

导热铸造 Al-Si 合金性能研究进展

杨卫平¹ 杨浩坤² 曹树岭¹

(1. 南昌工学院南昌市金属轻量化成形制造重点实验室, 南昌 330108; 2. 香港生产力促进局智能制造部, 香港 999077)

摘要 电子设备朝着小体积和高功率的要求发展导致设备的体积功率密度呈现爆发性增长, 散热性能成为制约高性能计算设备应用瓶颈之一。电子设备的常见散热方式是依靠设备中的散热器件将热量从发热元件转移到外界, 同时还需要具备一定的强度来保护脆弱的电子芯片和电路, 因此散热器件需要兼具高导热和高强度的特点。Al-Si 合金材料具有一定的导热性能和良好的铸造成形性能, 被广泛应用于制造散热器件的首选材料。但是 Al-Si 合金的导热性仍低于纯铝, 且综合力学性能也弱于结构用铝合金材料。因此, 实现 Al-Si 合金在导热和强度两方面的同步提升是未来的重要研究方向。本研究在综述导热铸造 Al-Si 合金的材料设计、热学和力学性能的研究进展基础上, 分析提升 Al-Si 合金综合性能存在的问题和挑战, 并展望其未来的发展方向。

关键词 铸造 Al-Si 合金; 导热; 力学性能; 材料设计

中图分类号 TG146.21 文献标志码 A DOI:10.15980/j.tzzz.Y20240034

Research Progress in Properties of Thermal Conductive Casting Al-Si Alloys

YANG Weiping¹, YANG Haokun², CAO Shuling¹

(1. Nanchang Key Laboratory of Metal Lightweight Forming Manufacturing, Nanchang Institute of Science and Technology, Nanchang 330108; 2. Smart Manufacturing Division, Hong Kong Productivity Council, Hong Kong 999077)

Abstract: Electronic device has developed towards the characteristics of small volume and high power, resulting in explosive growth in the volume power density of electric device, thus the heat dissipation becomes one of the challenges to cease the application of high performance computers. The common heat dissipation method of electronic devices is to transfer heat to the outside environment relying on heat dissipation component, and a certain strength is required to protect the fragile electronic chips and circuits. Therefore, the characteristics of high thermal conductivity and high strength are necessary for the heat dissipation device. Al-Si alloy exhibits certain thermal conductivity and desirable casting performance, which has been widely preferentially used in the manufacture of heat dissipation devices. However, the thermal conductivity of Al-Si alloy is still lower than that of pure aluminum, and the comprehensive mechanical properties are also weaker than that of Al alloy for structure. Therefore, achieving the simultaneous improvement of thermal conductivity and strength of Al-Si alloy becomes an important research direction in the future. The research progress on material design, thermal and mechanical properties of high thermal conductive casting Al-Si alloy were reviewed, and on this basis, the problems and challenges existing in enhancing comprehensive performance of Al-Si alloy were analyzed. Finally, the future direction was prospected.

Key Words: Casting Al-Si Alloys, Thermal Conductivity, Mechanical Properties, Material Design

随着高性能计算设备的性能提升, 电子芯片及其电子设备的单位体积功率由 20 世纪 70 年代的 0.77 W/cm^2 迅速提升到了现在的 31 W/cm^2 ^[1]。并且电子芯片的工作温度每升高 $2 \text{ }^\circ\text{C}$, 芯片工作可靠性就下降约 10%; 当

芯片工作温度超过 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 芯片的失效率将呈指数级增加^[2]。因此, 电子产品的散热性能成为了制约高性能计算设备性能提升的瓶颈之一^[3]。现有散热方案包括了主动和被动式散热, 其中主动式散热需要有辅助能源

收稿日期: 2024-08-05; 修订日期: 2024-09-06

基金项目: 香港生产力促进局 Commercial Research & Development (CRD) 资助项目 (10010788)

第一作者简介: 杨卫平, 男, 1963 年出生, 教授, E-mail: wp_yang1@126.com

通信作者: 杨浩坤, 男, 1989 年出生, 博士, E-mail: kuna1989@foxmail.com

引用格式: 杨卫平, 杨浩坤, 曹树岭. 导热铸造 Al-Si 合金性能研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(6): 874-880.

YANG W P, YANG H K, CAO S L. Research progress in properties of thermal conductivity casting Al-Si alloys [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 874-880.

参与强制散热,如风扇、液冷水泵、相变制冷压缩机等。这些散热方案需要消耗额外能源,因此主动散热的工作稳定性极度依赖辅助能源的支撑^[4]。被动散热则依靠导热构件将热量从发热单元转移到设备外壳,通过热辐射实现电子设备的降温,具有高可靠性、低成本和长寿命等优点。为进一步提升被动散热的传递效率,被动散热构件常采用高导热系数的金属材料,如 Cu、Mg、Al 及其合金^[5]。其中,Al 及其合金具有较高的导热系数[工业纯铝为 238 W/(m·K)],低密度(2.7 g/cm³),高比强度等特点^[6]。而且,铝在地壳中的含量远高于 Ag、Cu 和 Au,具有更低的价格优势^[7]。因此,铝及铝合金适合于制造对导热要求较高的散热器件。

工业纯铝虽然具有优异的导热性能,但是抗拉强度通常不高于 100 MPa^[8]。通常采用的合金化手段可提升抗拉强度到 250 MPa 以上,但又面临无法采用铸造方法进行产品的大批量生产^[9]。因此,常见铝制散热器件主要以 Al-Si 合金作为原材料,并采用铸造成形方法进行散热产品的制备以实现大批量生产目的^[10-11]。关于 Al-Si 合金,Si 含量一般在 5%~23% (质量分数,下同)之间,而在室温环境下,Si 在 Al-Si 合金中的溶解度约为 0.05%,这导致 Si 多以析出相形式存在于 Al-Si 合金中。由于析出 Si 相的表面能较低,易以解理断裂方式在铸造冷却过程中或者在受到外力作用下,加速 Al-Si 合金中的微裂纹萌生和扩展,最终导致 Al-Si 合金的强度和韧性显著降低^[12]。此外,Al-Si 合金的组织内部存在的固溶元素和析出相会降低电子的平均自由程,进而恶化铝合金的导热能力。因此,Al-Si 合金的元素成分设计,析出相的尺寸、形状、分布和界面的调控将会是铸造 Al-Si 合金材料和制备工艺优化的有效手段^[13]。本研究基于 Al-Si 合金无法同时满足力学与热学性能的要求现状下,从材料制备和热处理工艺设计角度出发,探讨材料热学和力学性能的优化方向,最后分析未来 Al-Si 合金开发的挑战和发展方向,为高导热铸造 Al-Si 合金的应用提供参考。

1 材料设计与制备

图 1 为 Al-Si 相图。可以看出,在 Si 含量低于 10% 时,Al-Si 合金基体组织以初生 α -Al 相和共晶 Si 相为主,被称为亚共晶 Al-Si 合金^[14]。当 Si 含量超过 14% 时,基体组织的析出相则以初生 Si 相和共晶 Si 相为主,被称为过共晶 Al-Si 合金^[15],而对于 Si 含量在 10%~14% 之间则为近共晶 Al-Si 合金。对于这 3 类合金,亚共晶 Al-Si 合金具有相对密度更低、比强度高、耐腐蚀和易回收的特点,有利于满足双碳经济的

发展需求;近共晶 Al-Si 合金的铸造流动性能好,适合复杂结构的铸件制造;过共晶 Al-Si 合金则具有热膨胀系数低、耐磨性好等优势,适合使用在高负载的恶劣环境^[16]。

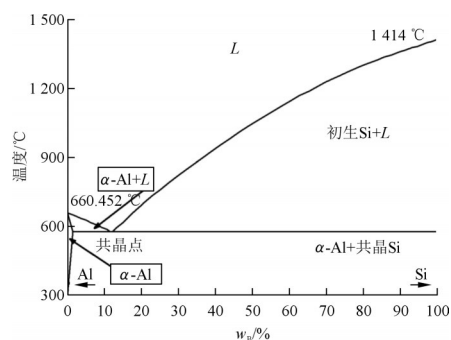


图 1 Al-Si 合金相图^[14]

Fig.1 Phase diagram of Al-Si alloy^[14]

亚共晶 Al-Si 合金中的初生 Al 相以粗大柱状形貌为主。为细化初生 Al 相以提升 Al-Si 合金的强度,常用方法包括快速凝固、变质调控和物理处理等,其中,快速凝固法是在大温度梯度和凝固速率下实现。表 1 为不同冷却速率下亚共晶 Al-Si 合金的二次枝晶臂间距值。可以看出,Si 可以有效降低合金的二次枝晶臂间距。这主要是由于快速冷却过程降低了临界形核半径和形核活化能,进而增加形核速率从而抑制初生 Al 相的生长^[17]。此外,WANG Y X 等^[18]还采用阶梯铸铁模具来调控铸造 Al-Li 合金的冷却速率,同样也发现提升冷却速率可有效细化晶粒和析出相。变质调控法是通过引入中间合金变质剂,在 Al-Si 合金熔体中形成异质形核点,促进形核率,进而细化初生 Al 相。常见方法包括采用 Al-Ti-C (或 Al-Ti-B) 晶粒细化剂,细化剂颗粒含有富 Ti 单层,以及游离的 Ti 溶质,均可促进初生 Al 相实现柱状晶到等轴晶的转变^[19],其机制是 TiB₂ 颗粒作为均质形核,同时通过 TiAl₃ 分解游离出的 Ti 原子抑制了晶粒的长大^[20]。此外,采用稀土元素(如 La、Ce、Sc 和 Er 等)可以降低合金的液相线温度,提供较大的过冷度,促进枝晶溶断,增加晶核数量。同时,稀土元素在初生 Al 相表面富集,进一步遏制晶粒的长大^[21]。通过添加稀土元素 Sr、B、La 的变质处理,一方面可以细化初生 Al 相的方法,减少铸锭中的铸造缺陷并同时促进高热导率的含 Al 金属间化合物的析出。在这两个因素的共同作用下,亚共晶 Al-10Si 和 Al-7.5Si 合金中的针片状共晶 Si 相向近圆形转变,热导率可获得 20 W/(m·K) 的提升^[22-24]。而对于物理处理方法(见图 2),包括对铝 Al-Si 合金熔体进行超声振动^[25]、电磁搅拌^[26]和机械振动^[27]等物理方法对晶体进行破碎,提升形核率,以辅助细化初生 Al 相。对于变质调控法,在不

表1 不同冷却速率下亚共晶 Al-Si 合金的二次枝晶臂间距^[17]

Tab.1 Secondary dendrite arm spacing (SDAS) of hypoeutectic Al-Si alloy under different cooling rates^[17]

冷速/(K·s ⁻¹)	二次枝晶臂间距/μm
0.15	84.1
1.5	43.9
15	24.8
150	13.5
1 500	0.82

改变铸造装备的前提下,即可得到有效的初生 Al 相细化效果。但是该方法会引入额外的合金元素,导致最终铸造 Al-Si 合金的化学成分造成偏差。相反,快速冷却法和物理处理方法可以避免变质调控引入的元素污染问题,但是设备的投入成本不可忽视。因此,采用上述初生 Al 相的细化方法时,需要平衡元素污染和制造成本之间的影响。

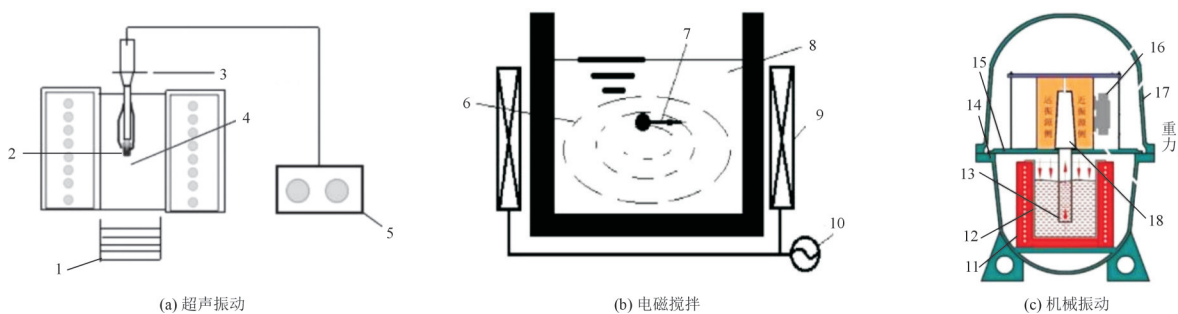


图2 常见物理细化方法^[25-27]

Fig.2 Common refinement methods^[25-27]

1.Ga-In合金 2.热电偶 3.超声发射器 4.装有试样的石英管 5.超声控制柜 6.电磁场 7.电磁力 8.金属熔体 9.电磁搅拌器 10.三相电源
11.电阻炉 12.坩埚 13.液体管道 14.下压力罐 15.中间挡板 16.振动马达 17.上压力罐 18.浇注

对于近共晶 Al-Si 合金的组织结构,以初生 Al 相和共晶 Si 相为主,其中共晶 Si 相的占比较亚共晶 Al-Si 合金要高。为提升近共晶 Al-Si 合金的力学和导热性能,目前主要是通过合金化、细晶强化和变质处理等方法来促进初生 Al 相和共晶 Si 相的细化。其中合金化主要是通过固溶强化,在近共晶 Al-Si 合金中加入 Ti、Cu、Mg 和 Mn 等元素,并通过调整铸造和热处理工艺,在基体中析出 Al₂Cu、Mg₂Si、Al₅Cu₂Mg₄Si₆ 和 Al₇Cu₄Ni 等金属间化合物来进一步增强合金的力学性能^[28]。如在 Al-12Si-0.6Mg 合金中添加 Cu 元素,可逐渐降低初生 Al 相的含量,并促进树枝晶向等轴晶的转变。同时,随着 Cu 含量上升到 4.2%,Al-12Si-0.6Mg-Cu 合金的抗拉强度和表面硬度有 34% 和 32% 的提升,但是热导率降低了 22%^[29]。此外,采用 Sr 和 B 元素对 Al-(10.5~13.5)Si 合金进行变质处理,可以优化共晶 Si 相的形态,并细化初生 Al 相基体,进而获得最高 31.2% 的导热性能提升^[30]。

从上述分析结果来看,不同合金元素的合金化对亚共晶 Al-Si 合金材料的力学和热学性能的影响有不同的结果。其中固溶合金元素对铸造 Al-Si 合金热导率的影响,可以类比对材料电导率的影响。根据威德曼-弗朗兹定律可知,金属的热导率与电导率之间成正比关系^[31]。根据马希森定则,金属材料,尤其是合金材料的电阻受到基体电阻、晶界引起的电阻、位错引起的电阻、固溶原子引起的电阻以及第二相引起的电阻影

响。鉴于铸造 Al-Si 合金基体的晶粒尺寸较大 (>100 μm),且位错密度较低,因此,固溶元素和析出相对 Al-Si 合金热导率的影响更大^[32]。从上述分析可知,若对材料组织配以细化工艺,可获得材料力学和热学性能的同时提升。但是材料成分设计的元素成分窗口若已成形,加以组织细化带来的屈服强度和抗拉强度的提升无法突破 Hall-Petch 定理的限制。因此,高导热高强度铸造 Al-Si 合金的性能突破还需要考虑热处理工艺的影响因素,尤其是如何采用热处理工艺来改善析出相形貌和界面组织。

2 热处理工艺设计

2.1 固溶处理

除了通过合金化和晶粒细化来优化 Al-Si 合金的热学和力学性能外,采用合适的固溶和时效热处理,亦可改变共晶 Si、析出相以及形成固溶体来优化合金的性能。其中,固溶处理是通过提升 Al-Si 合金的铸锭温度,加速析出相中的原子扩散到初生 Al 相中。考虑到扩散原子的半径与 Al 原子的不同,固溶原子在室温下的固溶度也会有所不同,见表 2。可以看出,Zn 元素在初生 Al 相中的固溶度最大,其次为 Mg 和 Cu 元素^[10]。此外,固溶温度也会影响到固溶原子在基体中的溶解度,导致在高温下才能获得较为理想的固溶强化效果^[33],但是过高的固溶热处理温度会导致某些低熔点

的相,甚至是基体发生熔化,形成过烧。此外,固溶热处理也会引起 Al-Si 合金晶格畸变,甚至恶化材料的力学性能^[34]。因此,为进一步提升 Al-Si 合金的热学和力学性能,还需要配合时效热处理。如在 540 °C 下 48 h 以内的固溶热处理工艺,可降低 Al-Si 合金基体中的初生 Si 相颗粒度,并得到 191 W/(m·K) 的热导率^[35-36]。

表 2 合金元素在 Al 基体中的最大固溶度与温度^[10]

Tab.2 Maximum solid solubility and temperature of alloying element in aluminum matrix^[10]

合金元素	固溶温度/°C	最大固溶度/%
Zn	380	82.80
Mg	450	14.90
Cu	550	5.67
Mn	660	1.82
Si	580	1.65
Ti	665	1.00
Zr	660	0.28
Fe	655	0.05

2.2 时效热处理

有效的热处理工艺还应该考虑后续的时效热处理,在基体中产生析出相以进一步提升 Al-Si 合金的热学和力学性能。刘蒙恩等^[37]采用固溶处理+人工时效,即 500 °C 固溶处理 4 h,然后 70 °C 水淬,最后在 175 °C 保温 8 h 的热处理工艺对 Al-20Si-Cu-Mn 合金进行了性能优化。结果表明,通过 1% 的 Cu+0.7% 的 Mn 合金化和复合热处理工艺的优化,铸造 Al-Si 合金的抗拉强度,相比于铸态最高可达 87% 的提升。施豪杰等^[38]对 Al-8Si-Mg-Mn-B 合金进行 520 °C×9 h 固溶和 145 °C×10 h 的热处理后,抗拉强度和伸长率分别得到了 25% 和 26% 的提升。此外,张建新等^[39]采用 560 °C×6 h 固溶+200 °C×6 h 时效热处理工艺,修复了 Al-Si-Mg 合金的组织缺陷,有效提升材料的导热能力不低于 216 W/(m·K)。最近,固溶处理+深冷处理(-196 °C 液氮温度)的热处理工艺被发现能够降低初生 Si 相的等效圆直径并提升单位面积初生 Si 相的数量,进而获得更好的强塑性匹配性能^[40]。杨湘杰等^[2]采用 220 °C×3 h 的短时效热处理工艺对 Al-Si-Ti(Sc) 铸造合金的基体组织结构进行优化,发现短时效热处理可以对初生 Si 相进行球化作用,进而显著提升 Al-Si 合金在室温到 300 °C 范围内的热导率。此外,经过短时效热处理后的亚共晶 Al-Si 合金的拉伸塑性也得到了提升。上述研究显示,时效热处理可以有效球化共晶 Si 析出相,并在尽量不损失导热性能的前提下,对 Al-Si 合金材料的力学性能起到了显著提升作用。由此可见,结合合金化和变质处理,并配合适当的短时效热处理工艺,可实现铸造 Al-Si 合金获得较优的力学和热

学性能。

通过对比固溶热处理前后的铸造 Al-Si 合金力学和热学性能,表明合适温度和时间的热处理可以有效提升初生 Al 相中的固溶元素含量,并且配合后续时效热处理调控析出相强化效果,可实现可观的性能提升。但是对于合金化和热处理对析出相形貌和分布,以及析出相与铸造 Al-Si 合金性能之间的关系,还需要进一步的分析讨论。

3 Al-Si 合金的热学与力学性能

Al-Si 合金可通过铸造工艺实现大批量生产的特点,从而具有低成本优势。Al-Si 合金在高热导率和低热膨胀率两个热学相关指标中获得同步优化越发重要。同时,良好的抗拉强度与塑性是保证铸造产品能够满足后续机械加工要求,并在恶劣环境下保持产品稳定性的关键性能。因此,热学与力学性能的匹配,是目前铸造 Al-Si 合金的材料设计方向。

首先,压铸制备 Al-Si 合金散热器件通常需要考虑压铸成形后快速脱模。因此,在 Al-Si 合金材料中,通常会加入一定量的 Fe 元素,以保证顺利脱模。此外,在对废弃 Al-Si 合金材料的回收过程中,Fe 元素也会被累积在 Al-Si 熔体中,导致 Fe 含量超标。随着 Fe 含量增加, β -Fe 析出相会堵塞金属熔体的补缩通道导致出现疏松缺陷,另一方面, β -Fe 析出相会贯穿初生 Al 相,导致材料整体的导热性能和强度损失严重^[41]。因此,在不显著降低 Al-Si 合金力学性能的前提下,可采用合金化和后续热处理工艺来改善铸造 Al-Si 合金的导热和力学性能。

关于合金化途径,秦裕^[42]系统研究了 Mn、Ce 和 V 元素对 Al-8Si 合金的组织优化效果。其中 Mn 和 V 元素的添加可以分别将长针状 β -Fe 转变为汉字状的 α -Fe(见图 3),Ce 元素的添加则对长针状 β -Fe 具有断裂作用(见图 3d)。上述两种添加元素,均可细化和球化析出相,进而起到更显著的析出相强化效果。其中,当 Mn、Fe 元素摩尔比为 0.8 时,Al-8Si 合金的屈服和抗拉强度分别增加了 33.6% 和 20.2%。当 Ce 含量为 0.4% 时,Al-8Si 合金的屈服强度和抗拉强度均提升了 6.6%。但值得注意的是,虽然 Ce 元素的合金化效果对强度提升有限,但是含 Ce 的 Al-Si 合金材料具有更佳的伸长率。类似的,V 元素的添加,尤其是当 V 含量为 0.6% 时,Al-8Si 合金的伸长率增幅可达 73.1%。但是,Mn 和 V 元素对 Al-8Si 合金的导热性能优化效果有限,尤其是当 Mn、Fe 摩尔比为 1.2,或者 V 含量大于 0.4% 时,材料的热导率降幅接近 30%。这是因为过量的 Mn

和V会导致元素偏析现象,进而引起 β -Fe相的尺寸增加,对电子的散射作用增加。由于Al-Si合金的热导率 κ_e 可以按照 $\kappa_e = c_e v_e \lambda_e$ 计算得出^[43],其中, c_e 为电子对导热性的贡献系数; v_e 为电子沿着导热方向的平均移动速

度; λ_e 为电子的平均自由程。由此可见, β -Fe相尺寸的增加,导致电子平均移动速度和平均自由程均降低,进而导热系数降低和性能恶化^[44]。因此,合理选择合金化元素和成分是调控铸造Al-Si合金的关键技术之一。

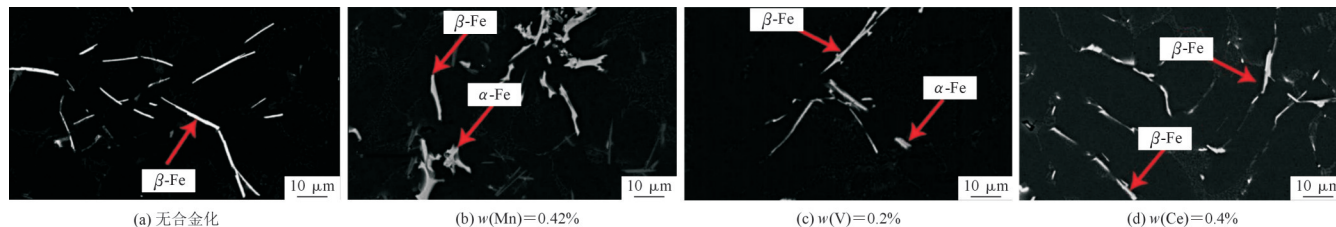


图3 Mn, V和Ce合金化对Al-8Si-0.1Cu-0.6Mg-0.7Fe合金中Fe相的影响^[42]

Fig.3 Effects of Mn, V and Ce alloying on Fe phase in Al-8Si-0.1Cu-0.6Mg-0.7Fe alloy^[42]

但是,Ce引起的热导率减小不明显,仅在0.4%时达到最高值(降幅为5.1%)。为缓解Mn和Ce元素对导热性能的恶化趋势,可以采用Mn、Ce复合添加方法,即当Mn和Ce含量分别为0.56%和0.40%时,Al-8Si合金的热导率可维持在146.9 W/(m·K)左右^[42]。此外,郭劲^[45]系统研究了Sb和Sr元素合金化对Al-8Si合金组织演化和力学/热学性能影响,见图4。通过图4来

看,Sr将共晶Si相转变为纤维状,而Sb则表现出转变为细片状特征。随着共晶Si相的尺寸细化,Al-8Si合金的热导率提升到166.8 W/(m·K),抗拉强度和伸长率也分别提升到218 MPa和6.45%,相比于Al-8Si合金,其提升比例分别为13.5%、7.8%和35.9%。由此可见,Sr和Sb元素对提升铸造Al-Si合金的效果与Mn、V和Ce元素相似。

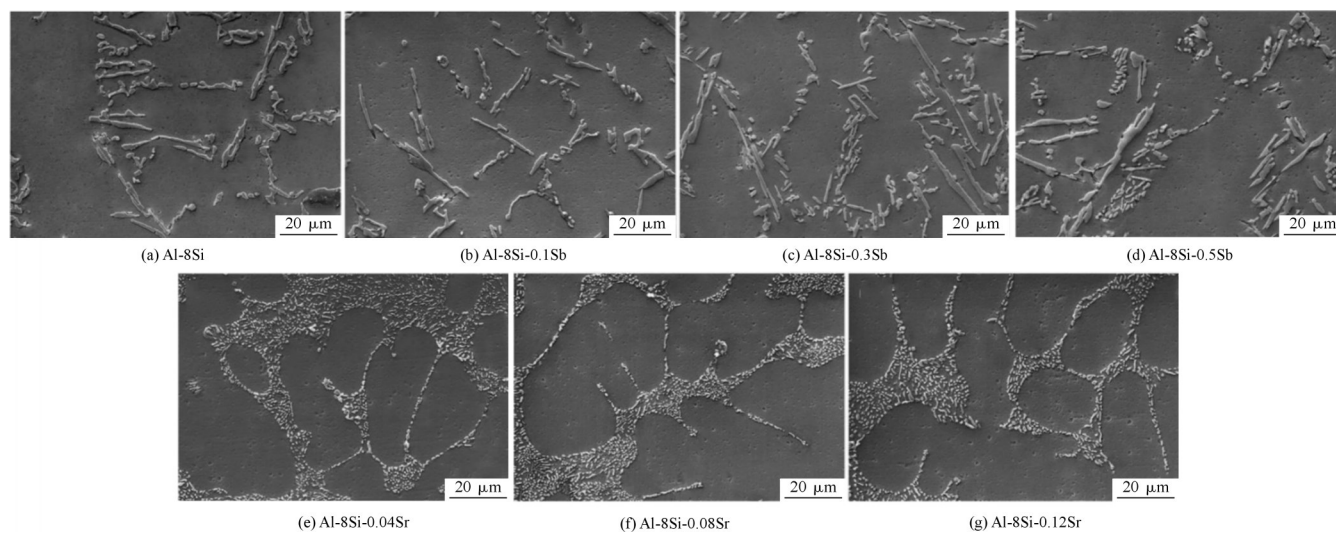


图4 不同含量Sr或Sb合金化前后Al-8Si合金的显微组织^[45]

Fig.4 Microstructure of Al-8Si alloy before and after Sr or Sb alloying^[45]

虽然合金化对提升铸造Al-Si合金的力学性能显著,但是合金化对材料的导热性能则普遍表现出负面影响,如Sr和B元素同时存在于Al-Si合金熔体中,会引起共晶Si相的再次粗大化。为此,许多研究者提出了采取优化Sr、B元素含量比例,提升Al-Si合金熔体冷却速度,和添加第三组元素等方法^[46-49]。在上述优化方案中,添加第3组元素由于其操作方便的优势,得到广泛关注。李星睿^[24]研究了La元素作为第3组元素添加到Al-10Si-Sr-B合金中,材料的变质成分区间增大3倍,并在Sr含量高于0.015%时,Sr、B的临界比值(质量比)由1.5降至0.4,由此促进了共晶

Si相中形成高密度孪晶。最终,Al-10Si-Sr-B合金的抗拉强度和伸长率提升了16.8%和163.2%,热导率也有13.5%的提高。谷立东等^[50]通过对Al-8Si-0.15La的组织结构进行扫描电镜观察,结果见图5。当加入0.15%的La元素后,共晶Si析出相形貌从大片层状或棒状,转变为针状或短片状,促进析出相与基体间的协调变形能力更好。因此,含有适当La的Al-8Si合金表现出显著的塑性与电导率的同步提升。

合金化,尤其是多种微量元素的复合化,可以有效抑制析出相的粗化,并显著降低析出相的长/短径比

值,提升了初生 Al 相的基体连续性。因此,合金化与复合化,在优化合金热导率和伸长率方面取得了显著的提升,是铸造 Al-Si 合金力学性能突破 Hall-Petch 理论的关键方法。但是,微量合金元素的复合化设计通常超过了 2 种元素,导致材料性能与合金元素之间的关系

难以定量描述,进而使得材料设计越发复杂。因此,后续的铸造 Al-Si 合金的材料设计工作可以引入神经网络预测模型等方法对 Al-Si 合金凝固、再结晶、析出相调控等方面进行辅助设计,以实现材料设计中析出相的精细化调控^[7,51]。

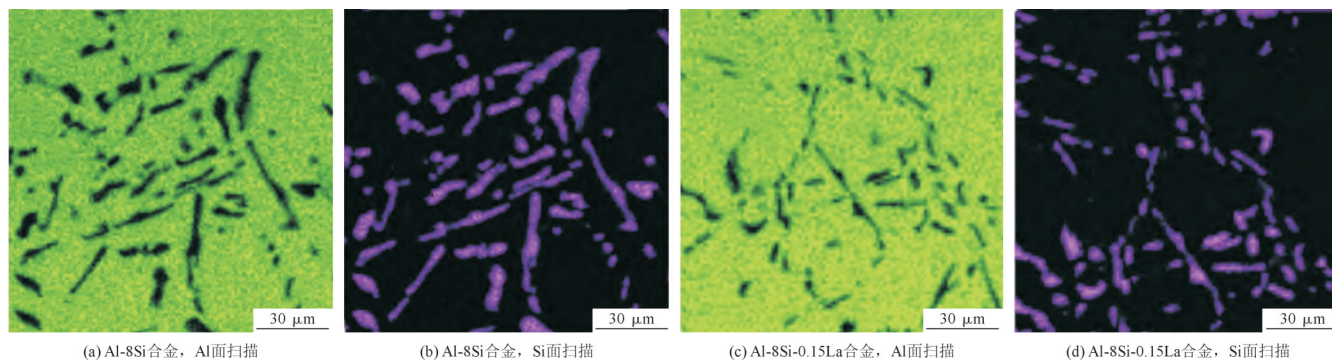


图 5 Al-8Si 和 Al-8Si-0.15La 合金的能谱分析观察结果^[50]

Fig.5 EDS results of Al-8Si and Al-8Si-0.15La alloy^[50]

4 挑战与展望

随着电子产品持续向微型化发展,单位体积内的热量堆积问题日益凸显。因此,针对散热应用的铸造 Al-Si 合金的设计和制备将会聚焦于:①析出相球化调控,在铸造过程中,通过合金化与热处理工艺相结合的方法,实现共晶 Si 相的球化;②更复杂的结构,提升铸造 Al-Si 合金的铸造流动性,结合铸造模拟软件优化模具结构设计,制造出具有更大的比表面积的产品,以提升散热效率;③散热器结构设计的复合化,将散热与强度功能融入散热器器的设计与制造,减少产品的零配件数量,以降低散热器器的制造和组装成本;④绿色制造,Al 合金的熔炼和铸造成形过程都是高耗能环节,且每次生产出的原材料或者产品的化学成分和微观组织都极为单一。但是随着小批量多品种的市场需求越发明显,现有的大批量制备方法已无法满足市场所需。因此,多通量制备方法,如一模多件的压铸模具设计方法,并配合灵活的小容积坩埚熔炼 Al-Si 合金,将有希望实现生产 Al-Si 合金制备的小批量、多品种散热器器的需求。

参 考 文 献

- [1] 杨浩坤,黎伟华. 三种汽车用轻量化材料的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(3): 471-484.
- [2] 杨湘杰,郭洪民,康跃华,等. Sc、Ti 及短时效热处理对 Al-Si 合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(5): 577-582.
- [3] 毛文龙,杨虹,杨莉,等. Si 含量对 Al-Si-Mg 合金铸造组织与性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2016, 10(4): 258-263.
- [4] 陈小村. 压铸用高强高导 Al-Si-Mg 合金的组织及性能[D]. 江苏苏州:苏州大学,2021.
- [5] 袁轩. 高导热 AlSiNiFe 压铸铝合金制备及其组织性能研究[D]. 太原:中北大学, 2024.
- [6] 胡惠翔,樊振中,罗婷瑞,等. Al-Si-Mg 系铸造合金应用现状与高强韧制备研究进展[J]. 铸造, 2023, 72(10): 1 227-1 234.
- [7] 甘俊旗,潘梦鹂,王锋,等. 高导热(电)/高强度铸造 Al-Si 合金的开发及研究进展[J]. 金属功能材料, 2022, 29(3): 53-61.
- [8] SHARMA A K, BHANDARI R, AHERWAR A, et al. A study of advancement in application opportunities of aluminum metal matrix composites [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 2 419-2 424.
- [9] 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: 3 971-3 981.
- [10] 董中强,成分优化及热处理对高导热铝硅合金组织性能影响[D]. 长春:吉林大学, 2022.
- [11] 石帅,闫俊,范卫忠,等. Si 含量对挤压铸造 Al-rSi-4.5Cu-0.5Mg 合金组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52(5): 73-76.
- [12] DASH S S, CHEN D. A review on processing-microstructure-property relationships of Al-Si alloys: Recent advances in deformation behavior [J]. Metals, 2023, 3: 609-673.
- [13] 杨坤义,廖光明,胡文杰,等. 热处理对高导热 Al-11Si 合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(10): 1 274-1 278.
- [14] BISWAS P, PATRA S, ROY H, et al. Effect of Mn addition on the mechanical properties of Al-12.6Si alloy: Role of Al₁₅(MnFe)₃Si₂ intermetallic and microstructure modification [J]. Metals and Materials International, 2021, 27(6): 1 713-1 727.
- [15] 张琳,铝硅合金结构及稳定性的理论研究[D]. 太原:西北师范大学, 2023.
- [16] 朱琳,微量纳米晶调控铸造铝合金微观组织及室温和高温力学性能[D]. 长春:吉林大学, 2023.
- [17] TIAN L S, GUO Y C, LI J P, et al. Effects of solidification cooling rate on the microstructure and mechanical properties of a cast Al-Si-Cu-Mg-Ni piston alloy [J]. Materials, 2018, 11(7): 1 230-1 239.

- [18] WANG Y X, WU G H, ZHANG L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of a cast and heat-treated Al-Li-Cu-Mg alloy: Effect of cooling rate during casting [J]. *Materials Science and Engineering*, 2023, A880: 145 366-145 379.
- [19] FAN Z, WANG Y, ZHANG Y, et al. Grain refining mechanism in the Al/Al-Ti-B system [J]. *Acta Materialia*, 2015, 84: 292-304.
- [20] CALLEGARI B, LIMA T N, COELHO R S. The influence of alloying elements on the microstructure and properties of Al-Si-based casting alloys: A review [J]. *Metals*, 2023, 13(7): 1 174-1 210.
- [21] NIU G D, MAO J, WANG J. Effect of Ce addition on fluidity of casting aluminum alloy A356 [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2019, 12: 5 935-5 944.
- [22] GAN J Q, HUANG Y J, WEN C, et al. Effect of Sr modification on microstructure and thermal conductivity of hypoeutectic Al-Si alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(11): 2 879-2 890.
- [23] WEN C, GAN J Q, LI C B, 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*, 2021, 15(1): 194-205.
- [24] 李星睿. La和B对Sr变质亚共晶铸造铝硅合金组织及性能的影响[D]. 上海:上海大学, 2021.
- [25] 董雄博, 郭永春, 夏峰, 等. 超声振动对活塞用近共晶铝硅合金硅相形貌及生长机制的影响[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(5): 68-72.
- [26] 陈志平, 刘政, 陈涛. 电磁搅拌和数值模拟在半固态铝合浆料制备中应用的研究现状[J]. *铸造*, 2017, 38(7): 702-706.
- [27] 廖青春, 芦刚, 周泽远, 等. 机械振动对真空差压铸造ZL114A铝硅共晶组织及力学性能的影响[J]. *材料工程*, 2024, 52(7): 1-12.
- [28] 李文博. 近共晶Al-Si合金的晶粒细化及性能研究[D]. 济南:山东大学, 2022.
- [29] 沈晓东, 翁文凭, 杨蕾, 等. Cu含量对Al-12Si合金组织结构及导热性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(1): 87-90.
- [30] 王剑, 曹东, 许德英. 高导热共晶Al-Si合金的制备及其性能[J]. *特种铸造及有色合金*, 2018, 38(4): 441-445.
- [31] WANG A, SHENG Y F, BAO H. Recent advances in thermal transport theory of metals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2024 (3): 37 201-37 214.
- [32] 戚忠乙, 王博, 江鸿翔, 等. 微量稀土La对Al-7Si-0.6Fe合金组织与性能的影响[J]. *物理学报*, 2024, 73(7): 246-256.
- [33] XIAO L R, YU H L, QIN Y W, et al. Microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu-Mg-Ni-Cr alloys: Effects of time and temperature on two-stage solution treatment and ageing [J]. *Materials*, 2023, 16(7): 2 675-2 691.
- [34] 蹇海根, 姜锋, 黄宏锋, 等. B93合金的时效析出特性研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2009, 29(11): 1 004-1 007.
- [35] 王慧, 罗晓梅, 李元东, 等. 固溶温度对铸造Al-Si合金热导率及力学性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(9): 1 016-1 020.
- [36] 侯慧兵, 刘磊磊, 黄程毅, 等. 高导热铝合金的研究进展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(6): 736-744.
- [37] 刘蒙恩, 张玺, 白莉. 元素Cu、Mn及热处理对Al-20Si合金组织及力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(16): 149-152.
- [38] 施豪杰, 庞亚飞, 杜晓东. T5热处理对Al-Si-Cu-Mg-Mn-B合金组织和性能的影响[J]. *科学技术创新*, 2023(20): 22-26.
- [39] 张建新, 高爱华. 热处理工艺对Al-Mg-Si系合金导热性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2011, 31(10): 911-913.
- [40] 杨扣华, 杭有锋, 杨在国, 等. 铸造铝硅合金的深冷处理与其组织和性能的研究[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(24): 156-160.
- [41] 于明轩, 范超, 张骏, 等. Fe含量对再生铝硅合金组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(14): 108-113.
- [42] 秦榕. 合金元素对含Fe亚共晶铝硅合金组织及性能的影响研究[D]. 长春:吉林大学, 2021.
- [43] WANG D T, NAGAUMI H, WEND W P, et al. Improvement mechanism of thermal conductivity in T6/T7-treated Al-Si-Mg cast alloy: Experimental studies and density functional theory calculations [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 25: 2 201 210-2 201 224.
- [44] NOGITA K, MCDONALD S D, DAHLE A K. Eutectic modification of Al-Si alloys with rare earth metals [J]. *Materials Transactions*, 2004, 45(2): 323-326.
- [45] 郭劲. Sr和B复合处理对亚共晶铝硅合金导热及力学性能的影响[D]. 长春:吉林大学, 2021.
- [46] NOGITA K, MCDONALD S D, DAHLE A K. Effects of boron-strontium interactions on eutectic modification in Al-10Si alloys [J]. *Materials Transactions*, 2003, 44(4): 692-695.
- [47] BIROL Y. Melt treatment of Al-Si foundry alloys with B and Sr additions [J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(11): 6 856-6 865.
- [48] LI J G, ZHANG B Q, WANG L, et al. Combined effect and its mechanism of Al-3Ti-4B and Al-10 Sr master alloy on microstructures of Al-Si-Cu alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, A328(1): 169-176.
- [49] 郑秋菊, 叶中飞, 江鸿翔, 等. 微合金化元素La对亚共晶Al-Si合金凝固组织与力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2021, 57(1): 103-110.
- [50] 谷立东, 王乐耘, 应韬, 等. 稀土La对铸造Al-Si合金组织与性能的影响[J]. *铸造技术*, 2024, 45(5): 475-478.
- [51] 黎小辉, 黎子聪. 人工神经网络预测动态再结晶:进展与关键技术[J]. *中国有色金属学报*, 2024, 34(8): 2 547-2 558.

(编辑:栗万仲)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

2024年起,《特种铸造及有色合金》杂志新版网站正式上线,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载pdf文件,并可体验AI导读功能,网址:www.special-cast.com,欢迎访问!