

Si、Mg元素及时效处理对Al-Si-Mg合金组织及性能影响

张锴昕¹ 周玉立² 刘士渊³ 张文达¹ 白培康¹

(1. 中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051; 2. 中铝材料应用研究院有限公司苏州分公司, 苏州 215026; 3. 山西中兵铸造有限公司, 大同 037036)

摘要 设计并制备了不同Mg、Si含量Al-Si-Mg合金, 结合透射电镜(TEM)、差示扫描量热法(DSC)和X射线衍射分析(XRD)等表征手段, 系统研究了时效处理对合金电导率及力学性能的影响。结果表明, Al-Si-Mg合金经短时时效处理后电导率与强度协同提升, 经250℃×2h时效处理后, Al-1Si-0.1Mg合金电导率由铸态的28.7 MS/m提升至33.5 MS/m, 增加了16.7%, 屈服强度从46.4 MPa增至83.4 MPa, 提高了79.7%。时效过程中Si、Mg固溶原子的析出减小晶格畸变, 从而改善导电性能; 同时纳米级Si颗粒与Mg₂Si的析出强化是强度提升的主要机制。

关键词 Al-Si-Mg合金; 导电性能; 力学性能; 直接时效处理

中图分类号 TG146.21; TG166.3

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250079

Influence of Si, Mg and Aging Treatment on Microstructure and Properties of Al-Si-Mg Alloys

ZHANG Kaixin¹, ZHOU Yuli², LIU Shiyuan³, ZHANG Wenda¹, BAI Peikang¹

(1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051; 2. Chinalco Material Application Research Institute Co., Ltd., Suzhou Branch, Suzhou 215026; 3. Shanxi Diesel Norinco Casting Co., Ltd., Datong 037036)

Abstract: Al-Si-Mg alloys with varying Mg and Si contents were designed and fabricated. The effects of aging treatment on the electrical conductivity and mechanical properties of alloys were systematically investigated using transmission electron microscopy (TEM), differential scanning calorimetry (DSC), and X-ray diffraction (XRD). The results indicate that the electrical conductivity and strength of Al-Si-Mg alloys are synergistically enhanced after short-term aging treatment. After aging at 250 °C for 2 h, the electrical conductivity Al-1Si-0.1Mg alloy is increased from 28.7 MS/m to 33.5 MS/m, showing a 16.7% enhancement, while the yield strength is enhanced from 46.4 MPa to 83.4 MPa, representing a 79.7% increase. The precipitation of solid-solution Si and Mg atoms effectively reduces lattice distortion during aging treatment, thereby improving electrical conductivity. Meanwhile, the precipitation strengthening of nanoscale Si particles and Mg₂Si is responsible for the strength improvement.

Key Words: Al-Si-Mg Alloys, Electrical Conductivity, Mechanical Property, Direct Aging Treatment

铝合金因其优异的高导电性、高比强度及耐腐蚀性特性成为铜材在电缆、电机等领域的轻量化替代材料^[1]。高导电铝合金通常为工业纯铝、1xxx和3xxx系铝合金^[1-2], 虽具有优异导电性(36 MS/m), 但抗拉强度仅为50 MPa, 显著限制高导电铝合金在承受较高载荷场景中的应用, 如电动汽车中的牵引电机、转子及逆变器等^[1]零部件。目前, 国内外者通过添加合金元素提高导电铝合金的力学性能, 但会显著降低金属材料的导电性能, 如添加1% (质量分数, 下同) 的Sc、V、

Mn或Cr元素可导致电导率下降28%~52%^[3]。特斯拉公司研发的高导电铸造铝合金包括Al-1Si-0.4Mg、Al-3.6Si-0.4Mg及Al-5.3Ni-0.35Fe等, 其屈服强度达到90~160 MPa, 电导率为27.26~30.74 MS/m^[4]。

因此, 如何实现强度与导电性的协同增强成为亟待解决的问题。金属导电性能的衰减机制主要源于电子散射效应, Drude-Sommerfeld理论^[5]指出, 自由电子在定向迁移过程中遭遇的晶格缺陷(如位错、固溶原子及第二相界面)会显著增加散射概率。金属中加入合

收稿日期: 2025-02-22; 修订日期: 2025-06-01

第一作者: 张锴昕, 男, 1999年出生, 硕士研究生, E-mail: 2535265823@qq.com

通信作者: 张文达, 男, 1976年出生, 副教授, E-mail: zhangwenda@nuc.edu.cn

引用格式: 张锴昕, 周玉立, 刘士渊, 等. Si、Mg元素及时效处理对Al-Si-Mg合金组织及性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(4): 604-611.

ZHANG K X, ZHOU Y L, LIU S Y, et al. Influence of Si, Mg, and aging treatment on the microstructure and properties of Al-Si-Mg alloys [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 604-611.

金元素会产生具有晶格畸变的固溶体,导致电子在传输过程中发生散射,降低电子的平均自由程,从而降低电导率^[6]。合金元素析出形成第二相后,第二相与基体的共格关系不同也会导致晶格畸变,降低电导率,某些粗大第二相(如 β -AlFeSi相)甚至会割裂基体,造成局部应力集中并产生微观裂纹,从而引起自由电子的散射并导致电导率降低^[7]。

研究表明,时效处理能够增强合金的强度、硬度及电导率,ABDO H S等^[8]研究发现,200℃时效处理8 h后轧制Al-Cu-Mg合金电导率提高了2.5%。仇晨等^[9]研究发现,120℃时效处理18 h后Al-Zn-Mg合金电导率比热轧态提高了约10%并稳定在峰值。DONG Q P等^[10]研究发现,180℃时效24 h后Al-Mg-Si合金的电导率比固溶态合金提高了9.61%。LIU H Y等^[11]研究了T6热处理对挤压态Al-1Si-0.6Mg-0.2Fe合金的影响,证明回归再结晶有利于挤压态铝合金晶粒增大,减小晶界对电导率的阻碍,其电导率为33.1 MS/m,抗拉强度为247.6 MPa。此外,时效过程中固溶原子会析出并形成纳米级弥散相,降低固溶原子导致的晶格畸变的程度,从而降低电导率^[12]。

如何调控合金成分、时效工艺,在提升高导电铸造铝合金材料强度的同时保障其高电导率方面仍需进一步研究。本研究设计并制备不同Si、Mg含量的Al-Si-Mg合金,在保障铝合金材料高电导率的基础上尽可能提升合金材料的强度,研究时效处理工艺及不同Si、Mg含量对Al-Si-Mg合金性能的影响,探讨Al-Si-Mg合金电导率及强度协同提升机理,旨在为高电导率铝合金的研发和应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用高纯Al锭(99.99%,质量分数,下同)、Al-20Si合金锭、纯镁锭为原料,将称好的高纯Al锭、Mg锭及Al-20Si合金锭放入石墨坩埚电阻炉中加热至720℃直至完全熔化,加入精炼剂并通入高纯氩气进行除气,静置30 min,浇注至预热到150~180℃的Y型模中,见图1。

表1为采用Thermo Fisher ARL 4460直读光谱仪测得的合金具体成分,合金中Fe为杂质元素。试验合金按照Si、Mg元素含量分类分别编号A、B、C、D,同一成分合金时效前后分别表示为A₁、A₂,以此类推。每个铸锭取3个拉伸试棒,电导率测试及显微组织观察试样取铸锭中间位置,见图1。

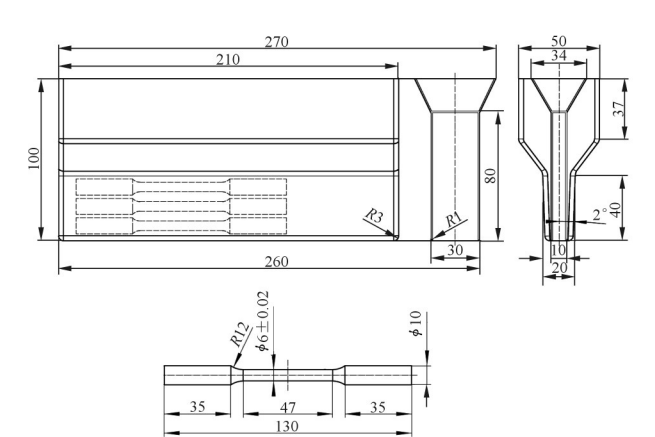


图1 铸件及力学拉伸试样尺寸示意图
Fig.1 Dimensional diagram of casting and specimen for mechanical tensile test

表1 不同Mg、Si含量的Al-Si-Mg合金

Tab.1 Chemical composition of Al-Si-Mg alloy with varied Mg and Si contents		w_B						%
编号	合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al	
A	Al-1Si-0.1Mg	0.97	0.01	<0.01	<0.01	0.11	余量	
B	Al-1Si-0.05Mg	1.02	0.01	<0.01	<0.01	0.05	余量	
C	Al-0.5Si-0.1Mg	0.51	0.01	<0.01	<0.01	0.11	余量	
D	Al-0.5Si-0.05Mg	0.48	0.01	<0.01	<0.01	0.06	余量	

1.2 试验方法

对合金铸锭采用进行直接时效处理,设定时效温度250℃,按时效时间分为8组(0.5、1、1.5、2、4、6、8和12 h),设铸态合金作为对照组。

采用Thermo Fisher FEI Apreo C型扫描电镜(配备能谱仪)进行显微组织观察,试样依次经过150、800和2 000目砂纸进行打磨,随后使用W2.5水溶金刚石研磨膏进行抛光处理。采用JEM-F200型透射电镜进行微观结构表征,线切割获取0.5 mm厚薄片,砂纸研磨至80 μm,冲孔制成直径为3 mm圆片,采用体积分数为25%的硝酸+75%的甲醇混合液进行双喷减薄,设备运行参数为-35℃,60 mA。

电导率测试采用FOERSTER SIGMATEST 2.069涡流电导率测试仪进行,测试环境温度为(20±2)℃,每个试样测试5个位置并取平均值。采用INSTRON 8861万能材料试验机测试合金的抗拉强度、屈服强度以及伸长率,屈服前和屈服后的拉伸速率分别为0.525和4.20 mm/min。热分析采用Perkin Eimer Diamond DSC仪,设置升降温速率为10℃/s,测试温度区间为400~750℃。采用DX2700型X射线衍射仪进行物相分析,设置工作电压为40 kV,管电流为30 mA,扫描范围为10°~80°,扫描速率为4(°)/min,通过JADE软件分析XRD图谱并计算晶格常数。

2 试验结果与分析

2.1 电导率

图2为4组试验合金在250℃时效12 h内的电导率变化曲线。结果表明,短时间时效处理后Al-Si-Mg合金的电导率快速上升,250℃时效2 h左右达到峰值电导率的85%(图2中表示为d85),随后逐渐稳定。4种合金中,Al-1Si-0.1Mg、Al-1Si-0.05Mg合金时效后电导率的提升幅度更大。当Si添加量为1%时,合金电导率最终趋于34.8 MS/m,比铸态下Al-1Si-0.1Mg、Al-1Si-0.05Mg合金电导率分别提升了21.2%和17.1%。相比之下,Al-0.5Si-0.1Mg、Al-0.5Si-0.05Mg合金时效12 h后电导率稳定在35.1 MS/m,较铸态提升了6.8%~8.0%。

值得注意的是,当Si添加量为1%时,合金电导率上升速度更快。Al-1Si-0.1Mg合金时效处理0.5 h后,电导率即可从铸态的28.7 MS/m上升至32.8 MS/m,提高了14.3%,占总提升额的67.4%,Al-1Si-0.05Mg合金在时效0.5 h后电导率提高了10.8%,占总提升额的63.1%。当Si添加量为0.5%时,由于固溶元素较少,其时效强化效应减弱,Al-0.5Si-0.1Mg合金时效1 h后电导率仅由铸态的32.47 MS/m上升至33.84 MS/m,提

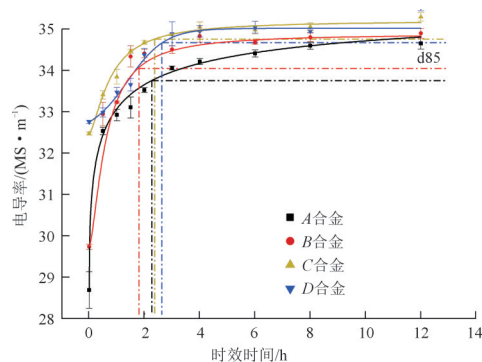


图2 时效处理对4种Al-Si-Mg合金电导率的影响

Fig.2 Electrical conductivity variation of Al-Si-Mg alloys with aging durations

高了4.2%,占总提升额的52.5%;Al-0.5Si-0.05Mg则提升了2.2%,占提升总额的32.3%。

2.2 力学性能

铸态及250℃×2 h时效处理后4种合金的力学性能见图3。可以看出,当Mg含量相同时,合金A(Al-1Si-0.1Mg)比合金C(Al-0.5Si-0.1Mg)铸态的抗拉强度提高了20.5%,合金B(Al-1Si-0.05Mg)比合金D(Al-0.5Si-0.05Mg)铸态的抗拉强度提高了14.1%。时效处理后,合金A、B抗拉强度提升,分别提高了5.2%和15.3%。相反,合金C、D时效处理后抗拉强度有所下降,分别降低了8.1%和4.8%。

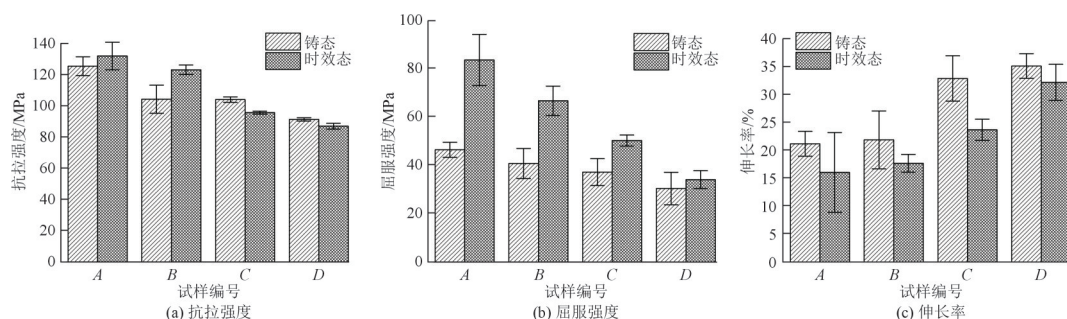


图3 250℃×2 h时效前后4种合金的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of alloys before and after aging at 250℃ for 2 h

4组合金铸态下的屈服强度随合金元素含量降低而降低。时效处理2 h后,4种合金屈服强度均提升,其中合金A时效2 h后提升幅度最大,提高了79.7%,合金B、C、D时效处理后屈服强度的提升幅度分别为63.6%、35.1%以及12.0%。

随着合金元素含量降低,铸态合金的伸长率上升,合金A和B铸态的伸长率分别为21.2%和21.9%,合金C和D则提高至32.8%和35.1%。时效处理后,合金的伸长率下降。当合金元素较多时,伸长率下降也更明显,如合金C的伸长率下降了27.9%,而合金D仅下降8.3%。

与国内外同类合金相比,本研究得到的合金成分

及时效处理工艺得到的强度较低,而电导率较高。以特斯拉专利合金为例,在添加Ti后Al-1Si-0.04Mg-0.03Ti合金时效后屈服强度可达150 MPa,远高于本研究(83.4 MPa),但其铸态电导率为29.0 MS/m,225℃×2 h时效处理后电导率为30.7 MS/m,远低于本研究的结果。

2.3 微观组织

4种合金250℃时效2 h后电导率提升至峰值电导率的85%左右,因此选择250℃×2 h时效处理试样与铸态试样进行对比,结果见图4。可以看出,当Si含量为1%时,铸态合金中存在两种AlFeSi析出相,即点状

的 α -AlFeSi 相及针状、短片状的 β -AlFeSi 相, 高倍 SEM 显示点状 AlFeSi 相内部呈现骨骼状结构(见图 4i), 其 EDS 定量分析表明, 析出相的 Fe、Si 摩尔比接近 1:1, 部分研究认为该相为 $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 相^[13]。由于材料中 Fe 含量极少, 仅为 0.01%, 析出含 Fe 相体积分数低于 0.4%。当 Si 含量为 0.5% 时, 铸态合金中含 Fe 相数量减少, 且均为点状的 α -AlFeSi 相, 证明添加的 Si 元素能够促进含 Fe 相的析出, 且增大了析出相尺寸。统计 Al-1Si-0.1Mg 等合金时效前后点状第二相半径, 每个合金中选取 5 张 SEM 图片, 每个合金共统计点数 50~

200 个, 结果显示 Al-1Si-0.1Mg 合金时效前后第二相平均半径为 2.92 μm 和 2.42 μm , 面积分数为 0.24% 和 0.22%; Al-1Si-0.05Mg 合金时效前后第二相平均半径为 2.68 μm 与 1.82 μm , 面积分数为 0.05% 和 0.04%; Al-0.5Si-0.1Mg 合金时效前后第二相平均半径为 2.92 μm 与 2.69 μm , 面积分数为 0.04% 和 0.04%; Al-0.5Si-0.05Mg 合金时效前后第二相平均半径为 1.22 μm 与 1.16 μm , 面积分数为 0.03% 和 0.02%。SEM 图像统计结果证明时效处理后第二相尺寸及面积分数均有小幅下降。

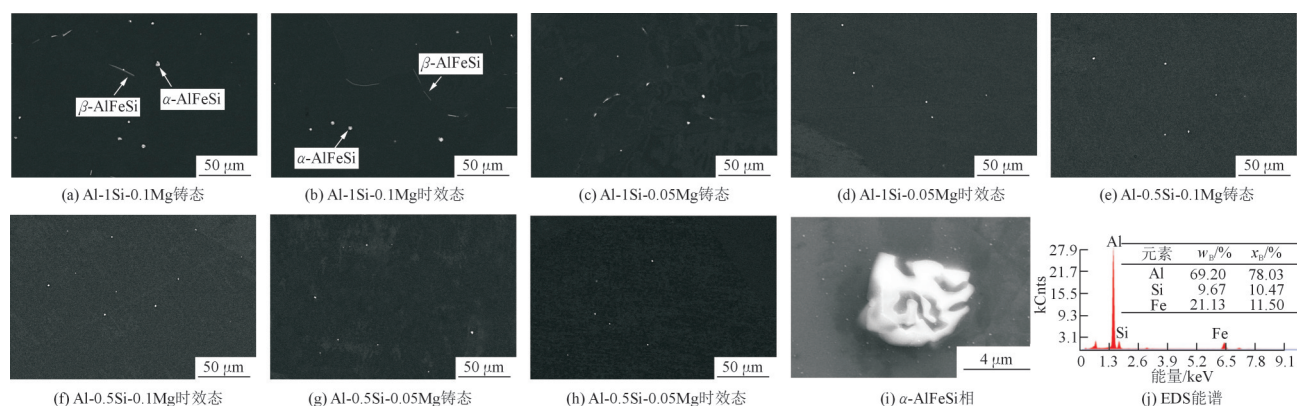


图4 4种合金 SEM 图

Fig.4 SEM images of alloys

2.4 热分析

图 5 为 4 种 Al-Si-Mg 合金的 DSC 曲线及析出相的 JMat-Pro 计算结果。从图 5a 可以看出, 4 种合金均在 580 $^{\circ}\text{C}$ 和 670 $^{\circ}\text{C}$ 存在吸热峰, 结合 JMat-Pro 软件计算 4 种合金不同温度下相组成计算结果, 其中 580 $^{\circ}\text{C}$ 的较小的吸热峰为 β -AlFeSi 相熔化峰^[14], 670 $^{\circ}\text{C}$ 处的吸热峰为

α -Al 熔化峰。铸态时, 合金 A、B 和 D 580 $^{\circ}\text{C}$ 处 β -AlFeSi 相的熔融焓分别为 0.057 5 J/g(A_1)、0.268 5 J/g(B_1)与 0.142 6 J/g(D_1), 时效处理后则分别为 0.045 1 J/g(A_2)、0.126 2 J/g(B_2)和 0.081 5 J/g(D_2), 结果均表现出时效处理后 β -AlFeSi 相的熔融焓降低的规律, 即时效处理后 β -AlFeSi 相减少^[15], 这一点与 β -AlSiFe 相尺寸及面积分数统计结果相符。

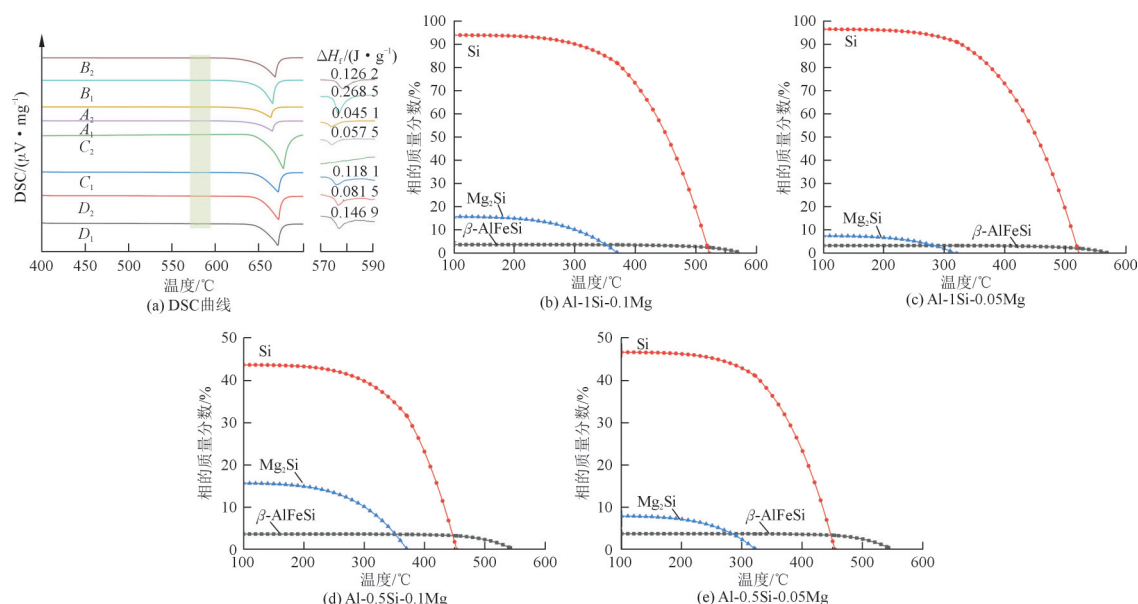


图5 4种合金的 DSC 曲线及析出相的 JMat-Pro 计算结果

Fig.5 DSC curves of alloys and calculation results of precipitation phases using JMat-Pro software

3 分析与讨论

3.1 时效处理对力学性能的影响

不同Si含量对合金时效处理后力学性能有较大影响。Si含量为1%的合金(合金A、B)时效处理后强度提升明显,Si含量为0.5%的合金(合金C、D)时效处理后抗拉强度降低,而屈服强度提升相对较小。为探明

不同Si含量合金力学性能变化内在机制,对相同Mg含量的两组合金时效前后显微组织进行了TEM观察,见图6。可以看出,铸态Al-1Si-0.05Mg合金在晶界处有较多纳米级Si析出相,晶粒内部则有少量纳米级Si析出相(图6a);时效处理后,晶内点状纳米级析出相增多且均匀分布,直径由7.8 μm 增加至52.2 μm ,面积分数由增加0.3%至1.0%,时效处理后还出现少量纳米级针状相 Mg_2Si 相,长度为200~1 000 nm(图6b)。

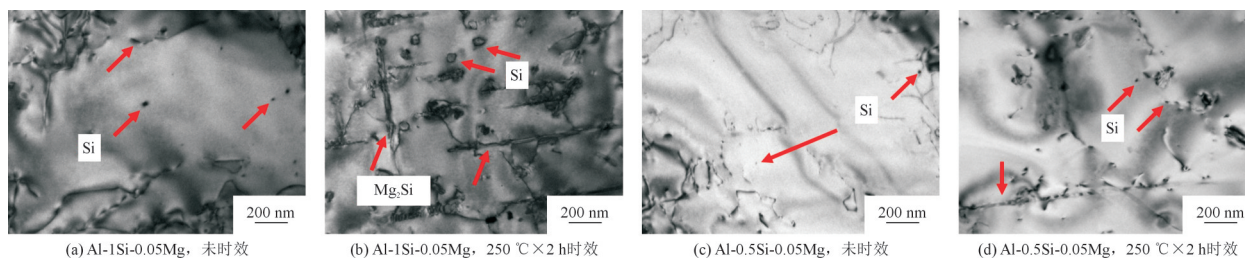


图6 时效前后Al-1Si-0.05Mg合金及Al-0.5Si-0.05Mg合金TEM明场相

Fig.6 TEM bright-field images of Al-1Si-0.05Mg and Al-0.5Si-0.05Mg alloys before and after aging

时效处理前,纳米级析出相的尺寸和数量与铸态Al-1Si-0.05Mg合金相近(见图6c),时效处理后, Mg_2Si 相和Si相增多(见图6d),但析出数量比Al-1Si-0.05Mg少。结合力学性能测试结果可以得出,Al-0.5Si- x Mg合金时效前后抗拉强度下降的原因在于当合金内部析出的相更少时,析出强化不足以弥补固溶强化减弱造成的强度损失。

图7为250 $^{\circ}\text{C}$ 时效后Al-1Si-0.05Mg合金的HAADF-STEM和元素分布图像。可以看出,纳米颗粒主要为Si相以及少量 Mg_2Si 析出相^[10,16-17]。测量得

到上述两种析出相宽度为30~110 nm。 Mg_2Si 及Si的纳米级析出相均为高硬度的析出相,两者共同提高了时效处理后合金的强度。

TEM结果表明,合金A、B比合金C、D时效处理后强度提升更加明显的原因在于时效过程会导致部分合金元素析出,当合金元素含量较高时,析出的强化相较多,会提高合金的强度;当合金元素含量较低时,合金元素析出导致固溶强化程度下降,且形成的析出相数量较少,因此导致合金强度下降。伸长率方面,合金元素含量降低导致晶格畸变程度降低,第二相数量和缺

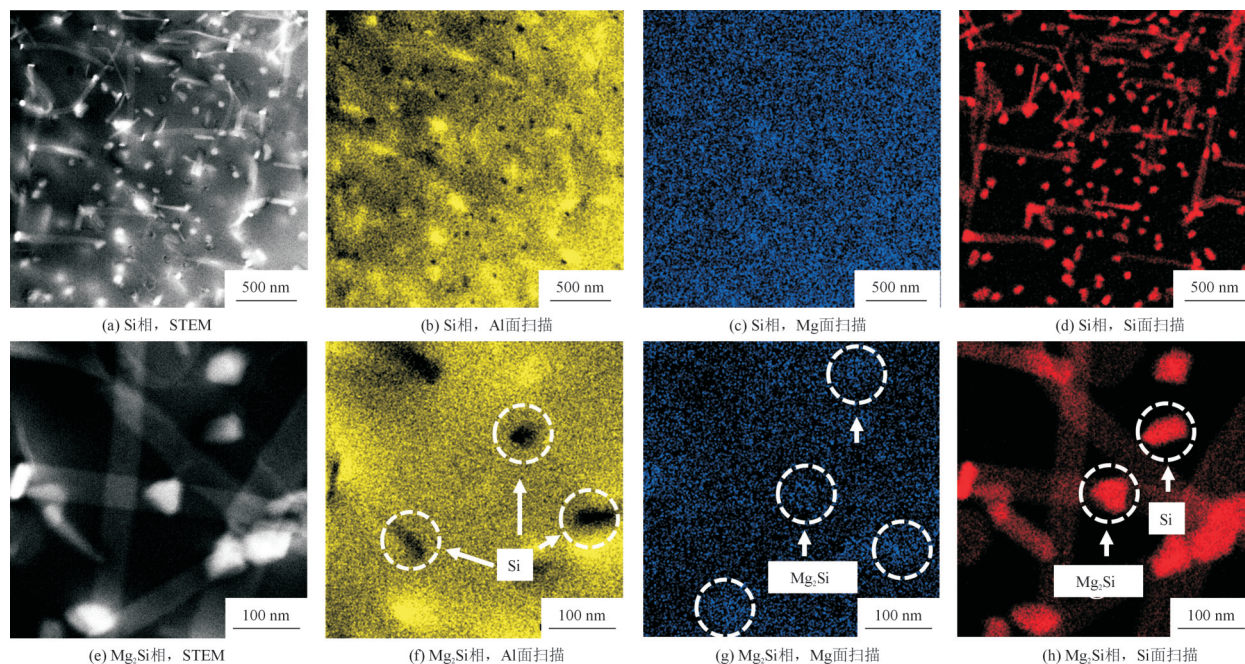


图7 250 $^{\circ}\text{C}$ 时效后Al-1Si-0.05Mg合金的HAADF-STEM和元素分布图像

Fig.7 HAADF-STEM and element mapping of Al-1Si-0.05Mg alloy after aging at 250 $^{\circ}\text{C}$

陷减少,提高了C、D合金的伸长率。时效处理后,Al-Si-Mg合金析出更多Si和Mg₂Si脆性相^[10,16],降低合金的韧性,宏观表现为合金的伸长率下降。

3.2 时效处理对电导率的影响

洛伦兹金属经典电子理论认为金属中存在自由电子,当存在外部电场时,自由电子会发生定向移动,产生电流。在理想晶格中,原子的排列是完全规则的,自由电子的运动是无阻碍的。然而,原子热振动与晶体缺陷均会导致自由电子发生散射,前者引起的电阻被称为本征电阻,其影响因素只有温度,后者产生的电阻为残余电阻,对其调控是改善材料的导电性能的主要方式。

晶体缺陷包括晶格畸变、第二相、晶界等,其中晶格畸变的形成因素包括固溶原子、置换原子、空位、位错等。

$$I_{\text{total}} = I_{\text{M}} - \Delta I_{\text{gb}} - \Delta I_{\text{ss}} - \Delta I_{\text{p}} - \Delta I_{\text{dis}} \quad (1)$$

式中, I_{total} 为总电导率; I_{M} 为无晶格缺陷纯铝的电导率; ΔI_{gb} 为晶界引起的电导率减量; ΔI_{ss} 为空位和晶格畸变引起的电导率减量; ΔI_{p} 为析出物引起的电导率减量; ΔI_{dis} 为位错引起的电导率减量。其中, ΔI_{ss} 对总电导率的降低贡献最大,即溶质原子对铝基合金导电性能的影响大于晶界、析出相和位错^[18]。因此,降低合金元素的固溶度能够有效提高金属的导电性。时效处理能析出固溶原子。菲克定律与Arrhenius方程表明金属原子的扩散过程受到温度影响较大^[19]:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (2)$$

式中, J 为扩散通量,表示单位时间内通过单位面积的物质量; dC/dx 为浓度梯度,表示浓度在空间中的变化率; D 为扩散系数,受材料特性与温度影响,其影响因素为:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

式中, D_0 为前因子,表示在无限高温下原子的扩散系数; Q 为扩散激活能,表示溶质原子扩散的能量障碍; R 为气体常数; T 为热力学温度。Arrhenius方程中 D_0 、 Q 受材料本身特性影响, R 为常数,因此温度提升能够改善材料中固溶原子的扩散。时效处理时温度升高,合金中的固溶原子在较高的温度下发生扩散,并在原子间结合能与吉布斯自由能的驱动下结合生成析出相^[20]。在时效过程,Si相及Mg₂Si相的析出使得合金中的固溶原子脱离Al晶格,降低了材料的晶格畸变,改善合金电导率。图8为固溶原子的析出对金属电导率的影响示意图,其中Si相具有面心立方(fcc)晶格,晶格参

数为 $a_{\text{Si}}=0.546 \text{ nm}$,图中为深色原子,铝同样具有fcc晶格,晶格参数为 $a_{\text{Al}}=0.403 \text{ nm}$ ^[21],图中表示为浅色原子,合金中析出的Si相与Al基体之间为半共格结构。当合金中固溶原子较多时,晶格畸变程度更大,自由电子更容易发生散射,当固溶原子析出后,基体对自由电子的散射程度大幅改善。

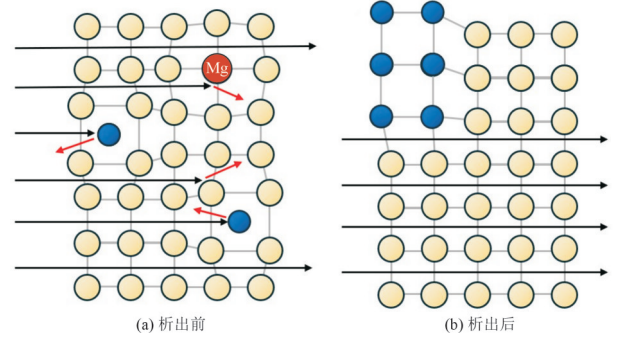


图8 固溶原子析出前后对晶格及自由电子的影响示意图

Fig.8 Influence diagram of solute atom precipitation on lattice and free electrons

图9为4种合金时效前后的XRD图。可以看出,Al-1Si-0.1Mg合金及Al-1Si-0.05Mg合金时效后的 $\langle 111 \rangle_{\text{Al}}$ 、 $\langle 200 \rangle_{\text{Al}}$ 峰和 $\langle 311 \rangle_{\text{Al}}$ 峰均向小角度方向偏移,证明Al基体晶格大小发生变化^[22-23],时效过程导致的固溶原子析出从而改变了晶格的畸变程度。Al-0.5Si-0.1Mg合金及Al-0.5Si-0.05Mg合金时效后峰未发生偏移,证明这两种合金并未因为时效处理而改变晶体结构。图2中Al-1Si-0.1Mg、Al-1Si-0.05Mg合金时效后电导率提升较少,原因在于Al-1Si-0.1Mg、Al-1Si-0.05Mg合金中的固溶态Si元素较少,时效后元素析出也较少,导致电导率提升较少。

由布拉格方程可知,X射线衍射分析能够反映晶格常数的变化,间接表征Al基体中溶质元素对晶格常数的影响,布拉格方程表达式为:

$$2d_{hkl} \sin \theta = \lambda \quad (4)$$

式中, λ 为X射线波长; d_{hkl} 为晶面间距,对应晶面指数 h 、 k 、 l ; θ 为入射角。当晶格发生畸变时,晶面间距 d_{hkl} 会偏离理想值,导致衍射峰位置(2θ)偏移或峰形展宽。铝合金的晶面间距可由下式得到:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (5)$$

式中, a 为点阵常数,即晶格常数。通过XRD测试得到 θ 值,结合式(4)及式(5),可以计算出晶格常数 a 。

晶格畸变程度可以通过晶格常数表征,晶格常数是指单个晶胞的边长或晶胞的三维尺寸,即晶系的三维尺寸 a 、 b 、 c 。在铝合金中,铝基体的晶体结构为面心立方晶格,其晶胞的3个棱长相等,即 $a=b=c=0.4046 \text{ nm}$ 。

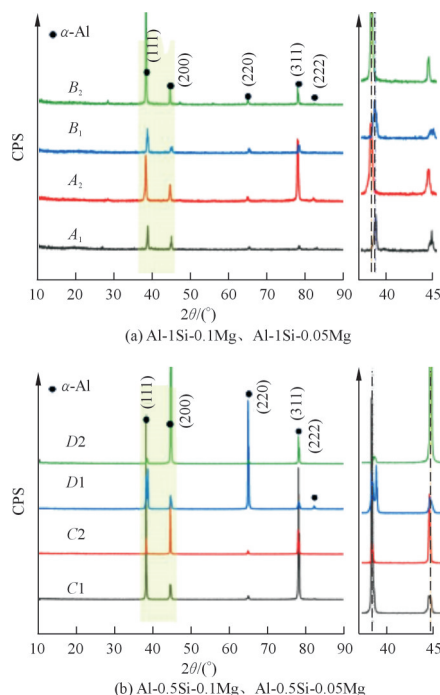


图9 4种合金的XRD图

Fig.9 XRD patterns of alloys

当材料存在晶格畸变时,晶体中原子偏离理想晶格位置,导致晶格常数发生变化。如合金原子扩散并产生空位缺陷后,原本空穴位置的原子对周围原子的斥力消失,空穴周围原本排列紧密的晶格发生晶格畸变,晶胞边长被拉长,导致晶格常数整体增大。利用X射线衍射试验可以测得实际材料的晶格常数信息,将时效处理前后的晶格常数对比后可以得到时效处理前后晶体中固溶原子析出程度。

图10为4种合金电导率及晶格常数的对比示意图。可以看出,A、B合金时效后晶格常数提升幅度较大,分别由0.403 6、0.404 0 nm增加到0.406 2、0.405 9 nm;Al-0.5Si-0.1Mg合金时效后晶格常数有小幅提升,由0.405 7 nm增加到0.406 2 nm,Al-0.5Si-0.05Mg合金时效后晶格常数小幅下降,证明合金中晶格畸变程度受到第二相析出的影响较大。时效后固溶原子析出

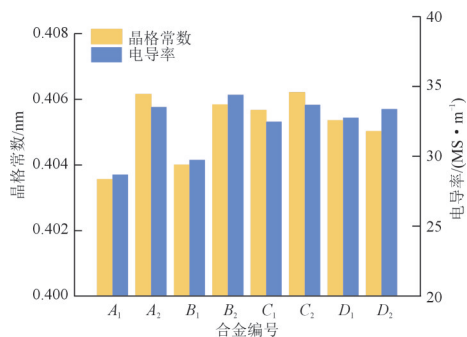


图10 Al-Si-Mg合金时效前后电导率与晶格常数

Fig.10 Electrical conductivity and lattice constant of Al-Si-Mg alloy before and after aging

形成更多第二相,降低了合金畸变程度,减小了自由电子的散射,提高了电导率。当合金成分不足以形成第二相时,时效处理对合金电导率影响程度大幅下降。Al-1Si-0.1Mg合金和Al-1Si-0.05Mg合金中Si相在时效处理后析出较多,因此晶格常数变化幅度较大,导致电导率有较大提升。

4 结 论

(1)时效处理短时间内能够使Al-Si-Mg合金的电导率快速上升,随后逐渐稳定。4种合金均在250℃时效处理2h左右时电导率达到峰值电导率的85%。

(2)Al-1Si- x Mg合金时效处理后能够提高合金的抗拉强度和屈服强度,尤其能够大幅提升合金屈服强度,相反Al-0.5Si- x Mg合金时效处理后强度有所降低。时效处理后4种合金的伸长率均有所下降。

(3)Al-Si-Mg合金在时效处理后能够同时提高其导电性能和力学性能,原因在于Al-Si-Mg合金时效后能够析出纳米级Si相和 Mg_2Si 相两种硬脆相,这些纳米相的形成提高了合金的强度。同时,析出相会消耗固溶Al晶格中的Si、Mg元素,有效降低合金的晶格畸变程度,减小自由电子的散射,提高电导率。

(4)Al-1Si-0.1Mg合金在250℃直接时效处理2h后电导率可达到33.5 MS/m,屈服强度达到83.4 MPa,在保持较高强度及电导率的前提下有效降低生产成本。

参 考 文 献

- [1] CZERWINSKI F. Aluminum alloys for electrical engineering: A review[J]. Journal of Materials Science, 2024, 59(32): 14 847-14 892.
- [2] JALILIAN M, RIBA J R, PARVIZI P. Aluminum conductor steel-supported conductors for the sustainable growth of power line capacity: A review and discussion[J]. Materials, 2024, 17(18): 4 536.
- [3] 刘静. 元素变质对含Mn铝合金导电性能的影响机制研究[D]. 广州:华南理工大学, 2023.
- [4] TESLA Inc. Aluminum alloys for die casting: US20210332461[P]. 2021-10-28.
- [5] 黄程毅, 段守岗, 卢逸喆, 等. 预变形与时效温度对6101合金电导率和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(1): 156-166.
- [6] 王孝国, 李秋书, 杨光印, 等. 固溶时效对7K01铝合金组织和硬度及电导率的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(5): 480-482.
- [7] 赵清汝. 第二相对铝合金导电及力学性能的影响与调控[D]. 济南:山东大学, 2017.
- [8] ABDO H S, SEIKH A H, MOHAMMED J A, et al. Alloying elements effects on electrical conductivity and mechanical properties of newly fabricated Al based alloys produced by conventional casting

- process[J]. Materials, 2021, 14(14): 3 971.
- [9] 仇晨, 荣莉, 魏午, 等. 缓慢升温时效处理对 Al-Zn-Mg-Er-Zr 合金性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(3): 8-11.
- [10] DONG Q P, WANG R Z, WANG J H, et al. Influence of Mg/Si ratio on the mechanical strength and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys [J]. Materials Today Communications, 2025, 42: 111 439.
- [11] LIU H Y, LIU J, WANG Y, et al. Study about heat treatment on microstructure, electrical conductivity and mechanical properties of Al-1Si-0.6Mg-0.2Fe alloy [J]. Materials Characterization, 2024, 209: 113 700.
- [12] WANG Y, ZHU L J, NIU G D, et al. Conductive Al alloys: The contradiction between strength and electrical conductivity [J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(5): 2 001 249.
- [13] LEI X X, LI Y K, DU X D. Microstructural features of AlFeSi spherical particles in hypoeutectic Al-Si alloy [J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107 105.
- [14] BRODARAC Z, DOLIC N, UNKIC F. Influence of copper content on microstructure development of AlSi9Cu3 alloy [J]. Journal of Mining and Metallurgy, 2014, B50(1): 53-60.
- [15] WANG G Q, YAN L, REN G C, et al. Analyzing as-cast age hardening of 356 cast alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(3): 399-404.
- [16] 颜家维. Al-1%Si 合金中第二相 Si 析出的调控机理及其对力学性能的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [17] 樊博阳, 李元东, 李想, 等. 镁硅质量比对 Al-Mg-Si 合金组织、热学和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 168-173.
- [18] 杨爽, 吴峻杰, 王朦朦, 等. 5G 基站散热器用高导电(热)压铸 Al-Si-Fe 铝合金的热力学设计与试验[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(7): 959-964.
- [19] KOHOUT J. Modified arrhenius equation in materials science, chemistry and biology [J]. Molecules, 2021, 26(23): 7 162.
- [20] ZHAO D D, ZHOU L C, KONG Y, et al. Structure and thermodynamics of the key precipitated phases in the Al-Mg-Si alloys from first-principles calculations [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(24): 7 839-7 849.
- [21] WU W Q, GONG M Y, WEI B Q, et al. Atomistic modeling of interface strengthening in Al-Si eutectic alloys [J]. Acta Materialia, 2022, 225: 117 586.
- [22] PYCZAK F, DEVIRENT B, MUGHRABI H. The effects of Different Alloying Elements on the Thermal expansion Coefficients, Lattice Constants and Misfit of Nickel-based Superalloys Investigated by X-ray Diffraction [C]//Superalloys 2004 (Tenth International Symposium). TMS, 2004.
- [23] SHEIBANI S, HESHMATI-MANESH S, ATAIE A. Structural investigation on nano-crystalline Cu-Cr supersaturated solid solution prepared by mechanical alloying [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 495(1): 59-62.

(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学术期刊等。

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技術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: 430019

电话: 027-85358206, 85486024, 85358127

投稿网址: www.special-cast.com

邮箱: tzzz@special-cast.com

