

Fe 含量对铸造铝合金导热和力学性能的影响

周玉立 张俊超 林师朋 钟 鼓
(中铝材料应用研究院有限公司苏州分公司)

摘 要 采用重力铸造制备了 5 组 Al-9Si-0.2Mg- x Fe($x=0.1, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$, 质量分数, %) 合金。通过金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)等手段,考察了 Fe 含量对合金的微观组织、导热性能及力学性能的影响。结果表明,当 Fe 含量从 0.1% 增加到 1.0% 时,合金中的含 Fe 相逐渐从汉字状的 π 相转变为长针状的 β 相,且相尺寸从几 μm 增加到 100 μm 以上;相应的合金的导热率降低了 6%,抗拉强度降低了 11.7%,伸长率降低了 66%。当 Fe 含量超过 0.6% 时,降幅明显增大。

关键词 Fe 元素;铸造铝合金;导热性能;力学性能

中图分类号 TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Fe Element on the Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Casting Al Alloys

Zhou Yuli, Zhang Junchao, Lin Shipeng, Zhong Gu

(Suzhou Branch, Chinalco Materials Application Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: Al-9Si-0.2Mg- x Fe alloys with different Fe content were prepared by gravity casting, and the effects of Fe element on the microstructures, thermal conductivity and mechanical properties of Al alloys were investigated through OM, SEM and EDS analysis. The results indicate that with Fe increasing from 0.1% to 1.0%, the morphology of iron-containing intermetallic is converted from script like π phase to needle like β phase, and the dimension is increased from several microns to larger than 100 μm . Correspondingly, the thermal conductivity, tensile strength and elongation of alloys are decreased by 6%, 11.7% and 66%, respectively, and a sharper decrease occurs when the Fe content is over 0.6%.

Key Words: Fe Element, Casting Aluminum Alloy, Thermal Conductivity, Mechanical Properties

Al-Si 系合金因具有优良的铸造性能,如流动性好、收缩率和热裂倾向小等,已广泛应用于汽车零部件、5G 通讯、3C 电子产品等领域,占铝铸件总产量的 90%。其中除主元素 Si 外,Fe 作为固有杂质在铸造铝合金中很难避免。在用 Bayer 法电解铝矾土生产原铝时就已存在 0.07%~0.1% 的 Fe,后续每一次重熔过程中都会由于与铁质器件的直接接触而产生不同程度的增铁^[1,2]。压铸生产过程中一般还会特别要求 Fe 含量提高到 0.7% 以上,以减轻材料粘模^[3]。

然而,随着相关应用领域中设备及电子系统越来越趋于大规模集成化、小型化及轻量化,相应运行功率密度和发热量也越来越高,对于材料的导热和力学性能等要求也越来越高^[4]。从材料设计角度考虑,由于室温下 Fe 在铝合金中的溶解度很低,最大溶解度仅为 0.05%,

过量的 Fe 将与 Al、Si 等元素形成既脆又硬的富 Fe 相,这种粗大的析出相对于材料的组织均匀性、导热和力学性能等的影响均极为不利。常规生产企业由于缺乏系统研究,无法通过精准调控 Fe 含量生产高端铸造铝合金。

因此,本课题旨在针对铸造铝合金在散热零部件领域的应用,通过成分设计及组织分析,系统考察 Fe 含量(0.1%~1.0%)对合金导热和力学性能的影响,并揭示其内在机理,为压铸过程中 Fe 含量控制提供参考。

1 试验材料和方法

采用高纯铝(99.99%,质量分数,下同)、纯镁(99.9%)、Fe 剂(75%)、高纯度 Al-10Si 中间合金为原材料配制 Al-9Si-0.2Mg- x Fe 合金,Fe 含量为 0.1%~

收稿日期:2020-12-14;**修改稿收到日期**:2020-12-31

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2001800)

第一作者简介:周玉立,女,1988 年出生,博士研究生,江苏苏州(215026),E-mail:zhouyuli@cmari.com

通信作者:钟鼓,男,1983 年出生,高级工程师,江苏苏州(215026),E-mail:zhonggu@cmari.com

引用格式:周玉立,张俊超,林师朋,等. Fe 含量对铸造铝合金导热和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(4):416-419.

ZHOU Y L, ZHANG J C, LIN S P, et al. Effects of Fe element on the thermal conductivity and mechanical properties of casting Al alloys [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4):416-419.

1.0%，按表 1 成分配料熔炼，熔炼温度为 740~780℃，选用 Al-10Sr 中间合金作为变质剂，在 720℃ 左右添加，添加量为 0.015%~0.03%；使用高纯氩气除气精炼，除气温度为 720~730℃，时间为 10 min，除气后扒渣，并静置 10 min。浇注温度控制在 710℃ 左右，采用铜模浇注。

表 1 Al-9Si-0.2Mg-xFe 合金名义成分

Tab.1 编号	Nominal composition of Al-9Si-0.2Mg-xFe alloy %				
	w_B				
	Si	Fe	Mg	Sr	Al
1	9.0	0.1	0.2	0.03	余量
2	9.0	0.4	0.2	0.03	余量
3	9.0	0.6	0.2	0.03	余量
4	9.0	0.8	0.2	0.03	余量
5	9.0	1.0	0.2	0.03	余量

采用 Thermo Scientific ARL 4460 型直读光谱仪分析合金的化学成分；采用标准金相试样制备方法制样，并使用 OLYMPUS GX51 金相显微镜和 JEOL JSM6480 扫描电镜观察分析试样的微观组织，采用截距法统计二次枝晶间距(SDAS)；采用 WDW3200 微机控制电子万能材料试验机测试合金的力学性能；采用

Netzsch LFA467 型激光热导仪检测试样的热导率。每组合金成分均选取 3 个试样，并计算其平均值。

2 合金组织分析

对 Al-9Si-0.2Mg-xFe 合金金相组织进行分析，见图 1。可以看出，各试样铸态组织中主要为白色的 α -Al 枝晶和浅灰色共晶 Si，还有少量的含 Fe 相。其中 α -Al 枝晶较为发达，枝晶臂相互搭接，用 Image-Pro-Plus 统计各试样二次枝晶间距(SDAS)，其中，每组合金随机选取 3 张金相照片，每张照片统计 10 段固定数量枝晶，并取平均值，见图 2。结果表明，随着 Fe 含量增加，SDAS 平均值逐渐从 21.3 μm 降至 17.2 μm ，降幅达 19%，表明 Fe 含量增加对合金组织有一定的细化作用。张亦杰等^[5]也发现了同样的现象，其原因在于合金凝固过程中，Fe 能够促进型壁晶核的游离和增加 α -Al 在型壁形核的质点数目，进而增加形核率，降低晶粒尺寸；MBUYA T O 等^[6]则认为 Fe 对晶粒的细化作用可能与其抑制晶粒生长有关。

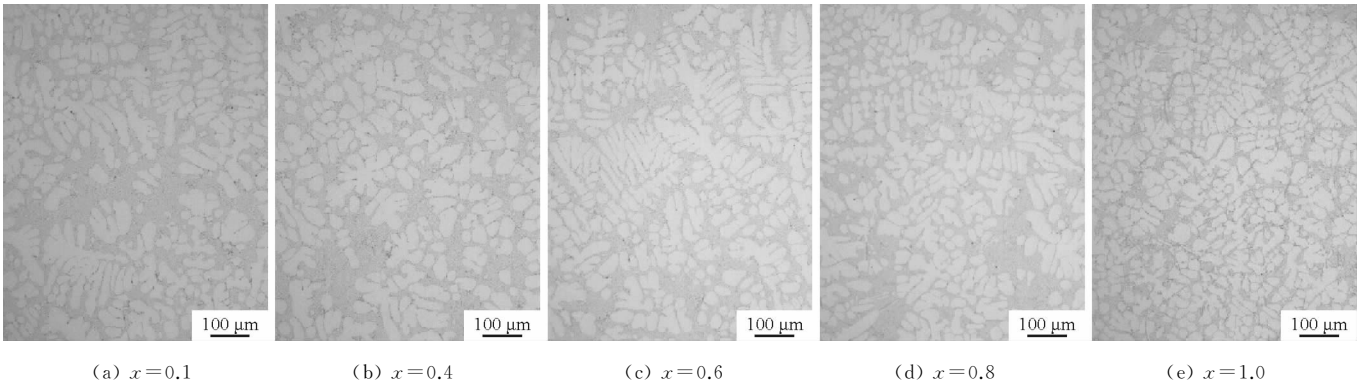


图 1 Al-9Si-0.2Mg-xFe 合金金相组织

Fig.1 Metallographic structure of Al-9Si-0.2Mg-xFe alloy

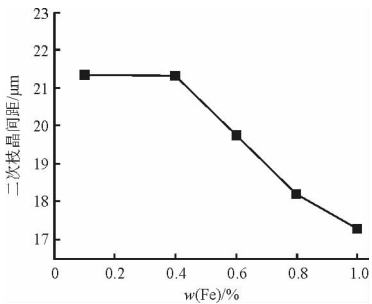


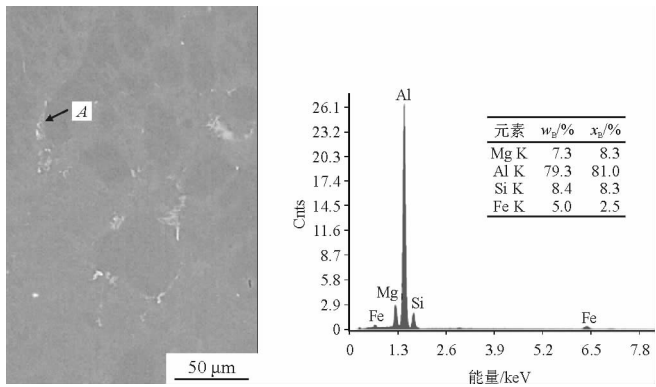
图 2 Al-9Si-0.2Mg-xFe 合金枝晶间距

Fig.2 Dendrite spacing statistics of Al-9Si-0.2Mg-xFe alloy

考虑到含 Fe 相会对合金组织和性能产生影响，因此，进一步对各试样中 Fe 相形貌开展分析。结果表明，Fe 含量较低时(0.1%)，合金中 Fe 相数量较少，多呈汉字状，SEM/EDS 结果表明，该相主要包含 Al、Fe、

Mg、Si 等 4 种元素，摩尔分数分别为 81%、2.5%、8.3%、8.3% (见图 3)，推测为 π - $\text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$ 相^[7]。随着 Fe 含量增加，Fe 相数量明显增加，且多呈长针状。EDS 结果表明，该相主要包含 Al、Fe、Si 元素，摩尔分数分别为 56.7%、18.5%、24.8% (见图 4)，推测为 β - Al_5FeSi 相^[8,9]。

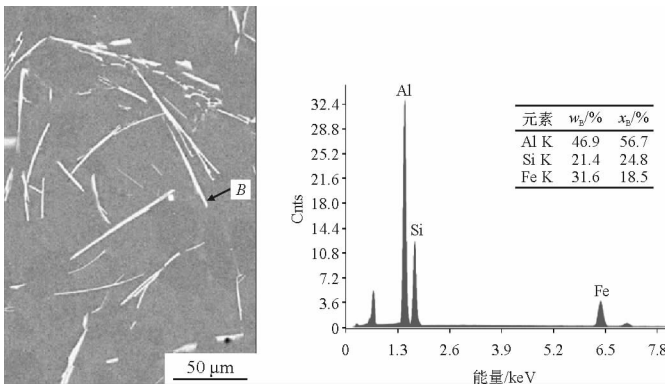
同时，对各组合金中 β -Fe 相平均尺寸进行统计，每组成分随机选取 3 张 SEM 图，共 20 个数据点，取平均值，结果见图 5 和图 6。由图 5 可知，随着 Fe 含量增加，Fe 相平均长度从 5.5 μm 增至 34.2 μm 。特别是 $w(\text{Fe}) \geq 0.6\%$ 时，长针状 β -Fe 相的数量和尺寸均急剧增加，最大尺寸达 110.5 μm ，见图 5d，图 5e。这种粗大的析出相会严重割裂基体，从而影响合金性能。



(a) SEM 图谱 (b) 位置 A 处 EDS 图谱

图 3 Al-9Si-0.2Mg-0.1Fe 合金 SEM 及 EDS 分析

Fig.3 SEM images and EDS analysis of Al-9Si-0.2Mg-0.1Fe alloy



(a) SEM 图谱 (b) 位置 B 处 EDS 图谱

图 4 Al-9Si-0.2Mg-1.0Fe 合金 SEM 及 EDS 分析

Fig.4 SEM images and EDS analysis of Al-9Si-0.2Mg-1.0Fe alloy

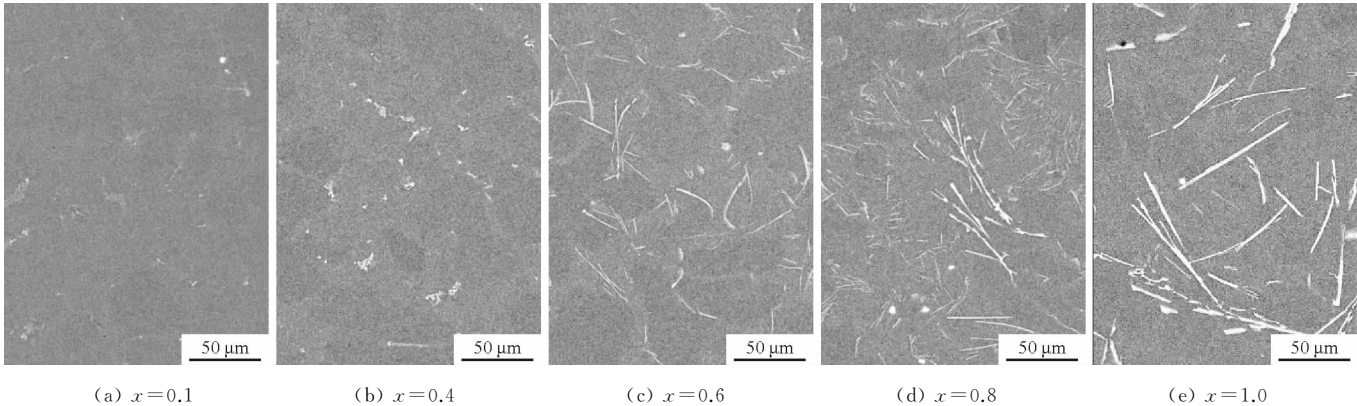


图 5 Al-9Si-0.2Mg-xFe 合金的 SEM 照片

Fig.5 SEM images of Al-9Si-0.2Mg-xFe alloy and average size statistics of Fe precipitated phase

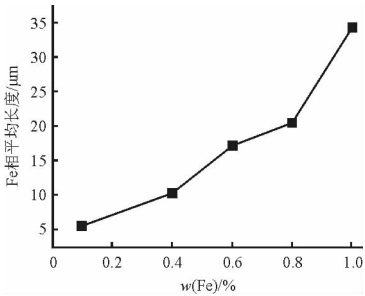


图 6 Al-9Si-0.2Mg-xFe 合金中 Fe 相平均尺寸

Fig.6 Average size of Fe phase in Al-9Si-0.2Mg-xFe alloy

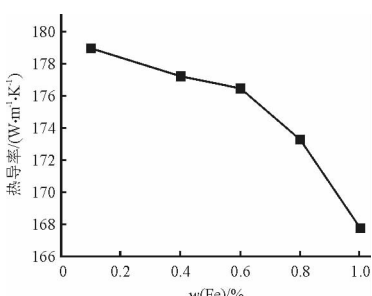


图 7 Al-9Si-0.2Mg-xFe 合金热导率

Fig.7 Thermal conductivity of Al-9Si-0.2Mg-xFe alloy

3 合金导热及力学性能分析

对 Al-9Si-0.2Mg-xFe 合金进行导热性能测试, 结果见图 7。可以看出, 随着 Fe 含量从 0.1% 增加到 1.0%, 合金热导率逐渐从 179.0 W/(m·K) 降至 167.8 W/(m·K), 降幅达 6.25%, 且在 Fe 含量高于 0.6% 时, 热导率降幅明显加剧。

与金属中自由电子导电理论一致, 金属的导热性能同样与组织中的晶格畸变程度、缺陷、相组成和分布等因素有关。晶体结构越完整, 自由电子定向传输效率越

高, 导电及导热性能越高^[10]。Al-Si 合金中加入 Fe 元素, 室温下 Fe 在 Al 基体中固溶度仅为 0.05%, 因此, 大部分 Fe 元素均以析出相形式存在。随着 Fe 含量增加, 含 Fe 相平均尺寸和数量也大幅增加, 特别是在 Fe 含量高于 0.6% 时, 迅速形成大量长针状 β-Al₅FeSi 相, 这种粗大的析出相同样会严重阻碍自由电子的运动, 进而导致电子散射几率大幅增加, 合金导热性能降低^[6]。徐纪平等^[11]在研究杂质元素 Fe 对 YL102 铝合金电导率的影响时同样发现 Fe 含量从 0.75% 增加到 1.7% 时, 合金电导率由于长针状 β-Al₅FeSi 相的存在而呈下降

趋势。此外,随着 Fe 含量增加, α -Al 基体二次枝晶间距逐渐增加,导致晶粒组织细化,晶界数量增多,对自由电子的运动有着强烈的阻碍作用,也会降低能量传输效率及导热性能^[4]。

Al-9Si-0.2Mg- x Fe 合金的力学性能见图 8。可以看出,随着 Fe 含量增加,合金的屈服强度从 76.9 MPa 增加到 81.04 MPa,呈小幅度增加趋势,而合金的抗拉强度从 181.1 MPa 降低至 160 MPa,降幅达 11.7%;合金的伸长率从 14.6% 降至 5.0%,降幅达 66%。说明当 Fe 含量在 0.1%~1.0% 范围内增加时,对合金屈服强度有微小提升作用,但对抗拉强度和伸长率的不利影响较大。

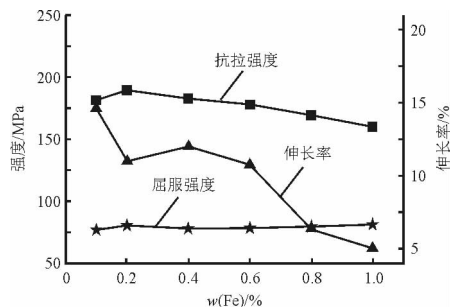


图 8 Al-9Si-0.2Mg- x Fe 合金的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of Al-9Si-0.2Mg- x Fe alloy

汪黎^[2]和高青等^[12]研究表明,当富 Fe 相高于临界值时,铝合金力学性能会急剧降低。当 Fe 含量增加时,主要对铝合金的抗拉强度和韧性有很大危害,而对铝合金的屈服强度影响不大。这是因为 Fe 含量增加时,合金中 β -Al₅FeSi 相数量及尺寸均逐渐增加,该相与其他含 Fe 相相比,具有更大的长径比,因此更容易阻碍位错的滑移,造成位错堆积,进而产生应力集中,在应力作用下更容易形成显微裂纹。同时,该相为非常活跃的气孔形核基底,微小的气孔依靠该相形核,造成了枝晶间区域内的显微缩松。因此,会直接影响合金的抗拉强度和伸长率。

4 结 论

(1)在 Al-9Si-0.2Mg- x Fe 合金系中,随着 Fe 含量从 0.1% 增加到 1.0%,二次枝晶间距平均值逐渐从 21.3 μ m 降至 17.2 μ m,降幅达 19%,表明 Fe 元素增加对合金组织有一定的细化作用。同时,合金中的含 Fe 相逐渐从汉字状的 π 相转变为长针状的 β 相,且相尺寸从几 μ m 增加到 100 μ m 以上。

(2)随着 Fe 含量增加,Al-9Si-0.2Mg- x Fe 合金的热导率逐渐从 179 W/(m·K) 降至 167.8 W/(m·K),降幅达 6.25%,且在 Fe 含量高于 0.6% 时,热导率降幅明显加剧。这主要是由于粗大的长针状 β 相及晶界数

量增多对自由电子运动的阻碍作用导致的。

(3)随着 Fe 含量增加,Al-9Si-0.2Mg- x Fe 合金的抗拉强度从 181.1 MPa 降至 160 MPa,降幅达 11.7%;伸长率从 14.6% 降至 5.0%,降幅达 66%。这是因为 β 相具有更大的长径比,更容易阻碍位错滑移,从而产生应力集中,影响合金的力学性能。

参 考 文 献

- [1] 唐奇. A356 铝合金中富铁相组织演变规律及控制[D].重庆:重庆大学,2018.
- [2] 汪黎. Fe 对 A356 铸造铝合金性能的影响研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [3] 陈涛,宋东福,陈胜迁,等. Al-Si-Fe 铸造铝合金的搅拌摩擦加工组织和性能研究[J]. 稀有金属, 2019, 43(12): 1 275-1 281.
- [4] 周玉立,邹纯,赵明宝,等. Mg、Sc 对铸造铝合金导热和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(4): 353-356.
- [5] 张亦杰,江盛玲,马乃恒,等. Fe、Si 对工业纯铝晶粒细化的影响[J]. 热加工工艺, 2006, 35(1): 25-27.
- [6] MBUYA T O, ODERA B O, NGANGA S P. Influence of iron on castability and properties of aluminum silicon alloys: Literature review[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2003, 16 (5): 451-465.
- [7] SANTOS J, JARFORS A E W, DAHLE A K. Formation of iron-rich intermetallic phases in Al-7Si-Mg: Influence of cooling rate and strontium modification[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2019, A50: 4 148-4 165.
- [8] BACAICOA I, LUETJE M, WICKE M, et al. 3D morphology of Al₅FeSi inclusions in high Fe-content Al-Si-Cu alloys[J]. Procedia Structural Integrity, 2016(2): 2 269-2 276.
- [9] KUCHARIKOVÁ L, TILLOVÁ E, CHALUPOVÁ M, et al. Analysis of microstructure in AlSi₇Mg_{0.3} cast alloy with different content of Fe[J]. Transportation Research Procedia, 2019, 40: 59-67.
- [10] CHEN J K, HUNG H Y, WANG C F, et al. Effect of casting and heat treatment processes on the thermal conductivity of an Al-Si-Cu-Fe-Zn alloy[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 105: 189-195.
- [11] 徐纪平,廖秋慧,傅子卿. 杂质元素 Fe 对铸造铝合金 YL02 电导率的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(2): 77-80.
- [12] 高青,赵忠魁,刘波祖,等. 铸造 Al-Si 系合金中的合金元素的作用[J]. 材料导报, 2014, 28(5): 74-78.

(编辑:栗万仲)

消息更正

本刊第三期消息"具有防腐性能的高强度碳纤维网球拍铸造工艺及性能研究"作者张楠;王长磊修改为王长磊;张楠。

特此说明!

《特种铸造及有色合金》杂志社