

# Al-Si-Cu-Mg合金研究现状与展望

赵赞溲 孙 明 裴林清 艾力西尔·吾甫尔 聂梓轩 艾孜海江·阿依甫  
(上海理工大学材料与化学学院, 上海 200093)

**摘 要** 高强度Al-Si-Cu-Mg合金因其优越的力学性能,在航空航天、汽车等领域受到广泛关注。目前,关于Al-Si-Cu-Mg合金的研究已取得了大量进展,但相关综述较为匮乏。总结了Al-Si-Cu-Mg合金的研究现状,主要概括了合金化基础(Si、Cu、Mg、Mn、Sr、RE、Zr)、成形方式(传统铸造、压铸、挤压铸造、变形)及热处理工艺(固溶、时效)等方面的研究进展,汇总了典型Al-Si-Cu-Mg合金的力学性能,并展望了合金的发展趋势。

**关键词** Al-Si-Cu-Mg合金;合金化基础;成形工艺;热处理

中图分类号 TG146.21;TG27

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240441

## Research Status and Prospect of Al-Si-Cu-Mg Alloys

ZHAO Yunhao, SUN Ming, PEI Linqing, WUPUER Ailixier, NIE Zixuan, AYIPU Aizihaijiang

(School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

**Abstract:** High-strength Al-Si-Cu-Mg alloy has attracted widespread attention in aerospace, automotive and other fields due to the superior mechanical properties. At present, abundant progress has been made in the research of Al-Si-Cu-Mg alloys, while related reviews are deficient. The research status of Al-Si-Cu-Mg alloy was reviewed. The research progress on alloying basis (Si, Cu, Mg, Mn, Sr, RE, Zr), forming methods (traditional casting, die casting, squeezing casting, deformation), heat treatment processes (solid solution, aging) were mainly summarized, and the mechanical properties of typical Al-Si-Cu-Mg alloys were reviewed. Finally, development trend of alloy was also prospected.

**Key Words:** Al-Si-Cu-Mg Alloy, Alloying Fundamentals, Forming Process, Heat Treatment

铝合金密度低、比强度高、可塑性好,可以加工成各种类型的零件,是现代工业中应用范围最广泛的有色金属材料之一<sup>[1]</sup>。高性能Al-Si-Cu-Mg合金在Al-Si合金基础上,添加了能够提升合金强度、韧性、耐腐蚀性的Cu和Mg等元素,可形成 $Mg_2Si$ 、 $Al_2Cu$ 和 $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 相等强化相<sup>[2]</sup>,被广泛应用在汽车、航空航天等产业中。

目前,高性能Al-Si-Cu-Mg合金的开发主要集中于合金成分设计、成形工艺优化以及合金性能提升等方面,并取得了一定进展。ZHENG Y等<sup>[3]</sup>通过改变合金内的Cu含量和Cu、Mg质量比,开发出了抗拉强度为378 MPa、屈服强度为306 MPa、塑性为11%的Al-6Si-2Cu-0.5Mg合金。DONG X X等<sup>[4]</sup>开发了一种高强度且高塑性的Al-8.8Si-1.7Cu-0.4Mg压铸铝合金,经 $510\text{ }^{\circ}\text{C}\times 30\text{ min}$ 固溶、 $170\text{ }^{\circ}\text{C}\times 12\text{ h}$ 时效处理后,合金抗拉强度达

到425 MPa、屈服强度达到321 MPa、塑性达到11.3%。张伟等<sup>[5]</sup>通过分级热处理,获得了抗拉强度超过385 MPa、伸长率超过5%的Al-7Si-2.5Cu-0.5Mg合金。

目前,关于Al-Si-Cu-Mg合金的研究已取得了大量进展,但相关综述较匮乏。因此,本研究将从Al-Si-Cu-Mg合金的合金化基础、成形方法和热处理工艺等方面进行综述,旨在为高性能铝合金的发展及应用提供参考。

## 1 Al-Si-Cu-Mg合金的合金化基础

对于Al-Si-Cu-Mg合金,合金化的研究通常涉及改性、晶粒细化和形成新的沉淀强化相3个方面<sup>[6]</sup>。在共晶温度为 $577\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,Si在Al基体中的最大固溶度为1.65% (质量分数,下同)<sup>[7]</sup>。图1为铸态和T4态Al-6.23Si-3.77Cu-0.06Mg合金中共晶Si相形貌。可以看

收稿日期:2024-10-29;修订日期:2024-12-13

基金项目:2024年上海市级大学生创新创业训练计划资助项目(SH2024174)

第一作者简介:赵赞溲,男,2000年出生,硕士研究生,E-mail:18736655109@163.com

通信作者:孙明,男,1982年出生,副教授,E-mail:ssm@usst.edu.cn

引用格式:赵赞溲,孙明,裴林清,等. Al-Si-Cu-Mg合金研究现状与展望[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(9):1 327-1 334.

ZHAO Y H, SUN M, PEI L Q, et al. Research status and prospect of Al-Si-Cu-Mg alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45 (9):1 327-1 334.

出, Si在合金中通常呈板条状或长针状<sup>[8-10]</sup>, 不利于提升合金的力学性能, 见图 1a, 需采用热处理来改善共晶 Si 的形貌, 使共晶 Si 相断裂、球化, 提高合金的力学性能, 见图 1b。此外, 使用 Sr、Na 和 Ba 等变质剂也可改善共晶 Si 形貌<sup>[11]</sup>。

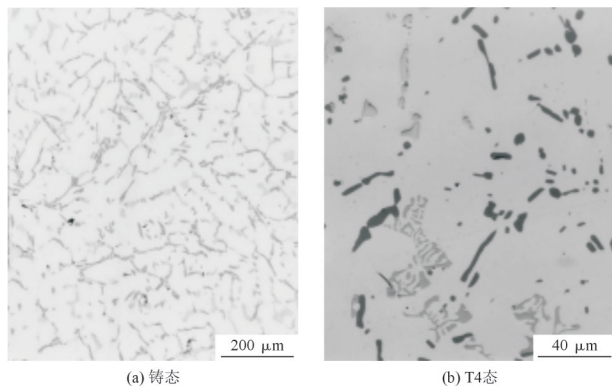


图1 铸态和 T4 态 Al-6.23Si-3.77Cu-0.06Mg 合金中共晶 Si 相形貌<sup>[10]</sup>

Fig.1 Morphologies of eutectic Si phase in as-cast and T4-treated Al-6.23Si-3.77Cu-0.06Mg alloy<sup>[10]</sup>

Cu 是 Al-Si-Cu-Mg 合金的重要合金元素, 在共晶温度为 548 °C 时, Cu 在 Al 基体中的固溶度为 5.6%<sup>[12]</sup>, 其主要通过固溶强化和第二相强化来提高合金的力学性能。Cu 可以与 Al 形成块状和片层状的  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相, 均可提高合金力学性能, 两种形态的  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相形貌见图 2<sup>[13]</sup>。其中, 片层状  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相显微硬度 (HV, 280) 远高于块状  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相 (185), 具有更好的强化效果<sup>[14]</sup>。张伟等<sup>[5]</sup>研究了 500 °C × 6 h + 520 °C × 8 h 两步固溶 + 175 °C 时效处理对 Al-7Si-2.5Cu-0.5Mg 合金中  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相析出行为的影响, 发现合金在时效 0~6 h 时析出  $\theta''$  相。时效 6 h 后, 随时效时间延长, 合金析出与基体保持半共格关系的  $\theta'$  相, 随着  $\theta'$  相的长大, 半共格关系被破坏, 合金开始析出  $\theta$  相。一般来说, 随着 Cu 含量增加, Al-Si-Cu-Mg 合金的抗拉强度和屈服强度显著增加, 但伸长率变差<sup>[15]</sup>以及耐腐蚀性降低<sup>[16]</sup>。表 1 为不同 Cu 含量下 Al-8.5Si-0.4Mg 合金的力学性能。

Mg 的添加可以使 Al-Si-Cu-Mg 合金在热处理(固溶+时效)后形成细小弥散的  $\text{Mg}_2\text{Si}$  沉淀相, 提高合金的力学性能<sup>[17]</sup>。一般来说, 在 Al-Si-Cu-Mg 合金中, Mg 的添加量在 3% 以内<sup>[11]</sup>。徐松等<sup>[18]</sup>发现 Al-10Si-2.5Cu- $x$ Mg ( $x=0.5\sim 2, \%$ ) 合金经 530 °C × 8 h 固溶 + 175 °C × 4 h 时效热处理后, 抗拉强度随 Mg 含量增加先增加后降低, 当 Mg 含量为 1.5% 时, 抗拉强度达到最大值 305 MPa。PRATHEESH K 等<sup>[19]</sup>研究 Al-12Si-3Cu- $x$ Mg ( $x=0\sim 2\%$ ) 合金时发现, 经 500 °C × 5 h 固溶 + 180 °C × 9 h 热处理后, 当 Mg 含量为 1% 时合金抗拉强度最高, 约为 300 MPa。Cu 和 Mg 均为 Al-Si-Cu-Mg 合金的重要合金元素, 不同 Cu、Mg 比会影响 Al-Si-Cu-

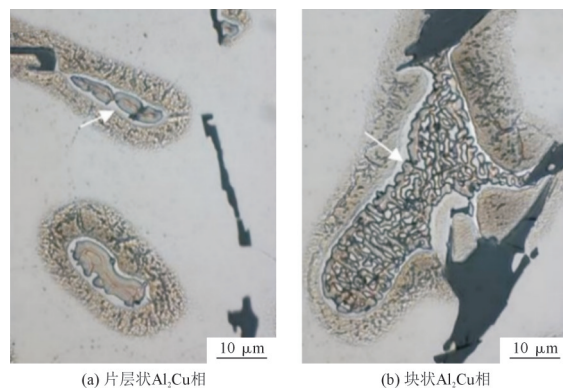


图2 Al-9.4Si-2.4Cu-0.28Mg 合金中不同形态的  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相形貌<sup>[13]</sup>

Fig.2 Morphologies of different forms of  $\text{Al}_2\text{Cu}$  phases in Al-9.4Si-2.4Cu-0.28Mg alloy<sup>[13]</sup>

表1 不同 Cu 含量下 Al-8.5Si-0.4Mg 合金的力学性能<sup>[15]</sup>

Tab.1 Mechanical properties of Al-8.5Si-0.4Mg alloy with different Cu contents<sup>[15]</sup>

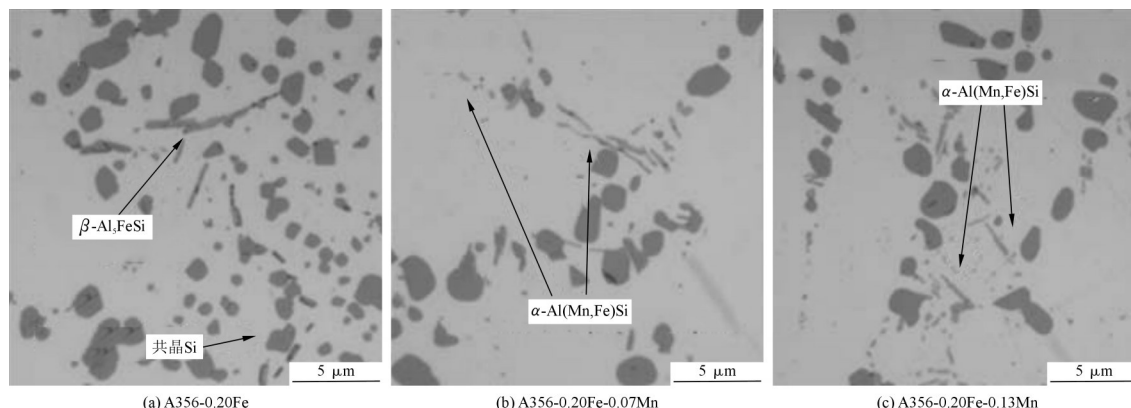
| $w(\text{Cu})/\%$ | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% |
|-------------------|----------|----------|-------|
| 0                 | 264      | 322      | 10.0  |
| 1.0               | 299      | 343      | 8.7   |
| 1.5               | 321      | 394      | 8.6   |
| 2.0               | 351      | 442      | 8.4   |

Mg 合金中  $\theta$ 、 $Q$  和  $\beta$  等 3 个主要强化相的时效析出效果, 从而影响合金的力学性能<sup>[3]</sup>。

Fe 是铝合金中最常见的杂质元素, 合金中的 Fe 不仅极易形成粗糙的、具有针状形态和尖锐边缘的  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$  相, 破坏基体的连续性, 使合金内的裂缝增多, 还会与 Cu 结合形成  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$  等难溶的化合物, 减少合金中的强化相, 减弱合金的时效强化效果<sup>[20]</sup>。

Mn 不仅可以细化铝合金晶粒、加速时效、强化基体, 还能在一定程度上起到改善 Fe 相形貌的作用。KIM Y H 等<sup>[21]</sup>在 A356 合金中添加了不同含量的 Mn, 合金形貌见图 3。结果发现, 未添加 Mn 时,  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$  相呈长针状, 见图 3a; 添加 0.07%~0.13% 的 Mn 后, Mn 将有害的长针状  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$  相改性为形貌更优的颗粒状  $\alpha\text{-Al}(\text{Fe}, \text{Mn})$  相, 可以增加强化相数量, 有效提高合金的力学性能<sup>[20]</sup>, 见图 3b 和图 3c。

Sr 是 Al-Si-Cu-Mg 合金中常见的变质剂, 可细化共晶 Si 相, 改善合金中共晶 Si 相形貌。在加入 Sr 后, 合金中的共晶 Si 相从粗大的针状、片状转变为细小的颗粒状或纤维状, 初生  $\alpha\text{-Al}$  相的粗枝晶细化, 合金力学性能显著提升<sup>[22-25]</sup>。稀土元素 (RE) 作为重要的合金添加剂, 具有高化学活性、低电位等特征, 少量添加即可对 Al-Si-Cu-Mg 合金的微观组织和力学性能造成较大的影响<sup>[26]</sup>。HU Z 等<sup>[27]</sup>在 Al-10Si-3.5Cu 合金中添加了不同含量的 Sm (0~2.5%), 发现其不但细化了合金中的  $\alpha\text{-Al}$  相和共晶 Si 相, 使其不再尖锐粗糙, 还能将富铁

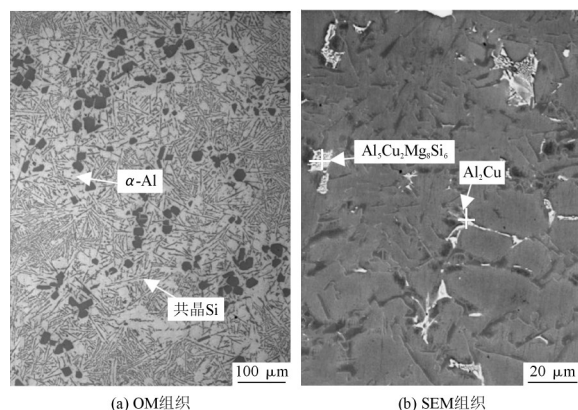
图3 A356-0.20Fe- $x$ Mn合金中 $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$ 与 $\alpha$ - $\text{Al}(\text{Mn}, \text{Fe})\text{Si}$ 相的形态<sup>[21]</sup>Fig.3 Morphologies of  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$  and  $\alpha$ - $\text{Al}(\text{Mn}, \text{Fe})\text{Si}$  particles in A356-0.20Fe- $x$ Mn alloy<sup>[21]</sup>

相的形状从汉字相转变为细长相,并形成 $\text{AlSiSm}$ 和 $\text{AlSiSmCu}$ 两种金属间化合物,提高合金的力学性能。其中,添加了1%的Sm时,合金获得了最佳的力学性能,抗拉强度和伸长率分别达到了220 MPa和3.1%。VOČINA M等<sup>[28]</sup>则在A383合金中添加了0.02%、0.05%的Ce,发现Ce可以细化合金中 $\alpha$ -Al和 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相的尺寸。朱锐祥等<sup>[9]</sup>研究了多种稀土元素对Al-11Si-3Cu-0.2Mg合金组织细化和力学性能的影响,发现细化效果为 $\text{Sm} > \text{Ce} > \text{La}$ 。此外,还有一些微合金元素如Sc、Zr等,可以降低晶界第二相的数量、连续性并细化晶粒,提高合金耐腐蚀性和力学性能。WANG R等<sup>[29]</sup>在Al-9Si-4.3Cu-0.45Mg合金中添加Zr,在细化晶粒的同时提高合金的耐腐蚀性,当Zr含量为0.3%时,合金的力学性能达到最佳,屈服强度为419 MPa、抗拉强度为490 MPa。

## 2 成形工艺对Al-Si-Cu-Mg合金的影响

### 2.1 重力铸造

重力铸造具有成本低廉、工艺简单、对设备要求较低等特点,可用于Al-Si-Cu-Mg合金的生产。图4为重力铸造下Al-18Si-4.5Cu-0.5Mg合金的微观形貌<sup>[30]</sup>。

图4 重力铸造Al-18Si-4.5Cu-0.5Mg合金的微观组织<sup>[30]</sup>Fig.4 Microstructure of Al-18Si-4.5Cu-0.5Mg alloy by gravity casting<sup>[30]</sup>

但重力铸造需要熔体在较高的高度下进行浇注,尺寸精度和冷却速率都较低,且铸造过程对模具的填充不完全,熔体易氧化,铸造出来的Al-Si-Cu-Mg合金往往缺陷较多,力学性能较差,使应用范围受到限制<sup>[31-32]</sup>。

### 2.2 压铸成形

相较于重力铸造,压铸能够提升生产效率、提高材料利用率、减少铸造缺陷,使铸件获得更好的尺寸精度和力学性能。当前有将近70%的铸造铝合金是通过压铸工艺制备<sup>[33]</sup>,其中也包括Al-Si-Cu-Mg合金。可见压铸过程往往通过优化压力、温度等工艺参数制备性能合格的压铸件。图5为压铸Al-8.8Si-1.7Cu-0.4Mg合金的偏光图像和T6态合金中气孔的SEM图。可见压铸Al-8.8Si-1.7Cu-0.4Mg合金中存在两种晶粒尺寸不同的 $\alpha$ -Al相,分别为凝固于压室中的 $\alpha_1$ -Al和凝固于型腔中的 $\alpha_2$ -Al,见图5a。其中,由于型腔冷却速率更高, $\alpha_2$ -Al相的晶粒较为细小<sup>[4]</sup>。然而,压铸件中通常会含有过多的气体,在热处理过程中易发生膨胀而形成气孔缺陷,见图5b,并导致合金出现鼓泡现象,使合金的力学性能降低。为解决该难题,可有效改善合金缺陷的真空压铸工艺受到广泛关注<sup>[34]</sup>。

真空压铸工艺能有效地降低合金的孔隙率,使后续的热处理工艺成为可能<sup>[35]</sup>。通过高真空压铸制备的合金试样缺陷减少,T6热处理后试样表面也不再出现鼓泡现象,合金的力学性能相较于普通压铸件显著提升<sup>[36]</sup>。刘学强<sup>[37]</sup>研究了高真空压铸制备而成的AlSi10MgMn合金,发现合金中的气体与普通压铸相比显著减少,力学性能大幅提高。热处理后,合金的屈服强度达到248.9 MPa,抗拉强度达到351.3 MPa,分别比铸态时提高了30.5%和13%。

使用合适的晶粒细化剂也可以提高压铸Al-Si-Cu-Mg合金的力学性能。当前,铝合金中使用最广泛的晶粒细化剂是Al-Ti-B中间合金,但其存在 $\text{TiB}_2$ 团

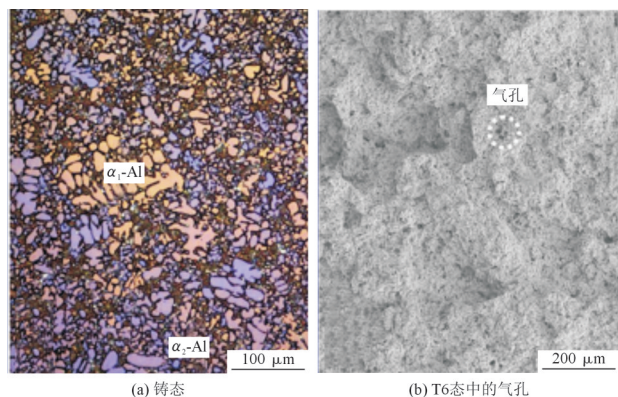


图5 压铸 Al-8.8Si-1.7Cu-0.4Mg 合金的偏光图像和 T6 态合金中气孔的 SEM 图<sup>[4]</sup>

Fig.5 Polarized image of die-cast Al-8.8Si-1.7Cu-0.4Mg alloy and SEM image of gas pores in T6 alloy<sup>[4]</sup>

聚、中毒等问题,无法将其细化效果发挥到最佳<sup>[38]</sup>。因此,开发更优质的晶粒细化剂,是压铸 Al-Si-Cu-Mg 合金的研究重点之一。

### 2.3 挤压铸造

挤压铸造工艺作为结合了铸造和塑性加工优势的先进材料精密成形技术,可以制备出形状更复杂、成形精度更高、组织更均匀、力学性能更好的零件<sup>[39]</sup>。舒櫻等<sup>[40]</sup>借助 AnyCasting 软件对 A354 (Al-9Si-1.8Cu-1.0Mn-0.05Mg)合金挤压铸造过程进行模拟,并结合挤压铸造工艺优化试验,从而消除挤压铸件内部缺陷并提高其力学性能。MALEKI A 等<sup>[41]</sup>发现熔体温度和模具温度在一定程度内的下降能够细化挤压铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金中的共晶 Si 相,改善合金的微观结构。提高挤压压力能够加快合金冷却速率,细化晶粒,并基本消除合金中的缩松和气孔等缺陷,从而提高合金的力学性能。EL-KHAIR A M<sup>[42]</sup>发现当挤压力从 70 MPa 提高到 160 MPa 后,Al-6Si-0.3Mg 合金的孔隙率从 0.71 降低至 0.48,α-Al 晶粒和共晶 Si 颗粒的尺寸从 50 μm 细化至 20 μm,抗拉强度从 198 MPa 提高到了 208 MPa,屈服强度从 136 MPa 提高到了 190 MPa,伸长率从 5.0% 提高至 8.0%。此外,相较于压铸,挤压铸造制备的 Al-Si-Cu-Mg 合金可以直接进行热处理。范卫忠等<sup>[43]</sup>对挤压铸造 Al-8.9Si-3.4Cu-0.2Mg 合金进行 490 °C×4 h 固溶+170 °C×6 h 时效的热处理,发现共晶 Si 相明显球化,合金中析出 θ' 及 β" 两种强化相,合金的屈服强度达到 375 MPa,抗拉强度达到 423 MPa。钟鼓等<sup>[44]</sup>对挤压铸造 Al-11Si-2.5Cu-0.5Mg 合金的进行 (495 °C×2 h+510 °C×2 h) 双级固溶+160 °C×12 h 时效的热处理,使合金抗拉强度达到 435 MPa、屈服强度达到 338 MPa、伸长率达到 7.0%。

然而,挤压铸造依然存在如共晶相偏析、晶粒过大等问题。为此,近年来又开发出了半固态挤压铸造、双重挤压铸造等一系列挤压铸造新工艺。尤其是半固态挤压铸造技术,相较于传统挤压铸造技术,其不仅能够显著细化晶粒(见图 6)<sup>[30,45]</sup>,还能够消除合金中的共晶相偏析和局部偏析,提高压铸件的力学性能<sup>[45]</sup>。

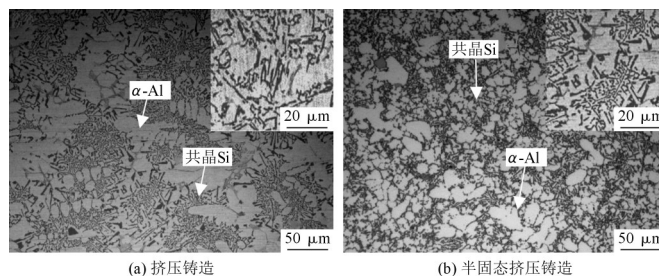


图6 挤压铸造和半固态挤压铸造 Al-17.75Si-4.36Cu-0.47Mg 合金组织形貌<sup>[30]</sup>

Fig.6 Microstructure of Al-17.75Si-4.36Cu-0.47Mg alloy by squeeze casting and semi-solid squeeze casting<sup>[30]</sup>

### 2.4 变形处理

通过挤压、轧制、锻造等变形方式能够制备内部缺陷少、晶粒尺寸细小的高强韧铝合金,成为 Al-Si-Cu-Mg 合金重要的加工手段。轧制工艺作为一种相对成熟的变形加工工艺,可以通过变形过程中的动态再结晶实现晶粒细化。ZHUO X R 等<sup>[46]</sup>通过轧制工艺制备了 Al-6Si-3Cu 合金,见图 7。轧制态合金的抗拉强度为 429.8 MPa、伸长率为 5.8%,相较于铸造合金分别提高了 105% 和 76%,其强化机理为较高的位错密度以及 Si 相的破碎、细化等因素。

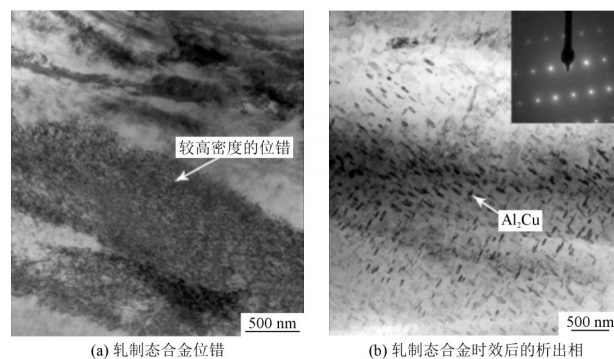


图7 轧制 Al-6Si-3Cu 合金的 TEM 图<sup>[46]</sup>

Fig.7 TEM images of as-rolled Al-6Si-3Cu alloy<sup>[46]</sup>

挤压变形作为一种重要的金属材料塑性加工工艺,是铝合金的重要成形工艺之一。对 Al-Si-Cu-Mg 合金来说,热挤压可以消除合金中的气孔、缩松和缩孔等缺陷,采用合适的挤压工艺可显著提高合金的可成形性,改善合金的力学性能。李荣德等<sup>[47]</sup>研究了热挤压后的 Al-10Si-1.5Cu-0.5Mg 合金,发现合金中共晶 Si

相、 $\text{Al}_2\text{Cu}$  相和  $\text{Mg}_2\text{Si}$  相等均发生了破碎变形,由粗大棒状、针状破碎成球状、近球状,并沿挤压方向分布于合金组织中,这极大地改善了合金的性能,使合金的抗拉强度达到了 296.9 MPa,伸长率达到了 18.04%。林高用等<sup>[48]</sup>发现挤压 Al-11Si-7Cu-1Mg 合金进行时效后析出了大量细小针状  $\theta''$  强化相和细小板条状  $Q'$  相,使合金的抗拉强度提高到了 486.8 MPa。

### 3 热处理对 Al-Si-Cu-Mg 系合金的影响

Al-Si-Cu-Mg 合金是一种典型的热处理强化合金<sup>[49]</sup>,固溶处理可改善合金溶质原子偏析和 Si 相形貌,使合金组织更均匀,影响固溶处理效果的关键因素是固溶温度和固溶时间<sup>[50]</sup>。时效处理可使过饱和固溶体中的溶质原子析出细小弥散的沉淀相,提升合金强度<sup>[51]</sup>。

#### 3.1 固溶处理

固溶处理可改善 Al-Si-Cu-Mg 合金中共晶 Si 颗粒、固溶  $\theta$ - $\text{Al}_2\text{Cu}$ 、 $\beta$ - $\text{Mg}_2\text{Si}$  和  $Q$ - $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$  等第二相形貌,均匀化合金元素,最终形成过饱和固溶体<sup>[52]</sup>。一般来说,固溶温度应比低熔点共晶相的共晶温度低 5~10 °C。因此,为避免含 Cu 相过烧,Al-Si-Cu-Mg 合金的固溶温度应在 495 °C 左右,但较低的固溶温度既不利于共晶 Si 颗粒的球化<sup>[53]</sup>,还会导致薄片状  $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$  相和块状  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相残留<sup>[6]</sup>。为此,Al-Si-Cu-Mg 合金常采用多级固溶。YANG X F 等<sup>[53]</sup>将 Al-7Si-3Cu-0.5Mg 合金先在 495 °C 固溶处理 8 h 充分固溶含 Cu 相并防止过烧,再在 515 °C 固溶处理 4 h 消除残留共晶相并促进共晶 Si 相的快速球化,从而为后续时效处理奠定基础。王云飞等<sup>[54]</sup>对 Al-7.4Si-2Cu-0.4Mg 合金采用了 500 °C×6 h+520 °C×8 h 两步固溶法,再经合适的时效处理,合金抗拉强度可达 343 MPa。此外,合适的固溶处理工艺还有利于改善热稳定相形貌<sup>[55-56]</sup>。

#### 3.2 时效处理

时效处理的目的是析出强化相。通常,Al-Si-Cu-

Mg 合金的时效析出序列为 SSSS (Super-saturated solid solution)→G.P.→ $L+\beta''+QC$ (淬火团簇)+QP→ $\beta'+\theta'\rightarrow\theta'+Q+\beta$ 。近期,FENG Y F 等<sup>[57]</sup>提出了一种新的时效析出序列:SSSS→G.P.I→ $\theta'_p\rightarrow\theta'_{p1}\rightarrow\theta'_{p2}\rightarrow\theta'$ ,见图 8。其主要认为  $\theta'_p$  相是 G.P.I 的生长延伸; $\theta'_{p2}$  相与  $\theta'$  相具有相同的板状形态和四方结构,且  $\theta'_{p2}$  与 Al 基体具有相同的取向关系和晶格结构。因此, $\theta'_{p2}$  相可以在不改变界面结构和取向关系的同时,转变为  $\theta'$  相。

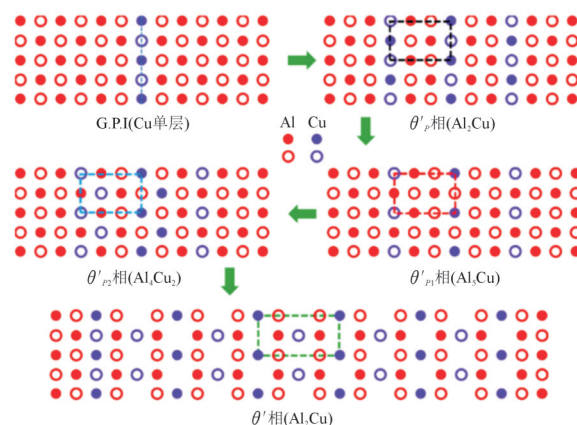


图 8 时效析出序列示意图<sup>[57]</sup>

Fig.8 Schematic diagram of aging precipitation sequence<sup>[57]</sup>

研究表明<sup>[3,58-59]</sup>, $\alpha$ -Al 相、共晶 Si 相、 $\beta$ - $\text{Mg}_2\text{Si}$  相、 $\theta$ - $\text{Al}_2\text{Cu}$  相、 $\pi$ - $\text{Al}_9\text{FeMg}_3\text{Si}_5$  相和  $Q$ - $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$  相等强化相共同决定了 Al-Si-Cu-Mg 合金的微观结构和力学性能,常见的强化相 TEM 形貌见图 9。一般情况下, $\text{Mg}_2\text{Si}$  相往往在低 Cu 含量、低 Cu、Mg 质量比的情况下析出;高 Cu 含量、高 Cu、Mg 质量比则促进  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相和  $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$  相的形成,抑制  $\text{Mg}_2\text{Si}$  相的形成;而当 Cu 含量(0.8%)保持不变,提升 Mg 含量到 0.8% 后,合金中则会形成  $\text{Al}_9\text{FeMg}_3\text{Si}_5$  相,表 2 为 Al-Si-Cu-Mg 合金主要强化相的部分研究结果。XUE W L 等<sup>[2]</sup>探讨了不同强化相对 Al-8Si-0.5Mg、Al-8Si-2Cu、Al-8Si-2Cu-0.5Mg 合金时效态屈服强度的影响,发现强化能力为  $\beta'$  相> $Q'$  相> $\theta'$  相。表 3 和图 10 为典型 Al-Si-Cu-Mg 合金的合金成分及力学性能。

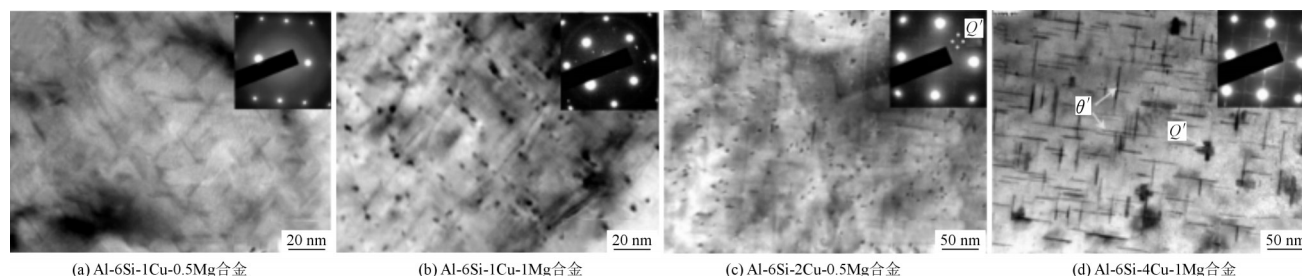


图 9 不同 Cu、Mg 质量比的 Al-6Si-xCu-yMg 系合金的 TEM 图<sup>[3]</sup>

Fig.9 TEM images of Al-6Si-xCu-yMg alloys with different mass ratios of Cu to Mg<sup>[3]</sup>

表 2 Al-Si-Cu-Mg 合金的主要第二相组成<sup>[3,58-59]</sup>

Tab.2 Main second phase composition of Al-Si-Cu-Mg alloy<sup>[3,58-59]</sup>

| 合金成分                    | $w(\text{Cu})/w(\text{Mg})$ | 主要析出相                   |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Al-5.93Si-1.04Cu-0.57Mg | 2                           | $\beta, \theta, Q$      |
| Al-6.07Si-1.06Cu-1.06Mg | 1                           | $\beta, \theta, Q$      |
| Al-5.98Si-2.08Cu-0.52Mg | 4                           | $\theta, Q$             |
| Al-6.02Si-3.98Cu-1.14Mg | 4                           | $\theta, Q$             |
| Al-7Si-0.01Cu-0.47Mg    | 0                           | $\beta$                 |
| Al-7Si-0.50Cu-0.47Mg    | 1                           | $\beta, Q$              |
| Al-7Si-1.04Cu-0.45Mg    | 2                           | $\beta, \theta, Q$      |
| Al-5Si-0.86Cu-0.51Mg    | 1.6                         | $\beta, \theta$         |
| Al-5Si-0.83Cu-0.80Mg    | 1                           | $\beta, \theta, \pi$    |
| Al-5Si-0.81Cu-1.2Mg     | 0.67                        | $\beta, \theta, \pi, Q$ |

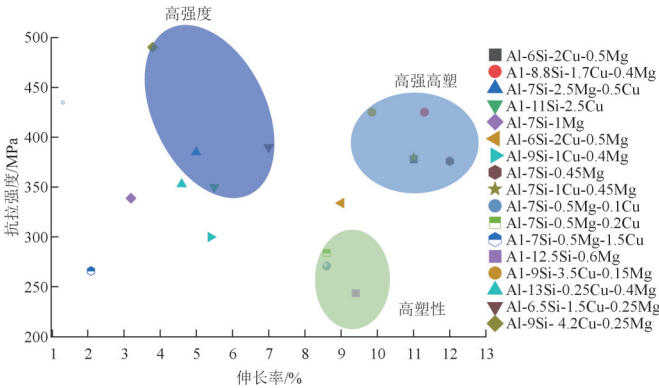


图 10 典型 Al-Si-Cu-Mg 合金的力学性能  
Fig.10 Mechanical properties of typical Al-Si-Cu-Mg alloy

表 3 典型 Al-Si-Cu-Mg 合金力学性能<sup>[3-5,29,43,46,49,60-67]</sup>

Tab.3 Mechanical properties of typical Al-Si-Cu-Mg alloys<sup>[3-5,29,43,46,49,60-67]</sup>

| 合金成分                  | 制备方式    | $w_B/\%$ |      |      | 力学性能     |          |       |
|-----------------------|---------|----------|------|------|----------|----------|-------|
|                       |         | Si       | Cu   | Mg   | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% |
| Al-6Si-2Cu-0.5Mg      | PMC+T6  | 5.98     | 2.08 | 0.52 | 378      | 306      | 11.0  |
| Al-8.8Si-1.7Cu-0.4Mg  | HPDC+T6 | 8.80     | 1.70 | 0.40 | 425      | 321      | 11.3  |
| Al-7Si-2.5Cu-0.5Mg    | PMC+T6  | 7.00     | 2.50 | 0.50 | 385      | —        | 5.0   |
| Al-9Si-4.3Cu-0.25Mg   | PMC+T6  | 8.31     | 4.17 | 0.32 | 490      | 419      | 3.8   |
| Al-9Si-3.5Cu-0.15Mg   | SQC+T4  | 8.92     | 3.41 | 0.16 | 425      | 380      | 9.9   |
| Al-6Si-3Cu            | RL+T4   | 6.30     | 3.30 | —    | 430      | 382      | 5.8   |
| Al-13Si-0.25Cu-0.4Mg  | HPDC+T5 | 13.10    | 0.25 | 0.37 | 353      | 213      | 4.6   |
| Al-11Si-2.5Cu         | SQC+T6  | 11.00    | 2.50 | —    | 350      | 262      | 5.5   |
| Al-7Si-1Mg            | PMC+T6  | 7.00     | —    | 1.00 | 339      | 274      | 3.2   |
| Al-7Si-0.45Mg         | LPDC+T6 | 7.12     | —    | 0.45 | 334      | 267      | 9.0   |
| Al-9Si-1Cu-0.4Mg      | GC+T6   | 9.00     | 1    | 0.40 | 310      | 290      | 3.9   |
| Al-7Si-0.45Mg         | DC+T6   | 7.00     | —    | 0.47 | 376      | 305      | 12.0  |
| Al-7Si-1Cu-0.45Mg     | DC+T6   | 7.00     | 1.04 | 0.45 | 380      | 295      | 11.0  |
| Al-7Si-3Cu-0.45Mg     | DC+T6   | 7.00     | 2.99 | 0.45 | 447      | 342      | 7.8   |
| Al-7Si-0.1Cu-0.5Mg    | TC+T5   | 7.20     | 0.11 | 0.50 | 271      | —        | 8.6   |
| Al-7Si-0.2Cu-0.5Mg    | TC+T5   | 7.30     | 0.26 | 0.52 | 284      | —        | 8.6   |
| Al-7Si-0.5Cu-0.5Mg    | TC+T5   | 7.00     | 0.50 | 0.51 | 296      | —        | 8.8   |
| Al-7Si-1.0Cu-0.5Mg    | TC+T5   | 7.10     | 1    | 0.53 | 306      | —        | 5.8   |
| Al-7Si-1.5Cu-0.5Mg    | TC+T5   | 7.20     | 1.52 | 0.54 | 266      | —        | 2.1   |
| Al-12.5Si-0.6Mg       | RL      | 12.20    | —    | 0.65 | 244      | 173      | 9.4   |
| Al-6.5Si-1.5Cu-0.25Mg | PMC+T6  | 7.28     | 1.57 | 0.28 | 390      | 308      | 7.0   |

注:PMC为金属型铸造;HPDC为压铸;SQC为挤压铸造;RL为轧制;LPDC为低压铸造;GC为重力铸造;DC为半连续铸造;TC为半固态触变成形。

4 总结与展望

随着汽车、航空航天领域对于轻量化需求的日益严苛,轻质高强 Al-Si-Cu-Mg 合金受到广泛关注。综述了 Al-Si-Cu-Mg 合金的国内外研究进展,包括合金化基础(Si、Cu、Mg、Mn、Sr、RE、Zr 元素的影响)、成形方式(传统铸造、压铸、挤压铸造)及热处理工艺(固溶、时效)等方面。为了进一步拓宽 Al-Si-Cu-Mg 合金的工程应用,未来可从以下几方面开展深入研究。

(1)进一步优化合金成分,探明不同成形方式下合金

的微观组织和力学性能关系,开发新型高性能 Al-Si-Cu-Mg 合金,为工程应用提供更为丰富的新材料数据库。

(2)将 ProCAST、AnyCasting 等软件应用于 Al-Si-Cu-Mg 合金铸造过程温度场、流场等模拟分析,促进铸造成形过程数字化和智能化,实现合金制备过程降本增效。

(3)通过耦合析出相热力学计算模拟、材料基因组工程、先进电镜表征技术等多种手段明晰时效析出行为规律,为高强度 Al-Si-Cu-Mg 合金的开发提供重要理论依据。

## 参 考 文 献

- [1] 潘复生,张丁非. 铝合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [2] XUE W L, JIA L H, MA K P, et al. Influence of Mg and Cu on precipitation behaviors and mechanical properties of Al-Si alloys[J]. *Materials Science & Engineering*, 2024, A908: 146-175.
- [3] ZHENG Y, XIAO W L, GE S J, et al. Effects of Cu content and Cu/Mg ratio on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 649: 291-296.
- [4] DONG X X, YANG H L, ZHU X Z, et al. High strength and ductility aluminium alloy processed by high pressure die casting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 773: 86-96.
- [5] 张伟,杨通,李建平,等. 铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金分级热处理工艺及对力学性能的影响[J]. *铸造技术*, 2007, 28(12): 1 631-1 635.
- [6] ZHANG M S, TIAN Y Q, ZHENG X P, et al. Research progress on multi-component alloying and heat treatment of high strength and toughness Al-Si-Cu-Mg cast aluminum alloys[J]. *Materials*, 2023, 16(3): 1 065.
- [7] 邹文逸,孙明,杨德鹏,等. 免热处理铝合金的研究现状及展望[J]. *材料热处理学报*, 2024, 45(9): 1-11.
- [8] 陈小村,翁文凭,长海博文,等. 固溶时效过程中高导热 Al-9Si 合金组织性能演变[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(7): 727-731.
- [9] 朱锐祥,秦新宇,胡南,等. 稀土元素对 Al-Si-Cu-Mg 系压铸铝合金组织和性能的影响[J]. *材料研究与应用*, 2019, 13(1): 27-32.
- [10] OUELLET P, SAMUEL F H. Effect of Mg on the ageing behaviour of Al-Si-Cu 319 type aluminium casting alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 1999, 34: 4 671-4 697.
- [11] ROBLES H F C, HERRERA R J M, MACKAY R, et al. Al-Si Alloys, Minor, Major, and Impurity Elements [M]. Berlin: Springer, 2017.
- [12] 赵忠魁. 金属材料学及热处理基础[M]. 北京:化学工业出版社, 2023.
- [13] HURTALOVÁ L, BELAN J, TILLOVÁ E, et al. Changes in structural characteristics of hypoeutectic Al-Si cast alloy after age hardening[J]. *Materials Science*, 2012, 18(3): 228-233.
- [14] ZHU X Z, DONG X X, BLAKE P, et al. Improvement in as-cast strength of high pressure die-cast Al-Si-Cu-Mg alloys by synergistic effect of  $Q$ -Al<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub> and  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu phases[J]. *Materials Science & Engineering*, 2021, A802: 140-162.
- [15] ZHOU P F, WANG D T, NAGAUMI H, 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] LIANG Z H, YE B, ZHANG L, et al. A new high-strength and corrosion-resistant Al-Si based casting alloy[J]. *Materials Letters*, 2013, 97: 104-107.
- [17] FARKOOSH A R, PEKGULERYUZ M. Enhanced mechanical properties of an Al-Si-Cu-Mg alloy at 300 °C: Effects of Mg and the Q-precipitate phase [J]. *Materials Science & Engineering*, 2015, A621: 277-286.
- [18] 徐松,吉泽升,许红雨,等. 镁含量对挤压铸造 Al-10Si-2.5Cu-xMg 合金显微组织及力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2019, 44(4): 10-14.
- [19] PRATHEESH K, KANJIRATHINKAL A, JOSEPH A M, et al. Study on the effects of squeeze pressure on mechanical properties and wear characteristics of near-eutectic Al-Si-Cu-Mg-Ni piston alloy with variable Cu content [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2017, 11(4): 831-842.
- [20] ZHANG L F, GAO J W, DAMOAH L N W, et al. Removal of iron from aluminum: A review [J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2012, 33(2): 99-157.
- [21] KIM H Y, PARK T Y, HAN S W, et al. Effects of Mn on the crystal structure of  $\alpha$ -Al(Mn, Fe) Si particles in A356 alloys [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, 291(1): 207-211.
- [22] WU Q J, YAN H, LIU Y, et al. Effect of Sr modification on microstructures and mechanical properties of Al<sub>3</sub>Ti/ADC<sub>12</sub> composites [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(3): 742-747.
- [23] LIU T, MORALES S, ARKKAINEN M, et al. The combined effects of Sr additions and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of high pressure die cast A383 alloy[J]. *Materials Science & Engineering*, 2019, A756: 373-380.
- [24] 汪闵,赵玉涛,陶然,等. Sr 对 AlSi9Cu3 合金组织与力学性能的影响[J]. *铸造技术*, 2018, 39(6): 1 153-1 156, 1 160.
- [25] 李豹,张志峰,王志刚,等. Sr 对铸态 Al-7Si-Mg 合金组织和力学性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2013, 33(8): 691-695.
- [26] 袁胜胜,李明茂,朱应禄,等. 稀土在铝及其合金中的作用和应用 [J]. *上海有色金属*, 2009, 30(3): 129-133.
- [27] HU Z, YAN H, RAO Y S. Effects of samarium addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Al-Si-Cu alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23 (11): 3 228-3 234.
- [28] VOČINA M, MEDVED J, BONČINA T, et al. Effect of Ce on morphology of  $\alpha$ (Al)-Al<sub>2</sub>Cu eutectic in Al-Si-Cu alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(1): 36-41.
- [29] WANG R, WANG D T, NAGAUMI H, et al. The novel strategy for enhancing mechanical properties and corrosion resistance via regulating multi-scale microstructure characteristics in Al-Si-Cu-Mg-Zr cast alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 180: 102-117.
- [30] HAO J F, LUO H X, BIAN J C, et al. The effect of squeeze casting process on the microstructure, mechanical properties and wear properties of hypereutectic Al-Si-Cu-Mg alloy [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2021, 16(1): 1-13.
- [31] DASH S S, CHEN D L. A review on processing-microstructure-property relationships of Al-Si alloys: Recent advances in deformation behavior [J]. *Metals*, 2023, 13(3): 609.
- [32] SAMAT S, OMAR M Z, BAGHDADI A H, et al. Microstructural evolution, dislocation density and tensile properties of Al-6.5Si-2.1Cu-0.35Mg alloy produced by different casting processes [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 95: 145-157.
- [33] 刘羽,段保华,陈光耀,等. 压铸铝合金的发展历史和未来展望[J]. *材料导报*, 2023, 37(S2): 348-357.
- [34] 张俊超,钟鼓,邹纯,等. 高真空压铸铝合金的研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(S2): 375-378.
- [35] KASPRZAK W, KURITA H, BIRSAN G, et al. Hardness control of Al-Si HPDC casting alloy via microstructure refinement and tempering parameters [J]. *Materials & Design*, 2016, 103: 365-376.

- [36] 万里,赵芸芸,潘欢,等.铝合金高真空压铸技术的开发及应用[J].特种铸造及有色合金,2008,28(11):858-861,817.
- [37] 刘学强.压铸 AlSi10MgMn 合金的组织 and 力学性能研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [38] 倪红军,陈科,张福豹,等.压铸铝合金研究现状及展望[J].轻金属,2019(3):51-55.
- [39] 贾海龙,周文强,王思清,等.高性能挤压铸造铝合金研究进展[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1187-1194.
- [40] 舒樱,杜航,张吉祥,等.基于 AnyCasting 的挤压铸造铝合金机座工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2020,40(1):46-49.
- [41] MALEKI A, SHAFYEI A, NIROUMAND B. Effects of squeeze casting parameters on the microstructure of LM13 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 209(8): 3790-3797.
- [42] EL-KHAIR A M. Microstructure characterization and tensile properties of squeeze-cast AlSiMg alloys[J]. Materials Letters, 2004, 59(8): 894-900.
- [43] 范卫忠,黄建良,闫俊,等.挤压铸造高强韧 Al-Si-Cu-Mg 合金组织性能研究[J].特种铸造及有色合金,2022,42(4):513-516.
- [44] 钟鼓,吴永福,邹纯,等.挤压铸造高强韧 AlSiMgMn 合金的组织性能[J].特种铸造及有色合金,2017,37(12):1277-1282.
- [45] GUAN R G, ZHAO Z Y, LI Y D, et al. Microstructure and properties of squeeze cast A356 alloy processed with a vibrating slope[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 229: 514-519.
- [46] ZHUO X R, LIAO H C, LV C L, et al. Enhanced tensile strength and ductility of an Al-6Si-3Cu alloy processed by room temperature rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 899: 163-321.
- [47] 李荣德,何昌国,李润霞,等.热挤压工艺对 Al-Si 合金组织和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2008,28(1):42-44.
- [48] 林高用,雷玉霞,郭道强,等.变形 Al-Si-Cu-Mg 合金热处理强化及其组织特征[J].中国有色金属学报,2014,24(3):584-592.
- [49] ZHAO B B, YE B, WANG L Y, et al. Effect of ageing and thermal exposure on microstructure and mechanical properties of a HPDC Al-Si-Cu-Mg alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2022, A849: 143-463.
- [50] HAN Y, SAMUEL A M, DOTY H W, et al. Optimizing the tensile properties of Al-Si-Cu-Mg 319-type alloys: Role of solution heat treatment[J]. Materials & Design, 2014, 58: 426-438.
- [51] BEROUAL S, BOUMERZOUZ Z, PAILLARD P, et al. Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and Mg on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784: 1026-1035.
- [52] EMMA S, SALEM S. The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(10):1249-1259.
- [53] YANG X F, XU C, LU G, et al. Towards strength-ductility synergy through an optimized two-stage solution treatment in Al-7Si-3Cu-0.5Mg alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2022, A849: 143-504.
- [54] 王云飞,王盟,王红霞.发动机用 Al-Si-Cu-Mg 合金热处理工艺优化设计[J].热加工工艺,2021,50(8):120-123.
- [55] ZUO L J, YE B, FENG J, et al. Effect of  $Q$ -Al<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub> phase on mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg alloy at elevated temperature[J]. Materials Science & Engineering, 2017, A693: 26-32.
- [56] BASAK C B, BABU N H. Morphological changes and segregation of  $\beta$ -Al<sub>5</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> phase: A perspective from better recyclability of cast Al-Si alloys[J]. Materials & Design, 2016, 108: 277-288.
- [57] FENG Y F, CHEN X, HAO Y Q, et al. Ageing evolution process of the  $\theta'$ -phase in Al-Si-Cu-Mg alloys: Atomic-scale observations and first-principles calculations[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 968: 171787.
- [58] MØRTSELL E A, QIAN F, MARIOARA C D, et al. Precipitation in an A356 foundry alloy with Cu additions—A transmission electron microscopy study[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 785: 1106-1114.
- [59] SALLEH M S, OMAR M Z, SYARIF J. The effects of Mg addition on the microstructure and mechanical properties of thixoformed Al-5Si-Cu alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 621: 121-130.
- [60] JIANG B, JI Z S, HU M L, et al. A novel modifier on eutectic Si and mechanical properties of Al-Si alloy[J]. Materials Letters, 2018, 239: 13-16.
- [61] THIRUGNANAM A, SUKUMARAN K, PILLAI U T S, et al. Effect of Mg on the fracture characteristics of cast Al-7Si-Mg alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2006, A445: 405-414.
- [62] WU X Y, ZHANG H R, MA Z, et al. Interactions between Fe-rich intermetallics and Mg-Si phase in Al-7Si-xMg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 786: 205-214.
- [63] 张万坤,张令坤,王通,等.不同时效工艺对 Al-Si-Cu-Mg 系合金微观组织和力学性能的影响[J].齐鲁工业大学学报,2018,32(4):33-38.
- [64] LI Y J, BRUSETHAUG S, OLSEN A. Influence of Cu on the mechanical properties and precipitation behavior AlSi7Mg0.5 alloy during aging treatment[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(1):99-103.
- [65] YAMAMOTO K, TAKAHASHI M, KAMIKUBO Y, et al. 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 & Technology, 2021, 93: 178-190.
- [66] WU Y N, LIAO H C, LÜ C L. Dynamic precipitation and recrystallization in Al-12.5Si-0.6Mg-0.1Ti alloy during hot-rolling and their impacts on mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 788: 125-135.
- [67] MAO H K, BAI X H, SONG F, et al. Effect of Cd on mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg alloys under different multi-stage solution heat treatment[J]. Materials, 2022, 15(15):5101.

(编辑:刘晨辉)