

微合金化对电力金具用铝合金组织及性能的影响

谭乐平^{1,2} 魏作山³ 王莹莹⁴ 赵少坤^{1,2} 孔祥广^{1,2} 丁海民^{1,2} 柳青^{1,2}

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 保定 071003; 2. 河北省电力机械装备健康维护与失效预防重点实验室, 保定 071003; 3. 魏桥国科高等技术研究院, 滨州 256606; 4. 山东新沙单轨运输装备有限公司, 新泰 271299)

摘要 以电力金具用 Al-7.5Si-xMg-0.08Fe 铝合金为研究对象, 利用金相显微镜、扫描电镜、维氏硬度计和万能拉伸试验机等设备, 分析了不同含量(质量分数, 下同)Mg 和 Cu 的添加对合金显微组织和力学性能的影响。结果表明, 随着 Mg 含量增加, 合金中的 β -Mg₂Si 相含量逐渐增多, 硬度及抗拉强度先增加后降低, 当 Mg 添加量为 1.5% 时二次枝晶臂(SDAS)最小, 硬度及抗拉强度最大, 添加 Mg 在一定程度上促进了 α -Al 和共晶 Si 相的细化。添加 Cu 后, 合金中产生 Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 相和 θ -Al₂Cu 相, 合金硬度(HV)提升至 118, 抗拉强度提升至 275 MPa。

关键词 电力金具用铝合金; Mg、Cu 微合金化; 力学性能; 组织

中图分类号 TG146.21 文献标志码 A DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240370

Influence of Microalloying on Microstructure and Properties of Aluminum Alloys for Electrical Fittings

TAN Leping^{1,2}, WEI Zuoshan³, WANG Yingying⁴, ZHAO Shaokun^{1,2}, KONG Xiangguang^{1,2}, DING Haimin^{1,2}, LIU Qing^{1,2}

(1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003; 2. Hebei Key Laboratory of Electric Machinery Health Maintenance & Failure Prevention, Baoding 071003; 3. Weiqiao Guoke National Science and Technology Institute of Advanced Technology, Binzhou 256606; 4. Shandong Xinsha Monorail Transportation Equipment Co., Ltd., Xintai 271299)

Abstract: The effects of different Mg and Cu additions on microstructure and mechanical properties of Al-7.5Si-xMg-0.08Fe alloy for electrical power fittings were investigated by metallographic microscopy, scanning electron microscopy, vickers hardness tester, and universal tensile testing machine. The results indicate that the amounts of β -Mg₂Si phase in the alloy are gradually increased with increasing in Mg content, while hardness and tensile strength are initially increased and then decreased. With 1.5% Mg content, the minimum secondary dendrite arm spacing (SDAS) are achieved, where the hardness and tensile strength reach maximum value. Moreover, Mg addition promotes the refinement of α -Al and eutectic Si phases to a certain extent. Cu addition results in the formation of Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆ and θ -Al₂Cu phases, and the Vickers hardness and tensile strength are increased to 118 HV and 275 MPa, respectively.

Key Words: Aluminum Alloy for Electrical Power Fittings, Mg、Cu Microalloying, Mechanical Properties, Microstructure

近年来,社会的不断发展和电力需求的增长,对输电线路金具性能的要求也日益提高。作为电力传输的关键组件之一,电力金具承担着传递机械负荷、电气负荷和保护电气设备的重要角色。然而,传统的铸铁金具在使用过程中存在着诸多问题,如密度高、能量损耗大等,从而迫切需要一种更为理想的替代材料^[1-2]。

目前,研究者在电力金具领域的研究主要集中在:无磁性铝及铝合金的应用研究^[2-3],无磁或低磁性的无磁钢和塑料基复合材料的开发^[4-6],新型结构节能电力金具的设计与优化^[7],新型制造工艺的探索与应用^[8]等。

铝合金因其较低的密度、卓越的耐腐蚀性能和较

收稿日期:2024-09-12;修订日期:2024-12-22

基金项目:教育部“产学合作 协同育人”资助项目(BINTECH-PY-20231124-23);保定市科技计划资助项目(2372P011);中央高校基本科研业务费面上资助项目(2023MS132)

第一作者简介:谭乐平,男,1999年出生,硕士研究生,E-mail: Tanlp999@163.com

通信作者:柳青,女,1986年出生,副教授,E-mail: 52452061@ncepu.edu.cn

引用格式:谭乐平,魏作山,王莹莹,等.微合金化对电力金具用铝合金组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2025,45(9):1405-1410.

TAN L P, WEI Z S, WANG Y Y, et al. Influence of microalloying on microstructure and properties of aluminum alloys for electrical fittings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1405-1410.

低的能耗而备受关注,被认为是铸铁金具的理想替代品^[9-10]。然而,目前的铝合金金具在抗拉强度等方面还存在一定的不足,特别是在电力系统的高要求场景下,需要进一步提升其性能。

为了解决上述问题,本研究在 Al-Si 合金的基础上通过添加 Mg 和 Cu 元素,进行微合金化。铝合金中 Mg 元素能够有效地与 Si 元素反应,形成稳定的 β -Mg₂Si 相,这种相在铝合金中具有良好的强化效果^[11-12]。同时, β -Mg₂Si 相能在一定程度上对初生 α -Al 相及共晶 Si 相起到细化作用,使其形成更为细小的晶粒结构,从而显著提高合金的力学性能^[13]。另外,Cu 元素的添加可以促进合金中 θ -Al₂Cu 相的形成,在铝合金中起到了重要的强化作用^[14-16],提高合金的抗拉强度和硬度,同时提高其耐磨性能,使其更适合用于电力传输线路等高强度场合的需要。

1 试验方法

1.1 合金制备过程

试验所用原料包括工业纯铝(纯度为 99.9%)、结晶硅(纯度为 99.99%)、Al-20Mg、Al-10Fe、Al-10Cu、Al-10Sr 和 Al-3Ti-1B 中间合金。由于试验中使用的工业纯铝母材中原本含有 Fe 杂质。经直读光谱仪测定,工业纯铝中 Fe 含量为 0.06%。在此基础上,为达到目标 Fe 含量,通过添加 Al-10Fe 中间合金进行成分调整,使 Fe 含量达到预期值。

合金的制备过程如下:首先,在 J1220A 型井式电阻炉的石墨粘土坩埚内,将工业纯铝加热至 760℃,待其完全熔化后加入结晶 Si 颗粒并溶解,然后加入 Al-10Fe 和 Al-50Cu 中间合金并保温 15 min。调节炉温至 720℃后,向熔体中加入采用铝箔包裹的 Al-20Mg 中间合金,并保温 15 min。随后,加入 Al-10Sr 中间合金并继续保温 15 min,然后将预热的 Al-3Ti-1B 细化剂加入熔体中,并利用石墨棒进行搅拌使其均匀分布,保温 15 min。最后,对熔体进行精炼处理后,控制温度在 (720±10)℃,静置 10 min 后浇入预热至 (300±10)℃ 的 45 号钢模具中。试验合金制备过程见图 1。

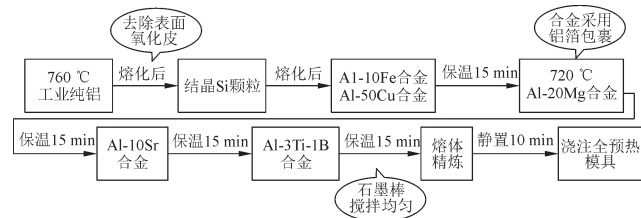


图 1 试验合金制备过程图

Fig.1 Flow chart of preparing experimental alloys

合金化学成分见表 1。

表 1 电力金具用铝合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of aluminum alloys for electrical fittings %

编号	w_B				
	Si	Mg	Fe	Cu	Al
A ₁	7.5	0.5	0.08	0	余量
A ₂	7.5	1.0	0.08	0	余量
A ₃	7.5	1.5	0.08	0	余量
A ₄	7.5	2.0	0.08	0	余量
A ₅	7.5	2.5	0.08	0	余量
A ₆	7.5	1.5	0.08	0.4	余量

1.2 组织表征及性能测试

使用 MSD400(倒置)OM 光学显微镜对合金的微观组织进行观察,并利用配备 EDS 的 JEOL JSM-IT500 SEM 对其显微结构和化学成分进行分析。与此同时,利用 Rigaku miniflex600 XRD 对合金的物相分析。在进行拉伸性能测试时,将铸坯加工成标准的狗骨状拉伸试棒,见图 2,采用 WDW3200 微控电子万能试验机在 1 mm/min 的加载速率下进行测试,每个试样至少测试 3 次,取平均值。使用 HVS-1000 数显维氏硬度计对合金的维氏硬度进行测量,载荷为 9.8 N,加载、保荷与卸载时间均为 15 s,为减小误差,进行 7 次测量,去除最大和最小值后取平均值作为试样的最终硬度值。

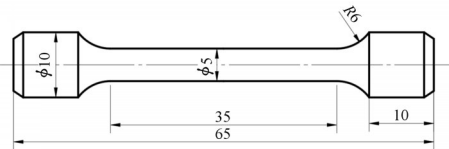


图 2 拉伸试棒示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile bar

2 试验结果与分析

2.1 不同 Mg 含量合金的显微组织分析

通过 SEM 观察试验合金的微观组织,并结合 EDS 点分析对其化学成分进行表征,见图 3。从图 3 可知,合金中除 Al 基体外,还存在 3 种主要特征相。由于 EDS 仅能提供局部区域的化学成分信息,无法准确确定每种析出相的具体物相组成,因此进一步采用 XRD 对整体合金的相组成进行分析,见图 4。XRD 衍射峰清晰表征了 α -Al 相、 β -Mg₂Si 相和共晶 Si 相。由于 Fe 在合金中的含量较低,其化合物的衍射峰强度较弱,因此无法在 XRD 图谱中明确识别。结合 EDS 和 XRD 分析,确认试验合金的微观组织中包含 3 种特征相:细小汉字状

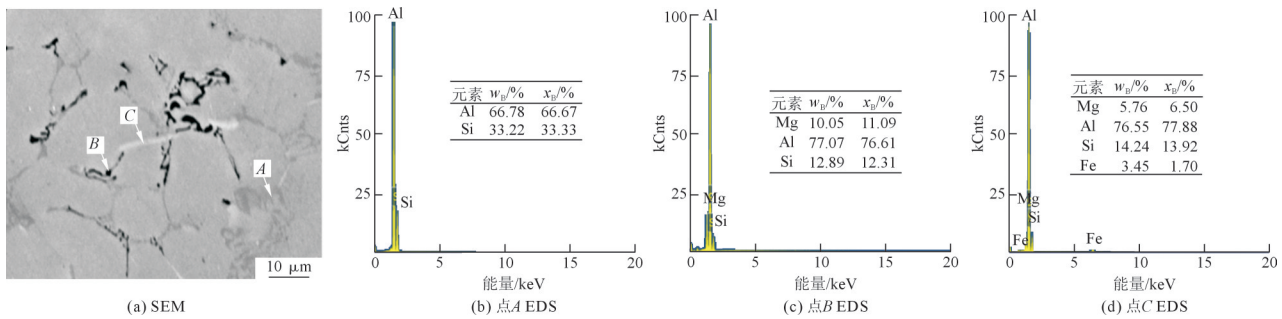


图3 Al-7.5Si-xMg-0.08Fe合金组织及EDS分析

Fig.3 Microstructure and EDS analysis of Al-7.5Si-xMg-0.08Fe alloy

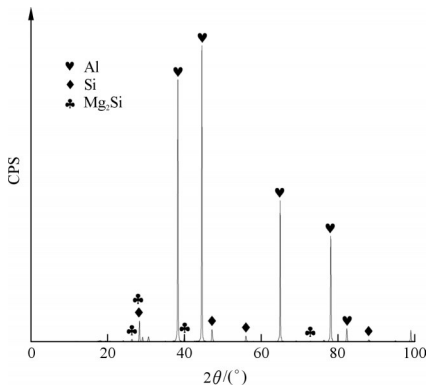


图4 Al-7.5Si-xMg-0.08Fe合金XRD图

Fig.4 XRD patterns of Al-7.5Si-xMg-0.08Fe alloy

的黑色组织为 β -Mg₂Si相,树枝状的灰色组织为共晶Si相,细长银白色针状组织为富Fe相。

不同Mg含量的Al-7.5Si-xMg-0.08Fe合金的显微组织见图5。观察可得,不同Mg含量的合金显微组

织结构相差不大,主要由 α -Al相、共晶Si相、 β -Mg₂Si相和富Fe相构成。Mg含量增加对初生 α -Al和共晶Si相的细化效果较显著。从图5a可见,A₁合金中的显微组织较为粗大, α -Al相形貌呈现为不规则的粗大树枝晶结构,且枝晶数量较多,共晶Si相也较为粗大,分布于 α -Al晶界处。从图5b可以看出,A₂合金的显微组织得到了细化, α -Al相尺寸减小,树枝晶数量明显减少,可以看到汉字状的 β -Mg₂Si相。从图5c可见,A₃合金的显微组织细化程度更加明显, α -Al相尺寸进一步减小,且主要呈现为等轴晶和类等轴晶,只有少量树枝晶存在, β -Mg₂Si相进一步增多。从图5d和图5e可见 α -Al相尺寸变大,树枝晶增多,但尺寸较小, β -Mg₂Si相数量变多且尺寸变大。这是因为过多的Mg元素将不能完全溶入基体,导致较粗大的Mg₂Si脆性相的产生^[17-18]。

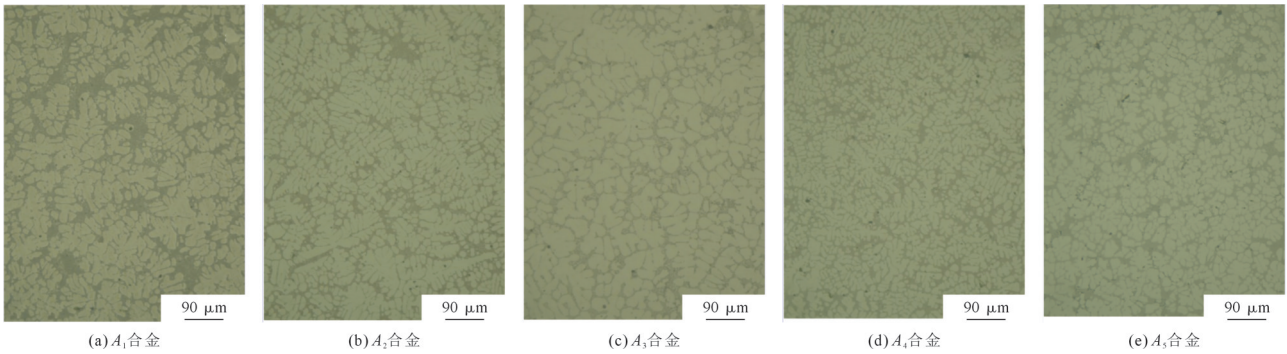


图5 不同Mg含量Al-7.5Si-xMg-0.08Fe合金的微观组织

Fig.5 Microstructure of Al-7.5Si-xMg-0.08Fe alloys with different Mg contents

二次枝晶臂间距(SDAS)是指在金属凝固过程中,二次枝晶形成时,相邻枝晶臂之间的距离,见图6。SDAS的大小对金属的组织结构及力学性能有着重要的影响。SDAS的测量通常利用Image-Pro Plus 6.0图像分析软件,通过截线法测量金相图上枝晶臂之间的间距。首先,选定若干测量线段,计算沿线段测得的枝晶间距长度;然后,测得的长度除以金相图中的标尺长度,并乘以标尺所代表的实际长度,得到实际的枝晶间距值;最后,将多个测量值取平均,得到最终的SDAS。

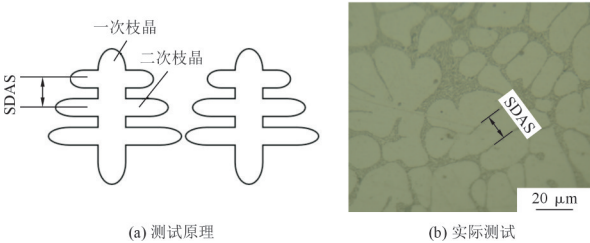


图6 截线法测量二次枝晶间距

Fig.6 Secondary dendrite arm spacing measured by line intercept method

在进行合金显微组织的 SDAS 统计时,考虑到取样点位置因素对 SDAS 的显著影响,所有试样均统一从相同位置取样。同时,为避免冷却速率的差异,试验过程中严格控制浇注条件,包括采用相同的浇注温度、模具及模具预热温度,以确保试验结果的可比性和可靠性。

图 7 为不同 Mg 含量的 Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe 合金显微组织的 SDAS 统计结果。可以看出,随着 Mg 含量的增加,SDAS 先减小后略有增大,但增幅不明显。当 Mg 含量为 1.5% 时(A_3 合金),SDAS 为 10.93 μm ,数值最小。结合组织分析可知,初生 α -Al 相及共晶 Si 相的形貌发生较大改变,初生 α -Al 相由取向性很强的树枝晶状被打断形成花瓣状及圆块状形貌,共晶 Si 相也变成蠕虫状。

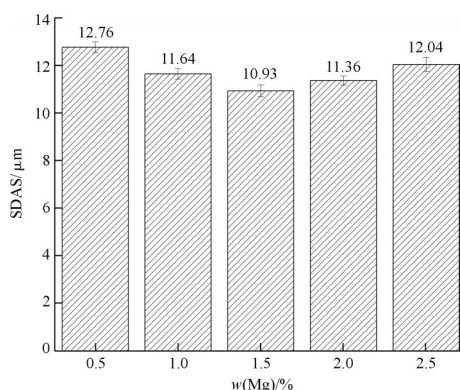


图 7 不同 Mg 含量 Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe 合金的 SDAS

Fig.7 SDAS of Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe alloys with different Mg contents

另外,作为铝合金中固有杂质元素的 Fe,在一部分合金中形成 α -Al+Si+FeSiAl₅ 三元共晶,而剩余的 Fe 将形成初生 Fe₂SiAl₈ 相,其残留在组织内部,导致组织结构割裂,降低铸件的强度和伸长率^[19-20]。因此,可控制 Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe 合金中的 Mg 含量保持在 1.5%,通过产生适量的细长 β -Mg₂Si 强化相,从而提高合金性能。

2.2 不同 Mg 含量合金的力学性能

图 8 为 Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe 铝合金硬度随着 Mg 含量的变化情况。可以看出,随着 Mg 含量增加,Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe 铝合金的硬度先增加后减小,这与 SDAS 的变化趋势相似。当 Mg 含量为 1.5% 时, A_3 合金的硬度(HV)最高,达到 111,比起 A_1 合金的硬度(81)提升了 37%。这是由于均匀分布且数量增加的 β -Mg₂Si 相作为强化相,能够提升 Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe 铝合金的硬度。然而,过量的 Mg 会导致 β -Mg₂Si 相粗化,降低了 A_4 和 A_5 合金的硬度,使其硬度(HV)略微降低。

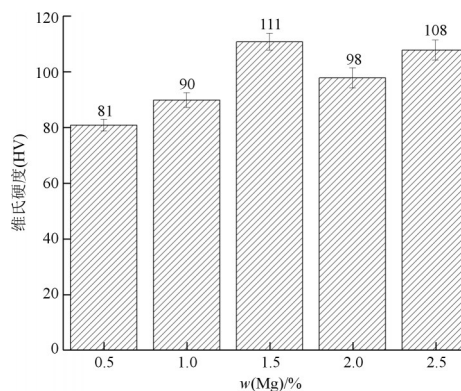


图 8 不同 Mg 含量 Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe 合金的维氏硬度

Fig.8 Vickers hardness of Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe alloys with different Mg contents

图 9 为 Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe 铝合金的力学性能随着 Mg 含量的变化。可以看出,随着 Mg 含量增加,Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe 铝合金的抗拉强度先增大后减小,而伸长率持续降低。当 Mg 含量为 1.5% 时,抗拉强度达到了最大值 268 MPa,伸长率为 5.9%。随着 Mg 含量的进一步增加,抗拉强度及伸长率均表现出下降的趋势,这是因为过多的 Mg 元素未能完全溶入基体中,导致形成较粗大的 β -Mg₂Si 脆性相,从而造成应力集中,降低了合金的抗拉强度及伸长率^[21]。在电力传输线路应用场合中,由于材料的抗拉强度是首要考虑的性能指标,能够在高负荷条件下提供更好的承载能力,有助于提升整体结构的稳定性和安全性。因此,Al-7.5Si-1.5Mg-0.08Fe 铝合金的表现最佳。

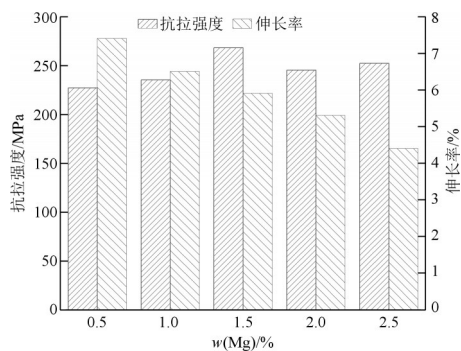


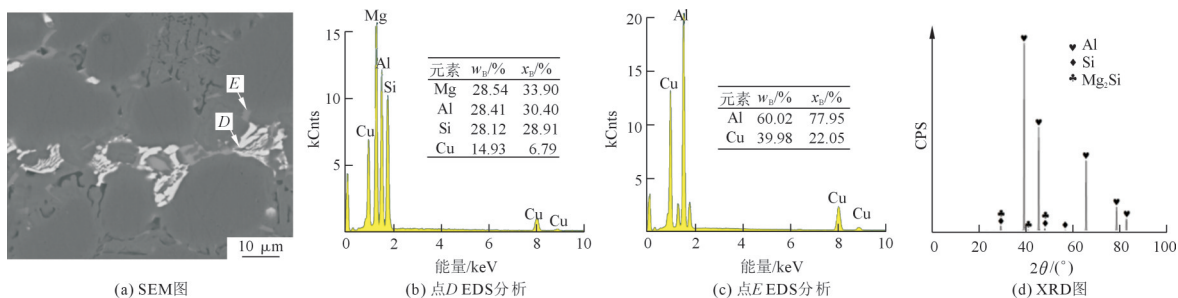
图 9 不同 Mg 含量 Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe 合金的力学性能

Fig.9 Mechanical properties of Al-7.5Si- x Mg-0.08Fe alloys with different Mg contents

2.3 Cu 元素添加后合金的显微组织

在最优 Mg 添加量为 1.5% 的 A_3 合金的基础上,通过添加 Cu 元素,旨在进一步提高合金性能。

通过 SEM 及相应的 EDS 点分析添加 0.4% Cu 元素的 A_6 合金的微观组织形貌,并结合 XRD 对其物相组成进行分析。图 10 为 A_6 合金的 SEM 和 EDS 分析同样,由于 Cu 元素在合金中的含量较低,其化合物的衍

图10 A_6 合金的SEM、EDS和XRD分析Fig.10 SEM microstructure, EDS analysis and XRD patterns of A_6 alloy

射峰强度较弱,因此无法在XRD图谱中明确识别。从图10中可以看出,除含有 β - Mg_2Si 相、共晶Si相、富Fe相外,Cu元素的添加使基体新生成 $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 相和 $\theta-Al_2Cu$ 相。

根据非平衡凝固原理,铝合金在凝固过程中首先析出 $\alpha-Al$ 和 $\alpha-Al+Si$ 的二元共晶。由于液相中Cu元素的添加,与已析出的 $\alpha-Al+Si$ 二元共晶形成 $\alpha-Al+Si+Al_2Cu$ 三元共晶结构,生成的 $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 相和 $\theta-Al_2Cu$ 相能够有效改善Al-Si系合金的强度,同时不会过多地降低该类合金的塑性和耐蚀性能^[22-23]。

图11为添加Cu元素前后合金的组织照片。可见合金中 $\alpha-Al$ 相的形貌和尺寸没有明显的变化,仍大部分呈现等轴晶和类等轴晶形貌,共晶Si相也没有产生明显的粗化或团聚。

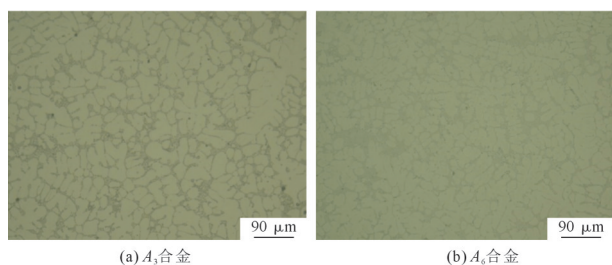


图11 Cu对Al-7.5Si-1.5Mg-0.08Fe合金微观组织的影响

Fig.11 Effects of Cu on microstructure of Al-7.5Si-1.5Mg-0.08Fe alloys

通过Image-Pro Plus 6.0软件对添加Cu元素后SDAS进行测量,发现未添加Cu元素的 A_3 合金SDAS为 $10.93\mu m$,添加0.4%的Cu的 A_6 合金SDAS为 $11.06\mu m$,并未产生明显的变化。结合微观组织分析发现,添加0.4%的Cu并不会对 $\alpha-Al$ 及共晶Si的形貌产生影响。根据相关研究,随着Cu含量的增加,铸态组织中 β - Mg_2Si 相的含量会逐步下降; $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 含量先增加,达到平衡后保持不变; $\theta-Al_2Cu$ 含量逐步增加^[16,24-25]。当Cu含量为0.4%时,组织中同时存在 β - Mg_2Si 、 $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 和 $\theta-Al_2Cu$ 相。

2.4 Cu元素对合金力学性能的影响

图12为Al-7.5Si-1.5Mg-0.08Fe-yCu铝合金力学

性能随Cu添加的变化情况。通过对铸态下的 A_6 合金的进行力学性能试验可知,未添加Cu元素的 A_3 合金硬度(HV)和抗拉强度分别为111和268 MPa,伸长率为5.9%。而添加Cu元素后, A_6 合金硬度(HV)提升至118,抗拉强度提高至275 MPa,分别提升了6%和2%,伸长率则有所降低,为5.6%。硬度及抗拉强度的提升归因于Cu含量增加。强化相 $\theta-Al_2Cu$ 的数量增多,从而提高了合金的强度。另一方面, $\theta-Al_2Cu$ 相一般分布在晶界或者共晶 β - Mg_2Si 周围, $\theta-Al_2Cu$ 相能够打断共晶 β - Mg_2Si ,起到细化 β - Mg_2Si 的作用,减少应力集中,从而提高了合金的强度^[26]。因此,Cu元素的添加对铸态下Al-7.5Si-1.5Mg-0.08Fe合金的力学性能具有显著的改善作用。

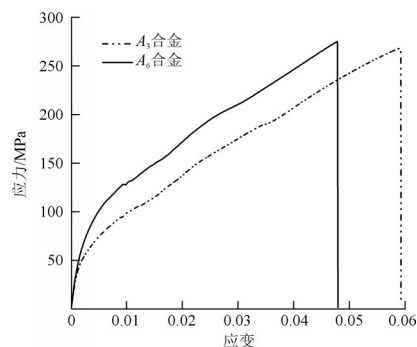


图12 添加Cu前后Al-7.5Si-1.5Mg-0.08Fe合金的应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of Al-7.5Si-1.5Mg-0.08Fe alloy before and after Cu addition

3 结 语

(1) Al-7.5Si-xMg-0.08Fe合金中随着Mg含量的增加, $\alpha-Al$ 二次枝晶间距先减小后增大,当Mg含量为1.5%时,SDAS由 $12.76\mu m$ 减小至最小 $10.93\mu m$ 。

(2) 随着Mg含量的增加,Al-7Si-xMg-0.08Fe合金的硬度及抗拉强度也呈现先增加后减小的趋势,且当Mg含量为1.5%时,合金表现出最优综合性能,硬度(HV)、抗拉强度、伸长率分别为111、268 MPa和5.9%。

(3) Cu元素的添加,并未明显影响合金的组织形

貌,但增强了合金的硬度(HV)和抗拉强度,提升至118和275 MPa。

参 考 文 献

- [1] 黄应敏,邹科敏,许翠珊,等.高导电性能铝合金在新型电力金具制造中的应用研究[J].合成材料老化与应用,2021,50(4):53-57.
- [2] 季伟,张飞勇,孟繁东,等.高强度铝合金材料电力金具的应用研究[J].浙江电力,2020,39(6):111-114.
- [3] JULIEN S, BLANKA L, NICOLE F, et al. Mechanical reinforcement of a high-performance aluminium alloy AA5083 with homogeneously dispersed multi-walled carbon nanotubes[J]. Carbon, 2012, 50(6):2 264-2 272.
- [4] 陆松华.Fe-Mn基奥氏体无磁钢在节能电力金具上的应用研究[D].江苏镇江:江苏大学,2006.
- [5] 陈玲,吴芳芳,马恒,等.纤维增强复合材料在电网中的应用[J].科技导报,2016,34(8):77-83.
- [6] 晁芬,周勇,吴航.新型塑料电力金具材料的制备及性能研究[J].江苏科技信息,2015(31):53-55.
- [7] 袁刚,赵杰.一种节能螺栓型耐张线夹:CN102222873A[P].2011-10-19.
- [8] 范志刚,祝德春,吴明,等.3D打印在电网设备结构设计与制造中的应用概述[J].机械制造与自动化,2016,45(6):56-59.
- [9] 蔡炜,王利民,何卫,等.一种纳米碳合金材料及基于该材料制备的电力金具的制作方法:CN201711293048.6[P].2018-04-06.
- [10] 陈胜男,何卫,杜挺,等.输电线路金具用材料及其应用技术研究进展[J].电工技术,2019(15):149-151,153.
- [11] 史宝良,李振兴,郭秋彦.Al-Si系铸造铝合金强化技术及研究进展[J].汽车零部件,2023(8):100-104.
- [12] YANG H L, JI S X, YANG W C, et al. Effect of Mg level on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al-Si-Cu alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2015, 642:340-350.
- [13] 吴奇.Mg含量对轨道车辆Al-7Si-xMg铝合金显微组织与力学性能的影响[J].铸造,2023,72(2):160-166.
- [14] 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(9):74-78,91.
- [15] ZHANG P F, WANG D T, HIROMI N, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Al-Si-Mg-Cu cast alloys with different Cu contents[J]. Metals, 2023, 13(1):98.
- [16] 何立子,陈彦博,崔建忠,等.Cu含量对一种新型Al-Mg-Si合金晶间腐蚀的影响[J].腐蚀科学与防护技术,2004(3):129-133.
- [17] 陈思君,陈送义,陈庚,等.Mg含量对2A14铝合金组织和力学性能的影响[J].金属热处理,2022,47(4):86-92.
- [18] 张素芬.Mg含量对汽车发动机缸体用Al-Si-Cu合金微观组织和力学性能的影响[J].铸造技术,2016,37(7):1 329-1 332.
- [19] KHALIFA W, SAMUEL F H, GRUZLESKI J E. Iron intermetallic phases in the Al corner of the Al-Si-Fe system[J]. Metall. Mater. Trans., 2003, 34:807-825.
- [20] LORELLA C, IURI B, ALESSANDRO M, et al. Effect of Fe content and microstructural features on the tensile and fatigue properties of the AlSi10Cu2 alloy[J]. Materials and Design, 2012, 36:522-528.
- [21] 唐正伟,周鹏飞.Mg含量对高导电铝合金压铸性能的影响[J].铸造技术,2017,38(2):395-397.
- [22] 周鹏飞,王东涛,张海.铸造Al-Si-Mg-Cu合金综合性能调控研究现状[J].特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 607-1 612.
- [23] TUNÇAY T. Effect of Cu content on microstructure and wear behaviour in A356 alloy[J]. Politeknik Dergisi, 2016, 934(4):585-592.
- [24] DE MORI A, TIMELLI G. Influence of Cu content on the microstructure and high-temperature tensile and fatigue properties of secondary AlSi7Mg0.3Zr alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A816:141-310.
- [25] YAMAMOTO K, NAKATA T. Optimization of Cu content for the development of high-performance T5-treated thixo-cast Al-7Si-0.5Mg-Cu(%) alloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2021, 93:178-190.
- [26] 陈大辉,黄文淑,汤进军,等.Cu、Mg对Al-Si-Cu-Mg合金力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2011,31(4):367-368.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《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,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、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科学期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、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,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、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研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号38-109。邮发订价每期20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430015

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

