

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

杨爽¹ 吴峻杰¹ 王朦朦^{1,2} 黄仲佳¹ 刘桐¹ 赵禹¹ 洪荣辉³ 姚英武³ 王俊²

(1. 安徽工程大学材料科学与工程学院, 芜湖 241000; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240; 3. 安徽舜富精密科技股份有限公司, 芜湖 241000)

摘要 针对5G基站中压铸铝散热壳体强度与电(热)导率之间的倒置问题,通过热力学计算与试验研究相结合,利用PANDAT热力学计算、金相显微镜、扫描电镜、X射线衍射仪以及透射电镜研究了时效处理对压铸Al-7.5Si-0.8Fe铝合金的显微组织以及导电性能的影响。结果表明,320℃×1h时效处理能够显著提升压铸铝合金的电导率,时效组织中沿晶界和晶内分别析出了Al-Fe-Si三元相和Si相,降低了Fe、Si元素在铝基体中的固溶度。另外,经过时效处理,共晶Si网链连续性变差、铝基体的连通性增强也是电导率提升的主要原因。

关键词 压铸铝合金;散热器;热导率;电导率;热力学计算

中图分类号 TG146.21;TG249.2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2024.07.016

Thermodynamic Design and Experiment on High Conductivity Die-casting Al-Si-Fe Aluminum Alloy for 5G Base Station Heat Sink

YANG Shuang¹, WU Junjie¹, WANG Mengmeng^{1,2}, HUANG Zhongjia¹, LIU Tong¹, ZHAO Yu¹,
HONG Ronghui³, YAO Yingwu³, WANG Jun²

(1. School of Materials Science and Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240; 3. Anhui Shunfu Precision Technology Co., Ltd., Wuhu 241000)

Abstract: In view of the inversion problem between strength and electrical (thermal) conductivity of die-cast aluminum heat sinks in 5G base stations, effects of aging treatment on microstructure and conductivity of die-cast Al-7.5Si-0.8Fe aluminum alloys were investigated through a combination of thermodynamic calculations and experimental research by PANDAT thermodynamic calculations, metallographic microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and transmission electron microscopy. The results indicate that the conductivity of alloy is significantly improved after heat aging treatment at 320 °C for 1 h. Al-Fe-Si ternary phases and Si phase are precipitated along the grain boundaries and interior, respectively, thus reducing the solid solubility of Fe and Si in Al matrix. In addition, the continuity of eutectic Si network is deteriorated after aging, accompanied with the increased connectivity of the aluminum matrix, which is the main reason for the enhancement of conductivity.

Key Words: Die-cast Aluminum Alloy, Heat Sinks, Thermal Conductivity, Conductivity, Thermodynamic Calculation

5G 通讯时代的到来推动着电子通讯设备及产品向着高度集成的方向发展,然而对设备用材的导热性能要求也在不断提高,以保证设备与产品的使用寿命^[1]。通讯滤波器作为5G基站的重要部件,其功率大、集成度高,壳体结构上设计有许多不规则的薄壁散热片以

提高散热能力。高压铸造因其具有较高的生产效率及成本优势成为大规模制造散热壳体的主要成形方法。金属铝具有低密度、高比强度以及优异的耐腐蚀性等特点,是制造通讯滤波器的主要材料^[2]。纯铝的室温热导率约为237 W/(m·K),但其强度较低。合金化可以

收稿日期:2023-07-10;修订日期:2023-09-03

基金项目:安徽省高校科学研究资助项目(2022AH050956);安徽工程大学校级启动基金资助项目(S02202269);芜湖市揭榜挂帅资助项目(2021hg08)

第一作者简介:杨爽,男,1996年出生,硕士研究生,E-mail:yang18019539880@163.com

通信作者:王朦朦,男,1992年出生,讲师,E-mail:mengmengwang_AHPU@163.com

引用格式: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.

YANG S, WU J J, WANG M M, et al. Thermodynamic design and experiment on high conductivity die-casting Al-Si-Fe aluminum alloy for 5G base station heat sink[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(7): 959-964.

提高纯铝的力学性能,但会对其导热性产生一定的负面影响^[3-5]。合金元素在铝中一般以固溶原子、析出相、第二相等形式存在,会带来诸如空位、位错、相界面等晶体缺陷,从而使电子散射的几率增大,电子散射的平均自由程减小,最终导致导电(热)性能下降,强度与导电(热)性能之间存在着互斥关系^[3-5]。目前高导热铝制散热壳体的材料主要是在Al-8Si合金的基础上做相关改进,考虑到模具的使用寿命,压铸高导热铝合金材料中一般含有0.8%~1.0%的Fe以提高模具的抗黏模性。另一方面,考虑到合金的导电导热性,需要进一步严格控制合金中杂质元素的含量以降低固溶元素对电导率的影响。研究表明,Cr、Mn、V、Ti等过渡族金属元素对导电导热的降低效果最为显著^[6]。因此,用于压铸的高导热铝合金一般为Al-Si-Fe合金体系,Si含量在6%~9%之间,Fe含量在0.6%~1.0%之间,其他杂质元素的含量一般控制在0.01%以下,以满足成形性与使用性能的双重需求^[7]。

然而,Si与Fe的相对含量会对共晶Si相体积分数、Fe相的晶体结构类型、体积分数、合金的凝固温度区间以及Fe、Si元素在铝基体中的固溶度产生直接影响,从而影响合金的强度、塑性以及导电(热)性能^[8-10]。高导热Al-Si-Fe合金一般需要经过300~350℃的时效处理来进一步提升电导率。然而,目前关于高导热合金的时效析出组织演变及时效析出动力学尚不清晰^[11]。此外,Fe、Si元素之间复杂的交互作用使得高导热压铸材料的开发往往基于试错试验,降低了研发效率,提高了研发成本。近年来材料科学领域已经开始广泛使用相图计算软件诸如Thermo-Calc、FactSage、PANDAT以及JMATPro等指导铝合金的设计,克服了单纯依靠试验探索的局限性与单一性,提高了产品研发的效率,节约了资源和能源^[12-13]。

本研究通过PANDAT热力学计算软件计算Al-Si-Fe体系的相组成、相体积分数、凝固温度区间以及Fe、Si元素的固溶度变化,揭示Fe、Si元素间的交互作用机制。利用计算得到的合金成分进行压铸产品试制,对合金的铸态组织、时效组织以及强化、导电机理进行研究及理论分析,以期为高导热材料的设计提供参考。

1 成分设计及试验方法

热力学计算采用PANDAT软件,所使用的数据库为PANAL2016,其中对Al-Si-Fe三元系进行了热力学的全描述。拟通过点计算的方法计算初生 α -Al相中Fe和Si元素的固溶度。利用线计算得到室温下铸态合

金的组织、相组成及相摩尔分数;利用截面计算得到不同Fe含量对特定Si含量(7.5%)的Al-7.5Si-xFe伪二元相图,以期明晰Fe含量变化所引起的微观组织的变化。最终利用得到的热力学计算结果,给出试验研究的合金成分。图1为热力学计算指导高导热压铸铝合金设计的总体技术路线。

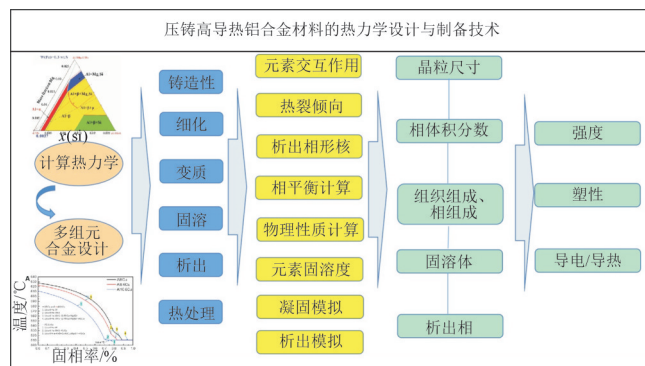


图1 热力学计算指导高导热压铸铝合金设计技术路线
Fig.1 Design route of high thermal conductivity die-casting aluminum alloys through thermodynamic calculation

在理论计算的基础上,通过压铸得到铸件以及随铸拉伸试棒,其尺寸示意图见图2。拉伸力学性能测试采用GB/T228.1-2010中规定的金属材料室温测试方法,恒定拉伸速率为2 mm/min。压铸试样的时效热处理温度为320℃,处理时间分别为1、2 h。金相试样的制备流程如下:依次使用400、600、800、1000、1500和2000号砂纸机械研磨后,使用1 μm的金刚石喷雾抛光剂抛光。使用凯勒试剂(体积分数为95%的H₂O+2.5%的HNO₃+1.5%的HCl+1%的HF)腐蚀8~15 s,在Axio Scope.A1金相显微镜(OM)以及S-4800扫描电镜(SEM)下观察合金的显微组织。物相分析使用D8-Focus X射线衍射仪(XRD)进行分析,加速电压为45 kV,电流为200 mA,功率为9 kW,扫描步长为10℃/min,扫描角度范围为20°~90°。TEM观察采用JEM-2100F电镜,试样制备流程如下:首先利用线切割机切取0.5 mm的金属薄片,通过砂纸打磨将厚度减薄至20~40 μm,利用离子减薄仪减薄至穿孔以供TEM观察。

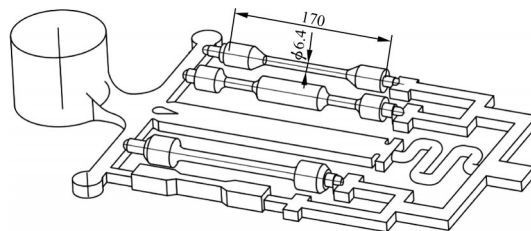


图2 随铸试棒的尺寸示意图
Fig.2 Dimension diagram of casting test bar

2 试验结果及讨论

2.1 热力学计算

通过设计几组不同Fe含量的Al-7.5Si- x Fe合金(设计成分见表1),计算得到了Fe含量变化对合金的凝固行为、组织、相组成、相摩尔分数以及初生 α -Al中Fe、Si元素固溶度的影响,计算结果见图3。从图3a可以看出,随着Fe含量改变,合金相图相区分布、凝固路径也发生了相应变化。以Al-7.5Si-0.6Fe三元合金为例,合金的凝固路径见图3b。当合金液体冷却时,首先析出枝晶状的初生 α -Al($T_1 \sim T_2$ 温度区间),紧接着析出 β -AlFeSi相($T_2 \sim T_3$ 温度区间),最后当剩余液体的成分达到共晶点温度时(T_3 温度区间),发生 $L \rightarrow \text{Si} + \alpha\text{-Al}$ 的共晶反应,直至合金液体全部凝固。 C_1 合金的组织组成为枝晶状的初生 α -Al、 β -AlFeSi相以及 α -Al/Si共晶。 $C_2 \sim C_5$ 合金的相组成与 C_1 合金相同,但相的比例存在一定差异。利用PANDAT的线计算功能可以得到各个组成相的摩尔分数。图3c是 C_1 合金中各相的摩尔分数随温度的变化曲线。由图3d和图3e可以看出,随着Fe含量(质量分数,下同)从0.6%增大到1.0%,共晶Si的摩尔分数从6.86%降低到6.60%, β -AlFeSi的分数则从1.02%增加到了3.02%。枝晶状的初生 α -Al的摩尔分数从25.5%降低到5.3%。利用点计算功能,可以得到合金初生 α -Al相中的Fe、Si元素固溶度,见图3f。可以看出,Fe和Si的固溶度在Fe含量处于0.7%~0.8%区间时,Fe和Si元素在初生 α -Al中的固溶度明显下降。

表1 热力学计算的几种合金成分

Tab.1 Compositions of alloys by thermodynamic calculation %

计算成分	w_B		
	Fe	Si	Al
C_1	0.6	7.5	余量
C_2	0.7	7.5	余量
C_3	0.8	7.5	余量
C_4	0.9	7.5	余量
C_5	1.0	7.5	余量

由此可见,增大Fe含量将会加剧Fe、Si之间的反应,使得 β -AlFeSi相的含量升高,共晶Si的含量降低。同时,增大Fe含量对合金的凝固行为影响更为剧烈,初生 α -Al的比例呈现出迅速减小,尤其是Fe含量达到0.8%。而初生 α -Al的减小将使得合金组织的不连续性增大,电子散射几率增大,不利于导电、导热性能的提升。综合考虑材料的强度、塑性以及电导率,结合热力学计算的结果,选定Al-7.5Si-0.8Fe作为研究对象,利用压铸制备试棒,进一步研究合金的组织与性能的关系。

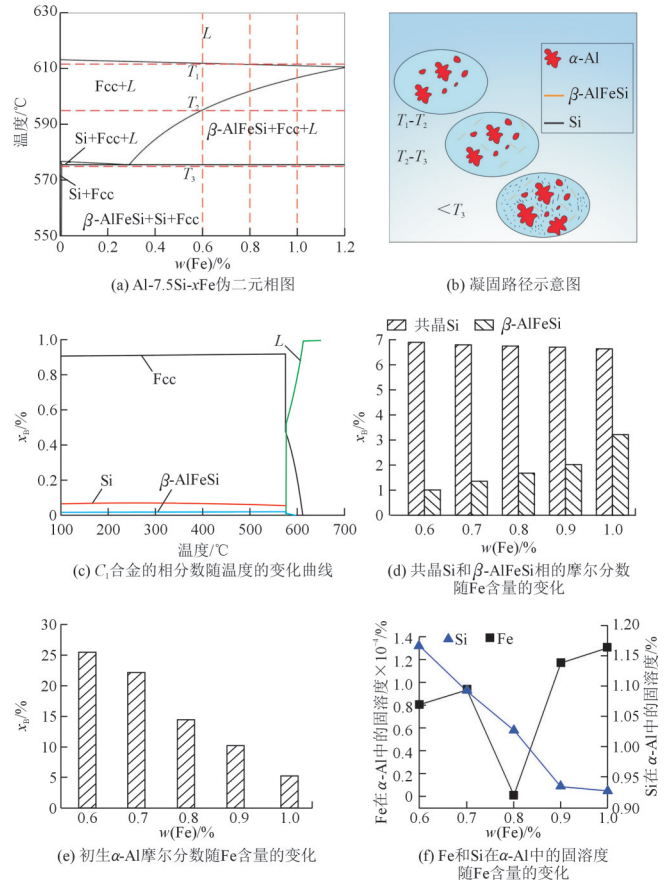


图3 热力学计算结果

Fig.3 Thermodynamic calculation results

2.2 微观组织与性能

2.2.1 微观组织

表2为Al-7.5Si- x Fe压铸合金的化学成分,其中Cr、Mn、Ti、V等杂质元素的含量均低于0.01%,未标出。为了使共晶Si发生变质,材料中加入了0.04%的Sr作为变质剂。图4为压铸合金的微观组织及元素面分布图。从图4a和图4b可以看出,压铸态微观组织由枝晶状的初生 α -Al、针状富Fe相以及枝晶间Al-Si共晶体组成。从图4b~图4f可以看出,针状富Fe相主要含有Fe和Si元素,结合热力学计算结果可以判定此针状富Fe相为 β -AlFeSi相。Sr元素主要分布在共晶中,这是由于Sr对共晶Si具有变质作用,容易富集在共晶Si的固液界面前沿以及Si孪晶的凹槽处。XRD分析进一步表明(见图5),铸态合金的组织由 α -Al、共晶Si以

表2 热力学优化后 T_1 合金设计成分与实际成分

Tab.2 Designed and actual composition of T_1 alloy after thermodynamic optimization %

成分	w_B			
	Fe	Si	Sr	Al
设计	0.80	7.5	0.04	余量
实测	0.78	7.8	0.03	余量

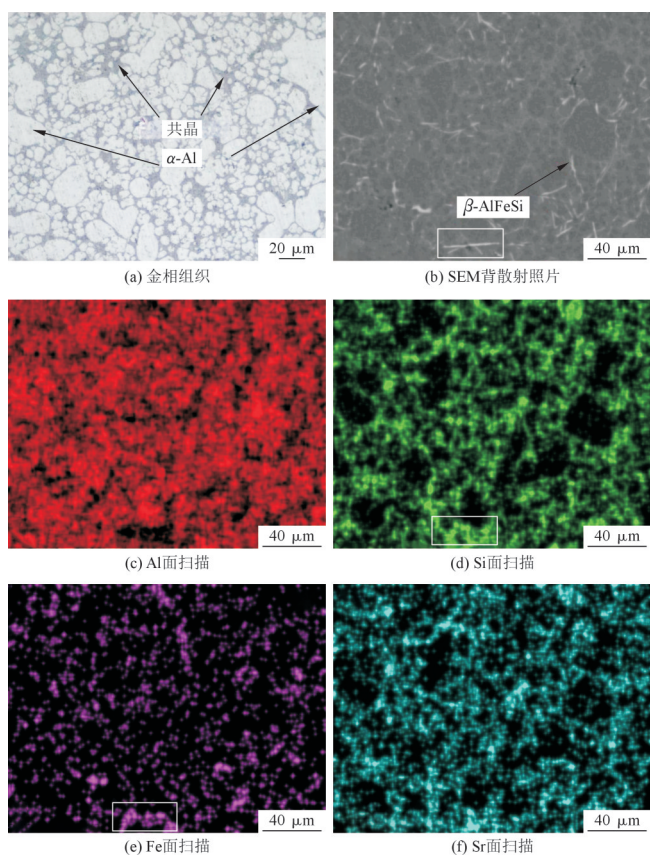


图4 压铸态合金微观组织及元素面分布图

Fig.4 Microstructure and element surface distribution of as-cast alloys

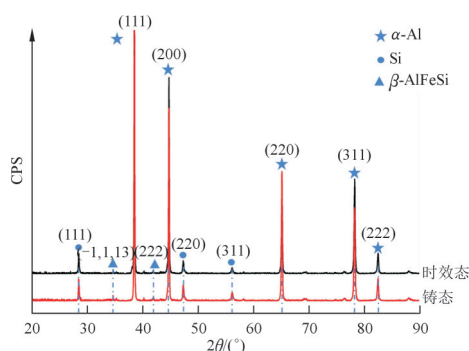


图5 铸态和时效处理态合金试样的XRD图谱

Fig.5 XRD patterns of as-cast and as-aged alloy specimens

及 β -AlFeSi组成。其中 β -AlFeSi的PDF卡片号为JCPDS20-0032,典型的化学组成为 Al_5FeSi 。

图6为经过深腐蚀处理的SEM二次电子形貌照片。可以看出,共晶Si呈现出树突状的变质形貌,共晶将铝基体分割成孤岛状。铸态下铝基体中未发现明显的析出相。从图6c可以看出,相比铸态,部分共晶网链出现局部断网,孤岛状的初生 α -Al变得逐渐连续。同时,在初生 α -Al中析出了颗粒状以及短棒状的析出相,见图6d。为进一步探明析出相的类型,使用EDS元素面扫描分析了析出相的溶质元素分布,见图7。可以看出,析出相主要存在两种类型,一种是富含Si的,一种

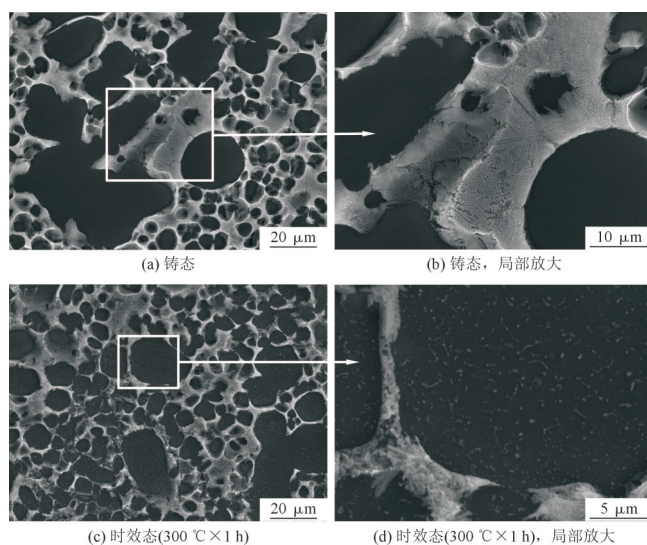


图6 压铸态与时效态合金试样的SEM组织

Fig.6 SEM images of as-cast and as-aged alloy specimens

是富含Fe、Mn、Si的。析出相的尺寸在几十到几百纳米之间,呈现出弥散分布特点。结合XRD图谱(见图5),时效后并未出现多余的衍射峰,组织组成仍然是 α -Al、Si以及 β -AlFeSi相,说明时效后没有新相产生。

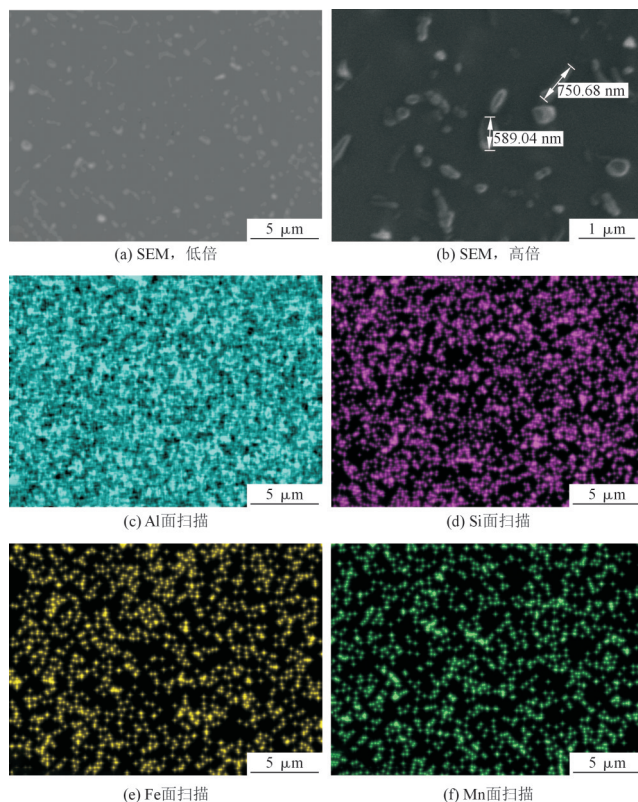


图7 析出相的EDS元素面分布图

Fig.7 EDS mapping of precipitated phase

图8为经过 $300\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 时效后的TEM微观组织及相应的元素面分布图。由图8a可以看出,铝基体中存在亚晶界,沿着亚晶界以及晶内析出了尺寸为几百纳米的颗粒状析出相。元素分布图表明,在亚晶界处

析出相存在两种类型,一种是富含 Si 的相,一种同时富含 Fe 和 Si 的相。在晶内只存在一种富含 Si 的析出相。EDS 定量分析表明,晶内富 Si 相成分为(摩尔分数) 45.5% 的 Al 和 55.5% 的 Si;晶界处 AlFeSi 相成分为 66.48% 的 Al、14.86% 的 Si、18.51% 的 Fe 和 0.14% 的 Mn。以上结果表明,在时效过程中,固溶 Si 元素以 Al-Si 共生体的形式析出,而由于 Fe 元素在铝中扩散较 Si 慢,只能依靠亚晶界等快速扩散通道发生元素结合并析出复合型铁相。

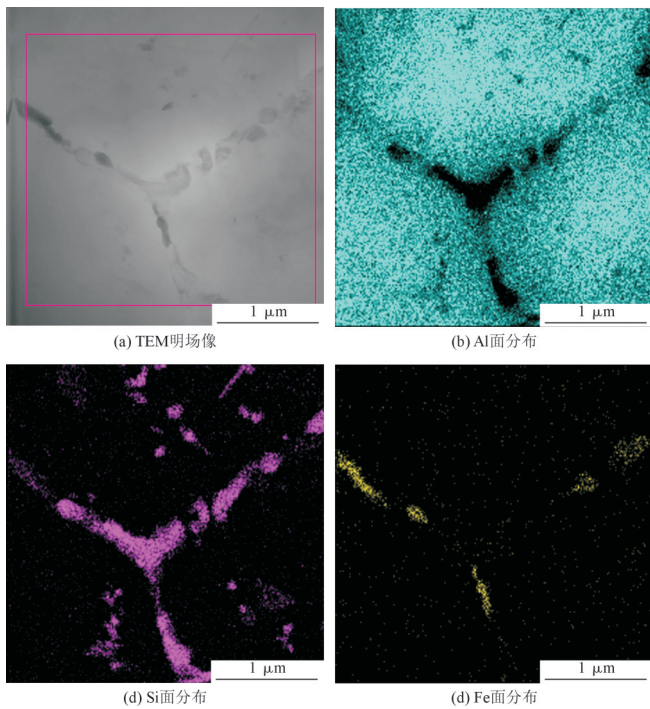


图 8 300 °C×1 h 时效合金试样的 TEM 组织
Fig.8 TEM images of alloy aged at 300 °C for 1 h

图 9 为通过热力学计算得到的 Fe 和 Si 元素在 α -Al 中的平衡固溶度随时效温度的变化。可以看出,当时效温度高于 250 °C 时,Fe 和 Si 元素的固溶度呈现出迅速增大的趋势,尤其是在 300~350 °C 时效温度区间。压铸是快速凝固的非平衡凝固过程,因此 Fe、Si 元素的固溶度通常会远远高于平衡态。通过时效处理可以为析出相的形核提供驱动力,驱使过饱和固溶体脱

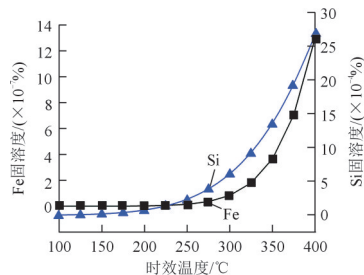


图 9 计算得到的 Fe、Si 元素的平衡固溶度与温度的关系
Fig.9 Relationship between calculated equilibrium solid solubility of Fe and Si elements and temperature

溶形成析出相。然而,在 300~350 °C 时效温度区间,固溶度的增大趋势是明显的。这说明时效过程中除了有 Fe、Si 元素的脱溶,还可能存在着 Fe、Si 的回溶现象。

2.2.2 力学性能与导电性能

图 10 为铸态与热处理态合金的力学性能。可以看出,铸态下合金的抗拉强度、屈服强度以及伸长率分别为 245 MPa、114 MPa 和 5.97%。经过 300 °C×1 h 时效热处理后,材料的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 198.8 MPa、96.6 MPa 和 6.96%。相比压铸态,抗拉强度和屈服强度出现了明显下降,伸长率有小幅提升。经过 300 °C×2 h 时效处理后,抗拉强度和屈服强度等力学性能指标基本不发生变化,伸长率下降。图 11 为采用压铸制备的圆盘散热壳体产品。由于壁厚差异会导致冷却速率的差异,从而对微观组织以及电导率也会产生影响,因此测量了不同壁厚处的电导率。可以看出,压铸态的电导率处于 23.5~24.2 MS/m 之间,经过 300 °C×1 h 时效处理后,电导率上升到 25.5~26.5 MS/m。然而,经过 300 °C×2 h 时效处理后,电导率相比时效处理 1 h 态出现了轻微下降。结合力学性能数据可以看出,合理的热处理工艺应该为 300 °C×1 h 时效,延长时效时间不仅不会提高电导率,强度-电导率的匹配也会变差。

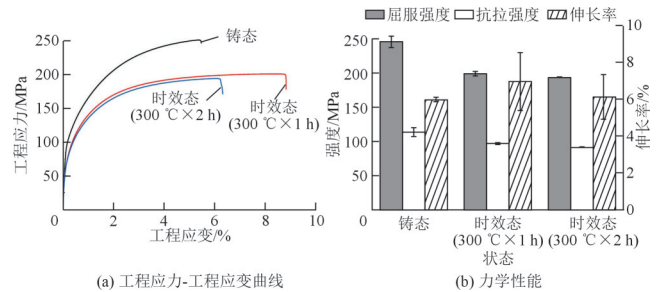


图 10 压铸合金铸态与时效处理态的工程应力-工程应变曲线和力学性能

Fig.10 Engineering stress-strain curves and mechanical properties of as-cast and as-aged alloys

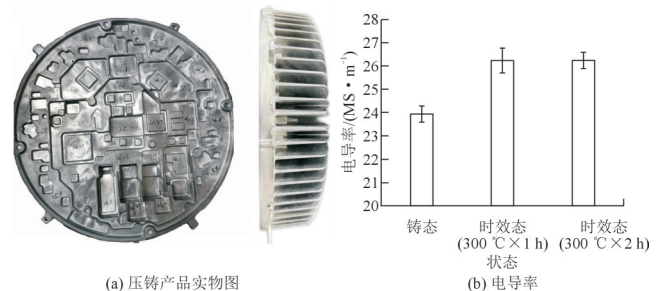


图 11 压铸产品及不同状态的电导率

Fig.11 Die-cast products and conductivity under different conditions

2.3 强化与导电机制

理解时效过程中电导率提升的作用机制可以为后处理工艺的进一步优化提供理论参考。由于热导率与电导率之间存在一定的定量关系,其物理本质(声子散射)也基本相同,因此将通过研究电导率的作用机制间接反映合金的导热机制。对于合金材料而言,影响电导率的因素主要有以下几个方面:溶质原子(空位)、第二相的形态及体积分数、晶界、位错等。

Matthiessen法中各类晶体缺陷对电阻率的贡献为:

$$\rho_D = \rho_{Al} + \rho_{SS} + \rho_{vac} + \rho_p + \rho_d + \rho_{gb}$$

式中, ρ_D 为由微结构引起的电阻率总值; ρ_{Al} 为由铝的晶格引起的本征电阻率; ρ_{SS} 和 ρ_{vac} 分别为由溶质原子以及各种点缺陷空位引起的电阻率; ρ_p 、 ρ_d 以及 ρ_{gb} 分别为由第二相、位错密度以及晶界引起的电阻率。

铸造合金时效处理的过程中基本不会发生晶粒的长大以及位错的变化,因此热处理后电导率提升主要受共晶Si相形貌和尺寸的改变与固溶度变化两个因素影响。对于稀固溶体型铝合金而言,由于析出相的体积分数较小,固溶元素是降低合金电导率的主要因素。然而,对于共晶合金而言,引起电导率减小的主要因素除了固溶度外,共晶相的形态与体积分数也起着重要的作用。前期研究表明,高导电Al-Y共晶合金的电导率受到共晶形貌、分布以及晶粒尺寸的共同影响^[14-15]。在本研究中,300℃×1h时效处理能够显著提升压铸铝合金的电导率,时效组织中沿晶界和晶内分别析出了Al-Fe-Si三元相和Si相,降低了Fe、Si元素在铝基体中的固溶度。此外,在时效温度下,共晶Si网链连续性变差,因此铝基体的连通性也将进一步增强,导致电子散射的平均自由程增大,提升电导率。因此,时效处理态下电导率的提升是弥散析出与共晶球化两方面共同作用的结果。

由力学性能可以看出,材料经时效处理后,强度相比铸态出现了明显的下降。假设在时效处理的过程中仅仅发生析出相的析出,根据Orowan强化理论其抗拉强度理应增大,这显然与试验结果相违背。结合图6可以看出,时效处理后共晶体的网状连续性变差,共晶Si发生了部分球化。共晶Si的球化是毛细现象导致的Si元素向铝基体的回溶,其结果是降低用于强化Si相的体积分数,提高铝基体中元素的固溶度。在力学性能方面,Si元素的回溶将导致Si相体积分数减小,会降低强度,而析出相的析出则会增加强度。由此可见,Si元素的回溶与析出相的析出是一种双向竞争的关系。因此,在本研究中Si相的回溶应该是导致强度降低的主要原因。

3 结 论

(1)通过热力学计算,得到了不同Fe含量对Al-7.5Si合金的组织、相组成以及Fe、Si元素固溶度的影响。发现随着Fe含量增大,初生 α -Al的摩尔分数减小,Fe和Si的固溶度在Fe添加量为0.8%时最小。

(2)压铸Al-7.5Si-0.8Fe合金的抗拉强度为245 MPa,伸长率为5.97%,电导率在23.5~24.2 MS/m之间;300℃×1h时效后抗拉强度为198 MPa,电导率在25.5~26.5 MS/m之间,时效处理可以显著改善合金的电导率。

(3)共晶Si相形貌与Fe、Si固溶度是影响电导率的两个主要微观结构因素,其中时效处理过程中共晶Si的球化增强了铝基体的连续性,增大了传导电子的平均自由程,是时效电导率提升的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 王慧,李元东,罗晓梅,等.高导热铝合金的开发与研究进展[J].铸造,2019,68(10):1104-1110.
- [2] 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.
- [3] 陈森煜,王火生,傅淑云,等.Si, Fe, Mn, Sr和T2热处理对高导热铝合金组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(6):749-754.
- [4] 刘静,温澄,甘俊旗,等.合金元素对纯铝导电性能的影响机制[J].材料导报,2021,35(24):24101-24106.
- [5] 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.
- [6] 甘俊旗.Al-Si基铸造铝合金组织调控对导热性能的影响机制研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- [7] 刘勇,陈超,张振富,等.不同Mg、Si质量比对压铸铝合金组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2017,37(11):1179-1182.
- [8] 赵立洋,贾伟,张桓,等.耐热导电铝合金耐热性能改善的研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(10):1232-1234.
- [9] 周玉立,张俊超,林师朋,等.Fe含量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,2021,41(4):416-419.
- [10] 张方,于鑫,邹大鹏,等.稀土改性高电导率铝合金研究进展[J].特种铸造及有色合金,2021,41(8):938-943.
- [11] 林枫,陆文兴,吴孟武.热处理对压铸铝合金ZL102力学及导热性能的影响[J].铸造,2022,71(6):683-688.
- [12] 杜勇,李凯,赵丕植,等.研发铝合金的集成计算材料工程[J].航空材料学报,2017,37(1):1-17.
- [13] 赵明铭,郭二军,冯义成,等.基于JMatPro对2324铝合金析出相的热力学模拟计算[J].哈尔滨理工大学学报,2021,26(6):112-117.
- [14] WANG M M, ZHOU Y, LÜ H Y, et al. Mechanical properties and electrical conductivity of cold rolled Al-7.5%Y alloy with heterogeneous lamella structure and stacking faults [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021(9):160-692.
- [15] WANG M M, LÜ H Y, ZHANG C, et al. High strength high electrical conductivity ultrafine-grained Al-Y alloy processed via cold drawing [J]. Materials Science and Engineering, 2020, 772: 138-824.

(编辑:栗万仲)