DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.02.002

Fe 含量对 Al-8Si-0.5Mg 合金组织及性能的影响

孙 博,刘玉杰,刘春明

(东北大学 材料学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要:利用光镜、扫描电镜观察及硬度、拉伸、导电和导热性能测试等研究了 Fe 对 Al-8Si-0.5Mg 合金组织及性能 的影响。结果表明,随着 Fe 的增加,铸态组织中第二相比例逐渐增加,二次枝晶间距逐渐减小,针状富 Fe 相平均长度先 升高后降低,0.9%Fe 时达到最大值 58 μm;同时,合金的硬度逐渐升高,电导率和热导率均呈逐渐降低的趋势,屈服强 度逐渐升高。当 1.15%Fe 时,硬度达到最大值 90 HV;电导率和热导率分别下降了约 14%和 11%;屈服强度升高了约 13.7%。随着 Fe 的增加,伸长率呈下降趋势,当 0.9%Fe 时下降了 48%,而后随着 Fe 含量增加基本保持不变。

关键词:Al-8Si-0.5Mg 合金;Fe 含量;微观组织;力学性能;导电导热性能 中图分类号:TG292;TG113 文献标识码:A 文章编号:1000-8365(2022)02-0083-07

Effect of Fe Content on Microstructure and Properties of Al-8Si-0.5Mg Alloy

SUN Bo, LIU Yujie, LIU Chunming

(School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The effect of Fe on microstructure and performance of Al-8Si-0.5Mg alloy was studied by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and hardness, tensile, electrical and thermal conductivity tests. The results show that with the increase of Fe content, the proportion of the second phase in the as-cast microstructure increases gradually, the secondary dendrite spacing decreases gradually, and the average length of the needle-like Fe-rich phase increases first and then decreases, and reaching the maximum 58 µm at 0.9% Fe. At the same time, the hardness of the alloy gradually increase, the electrical conductivity and thermal conductivity show a trend of gradual decrease, and the yield strength gradually increase. When 1.15% Fe, the hardness reaches the maximum 90 HV. The conductivity and thermal conductivity decrease by about 14% and 11% respectively. The yield strength increase by about 13.7%. With the increase content of Fe, the elongation will decrease by 48% when the Fe content is 0.9%Fe, and then it remains unchanged with the increase of Fe content. **Key words**: Al-8Si-0.5Mg alloy; Fe content; microstructure; mechanical property; electrical and thermal conductivity

铝合金具有密度低、强度高、塑性好、导热性能 优良等优点,被越来越多的电子产品外壳、LED 散 热片、无线通讯基站散热基板等零部件所采用^[1-3]。 而常规压铸导热铝合金材料(如 ADC12、A380 等)虽 然具有优良的铸造性能和力学性能,但其室温导热 系数仅 90~120 W/(m·K),难以满足当前行业中电子 通讯设备对散热材料的应用需求^[4-5],所以开发一种 新型的铸造 Al-Si 合金十分必要。但 Fe 作为固有杂 质在合金中很难避免,熔炼过程中与铁制器件的接 触也会使其含量增加。但当合金作为薄壁类铸件生 产时,适当的 Fe 元素可以改善合金的脱模性能,并 且合金中少量 Fe 元素的存在有助于提高铝的结晶

收稿日期:2021-11-17

- 基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2001801)
- 作者简介:孙 博(1996—),硕士生.研究方向:铸造铝硅合金. 电话:13555782655,Email:309886112@qq.com
- 通讯作者: 刘春明(1961—).博士,教授.研究方向:金属材料的组 织与性能.电话:13609880333, Email:cmliu@mail.neu.edu.cn

温度,从而使铸态晶粒得到细化⁶⁰。但 Fe 元素会在 合金中形成粗大的针状 β -Fe 相,对合金性能产生较 大的危害,而对于向合金中加入 Mn 元素改善 β -Fe 相形态的做法,会降低合金的散热性能,所以不便于 添加其他合金元素;由于 Fe 对合金的组织和性能有 显著影响,目前国内外有关 Fe 元素对于铝合金作用 的研究已有一些报道^[7-9],多数认为 Fe 对合金的性能 是有害的,它会降低合金的力学性能、韧性和疲劳寿 命,限制其工业应用^[10]。所以,研究探讨 Fe 元素含量 对合金组织性能的影响,确定出 Fe 元素适当的添加 范围是十分必要的。

本文作者旨在研究向 Al-8Si-0.5Mg 合金中添 加不同含量的 Fe 元素,确定合金组织和性能随 Fe 含量的变化规律。

1 试验材料与方法

实验材料为铸造 Al-8Si-0.5Mg 合金,通过改变 合金中 Fe 元素含量来确定 Fe 的改变对合金组织与 性能的影响规律。实验材料为工业纯铝(99.85%)、 Al-30Si、Al-10Mg、Al-10Fe 等。熔炼设备为井式电阻 炉。在电阻炉内于 760 ℃加热熔化 Al-8Si-0.5Mg 合 金,经精炼、扒渣以后降温至 730 ℃保温静置 30 min, 将所得的熔融合金浇至水冷铜模后取出。对合金的 成分分析结果如表 1。可见熔铸合金的成分与预设 成分基本一致。

	表1	Al-8Si	-0.5Mg	合金的	化学	成分	w (%)
Tah	1 C	hemical	compos	ition of	A1_	8Si_0	5 Μ σ	allo

		I		8
	Al	Si	Mg	Fe
1#	Bal.	7.8	0.48	0.15
2#	Bal.	7.9	0.47	0.35
3#	Bal.	8.0	0.49	0.55
4#	Bal.	8.2	0.51	0.75
5#	Bal.	7.9	0.48	0.90
6#	Bal.	8.0	0.53	1.15

从铸锭上截取各种测试用形状与尺寸的试样。 各种测试用装置及测试条件如下:对试样进行 X 射 线衍射(XRD)分析;对经磨制、抛光后的试样进行 金相组织观察;在 JSM-7001 F 型扫描电镜下对试样 进行深度观察及能谱分析以检测第二相成分;将合 金锭上取样加工成 ϕ 5 mm 的标准拉伸试样,在 AG-XPLUS100KN 电子拉伸试验机上进行室温拉 伸,拉伸速率为 2 mm/min;用涡流电导仪和激光导 热仪测量合金的导电系数和热导率。

2 试验结果及讨论

2.1 Fe 含量对 Al-8Si-0.5Mg 合金组织的影响 为了确定 Fe 含量变化对合金中的相组成是否 存在影响,对不同 Fe 含量合金进行了 XRD 分析,结 果如图 1。XRD 分析结果表明,合金组织均主要由 基体 α -Al 和共晶 Si 相组成,此外还存在 Al_Fe_Si 和 Al_FeSi 两种三元相,未出现含 Mg 元素相的衍射峰。



图 1 不同铁含量 Al-8Si-0.5Mg 铝合金的 XRD 图谱 Fig.1 XRD patterns of Al-8Si-0.5Mg alloys with different Fe contents

图 2 是不同铁含量 Al-8Si-0.5Mg 铝合金的显 微组织图。由图可见,合金主要由 α-Al 枝晶和呈针 状或板条状的 Si 相组成,其中 α-Al 呈现不规则的 取向;由于是水冷铜模铸造,会造成铸锭的成分的不 均匀和枝晶偏析,所以合金表面会出现比较多的第 二相富集现象,同时发现合金中富 Fe 相会比较偏向 于在 Si 相附近形成。Si 相的存在会促进富 Fe 相的 形核长大^[11],所以在共晶 Si 周边会有富 Fe 相的富 集;随 Fe 含量的升高,合金中呈粗大针状的富 Fe 相 逐渐增多,呈无规则、无固定取向地排列分布在基体 表面,严重割裂基体;同时观察到当 Fe 元素含量较 高时,合金中会出现呈污泥状态的富 Fe 相,经观察 判定,并依据文献总结^[12],认定为α富铁相,如图 2(f)。



图 2 个问铁苫重 AI-8SI-0.5Mg 话言畫的並做组织 Fig.2 Microstructures of as cast AI-8Si-0.5Mg alloys with different Fe contents

随着 Fe 含量的增加,合金组织二次枝晶间距变 化如图 3(a)所示,二次枝晶间距是使用 IPP(Image Pro Plus)软件对金相观察结果进行统计而得到的。 可以看出,随着 Fe 含量逐渐增加,合金的二次枝晶 间距逐渐降低。由此可见,Fe 的添加对合金微观组 织有一定的细化作用。图 3(b)所示为不同 Fe 含量 下合金铸态组织中表面区域第二相所占比例。可 以看出,随着 Fe 含量的增加,表面区域第二相比 例明显增加,这是因为 Fe 在铝合金中的溶解度很 低,室温下固溶度仅为 0.05%左右,因此,大部分 Fe 元素以第二相的形式存在,其与 Al、Si 等元素形 成的相富集在表面区域,导致表面区域第二相所 占比例增加。

图 4 为不同 Fe 含量合金表面区域的 SEM 背 散射照片。可以看出,富 Fe 相呈现出较为明显的亮 白色特征,随 Fe 含量的变化,表面区域的富 Fe 相形 貌、量以及针状富 Fe 相的长度都有一定的变化。Fe 含量较少时,富 Fe 相主要呈汉字状或鱼骨状,对合 金力学性能影响较小;随 Fe 含量逐渐增加,针状富 Fe 相逐渐增加,不均匀地分布在基体表面,大尺寸 的针状富 Fe 相明显增多。

图 5 是根据图 4 的背散射图片统计的合金中 β-Fe 相平均长度的变化趋势。当 Fe 为 0.15%时, β-Fe 相平均长度最短,为 23 μ m,当 Fe 达到 0.9% 时,其平均长度达到最大值,58 μ m,呈现出比较 明显的细针状散乱分布于基体之上;Fe 含量进一 步增加时,β-Fe 相平均尺寸略有降低,为 49 μ m。 根据照片统计,当 Fe 达到 0.35 %后,合金中 β-Fe 相的尺寸最大可以达到 180 μ m 左右,对基体的 影响比较大。

图 6 为铸态合金试样的背散射电子扫描电镜照 片。可以看到,长针状的富 Fe 相分布在铝基体中;Fe 含量较低时,形成的针状富铁相较少,第二相以汉字 状或鱼骨状的 α 富铁相为主,这种富铁相对基体性



图 4 不同铁含量 Al-8Si-0.5Mg 铝合金的扫描电镜背散射图像 Fig.4 SEM Backscatter Images of Al-8Si-0.5Mg alloys with different Fe contents



图 5 Al-8Si-0.5Mg 合金中不同 Fe 添加下的 β-Fe 相平均长 度

Fig.5 Average length of β -Fe phase in Al-8Si-0.5Mg alloy with different Fe content

能影响较小,而随着 Fe 含量的升高,长针状的富 Fe 相明显增多,对合金性能产生不利影响。

表2 Al-8Si-0.5Mg-xFe合金能谱分析结果 (at%) Tab.2 EDS results of Al-8Si-0.5Mg-xFe alloys

Tuble LDB Testills of The opt of the grade anoys						
合金	区域	Al	Si	Fe		
A1 90: 0 15E-	1	68.46	15.30	15.44		
AI-851-0.15Fe	2	64.64	11.78	23.57		
Al-8Si-0.35Fe	1	61.54	19.83	18.63		
Al-8Si-0.55Fe	1	82.16	9.88	7.96		
Al-8Si-0.75Fe	1	67.00	18.12	14.88		
Al-8Si-0.90Fe	1	68.26	18.87	12.87		
Al-8Si-1.15Fe	1	62.81	22.92	14.27		



(d) 0.75%

(e) 0.90%

(f) 1.15%

图 6 不同 Fe 含量的铸态 Al-8Si-0.5Mg-xFe 合金背散射电子像 Fig.6 BSE images of the as-cast Al-8Si-0.5Mg-xFe alloys with different content of Fe

表 2 为铸态合金扫描组织(图 6)中标示处的 EDS 分析结果。位置1能谱分析中的成分,铁硅含 量原子比接近 1:1。结合 XRD 和扫描形貌判断为 β-AlFeSi(Al5FeSi)相。同时由图 6(a)中点 2 处的EDS 分析可以看出,Fe成分为 23.57 at.%,Si 为 11.78 at.%, 原子比接近 2:1。结合 XRD 以及扫描形貌为较明 显的鱼骨状判断为 α -AlFeSi(Al8SiFe2)相。以同 样的方式对其余 Fe 含量合金中的针状富铁相进 行观察分析可以得出其均为β富铁相。同时,当 Fe 含量升高时,在合金中并没有再发现有鱼骨状 富 Fe 相的形成,由此可以看出,当 Fe 含量升高 时,合金中的富铁相将会主要以针状的形式析出。 这与文献 [13] 结果一致。结合 EDS 结果,对 Al-8Si-0.5Mg-0.75Fe 合金中针状富铁相进行面扫 结果如图 7 所示。可以发现, Fe 十分均匀地分布 在针状相中。

2.2 Fe 含量对 Al-8Si-0.5Mg 合金性能的影响

图 8 是不同 Fe 含量铸态合金的硬度测试结果。 可以看出,随 Fe 含量增加,硬度呈现逐渐升高的趋势。当 Fe 含量为 0.15 %时硬度最小,为 80 HV;Fe 含量为 1.15%时,为 94 HV,达到最大值;硬度提高 了大约 17.5%。Fe 含量由 0.15%提高到 0.35%时,硬 度升高幅度较大;当 Fe 含量超过 0.35%时,上升趋 势趋于平缓。

图 9 为合金导电率(图 9a)和热导率(图 9b)随 Fe 含量的变化。可以看出,由于合金的导电性能和 导热性能具有一定的相关性,所以都随 Fe 含量的升 高而逐渐降低。这应该是因为:合金中共晶硅呈针片 状,β-AlFeSi 相呈长针状,对电子的散射增加,导致 合金电导率随 Fe 含量的升高而逐渐降低;而与金属 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



图 7 Al-8Si-0.5M-0.75Fe 铝合金的背散射电子图像何能谱分析 Fig.7 BSE Image and EDS results of acicular Fe-rich phase in Al-8Si-0.5Mg-0.75Fe alloy





有关。晶体结构越完整,自由电子定向传输效率越高,导热性能越高^[14],同时 Fe 室温时在 Al 基体中的 溶解度仅为 0.05 %左右,大部分都以析出物的形式 存在,随着 Fe 含量的升高,β-AlFeSi 相的尺寸和数 量明显增加,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 金导电和导热性能降低^[15]。

不同 Fe 含量合金拉伸力学性能如图 10 所示。 可以看出,随 Fe 含量的增加,屈服强度整体呈现逐 渐升高的趋势,由 0.15%Fe 的 117 MPa 升高到 133 MPa,提升大约 13.7%;抗拉强度呈现先降低再



图 9 Al-8Si-0.5Mg-xFe 铝合金的导电率导热率 Fig.9 Electrical and thermal conductivity of Al-8Si-0.5Mg-xFe alloys

升高的趋势,当 Fe 含量为 0.75%时到达最小值,为 199 MPa,Fe 含量为 0.35%时最大,为 219 MPa,抗 拉强度降低大约 10%;伸长率呈现逐渐下降的趋 势,由 0.15%Fe 的 12.53%下降为 0.9%Fe 的 6.7%, 下降了大约 46.5%。再升高 Fe 含量,伸长率变化 不大。

铸态合金的室温拉伸断口的 SEM 观察结果如 图 11。可以看出,拉伸试样断裂以后的断口主要存 在着准解理面;当 Fe 含量较少时,可以看到合金断 口处出现大量的撕裂棱,这种现象说明合金发生了



图 10 Fe 含量对力学性能的影响 Fig.10 Influence of Fe content on mechanical properties 明显的塑性变形;当 Fe 含量增加到 0.55%时,断口 表面的准解理面明显变大,且撕裂棱数量明显减少。 结合面扫及能谱分析可知,这是由于 Fe 含量升高, 合金中的针状富铁相增加,这些富铁相的存在会引 起合金的脆性断裂。当 Fe 含量进一步增加,合金断 裂表面处出现很多的准解理面,并且其面积明显增 加。这是由于 Fe 含量进一步上升导致合金中产生 大量 粗大的脆性针状 β-AIFeSi 相,进而引起合 金的脆性断裂。同时看出,重力铸造得到的合金 断口中几乎没有韧窝的生成,解离平台呈现大量存 在的状态。



(d) 0.75%

(e) 0.90%

(f) 1.15%



3 结论

(1)通过 XRD 测试表明铸态合金主要由α-Al、Si 相及富 Fe 相组成;随着 Fe 含量的升高,β-Fe 相含 量逐渐增加,尺寸变大,最大可达到 180 μm;当 Fe 含量达到 0.9%以后,合金中针状富 Fe 相呈现出明 显的更加细小的针状形貌,散乱地分布于基体表 面;第二相所占比例随 Fe 含量的增加逐渐增加;二 次枝晶间距逐渐降低。

(2)合金硬度随着 Fe 含量的增加逐渐升高, 最小值为 79 HV,最大值为 90 HV;导电性能、导热 性能随着 Fe 含量的升高均逐渐降低,这是由于 Fe 含量升高,针状 β-AlFeSi 相增多,对合金中自由电 子的散射作用增加。

(3)随着 Fe 含量增加,合金屈服强度逐渐增加,由 118 MPa 升高为 134 MPa, 抗拉强度和伸长率总

体上逐渐降低。其中伸长率在低 Fe 含量下降低明 显,由 12.5%降低为 6.6%,当 Fe 含量达到 0.9%后基 本保持不变;SEM 反映出的断口形貌,随 Fe 含量增 加,撕裂棱逐渐减少,解理面面积明显变大,所占比 例明显增加,从而引起合金穿晶脆性断裂。

参考文献:

- KIN D, LEE J, KIN J, et al. Enhancement of heat dissipation of LED module with cupric-oxide composite coating on aluminum-alloy heat sink [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106: 958-963.
- [2] 李雪辰,李小平,李国庆,等.整铸式铝合金加热盘的研制[J].铸造,2014,63 (12):1295-1297.
- [3] 罗淞,林高用,曾菊花,等.硬质相对 6061 铝合金异型散热型材
 表面质量的影响 [J].中国有色金属学报,2015,21(7):1521-1526.
- [4] 邓运来,张新明.铝及铝合金材料进展 [J].中国有色金属学报,

2019, 29(9): 321-347.

- [5] CHO Y H, KIM H W, LEE J M, et al. A new approach to the design of a low Si-added Al-Si casting alloy for optimising thermal conductivity and fluidity[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50 (22): 7271-7281.
- [6] 张建新,高爱华. 合金元素对 6063 铝合金组织性能的影响[J]. 铸造,2007,56(6):642-644.
- [7] 张建新, 钟建华. 合金元素对 6063 型材腐蚀性能的影响[J]. 铝 加工, 2002, 25(5): 7-9.
- [8] 沈宁,何建贤,李春流,等.双级时效对 6082 型材性能的影响[J].热加工工艺,2014,43(18);166-168.
- [9] 张建新,高爱华,陈昊. 合金元素对 Al-Mg-Si 系铝合金组织及性 能的影响[J]. 铸造技术,2007,28(3):373-375.
- [10] SEIFEDDINE S, SVENSSON I L. Prediction of mechanical proper-ties of cast aluminum components at various iron contents [J]. Materials & Design, 2010, 31(1):6-12.
- [11] SAMUEL E, SAMUEL A M, DOTY H W, et al. Intermetallic

phases in Al-Si based cast alloys: new perspective[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2014, 27:107-114.

- [12] YANG H L, JI S X, FAN Z Y. Effect of heat treatment and Fe content on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al-Si-Cu alloys[J]. Materials & Design, 2015, 85(7): 823-832.
- [13] KUCHARIKOVA L, TILLOVA E, CHAL UPOVA M, et al. Analysis of microstructure in AlSi7Mg0.3 cast alloy with different content of Fe[J]. Transportation Research Procedia, 2019, 40: 59-67.
- [14] 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.
- [15] MBUYATO, ODERABO, NGANGASP. Influence of iron on castability and properties of aluminum siliconalloys: Literature review [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2003, 16 (5):451-465.