



合金元素与退火处理对Al-7Si-0.8Fe铸造铝合金导电和力学性能的协同影响

李梦妮, 罗 干, 杜 军

(华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640)

摘 要: 研究了Mg、Zn、Cu三种合金元素对Al-7Si-0.8Fe导电和抗退火软化性能的影响, 并分析其影响机理。合金元素加入后合金的导电率均有不同程度降低, 低温退火提升合金的导电率, 其中, 含Mg合金的导电率提升最为显著, 导电率可达22.9 MS/m, 而含Zn、Cu合金的导电率提升幅度较小。Mg显著提升的硬度和抗拉强度, 经退火后, 合金发生不同程度软化, Cu添加后合金的退火软化最为显著, 而Mg则表现出优异的抗退火软化特性, 硬度和抗拉强度可达79 HB和266 MPa。Mg可显著细化铸态合金中的共晶Si相, 低温退火过程中, 基础合金及含Zn和Cu的合金中基体中均有明显的Si相析出, 而在含Mg合金中生成细小弥散的Mg₂Si相, 保证其优异的抗退火软化特性。

关键词: 铸造铝合金; 导电、导热性能; 力学性能; 抗退火软化特性

文章编号: 1004-0609(2022)-06-1571-08

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

引文格式: 李梦妮, 罗 干, 杜 军. 合金元素与退火处理对Al-7Si-0.8Fe铸造铝合金导电和力学性能的协同影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1571–1578. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36783

LI Meng-ni, LUO Gan, DU Jun. Synergistic effects of alloy elements and annealing on electrical conductivity and mechanical properties of Al-7Si-0.8Fe casting aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1571–1578. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36783

随着5G技术的不断发展和快速普及, 对Al-Si系合金压铸生产通信基站壳体和滤波器腔体等器件的散热要求越来越高。常规压铸导热铝合金材料(如ADC12、A380等)具有优良的铸造性能和力学性能, 但其室温导热系数仅为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^[1-2]。导热和力学性能往往表现为负相关, 如何同步提升导热和材料的强度性能甚为关键, 研究主要集中于微合金化^[3-5]、热处理^[5-7]和先进的压铸成型方式等^[8-9]。其中基于合金化实现组织有效调控是制备高强高导Al-Si系合金的关键, Mg、Zn、Cu是受到关注相对较多的合金元素。周玉立等^[4]研究表明, Mg的添加可显著提升Al-9Si-0.7Fe屈服强

度, 但降低其导热性能, Al-9Si-0.7Fe-0.2Mg合金的导热率为151 W/(m·K); 王韬等^[10]研究表明, Mg元素的添加提升了A380的抗拉强度和硬度, 其内在机制是Mg₂Si的沉淀强化作用和 α (Al)二次枝晶臂间距的细化; VANDERSLUIS等^[11]研究表明319经过T7处理促进细小Al₂Cu相的形成和共晶Si球化提高力学性能, 时效过程中消耗溶质使热导率提高; 李荣德等^[12]研究表明, 在Al-Si-Mg-Cu添加微量Zn后, 合金获得较高的峰时效硬度, 其内在机制是微量Zn固溶于基体中, 加快了亚稳相析出。

对于实际生产的压铸产品, 经低温退火后可显著提高合金导热性^[13], 但易于导致力学性能降低, 发生退火软化现象, 如何在确保导热提升的前提

收稿日期: 2021-06-29; 修订日期: 2021-09-19

通信作者: 杜 军, 教授, 博士; 电话: 020-87113597; E-mail: jundu@scut.edu.cn

下,抑制退火软化值得关注。针对铸造 Al-Si 基合金的退火软化、导热提升和合金元素之间的交互影响及其机制尚未见报道。基于此,本文系统研究常用合金化元素 Mg、Zn、Cu 对 Al-7Si-0.8Fe 合金微观组织、导热和力学性能的影响,重点关注低温退火后合金的组织演变和性能变化,评价合金化元素对该合金抗退火软化性能的影响,为实际工业化生产提供有价值的参考。

1 实验

基于导热和铸造性能考量,本文选择 Al-7Si-0.8Fe 合金为基础合金(Base alloy, BA)。本文基于该合金进行合金化,通过熔炼铸造制备 4 种合金,合金成分为 BA-xM($x=0.5$, 质量分数,%; M=Mg, Zn, Cu)。选用 99.95% 工业纯铝为基本原料,以及 Al-20%Si、Al-20%Fe、Al-10%Mg、99.99%Zn、Al-50%Cu 中间合金,制备两块薄壁试样(尺寸为 100 mm×60 mm×5 mm)。将其中一块作为铸态试样;另一块试样使用电阻炉对其进行退火热处理(260 °C, 4 h)后空冷至室温。

采用 AG-X100KN 型精密电子万能材料试验机测试抗拉强度每个试样测试 3 个数据,取平均值为实验值;采用 First FD-101 型涡流导电仪测量导电率(σ),将试样表面打磨光滑,正反两面共取 10 个点测其电导率,取平均值最为实验值;根据经验公式估算热导率 $\lambda=6.89\sigma^{[14]}$ 。采用 DHB-3000 型布氏硬度计测试硬度,载荷为 62.5 N,压头直径为 2.5 mm,保压时间为 60 s,每个试样测试 5 个数据,取平均值最为实验值;采用 DMI3000-M 型光学显微镜进行金相观察;采用 Merlin Compact 型超高分辨率场发射扫描电镜进行微观组织观察及能谱分析;采用 National Instruments 公司生产的热分析设备,通过温度 NI 9212 传感器和 NI cDAQ-9171 温度采集器收集信号输入电脑,使用计算机辅助热分析法(Computer-aided cooling curve thermal analysis, CA-CCTA)获得凝固冷却曲线。

2 实验结果

2.1 导电和力学性能

图 1 所示为 4 种合金铸态及其退火态的导电和

力学性能。对于基础合金,铸态导电率为 20.8 MS/m,随合金元素的添加,合金的导电率均有不同程度的降低,其中 Mg 元素对合金导电率的降低幅度最大,降低至 19.0 MS/m,降低了 8.7%,而 Zn 元素的影响较小,仅下降 3.4%,为 20.1 MS/m。低温退火处理后,各合金的导电率有显著的提升,基础合金导电率提升为 23.3 MS/m,而 BA-0.5Mg 合金的导电率提升至 22.9 MS/m。经计算,铸态合金热导率为 130~145 W/(m·K)之间,而退火后合金热导率为 145~165 W/(m·K),相较铸态合金提升了 15~20 W/(m·K)。对比不同合金在铸态及退火态的力学性能(见图 1(b)和(c))。合金元素加入后合金的硬度和强度均有不同程度提高,其中,添加 Mg 后合金硬度和强度提高幅度最为显著,而添加 Zn 和 Cu 元素的提升不显著。铸态时,添加 0.5%Mg 可使基础合金的硬度和抗拉强度由 60.1 HB 和 230 MPa 提高至 80.7 HB 和 277 MPa,较基础合金提升约 34.3%和 20.4%。低温退火后不同合金的硬度和强度都有不同程度的下降,发生软化。

图 1(d)所示为合金退火前后性能变化率。对于导电率,BA-0.5Mg 合金经过低温退火处理后提升幅度最为显著,提升幅度高达 20.6%,而含 Zn、Cu 合金的导电率提升幅度分别仅为 10.1%和 10.3%。对比退火后的力学性能可以发现,加 Mg 后的合金经退火后性能降低幅度最小,硬度和抗拉强度分别仅下降 2.0%和 3.9%。而添加 Cu 后合金的下降幅度最大。可见,对于 Al-7Si-0.8Fe,添加不同合金元素对其退火后性能变化的影响存在显著差异,其中 Mg 表现出最高的导电提升和最低的强硬性下降,表现出优异的抗退火软化特性。

2.2 微观组织

图 2 所示为基体合金和添加 Mg、Zn、Cu 合金的铸态微观组织。对于 Al-7Si-0.8Fe 合金,其物相组成主要包括 α (Al)、Si 以及 β -Al₅FeSi 相^[15]。对比图 2(a)~(d),Zn、Cu 合金对其组织特征影响不大,而 Mg 元素显著改善 Si 相的形貌及其分布,具有显著的细化作用(见图 2(b))。退火后合金的微观组织如图 3 所示,相较于铸态组织,基础合金的 α (Al)基体中出现细小弥散的颗粒状析出相,在添加 Zn 和 Cu 的合金基体中也存在类似的现象。但是在含 Mg 的合金中, α (Al)基体仍较为光滑,无类似现象发

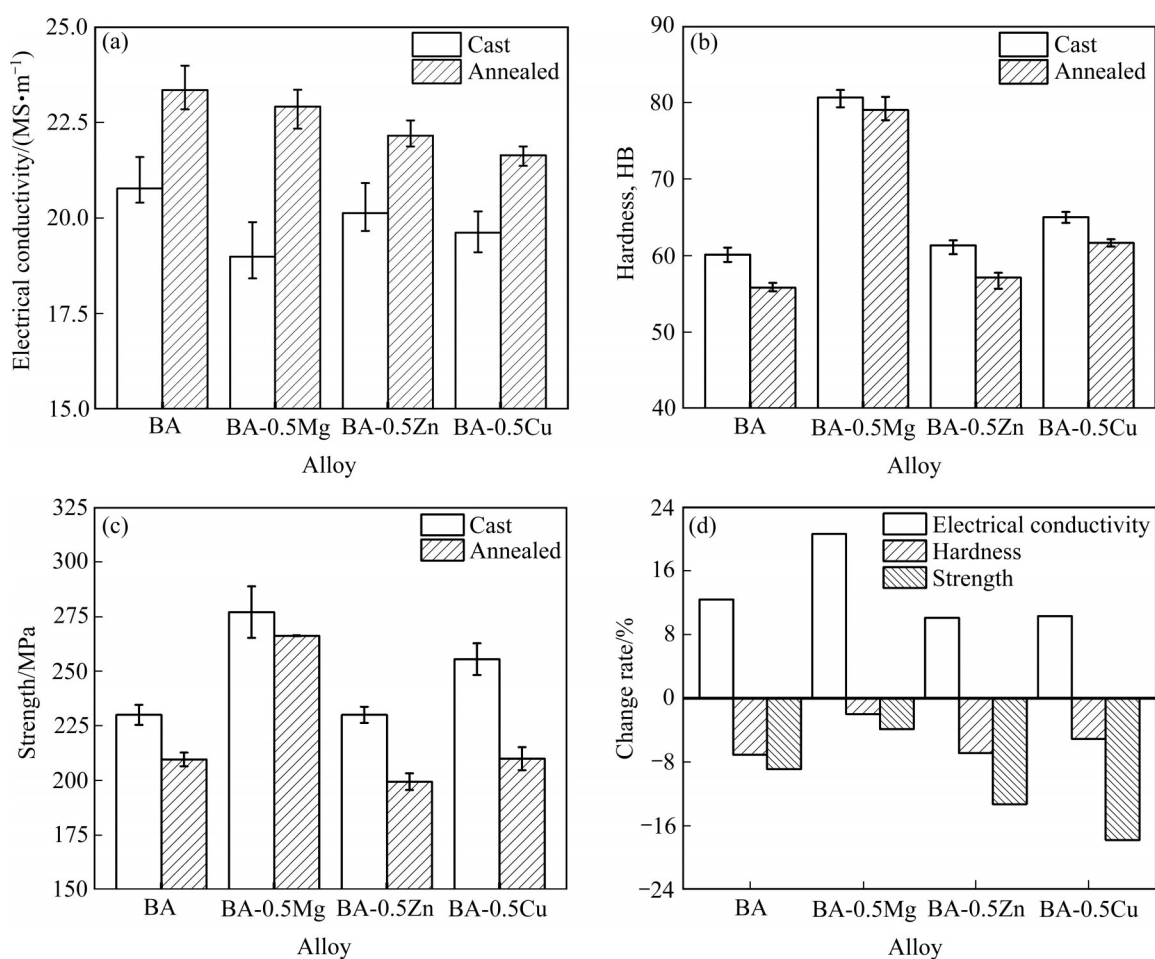


图1 添加不同元素的Al-7Si-0.8Fe合金的铸态和退火性能

Fig. 1 Properties changes of as-cast and as-annealed Al-7Si-0.8Fe alloys with different element additions: (a) Electrical conductivity; (b) Hardness; (c) Tensile strength; (d) Change rates of properties

生。在实际凝固条件下, $\alpha(\text{Al})$ 基体中Si的固溶量应大于平衡固溶度, 在低温退火过程中, 细小弥散的Si颗粒从基体中脱溶析出^[16]。对比可见, 基础合金中的Si析出数量相对较多, BA-0.5Mg的合金Si析出数量较少。

图4所示为基础合金和BA-0.5Mg合金退火前后的SEM像。对于基础合金, 退火后在基体中可见脱溶析出的细小Si相(见图4(c)), 而在BA-0.5Mg合金可观测含Fe-Mg-Si的长针状相(见图4(b)), 长度约为5~20 μm 之间, 其EDS分析结果如表1所示。通常而言, 在Al-Si合金中, Mg元素加入会生成 Mg_2Si ^[17], 特别是在退火过程更易于析出并逐渐长大。经退火后的BA-0.5Mg合金中发现存在颗粒状的 Mg_2Si 相(见图4(d)), 其直径为400~800 nm。退火态BA合金与BA-0.5Mg合金的微观组织存在明显的差异, 基体合金的退火态组织中存在大量细

小弥散分布的Si颗粒; 而在BA-0.5Mg合金中, Si颗粒的数量较少, 其原因是铸态组织中的 Mg_2Si 相消耗部分Si原子, 降低Si在 $\alpha(\text{Al})$ 基体中的实际固溶量, 含Zn、Cu合金的微观组织与BA合金的相似。

3 分析与讨论

3.1 组织影响机制

合金元素对Al-7Si-0.8Fe合金组织和性能存在影响, 特别是其退火后性能变化影响存在显著差异。其中合金元素(Mg、Zn、Cu)从以下几个方面影响Al-7Si-0.8Fe合金的热导率^[18]: 一是原子固溶进入铝基体导致点阵畸变, 对自由电子和声子造成散射作用, 显著降低合金的热导率; 二是对共晶Si相的变质作用, 若Si相形态由板条状变质为纤维或

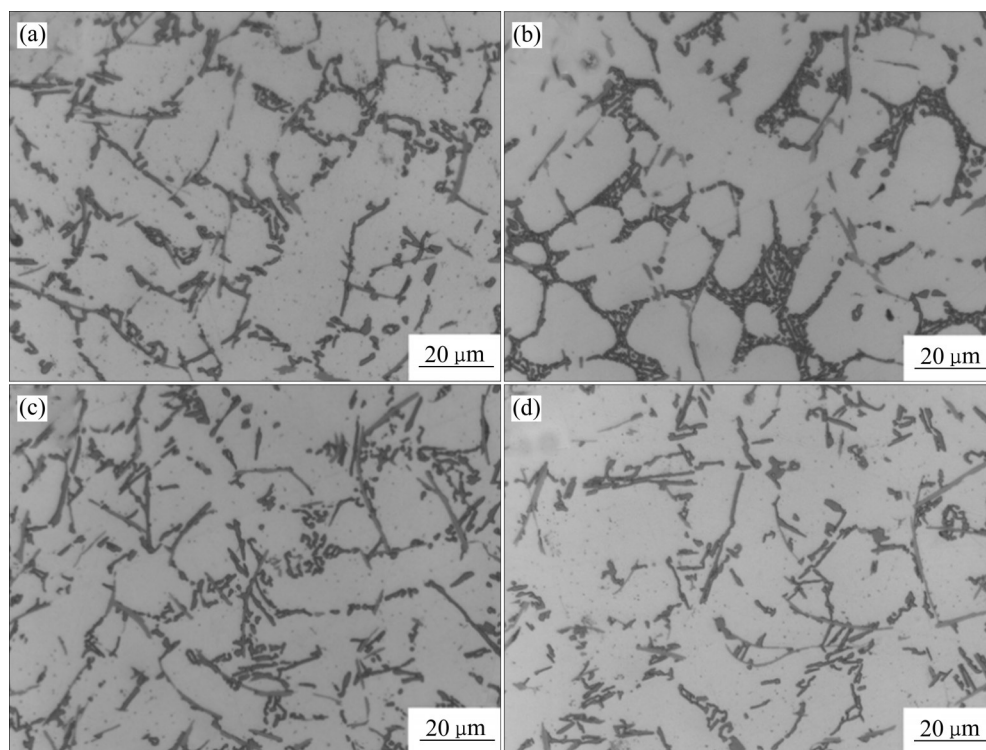


图2 添加不同合金元素的Al-7Si-0.8Fe合金的铸态光学显微组织

Fig. 2 Optical microstructures of as-cast Al-7Si-0.8Fe alloy with different element additions: (a) No addition; (b) BA-0.5Mg; (c) BA-0.5Zn; (d) BA-0.5Cu

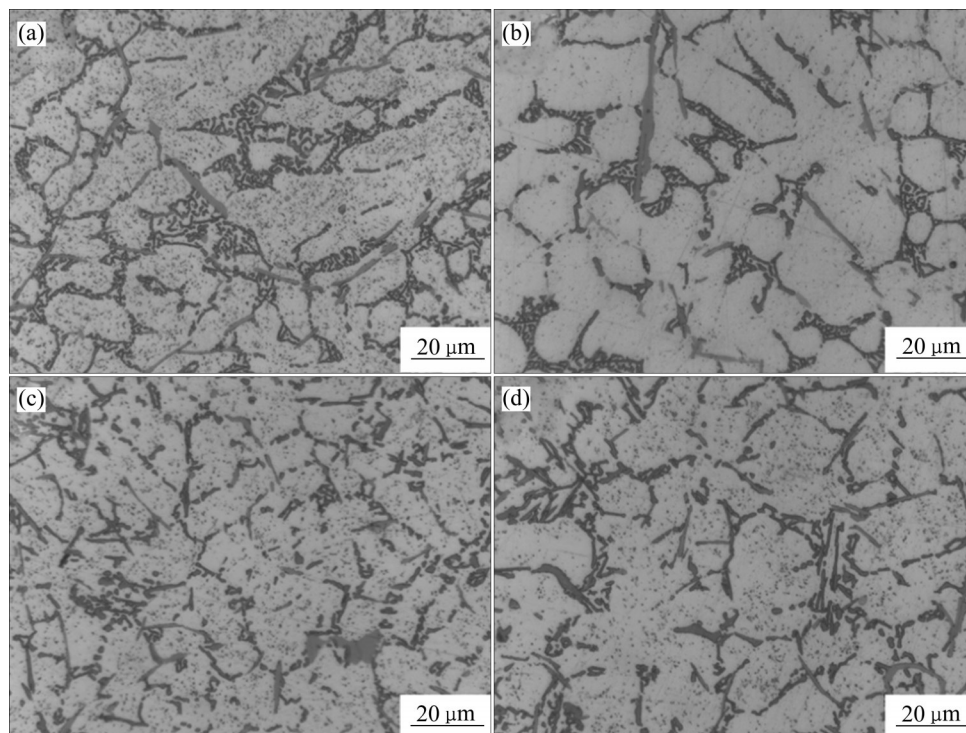


图3 添加不同合金元素的Al-7Si-0.8Fe合金的退火态光学显微组织

Fig. 3 Optical microstructures of as-annealed Al-7Si-0.8Fe alloy with different element additions: (a) No addition; (b) BA-0.5Mg; (c) BA-0.5Zn; (d) BA-0.5Cu

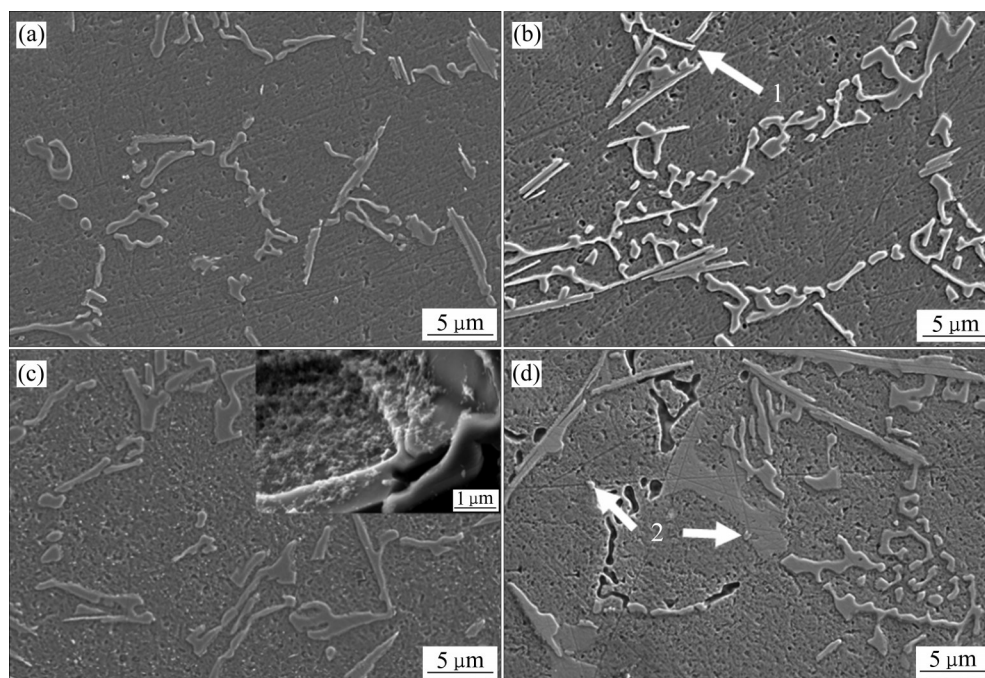


图4 基础合金和BA-0.5Mg合金铸态和退火态时的SEM像

Fig. 4 SEM images of as-cast and annealed BA((a), (c)) and BA-0.5Mg alloys ((b), (d))

表1 图4中第二相的能谱分析结果

Table 1 EDS results of intermetallic particles shown in Fig. 4

Point No.	Mole fraction/%			
	Al	Si	Fe	Mg
1	74.29	15.70	8.73	4.80
2	73.55	18.05	0	8.40

颗粒状,降低电子散射,提升热导率;三是Si元素以第二相形式析出,形成 β -Al₃FeSi、Mg₂Si等,降低Si的实际固溶量,进而提升合金的导热性能。同时上述组织变化也对合金的力学性能产生影响。

基于凝固冷却曲线,对比分析了不同元素对Al-7Si-0.8Fe合金凝固特性的影响。发现Zn和Cu的添加对基础合金的凝固过程影响并不显著,凝固过程中也没有新的第二相生成,而Mg则会产生显著影响。图5所示为基础合金和BA-0.5Mg合金的固热分析曲线及其一阶、二阶导数。而添加Mg后,在其凝固过程中产生一个新峰,分析表明,该析出相为Mg₂Si相^[19]。值得注意的是,Mg元素使合金的共晶生长平台温度 T_{EG} 从848.6 K降低至829.8 K,下降了约19 K,在实际凝固过程中,Mg元素富集在固/液生长前沿,造成成分过冷,阻碍

共晶Si相生长,进而细化共晶组织。因此,Mg添加后合金的力学性能最为显著。

3.2 导电和软化的协同影响机制

对于纯金属及合金而言,导热性能与导电性能呈正相关。根据Mattissen-Flemming定律^[20],Al-Si合金的电阻率应与合金内部晶(相)界面积、位错密度和空位浓度呈反比。合金导电性能的提升与固溶原子浓度、位错密度、空位浓度的降低有关,而且固溶原子对电阻率的影响比位错密度和空位浓度显著。经过退火处理后,基体合金析出Si颗粒,降低对自由电子的散射,合金的晶粒大小没有发生明显的变化,晶界面积对电阻率的影响可忽略不计,合金中的位错密度、空位浓度降低,导电率提升。

对于实际凝固组织,由于Mg的相对原子质量较小,在添加相同质量分数的Mg、Zn和Cu元素的情况下, α (Al)基体中Mg的摩尔分数最高。此外,结合相图分析析出相种类及其含量结果表明,对于本实验的合金,Mg、Zn、Cu元素在 α (Al)中固溶量分别为0.24%、0.21%、0.11%(摩尔分数)。固溶原子对纯铝导热性能的影响主要取决于其原子半

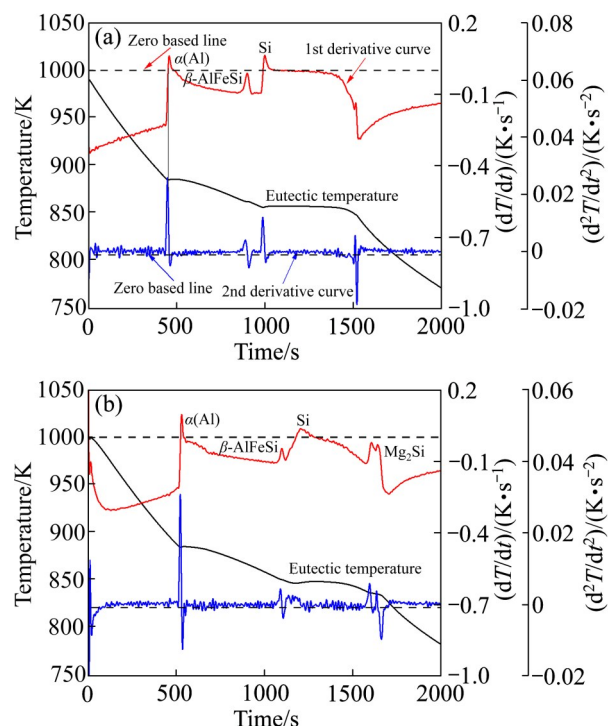


图5 添加不同合金元素的Al-7Si-0.8Fe合金的凝固冷却曲线

Fig. 5 Solidification thermal analysis of Al-7Si-0.8Fe alloy with different element additions: (a) No addition; (b) 0.5Mg

径、化合价以及核外电子结构^[21]。由于Mg与Al的原子半径差异最大，且Mg在 $\alpha(\text{Al})$ 中固溶量最高，因此，铸态Al-7Si-0.8Fe-0.5Mg合金的导电率最低。

铝合金中含Mg和Si时，经过适当的热处理工艺，合金中会形成纳米级的沉淀析出 β 相(Mg_2Si)，该析出相具有高熔点、低密度、高硬度、高弹性模量(120 GPa)和良好的热电性能，并且析出相和基体之间存在一定的应变场，这些应变场成为阻碍位错运动的障碍从而起到沉淀强化的作用^[22]。因此含Mg的合金经低温退火后表现最优异的导电性能提升和良好的抗软化特性，与Mg和Si协同存在 Mg_2Si 相析出密切相关。

4 结论

1) 合金元素加入Al-7Si-0.8Fe合金后其导电率均有不同程度降低。低温退火提升合金的导电率，其中含Mg合金的导电率为22.9 MS/m，提升幅度

为20.6%，提升最为显著，而含0.5Zn、0.5Cu合金的导电率提升幅度为10.1%和10.3%，提升幅度较小。

2) Mg显著提升合金的硬度和抗拉强度为80.7 HB和277 MPa，较基体合金提升约34.3%和20.4%。经退火后，合金发生不同程度软化，Cu添加后合金的退火软化最为显著，而Mg则表现出优异的抗退火软化特性。

3) Mg可显著细化铸态合金中的共晶Si相。低温退火过程中在基础合金及其含Zn和Cu的合金中基体中均有明显的Si相析出，而在含Mg合金中生成细小弥散的 Mg_2Si 相，保证其优异的抗退火软化。

REFERENCES

- [1] 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.
DEND Yun-lai, ZHANG Xin-ming. Development of aluminum and aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 321-347.
- [2] 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.
- [3] WEN Cheng, GAN Jun-qi, LI Cheng-bo, et al. Comparative study on relationship between modification of Si phase and thermal conductivity of Al-7Si alloy modified by Sr/RE/B/Sb elements[J]. International Journal of Metalcasting, 2020, 15(1): 194-205.
- [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.
ZHOU Yu-li, ZOU Chun, ZHAO Ming-bao, et al. Effects of Mg and Sc elements on the thermal conductivity and mechanical properties of cast Al alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(4): 353-356.
- [5] FAN Zhen, SONG Wei, ZHANG Hua-rui, et al. Effect of holding pressure on density and cooling rate of cast Al-Si alloy during additive pressure casting[J]. China Foundry, 2019, 16(6): 363-370.
- [6] KIM Y M, CHOI S W, HONG S K. The behavior of thermal diffusivity change according to the heat treatment in Al-Si

- binary system[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 687: 54–58.
- [7] 刘晓滕, 赵佳蕾, 孙有政, 等. 中间退火对Al-Mg-Si系铝合金汽车板组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(10): 125–130.
- LIU Xiao-teng, ZHAO Jia-lei, SUN You-zheng, et al. Effect of intermediate annealing on microstructure and properties of Al-Mg-Si series aluminum alloy automotive sheet[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(10): 125–130.
- [8] QI Ming-fan, KANG Yong-lin, LI Jing-yuan, et al. Improvement in mechanical, thermal conductivity and corrosion performances of a new high-thermally conductive Al-Si-Fe alloy through a novel R-HPDC process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 279.
- [9] 胡宸, 赵海东, 王雪灵, 等. Mg含量对高真空压铸AlSi10MgMn合金时效强化的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(7): 1481–1490.
- HU Chen, ZHAO Hai-dong, WANG Xue-ling, et al. Effect of Mg on age hardening of high vacuum die casting AlSi10MgMn alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(7): 1481–1490.
- [10] 王韬. Mg及稀土Nd元素对A380.0铝合金组织及性能的影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- WANG Tao. The influence of Mg and rare earth Nd elements on the microstructure and properties of A380.0 aluminum alloy[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010.
- [11] VANDERSLUIS E, LOMBARDI A, RAVINDRAN C, et al. Factors influencing thermal conductivity and mechanical properties in 319 Al alloy cylinder heads[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 648: 401–411.
- [12] 李荣德, 张晓丽, 李润霞. Zn在AlSiCuMg合金时效过程中的作用[J]. *沈阳工业大学学报*, 2007, 29(6): 642–645.
- LI Rong-de, ZHANG Xiao-li, LI Run-xia. Effect of Zn in the aging process of AlSiCuMg alloy[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2007, 29(6): 642–645.
- [13] CAVALIERE P, CERRI E, LEO P. Effect of heat treatments on mechanical properties and fracture behavior of a thixocast A356 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(5): 1653–1658.
- [14] 温澄. 高导热Al-Si系铸造铝合金的组分设计与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- WEN Cheng. Composition design and application of Al-Si cast aluminum alloy with high thermal conductivity[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [15] 董衍衡, 贾志宏, 温柏杨, 等. 稀土Sm对Al-7Si-0.3Mg合金微观组织的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(3): 479–488.
- DONG Yan-heng, JIA Zhi-hong, WEN Bai-yang, et al. Effect of rare earth Sm on the microstructure of Al-7Si-0.3Mg aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(3): 479–488.
- [16] GUSTAFSSON G, THORVALDSSON T, DUNLOP G. The influence of Fe and Cr on the microstructure of cast Al-Si-Mg alloys[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1986, 17(1): 45–52.
- [17] MATSUDA K, IKENO S, UETANI Y, et al. Metastable phases in an Al-Mg-Si alloy containing copper[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32(6): 1293–1299.
- [18] GUO Yu, WANG Ye, YANG Jie-ren, et al. A study of the mechanical and thermal characteristics of an Al-Si-Fe alloy fabricated by rolling and heat treatment[J]. *Metals*, 2018, 9(1): 9.
- [19] CAI M, FIELD D P, LORIMER G W. A systematic comparison of static and dynamic ageing of two Al-Mg-Si alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 373(1/2): 65–71.
- [20] CALLISTER W D, RETHWISCH D G. *Materials science and engineering: an introduction*[M]. New York: Wiley, 2018.
- [21] ZHONG L, PENG J, SUN Y, et al. Microstructure and thermal conductivity of as-cast and as-extruded binary Mg-Mn alloys[J]. *Materials Science and Technology*, 2016, 33(1): 92–97.
- [22] 李冲. 铝合金中Mg₂Si相演变行为及析出长大机制的研究[D]. 山东: 山东大学, 2012.
- LI Chong. Study on the evolution behavior and precipitation growth mechanism of Mg₂Si phase in aluminum alloy[D]. Shandong: Shandong University, 2012.

Synergistic effects of alloy elements and annealing on electrical conductivity and mechanical properties of Al-7Si-0.8Fe casting aluminum alloy

LI Meng-ni, LUO Gan, DU Jun

(School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The effects of Mg, Zn and Cu alloy elements on the electrical conductivity and anti-annealing softening property of Al-7Si-0.8Fe base alloy were studied in the present study. The influence mechanism was deeply discussed. The electrical conductivity of the base alloy decreases to vary degrees after the addition of alloy elements. The electrical conductivities of the all alloys increase after being low-temperature annealed. The electrical conductivity of Mg-containing alloy remarkably increases to 22.9 MS/m. Relatively, the improvement of electrical conductivity of Zn or Cu-containing alloys is small. Mg addition can significantly improve the hardness and tensile strength by about 34.3% and 20.4% compared with the base alloy. Annealing softening occurs for the all alloys to different degrees. Mg addition shows the lowest annealing softening and high anti-annealing softening properties. The hardness and tensile strength of as-annealed Al-7Si-0.8Fe-0.5Mg alloy are 79 HB and 266 MPa, respectively. Mg addition can significantly refine the eutectic Si phase in the as-cast alloy. During the low-temperature annealing process, small Si particles obviously precipitate of in the base alloy and Zn or Cu-containing alloys. However, fine dispersion of Mg₂Si phase precipitate in the Mg-containing alloy, ensuring the excellent resistance to annealing softening.

Key words: casting aluminum alloy; electrical and thermal conductivity; mechanical property; anti-annealing softening property

Received date: 2021-06-29; **Accepted date:** 2021-09-19

Corresponding author: DU Jun; Tel: +86-20-87113597; E-mail: jundu@scut.edu.cn

(编辑 龙怀中)