根据研究,该相为 $\text{Al}_{12}\text{Si}_6\text{Fe}_2(\text{Mg}, \text{Sc})_5$, 见图 5b^[7-9]。当 Sc 含量继续增加到 0.5% 时,较规则团块状 $\alpha\text{-Fe}$ 相转变为棒状 $\delta\text{-Fe}$ 相,见图 5c,这是由于 Sc 和 Fe 在 $\alpha\text{-Al}$ 中的固溶度都很小,在 $\alpha\text{-Al}$ 相形核长大过程中,由于溶质再分配,Sc 或 Fe 极易在结晶前沿的液相中富集,并且 Sc 与 Al 的原子半径相差较大,为了减弱由原子半径差所产生的晶格畸变,Sc 原子易于向

$\beta\text{-Fe}$ 或 $\delta\text{-Fe}$ 相周围富集,并填补在这些正在生长着的富 Fe 相表面的缺陷中,生成阻碍其长大的“膜”,最终使富 Fe 相的形貌和分布状态发生较大变化^[15]。EP-MA 元素分布表明,在块状和汉字状 Fe 相周围,Sc 含量相对较高,见图 6。而当 Sc 含量超过 0.3% 时,“膜”对 Fe 原子迁移的阻碍作用更强,此时金属液前端 Fe 原子浓度梯度增大,导致成分过冷。TILLER W A^[16]指出,当过冷度超过临界过冷度的 π 倍时,固液界面将不再光滑而是粗糙界面。由于富 Fe 相周围存在

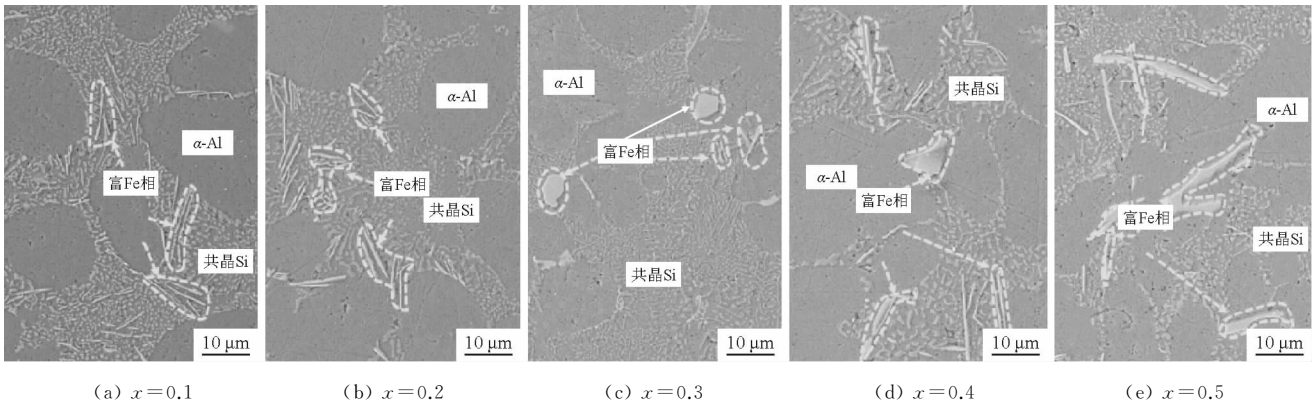


图 4 铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 压铸合金富 Fe 相的 SEM 图

Fig.4 SEM images of Fe-rich phase in as-cast Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc die-casting alloys

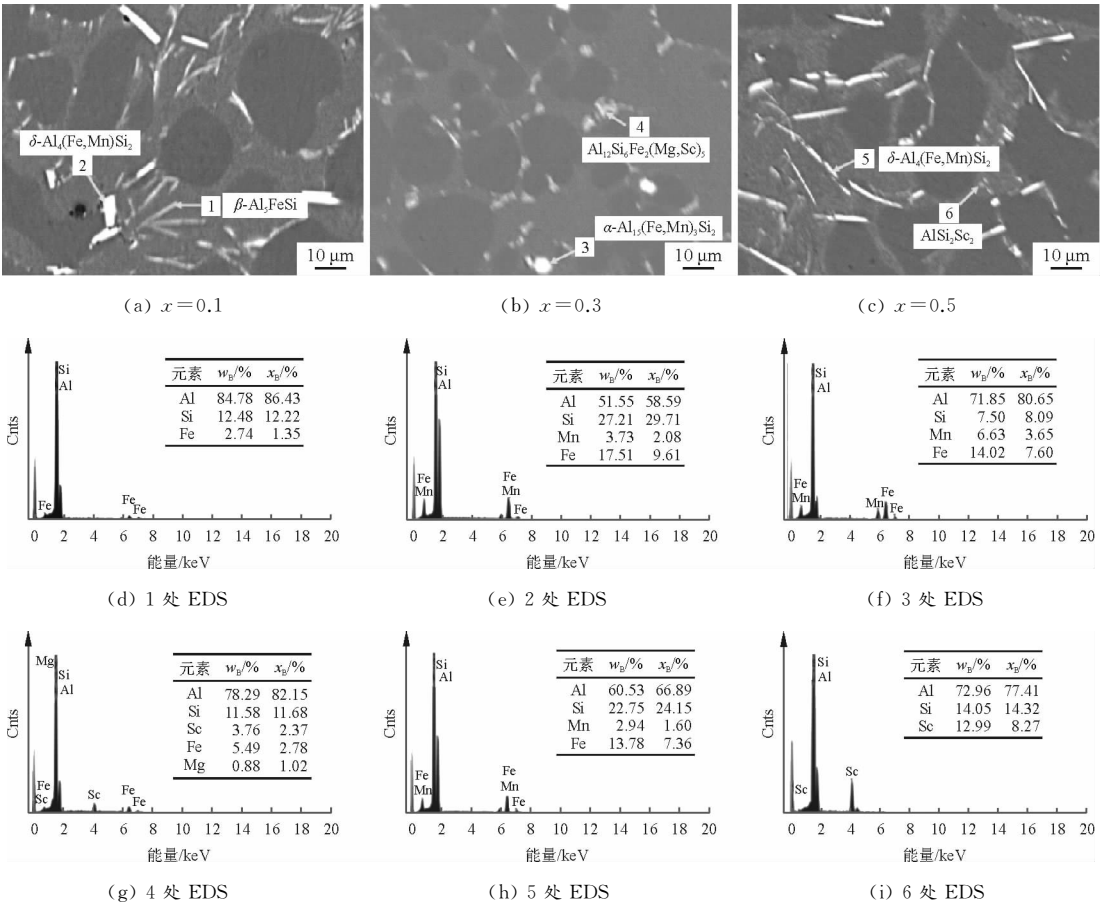


图 5 铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 压铸合金的 EPMA 分析结果

Fig.5 EPMA analysis results of as-cast Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc die-casting alloys

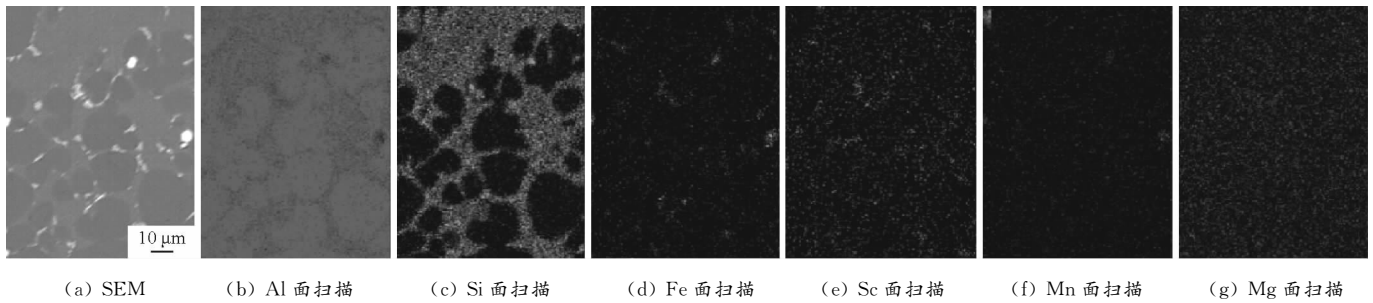


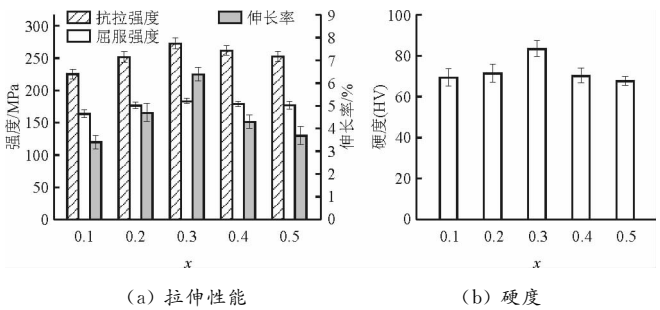
图 6 铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg-0.3Sc 合金的 EPMA 分布图
Fig.6 EPMA distribution of as-cast Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg-0.3Sc alloy

较大的成分过冷,富 Fe 相上的细小凸起易于伸向较大成分过冷区长大,最终长成相对粗大的板条状。

2.2 力学性能分析

图 7 为铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 压铸合金的拉伸力学性能和硬度。由图 7a 可以看出,随着 Sc 加入量增加,合金的拉伸力学性能呈现出先增加后降低的趋势,并在 Sc 添加量为 0.3% 时达到最大值,其抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 273.0 MPa、183.6 MPa、6.4%。由图 7b 可以看出,合金的硬度(HV)在 Sc 添加量为 0.3% 时达到 83.6。综上,添加适量的 Sc 可以提高合金的综合力学性能。由微观组织分析结果可知,添加适量的 Sc 后, α -Al 相晶粒被细化,晶粒的数量增多,晶界也相应增多,晶粒界面面积更大,能够更快速地分散受力点应力,极大地降低应力集中,提高自身强度和塑性。同时,Sc 改善了共晶 Si 相和富 Fe 相的形态,削弱了共晶 Si 相和富 Fe 相对基体的割裂作用。此外,合金在凝固冷却过程中会生成纳米级 Al_3Sc 二次析出相,分布于基体中。细小的 Al_3Sc 相能够有效抑制晶界的迁移,阻碍位错移动,进而促进了强度和硬度提高^[17]。而过量 Sc 的加入会使 α -Al 相和共晶 Si 相粗化,同时生成一些大尺寸的富 Fe 相,而且富 Fe 相通常是在共晶相之前形成,尺寸较大的富 Fe 相会阻碍枝晶间的补缩作用,容易导致缩孔缩松出现,从而

使得合金的力学性能下降^[18]。



(a) 拉伸性能 (b) 硬度
图 7 铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 合金的力学性能
Fig.7 Mechanical properties of as-cast Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc die-casting alloys

2.3 拉伸断口形貌分析

图 8 为铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 合金的拉伸断口形貌。可以看出,添加 0.1% 的 Sc 的合金断口上显示出大量撕裂棱和解理面,仅观察到少量不均匀分布的韧窝。随着 Sc 的添加,合金断口上的韧窝数量增多。这归因于 Sc 的加入使得合金的抗拉强度和伸长率提高。此时,合金的断裂模式从准解理断裂转变为韧-脆混合型断裂。当 Sc 添加量增加至 0.3% 时,韧窝的深度增加且其分布更加均匀,断裂模式属于韧性断裂。然而,随着 Sc 含量继续增加,合金的力学性能开始恶化,断裂面上的韧窝数量逐渐减少,解理面数量逐渐增多,断裂模式从韧性断裂转变为韧-脆混合型断裂。

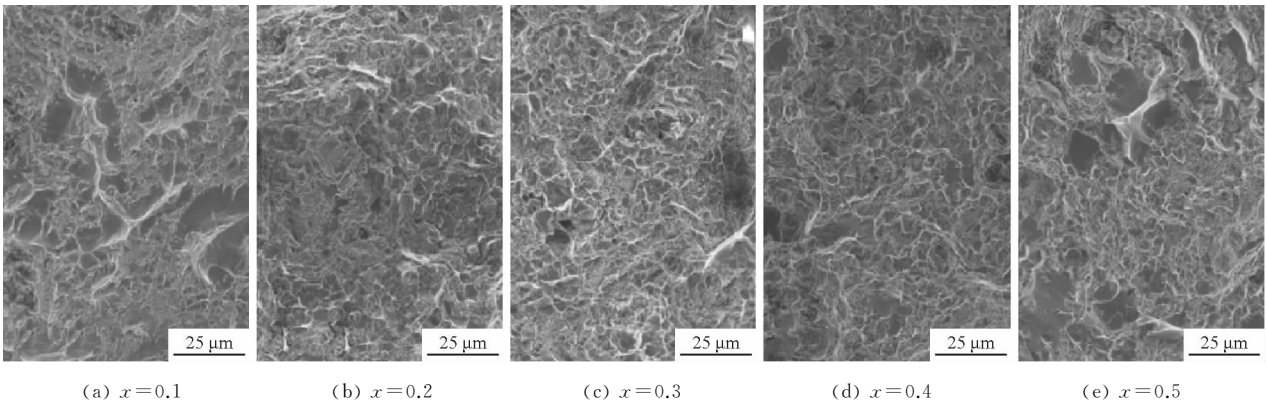


图 8 铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 合金的拉伸断口形貌
Fig.8 Fracture morphologies of as-cast Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc die-casting alloys

3 结 论

(1) 在压铸 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 合金中, Sc 元素对初生 α -Al 相、共晶 Si 相和 Fe 相具有明显的细化、变质作用。当 Sc 添加量为 0.3% 时, 合金中初生 α -Al 相细化效果最好, 共晶 Si 相变质效果也达到最好, 且针状 β -Al₅FeSi 相或粗棒状 δ -Al₄(Fe, Mn)Si₂ 相转变为形貌相对规整的团块状 α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ 相或汉字状 Al₁₂Si₆Fe₂(Mg, Sc)₅ 相。

(2) 铸态 Al-9Si-0.6Fe-0.2Mn-0.2Mg- x Sc 压铸合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度值均随着 Sc 加入量的增加呈现出先上升后下降的趋势。Sc 添加量为 0.3% 时, 合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度 (HV) 均达到最大值, 分别为 273.0 MPa、183.6 MPa、6.4% 和 83.6, 此时合金的拉伸断裂方式为韧性断裂。

参 考 文 献

- [1] 樊振中, 袁文全, 王端志, 等. 压铸铝合金研究现状与未来发展趋势[J]. 铸造, 2020, 69(2): 159-166.
- [2] 董显明, 蹇超. 铝合金压铸标准现状及展望[J]. 铸造, 2017, 66(10): 1122-1124.
- [3] 姚丽娟, 朱满, 坚增运, 等. Al-Si 合金的晶粒细化与凝固行为研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(15): 9-11.
- [4] 吴桢, 刘昊, 李世铎, 等. 亚共晶 Al-Si 合金 Sr 变质共晶 Si 研究进展[J]. 热加工工艺, 2022, 51(11): 6-11.
- [5] 黄吉, 程和法, 杜承信, 等. Sc 对 A356 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(12): 1318-1321.
- [6] XU C, XIAO W L, MA C L, et al. The effect of scandium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy: A multi-refinement modifier[J]. Materials Characterization, 2015, 110: 160-169.
- [7] PRAMOD S L, RAVIKIRANA, RAO A K P, et al. Effect of Sc addition and T6 aging treatment on the microstructure modification and mechanical properties of A356 alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A674: 438-450.
- [8] TZENG Y C, JIAN S Y. Effects of the addition of trace amounts of Sc on the microstructure and mechanical properties of Al-11.6Si alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A723: 22-28.
- [9] 朱凯, 王祝堂. 钪的研究进展及其在铝合金中的应用[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(2): 1-10.
- [10] WANG M H, DU X D, LI Y K, et al. Effect of Sc on as-cast microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg-Cu-Ti alloys[J]. Key Engineering Materials, 2017, 732: 32-37.
- [11] NOGITA K, YASUDA H, YOSHIYA M, et al. The role of trace element segregation in the eutectic modification of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 489(2): 415-420.
- [12] PATAKHAM U, KAJORNCHAIYAKUL J, LIMMANEEVICHITR C. Modification mechanism of eutectic silicon in Al-6Si-0.3Mg alloy with scandium[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 575: 273-284.

- [13] SONG D F, WANG S C, ZHAO Y L, et al. Effect of melt holding on morphological evolution and sedimentation behavior of iron-rich intermetallic phase in Al-Si-Fe-Mn-Mg alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(1): 1-13.
- [14] LIN C, WU S S, LV S L, et al. Influence of high pressure and manganese addition on Fe-rich phases and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloy with rheo-squeeze casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(2): 253-262.
- [15] 潘海成, 苗进. Sc、Zr 对 Al-4Fe 合金组织的细化作用[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(3): 328-331.
- [16] TILLER W A. Recent Research on Cast Iron[M]. New York: Gordon & Breach, 1969.
- [17] DING J, ZHANG P, LI X W, et al. Microstructure and thermal stability evolution behavior of Sc-containing A356.2 aluminum alloy under cyclic thermal exposure conditions[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A723: 165-173.
- [18] JIANG W, FAN Z, CHEN X, et al. Combined effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A619: 228-237.

(编辑: 彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管, 中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊, 是对国内外公开发行的中文核心期刊, 中国科技论文统计与分析用刊, SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊, 并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿, 征稿内容包括: 各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验, 此外还包括各相关学科和交叉学科, 如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址: 武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编: 430019

电话: 027-85358206, 85486024

传真: 027-85358127

投稿网址: www.special-cast.com

邮箱: tzzz@special-cast.com

