

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

温度,从而使铸态晶粒得到细化^[6]。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 and 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

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

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 $w(\%)$
Tab.1 Chemical composition of Al-8Si-0.5Mg alloy

	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-7001F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 $\phi 5$ 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 $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ 和 Al_3FeSi 两种三元相,未出现含Mg元素相的衍射峰。

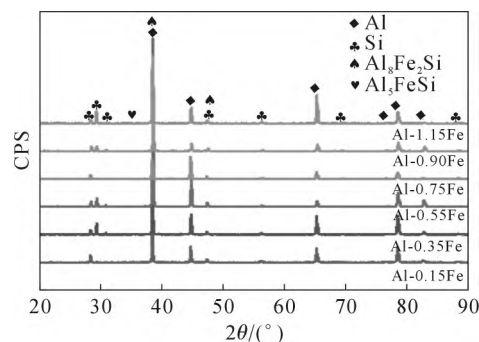


图1 不同铁含量Al-8Si-0.5Mg铝合金的XRD图谱
Fig.1 XRD patterns of Al-8Si-0.5Mg alloys with different Fe contents

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^[1],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^[2],认定为 α 富铁相,如图2(f)。

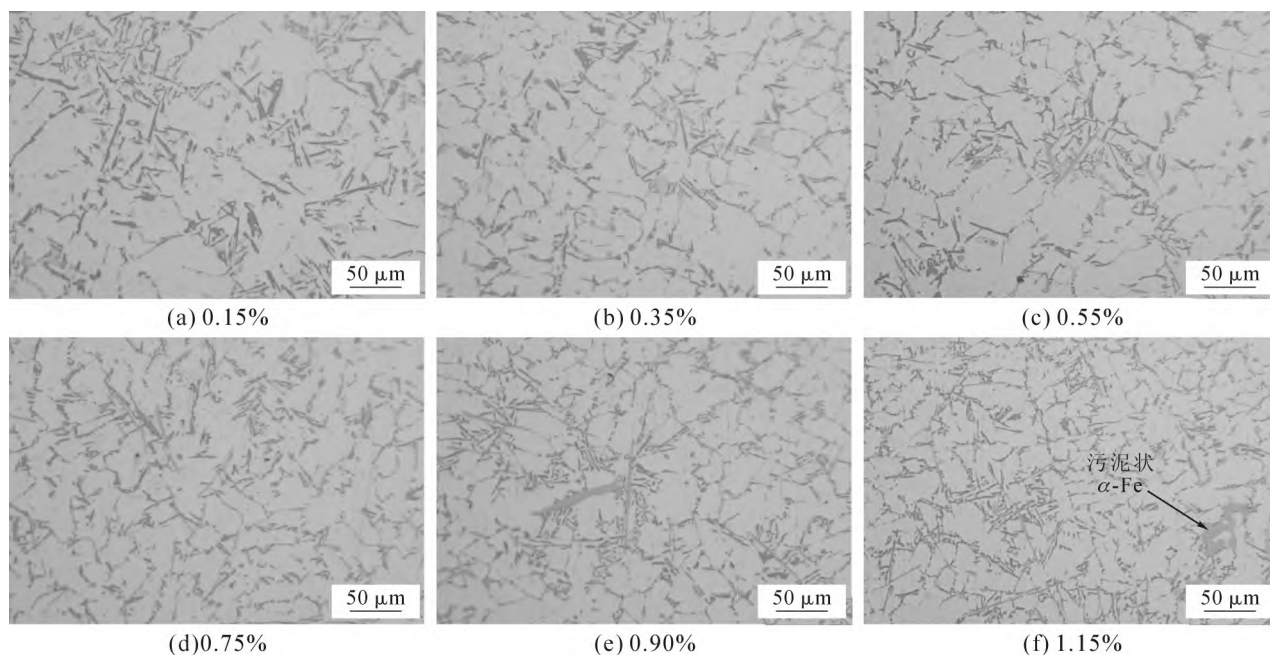


图2 不同铁含量Al-8Si-0.5Mg铝合金的显微组织
Fig.2 Microstructures of as cast Al-8Si-0.5Mg alloys with different Fe contents

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 μm ,当 Fe 达到 0.9%时,其平均长度达到最大值,58 μm ,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 μm 。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 μm 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

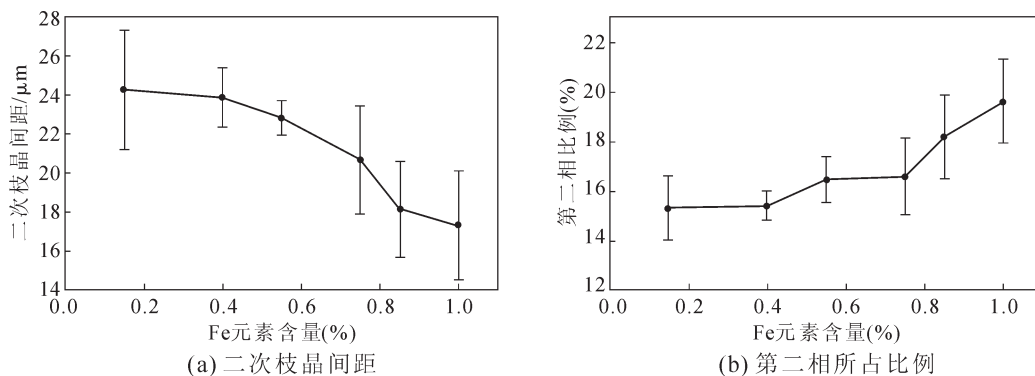


图 3 不同铁含量 Al-8Si-0.5Mg 铝合金显微组织的枝晶特征

Fig.3 Dendrite characteristics of Al-8Si-0.5Mg alloys with different Fe contents

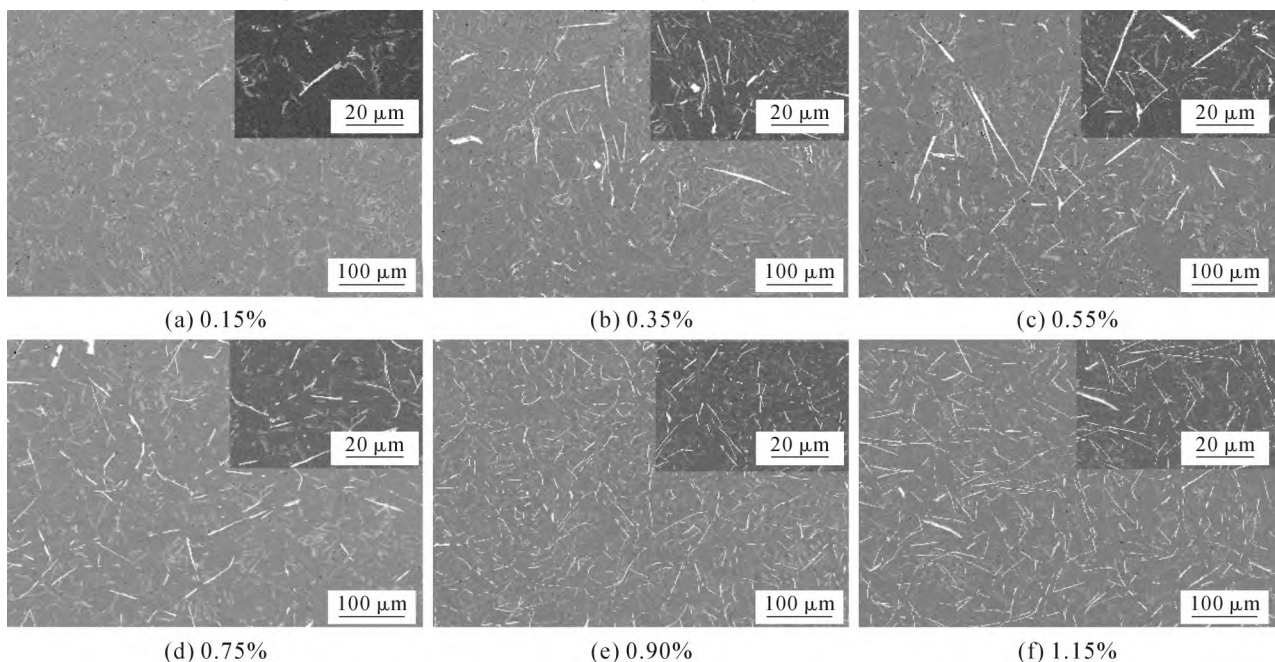


图 4 不同铁含量 Al-8Si-0.5Mg 铝合金的扫描电镜背散射图像

Fig.4 SEM Backscatter Images of Al-8Si-0.5Mg alloys with different Fe contents

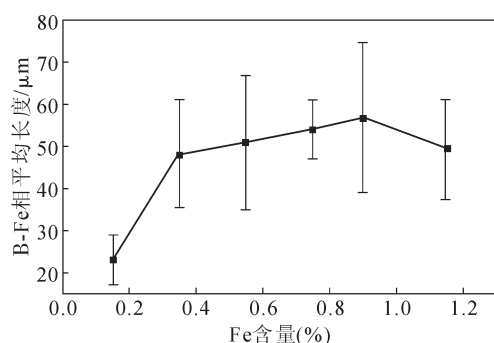


图5 Al-8Si-0.5Mg合金中不同Fe添加下的β-Fe相平均长度

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

合金	区域	Al	Si	Fe
Al-8Si-0.15Fe	1	68.46	15.30	15.44
	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

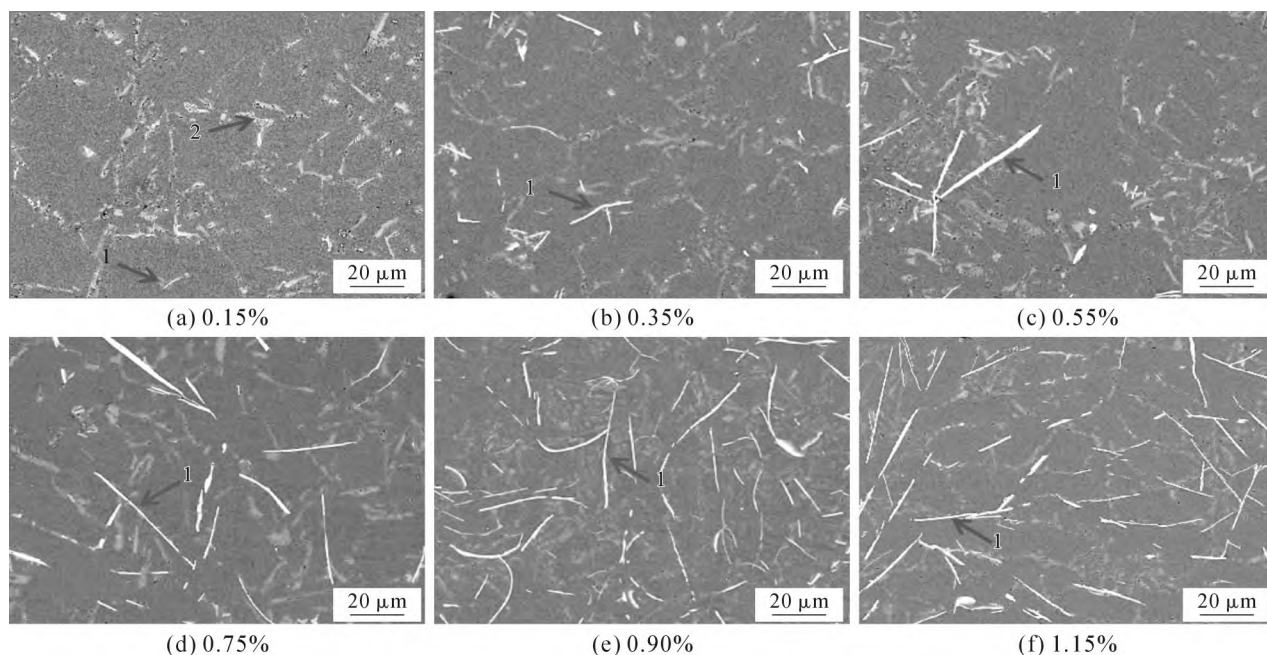


图6 不同Fe含量的铸态Al-8Si-0.5Mg-xFe合金背散射电子像

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

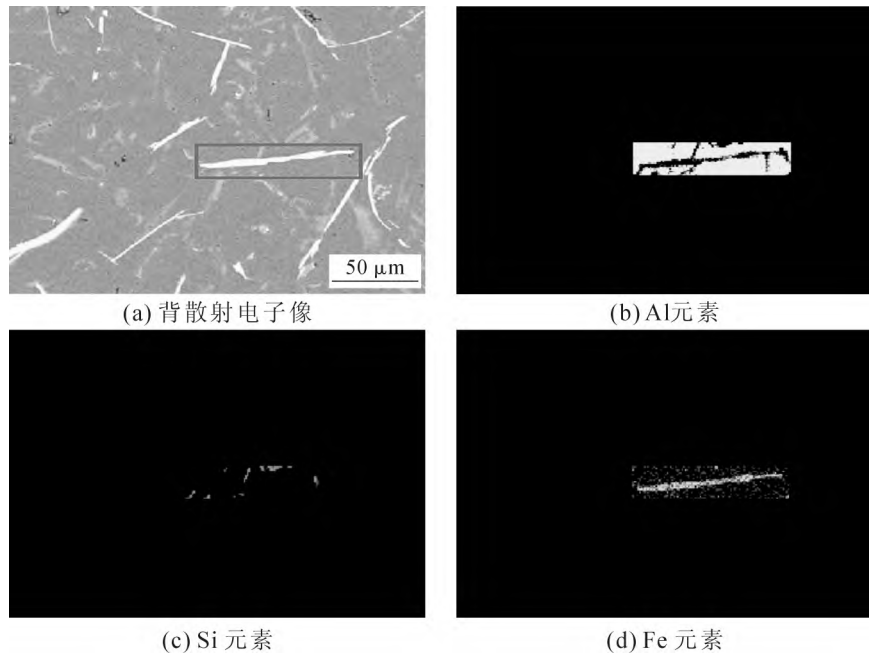


图 7 Al-8Si-0.5Mg-0.75Fe 铝合金的背散射电子图像能谱分析

Fig.7 BSE Image and EDS results of acicular Fe-rich phase in Al-8Si-0.5Mg-0.75Fe alloy

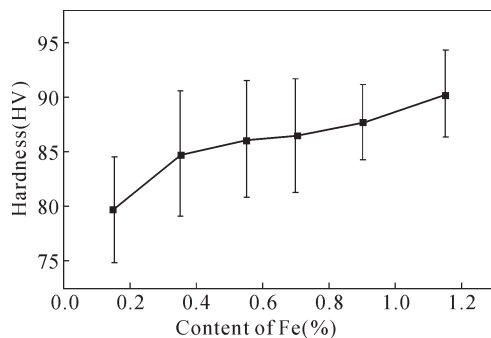
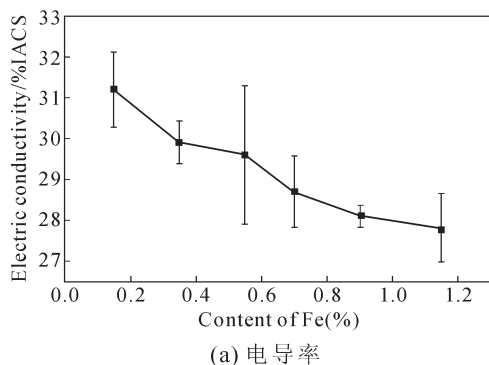
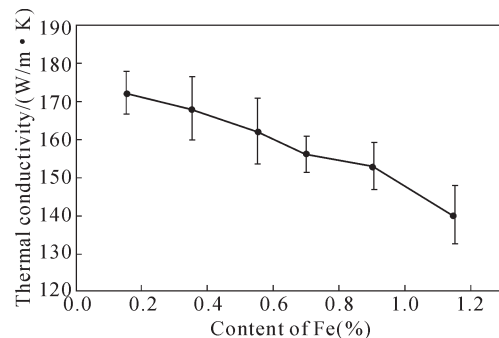


图 8 Al-8Si-0.5Mg 合金的硬度随 Fe 含量的变化

Fig.8 Hardness change of Al-8Si-0.5Mg alloy with different of Fe content



(a) 电导率



(b) 热导率

图 9 Al-8Si-0.5Mg-xFe 铝合金的电导率导热率

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

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

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

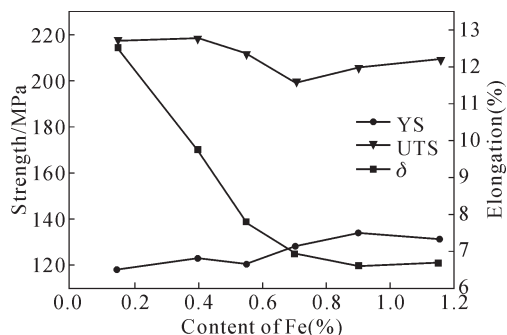


图 10 Fe 含量对力学性能的影响

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 -AlFeSi 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,解理平台呈现大量存在的状态。

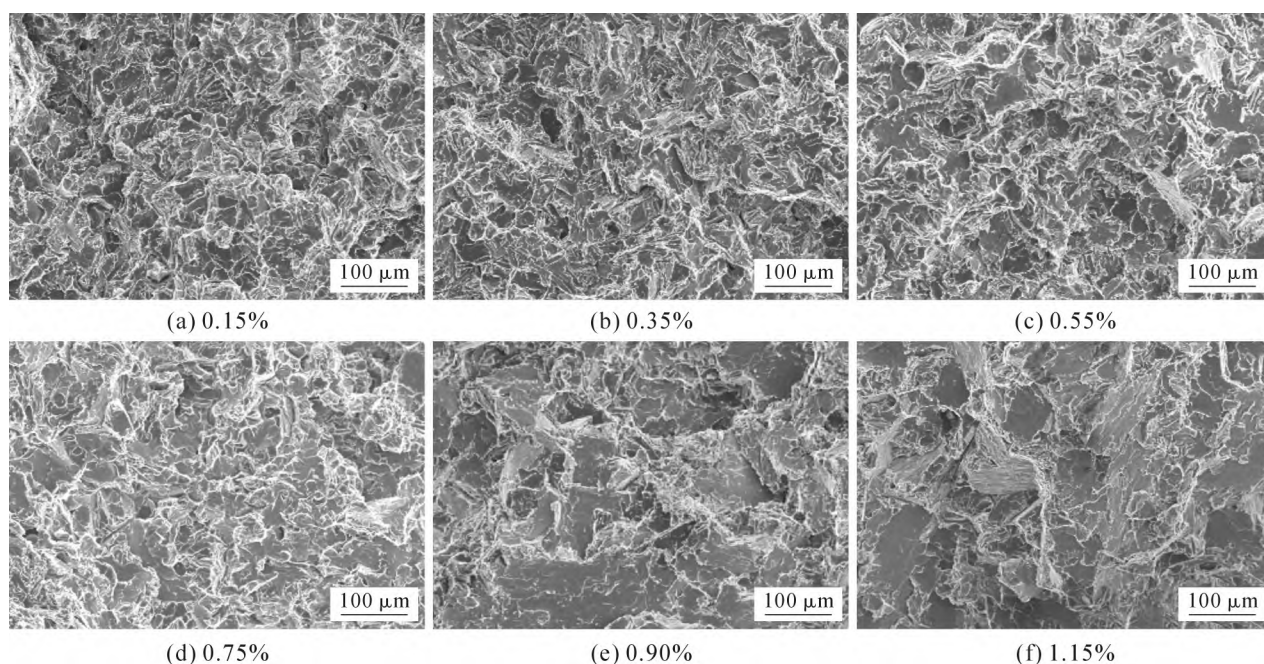


图 11 铸态 Al-8Si-0.5Mg-xFe 合金拉伸断口形貌

Fig.11 Tensile fracture morphology of as-cast Al-8Si-0.5Mg-xFe alloys

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:

- [1] 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 properties 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 silicon alloys: Literature review [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2003, 16 (5): 451-465.