

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)

A356 合金是一种亚共晶铸造 Al-Si 合金,具有良好的综合力学性能,并且可焊接性、耐蚀性和气密性好,由于含有一定量的 Mg 元素,可以通过固溶及时效处理进一步提高力学性能,因此,在机械制造、航空航天、汽车和船舶制造业等领域中广泛应用^[1-4]。A356 合金的铸态组织包括初生 α 相和针片状共晶 Si,通常采用 Sr 对 A356 合金进行变质处理,改善其中的共晶 Si 形态和细化尺寸,以提高 A356 合金的力学性能。然而,采用 Sr 变质处理,也会增加铝合金熔体的 H 含量,产生针孔缺陷,影响 A356 合金的力学性能^[5-7]。

稀土元素 Sc 既具有稀土金属对铝合金的变质作用,同时又起到微合金化作用,Sc 能作为铝合金初生 α 相的非自发形核剂,细化初生 α 相,并且在热处理过程中能够抑制再结晶,从而显著提高铝合金的力学性能^[8-10]。对于 Sc 在铝合金中的应用及其作用机理的研究受到广泛关注^[11-14]。

鉴于 Sc 细化 Al-Si 合金凝固组织以及热处理对铝合金产生良好的弥散强化作用,本研究拟加入 Sc 对 A356 合金的凝固组织进行改善,并研究其对 A356 合金热处理后微观组织和力学性能的影响,旨在为高性能铝合金的应用提供参考。

1 试验方法

试验设计 A356 合金的主要化学成分为:7%的 Si,0.3%的 Mg,余量为 Al。原材料为工业纯 Al(99.9%,质量分数,下同)、工业纯 Mg(99.9%)、Al-12Si 中间合金,合金具体成分见表 1。

表 1 A356 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of A356 alloy										%
ω_B										
Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr	Sc	其他	Al	
7.698	0.303	0.175	0.117	0.091	0.101	0.090	0.1~0.3	0.181	余量	

稀土 Sc 以 Al-2Sc 中间合金的形式加入 A356 合金中,Sc 的加入量为 0.2%~0.3%。A356 合金采用电阻

式坩埚炉(SG 2-5-10 型)熔炼,先将配置 A356 铝合金的原材料加热熔化,并升温至 740℃,用钟罩压入 C_2Cl_6 进行精炼处理,撇渣后,按照不同 Sc 含量加入 Al-2Sc 中间合金,并且搅拌均匀,然后在熔体表面撒上覆盖剂,再次精炼,静置 5~10 min 后撇渣,当合金温度下降到 720℃时,浇注到经过预热的金属型中。铝合金试样浇注成 $\phi 20$ mm 试样,切割后观察微观组织,采用机加工的方法加工成直径为 $\phi 10$ mm 的拉伸试棒。

A356 合金的热处理参数为 530℃ $\times$ 6 h 固溶+200℃ $\times$ 7 h 时效。在铸态和热处理后的铸块上同一部位分别切取试样(10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 2 mm)进行金相组织观察(MR2000 型),采用质量分数为 0.5% 的 HF 对金相试样进行腐蚀。合金试样的物相分析在 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪上进行,并采用 EDAX 能谱仪及面扫描的方法定性分析铝合金中各相的成分,采用 SEM(JSM-6490LV 型)对凝固的共晶 Si 形貌进行观察。在 CSS-WAWDL 电动伺服万能试验机上进行准静态拉伸试验。

2 结果及分析

2.1 Sc 变质对 A356 合金微观组织的影响

不同 Sc 加入量下 A356 合金的铸态组织见图 1。可以看出,未加入 Sc 的 A356 合金铸态组织中,共晶 Si 的形态呈现粗大的针片状,这种形态的共晶 Si 对基体的割裂严重,导致合金的力学性能下降。当加入 0.2% 的 Sc 后,共晶 Si 形貌发生了明显的改变,共晶 Si 的分枝细化,数量显著增多,形态也由针片状变为纤维状和短棒状。可见,加入 0.2% 的 Sc 对 A356 合金中的共晶 Si 形态和尺寸具有显著的改善和细化作用。Sc 加入量增加到 0.3% 后,共晶 Si 的形态没有进一步变化,尺寸略有粗化。微量的 Sc 加入到 A356 合金中,生成了 Al_3Sc 质点,并且可以作为初生 α -Al 相的异质晶核,从而细化并改善初生 α -Al 的形态,导致共晶 Si 细化^[15]。

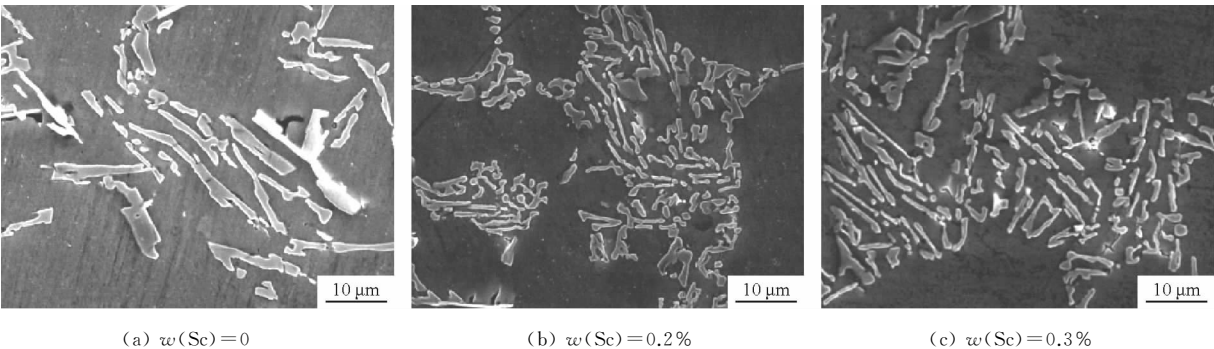


图 1 Sc 含量对共晶 Si 形貌的影响(SEM)

Fig.1 SEM morphologies of eutectic Si with different Sc contents

但是继续增加 Sc 会在 A356 合金中生成过多的 Al_3Sc 颗粒,这些晶粒经过碰撞合并,形成了较大的 Al_3Sc 颗粒,反而使其数量减少,对初生 $\alpha\text{-Al}$ 相的细化作用减小,导致了共晶 Si 与前者相比略有粗化。

经过 $530\text{ }^\circ\text{C}\times 6\text{ h}$ 固溶+ $200\text{ }^\circ\text{C}\times 7\text{ h}$ 时效处理后, A356 合金微观组织中的共晶 Si 形貌均发生了明显改变,见图 2。未加入 Sc 的 A356 合金中,共晶 Si 的形态由粗大的针片状变为短棒状,分布也更加均匀(见图 2a)。加入 0.2%~0.3% 的 Sc 并经过热处理后,共晶 Si 形态由纤维状和短棒状进一步演变为细小均匀分散的颗粒状,部分共晶 Si 形态呈近似细小的圆形颗粒状,不仅尺寸减小,分布也更加弥散和均匀。固溶处理后共晶 Si 形态的改变更有利于提高合金力学性能。对比可以看到,当 Sc 加入量为 0.2% 时,共晶 Si 的形态最为细小

和均匀,而当 Sc 加入量增加到 0.3% 时,共晶 Si 的尺寸又开始呈现出粗大化的倾向。在高温下对 Al-Si 合金进行长时间的保温固溶处理,能够促使共晶 Si 形态改变,其机理是在接近共晶温度下的高温保温时,大大提高了 Si 在 $\alpha\text{-Al}$ 基体中的固溶度,而且,高温下 Si 原子的扩散能力也显著增强,高温为 Si 在基体中的扩散提供了更好的动力学条件。在高温固溶处理的保温过程中,由于基体中 Si 的溶解度上升,促使 Si 原子固溶到 $\alpha\text{-Al}$ 相中,共晶 Si 的尖角和尖端处,因为界面能高,首先产生溶解和溶断,形态发生改变,而在后续的时效过程中, Si 再次沉淀析出,成为细小的颗粒状。因此, A356 合金中的共晶 Si 中的 Si 原子溶入基体和再析出,使得共晶 Si 晶体发生了溶断、钝化、颗粒化。当共晶 Si 的形貌趋于球形时,其界面能最低,所以,部分共

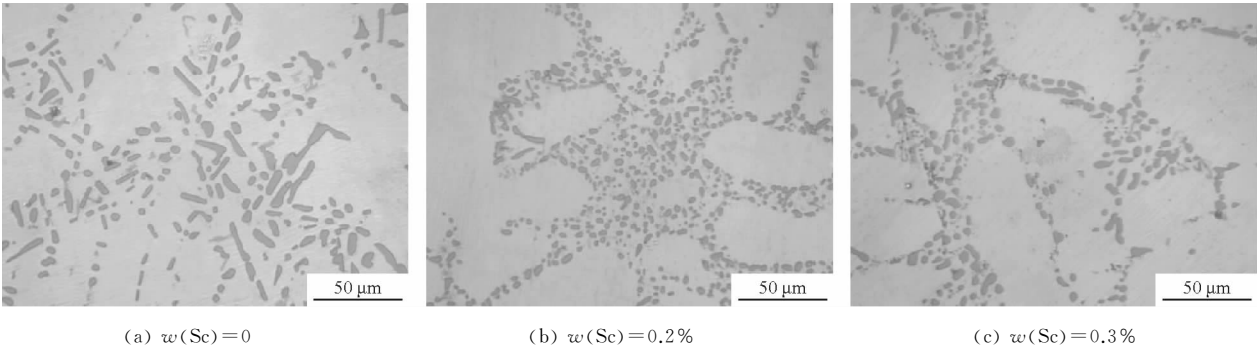


图 2 不同 Sc 加入量的 A356 合金热处理后的共晶 Si 形貌
Fig.2 Morphologies of eutectic Si in A356 alloy with different Sc contents after heat treatment

晶 Si 颗粒发生了球化现象,平均尺寸为 $6.5\sim 9.0\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.2 加入 Sc 的 A356 合金热处理后的相组成

经 0.2%Sc 变质处理后 A356 合金的 X 射线衍射物相分析见图 3。可以看出,Sc 加入量为 0.2% 的 A356 合金经热处理后,合金中除了初生 $\alpha\text{-Al}$ 相、共晶 Si 及少量 Mg_2Si 以外,还有少量的 Al_3Sc 析出相。加入的 Sc 元素一部分固溶在 $\alpha\text{-Al}$ 相中,另外一部分形成 Al_3Sc 相,作为初生 $\alpha\text{-Al}$ 相的异质晶核。在固溶热处理后,铝合金的微观组织弥散析出了小部分细小的次生

Al_3Sc 相,由于析出总量相对较低,所以其 XRD 衍射峰不突出。

对加入 0.2% Sc 的 A356 合金进行了 SEM 扫描和 EDS 分析,见图 4。可以看出,加入 0.2% 的 Sc 并热处理后, A356 合金微观组织中出现了一些细小的白色相,经过能谱分析,是含 Al、Si、Fe、Sc 元素的相。对加入 Sc 的 A356 合金固溶热处理后微观组织中的富 Fe 相进

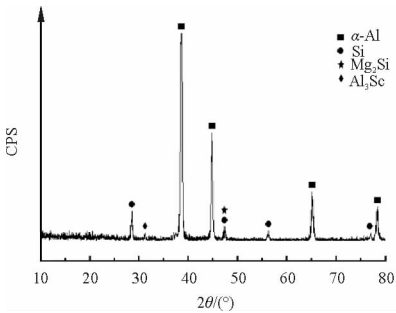


图 3 加入 0.2% 的 Sc 的 A356 合金热处理后的 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of A356 alloy with 0.2% Sc addition after heat treatment

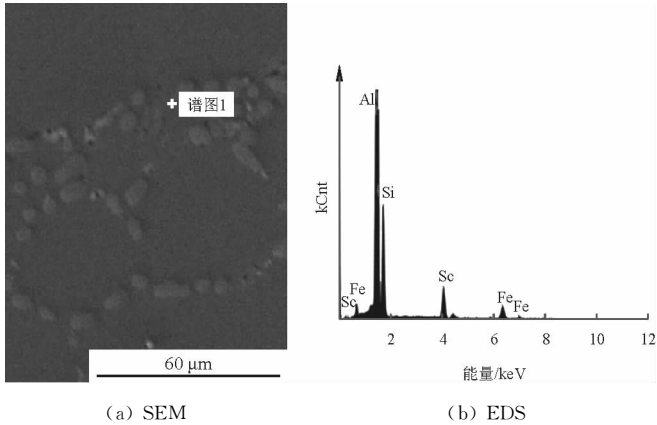


图 4 加入 0.2%Sc 的 A356 合金热处理 SEM 形貌及能谱分析
Fig.4 Energy spectrum analysis of A356 alloy with 0.2% Sc addition after heat treatment

行了观察和分析,发现富 Fe 相由铸态下常见的片状和针状变为蠕虫状,见图 5。

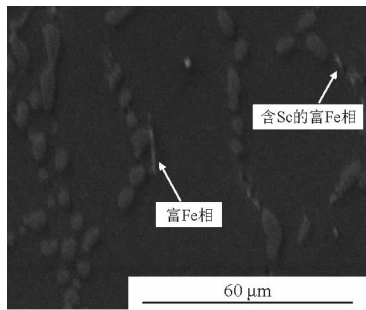


图 5 加入 0.2%Sc 的 A356 合金热处理态组织中的富 Fe 相形貌
Fig.5 Morphology of Fe-rich phase in heat-treated A356 alloy with 0.2% Sc addition

2.3 Sc 对 A356 合金力学性能的影响

加入 Sc 后 A356 合金的力学性能见表 2。可以看出,未变质 A356 合金固溶+时效处理后的抗拉强度为 213.9 MPa,伸长率为 5.4%。而加入 0.2% 的 Sc 变质处理后,A356 合金的抗拉强度提高了 36.6%,伸长率也上升了 40.7%。当 Sc 的加入量增加到 0.3% 时,合金抗拉强度为 284.1 MPa,伸长率为 7.1%,与加入 0.2% 的 Sc 相比,强度和伸长率均略有下降。

加入 Sc 元素,一方面由于形成的 Al_3Sc 具有异质形核作用,细化了初生 $\alpha-Al$ 相;另一方面,由于其变质作用,使共晶 Si 更加分枝细化,形态也由针片状变为纤维状、短棒状,再经过固溶+时效处理后,共晶 Si 由纤维状和短棒状进一步演变成为更加细小、分散的颗粒状,甚至球状。此外,固溶处理过程中,在初生 α 相中弥散析出 Al_3Sc 相,对合金产生显著的第二相强化作用,提高强度。

表 2 加入 Sc 的 A356 合金热处理后的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of A356 alloy with Sc addition after heat treatment

w(Sc)/%	抗拉强度/MPa	伸长率/%
0	213.9	5.4
0.2	292.2	7.6
0.3	284.1	7.1

3 结 论

(1)在 A356 合金加入 0.2%~0.3% 的 Sc,可以使共晶 Si 的形貌高度分枝化,形态由针片状变为纤维状、蠕虫状。

(2)加入 0.2%~0.3% Sc 的 A356 合金经过 530℃×6 h 固溶+200℃×7 h 时效处理后,共晶 Si 形态由纤维状和蠕虫状演变成为细小、分散的颗粒状。

(3)A356 合金中加入 0.2% 的 Sc,再经过 530℃×

6 h 固溶+200℃×7 h 时效处理后,其抗拉强度达到 292.2 MPa,伸长率达到 7.6%,比未加 Sc 的合金强度和伸长率分别提高了 36.6% 和 40.7%。继续提高 Sc 加入量至 0.3% 时,合金的抗拉强度和伸长率略有下降。

参 考 文 献

[1] 刘静安.几种高性能汽车用铸造铝-硅合金[J].铝合金加工技术, 2002, 30(3): 47-51.

[2] 刘闪光,虞秀勇,毛郭灵,等.钇在亚共晶 Al-Si 合金中的作用研究进展[J].材料导报, 2022, 36(11): 1-7.

[3] 戴志雄.交通用铝为中国制造减重[J].有色金属工业, 2005(8): 70-71.

[4] 杨文涛,何鹏飞,刘明.热处理工艺对 Al-Si 合金显微组织和性能影响的研究现状[J].材料导报, 2022, 36(11): 1-8.

[5] 廖恒成,丁毅,孙国雄.Sr 对 Al2Si2Mg 铸造合金中 Mg2Si 相结晶行为影响的研究[J].铸造, 2002, 51(2): 80-84.

[6] 李华基,刘昌明,谭会辛,等.稀土和铈变质的 Al-Si-Mg 合金[J].重庆大学学报, 2000, 23(4): 23-29.

[7] 李双寿,唐靖林,曾大本.亚共晶 Al-Si 合金铈变质处理的孕育和衰退[J].铸造, 2005, 54(4): 344-347.

[8] ZHOU S A, ZHANG Z, LI M, et al. Effect of Sc on microstructure and mechanical properties of as-cast Al-Mg alloys[J]. Materials and Design, 2016, 90: 1 077-1 084.

[9] COSTA S, PUGA H, BARBOSA J, et al. The effect of Sc additions on the microstructure and age hardening behaviour of as cast Al-Sc alloys[J]. Materials and Design, 2012, 42: 347-352.

[10] 王月.含钕铝合金的研究进展[J].上海金属, 2003, 25(1): 36-40.

[11] 闫洪,张辉,杨祖贵.铸造 A356.2(Sc,La)铝合金研究[J].宇航材料工艺, 2022(3): 53-55.

[12] 李绍禄,潘清林,陈显明.Sc 和 Ti 复合微合金化对 Al-Mn 合金组织与性能的影响[J].兵器材料科学与工程, 2003, 26(1): 11-15.

[13] 黄为民,章爱生,颜小明.微量钕对 A357 合金组织与性能的影响[J].热加工工艺, 2011, 40(3): 18-21.

[14] 王芝秀,郑子樵,李海.少量 Sc 对 Al-Mg-Cu-Li-Zr 合金组织与性能的影响[J].材料热处理学报, 2008, 29(2): 90-94.

[15] 姚衡,张文达,刘云,等.固溶处理对含钕 ZAlSi7Cu2Mg 合金组织与性能的影响[J],材料热处理技术, 2011, 40(22): 179-181.

(编辑:栗万仲)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号

● 微官网

● 微商城

● 本刊会议

● 收录动态

● 稿件系统

● 行业动态

● 铸造前沿

● 经典案例

● 铸造学堂

● 专利与发明

● 联系我们

● 免费推广

● 铸造职场

● 产品库

● 企业库