

# Al-Si-Mg 系铸造合金应用现状与 高强韧制备研究进展

胡惠翔<sup>1</sup>, 樊振中<sup>2, 3</sup>, 罗婷瑞<sup>1</sup>, 张 喆<sup>4</sup>, 田艳中<sup>1</sup>

(1. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095;  
3. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心, 北京 100095; 4. 天津大学化工学院, 天津 300350)

**摘要:** 概述了Al-Si-Mg系铸造合金的应用现状与高强韧制备研究进展, 系统总结了Al-Si-Mg系铸造合金晶粒细化、硅相变质、精密热处理、成分设计与成形-成性工艺装备的研究进展, 归纳了各制备工艺对材料微观组织与力学性能的影响, 总结了Al-Si-Mg系铸造合金高强韧制备的力学性能成果。最后, 对其材料成分设计、凝固组织细晶化制备、计算机辅助工程开发与高强韧精密热处理工艺发展进行了技术展望。

**关键词:** Al-Si-Mg系铸造合金; 应用现状; 微观组织; 力学性能; 晶粒细化; 硅相变质; 高强韧

## 1 应用与研究现状

### 1.1 应用现状

作为一种轻质金属结构材料, 铝合金具有密度低、耐腐蚀性佳、比强度高、成形工艺优良等特点, 被广泛用于飞机、运载火箭、新能源汽车、船舶、化工等装备制造领域<sup>[1-2]</sup>。与镁合金相比, 铝合金耐蚀性佳, 可实现长寿命低成本使用及储存维护, 且制造技术成熟; 与碳/碳等复合材料相比, 其制造工艺灵活、制造周期短、生产成本低, 可采用锻造、铸造、焊接与增材制造等工艺实现复杂结构一体化设计与制造。与锻造成形、增材制造等工艺相比, 铸造成形占比超过65%; 其中铝硅合金尤其是亚共晶铸造铝硅合金为铸造铝合金中用量最大的合金<sup>[3-4]</sup>。

铸造铝合金主要分为Al-Cu、Al-Si、Al-Mg和Al-Zn四个系列, Al-Cu系铸造合金具有较好的耐热性能与力学性能, 但其铸造工艺较差, 在铸造成形时易产生热裂、疏松和偏析冶金缺陷; Al-Mg系铸造合金耐蚀性佳, 适合制备复杂海洋环境下使用的制件, 但其屈服强度较低, 不能在中强和高强服役载荷下使用; Al-Zn系铸造合金密度高, 可通过热处理实现轻质高强韧合金的制备, 多用于非承载简单结构制件的铸造成形, 适用范围较小; Al-Si系铸造铝合金易熔炼易浇注, 结合T5/T6热处理可获得较佳的综合力学性能, 可承载中高强度服役载荷, 被广泛用于制造导弹壳体、飞机舱门、箭载仪表器材、汽车轮毂、新能源汽车副车架、高铁齿轮箱等<sup>[4-5]</sup>。Al-Si铸造合金主要包括ZL101、ZL101A、ZL102、ZL104、ZL105、ZL105A、ZL114A、ZL116等。其中ZL101A和ZL114A是铝硅合金中较为成熟的牌号, 两者的主要区别在于ZL114A中的Mg元素含量较高。综上, 开展Al-Si-Mg铸造铝硅合金的应用研究, 可为实现复杂结构部件的轻量化、强韧化制备提供材料支撑与技术支持, 具有重要的意义<sup>[6]</sup>。

### 1.2 研究现状

#### 1.2.1 细化剂对晶粒细化的作用

晶粒细化可同时提高合金的强度与塑韧性, 在实际生产中常用添加化学细化剂

作者简介:

胡惠翔(1997-), 女, 硕士生, 研究方向为高强韧铝合金设计与制备。E-mail: 1304279774@qq.com

通讯作者:

田艳中, 男, 教授。E-mail: tianyanzhong@mail.neu.edu.cn

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)10-1227-08

收稿日期:

2022-11-29 收到初稿,  
2023-02-13 收到修订稿。

的方法进行细晶处理<sup>[7]</sup>。自20世纪40年代起,晶粒细化剂在铝合金制造行业中不断发展,见图1<sup>[8]</sup>。铝合金熔体凝固过程伴随着 $\alpha$ -Al相的形核与长大,晶粒细化剂在形核阶段可为熔体提供大量非均匀形核质点,同时细化剂元素可形成成分过冷,实现非均匀凝固;在长大阶段,细化元素(或不溶性粒子)会在晶粒之间

聚集,进而限制晶粒的生长,实现晶粒细化。常规细化剂具有利用率低、易聚集沉淀、细化效果受限等不足,为了获得较佳的晶粒细化制备效果,很多学者深入研究了Ti、Zr、B等元素的细化机理,并提出了相应的晶粒细化观点及理论,其中具有代表性的包括碳化物-硼化物理论、包晶反应理论与双重形核理论等,

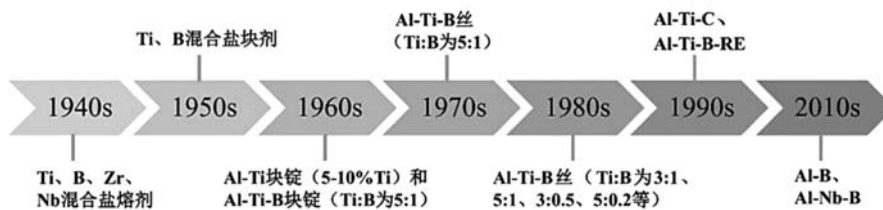


图1 细化剂种类的发展

Fig. 1 Development of refinement agent types

但迄今尚未有统一的理论可用于阐释所有的晶粒细化机理<sup>[9-11]</sup>。目前,通过改进细化剂元素配比所制备的新型细化剂正成为国内外研究学者的研究热点。Zhang等人研究发现,相比于传统商业细化剂Al-3Ti-B和Al-5Ti-B,根据V:B=1:2原子比制备的新型Al-3V-1.28B细化剂对亚共晶Al-7%Si合金具有更优异的细化效果<sup>[12]</sup>。由于国内对晶粒细化剂的研究起步较晚,部分细化剂的细化效果与国外同类产品存在一定差距,且对细化剂制备过程的热力学研究还较为缺乏。Al-Ti、Al-Ti-B、Al-Ti-C、Al-B是工业生产常用的晶粒细化剂,其中尤以Al-Ti-B的应用最为广泛<sup>[13-14]</sup>。

(1) Al-Ti细化剂。Ti元素晶粒细化剂最早采用含Ti的无机盐类与Al熔体反应生成 $Al_3Ti$ 粒子进而细化 $\alpha$ -Al基体,但细化效果较差,无法有效预测晶粒细化程度,且Ti元素回收难度大,因此逐渐被淘汰。到20世纪60年代,随着制备工艺的不断发展,出现了对纯铝细化效果较佳的Al-Ti类中间合金,包括Al-5Ti、Al-6Ti、Al-10Ti等中间合金,但其对Al-Si系铸造合金细化效果较差。

(2) Al-Ti-B细化剂。自20世纪60年代,Al-Ti-B合金一直是铝合金优先采用的细化剂之一,包括Al-5Ti-B、Al-3Ti-3B、Al-3Ti-4B等。然而Al-Ti-B合金的细化行为容易受到 $TiB_2$ 颗粒分布、合金成分等因素的影响,特别是当Si含量较高时(>7.0%),易在形核质点上形成富钛硅化物,会削弱Al-5Ti-1B细化能力并发生明显的晶粒粗化现象,此现象为Si毒化<sup>[15-16]</sup>。对于工业纯铝,Al-5Ti-B中间合金细化效果优于Al-3Ti-B中间合金,对于Al-Si铸造合金,Al-3Ti-B中间合金细化效果优于Al-5Ti-B中间合金<sup>[17]</sup>。当铝熔体中含有Zr、Cr、V、Mn元素时, $TiB_2$ 粒子因“中毒”而削弱细化效果,并且这种结果不可逆<sup>[16, 18]</sup>。因此“毒化”效应严重制约了Al-Ti-B中间合金的细化效率。

(3) Al-Ti-C细化剂。由Al-Ti-C合金带入熔体的TiC粒子不易团聚沉淀,可作为 $\alpha$ -Al的有效异质形核质点,提高形核率<sup>[19]</sup>。相比于Al-Ti-B,Al-Ti-C细化剂不会产生“Si毒化”,并对含Zr、Cr元素铝合金仍具有较佳的细化效果。但C与Al熔体润湿性较差,导致TiC颗粒在熔体中不够稳定。20世纪90年代后,Al-Ti-C-B、Al-Ti-B-RE、Al-Ti-C-RE等新型细化剂逐渐被开发,其中Al-Ti-C-RE合金可提高C与Al熔体界面的润湿性,使TiC粒子悬浮性得到明显改善。Li研究指出Al-5Ti-0.8B-0.2C细化剂具有比Al-5Ti-B更佳的晶粒细化效果,添加0.2%的Al-5Ti-0.8B-0.2C细化剂,可将铸态纯铝晶粒尺寸细化至190  $\mu m$ 以下,细化作用持续时间不低于1 h;与Al-Ti-B类中间合金相比,C元素的加入降低了合金熔体中 $TiB_2$ 的偏析程度<sup>[20]</sup>。

(4) Al-B细化剂。与Al-5Ti和Al-5Ti-B中间合金相比,Al-4B对A356合金的晶粒细化效果更为显著。Biroi指出Al-B中间合金的有效形核质点为 $AlB_2$ 相;Kori发现对Al-Si铸造合金而言,Al-B中间合金比Al-Ti中间合金晶粒细化效果更佳,当B元素添加量 $\geq 3\%$ 时, $AlB_2$ 颗粒尺寸随B元素添加量的增加而持续增大,合金熔体中有效形核质点数量大幅减少<sup>[21-22]</sup>。

## 1.2.2 硅相变质研究现状

未经变质的共晶硅尖端处存在应力集中,严重割裂基体,恶化合金力学性能。共晶硅变质的方法有物理变质、化学变质以及快速凝固,本文所介绍的硅相变质方法主要指化学变质。化学变质是指通过添加微量化学元素达到改善共晶硅组织形貌的目的。国内目前主要选用Na、Sr元素及其盐类进行硅相变质,但对其最佳添加量的认识尚未统一。Na盐变质剂成本低、潜伏期短,对冷却速度不敏感,且硅相变质效果较佳。但Na盐类变质剂在熔体中挥发性大,易烧损,添

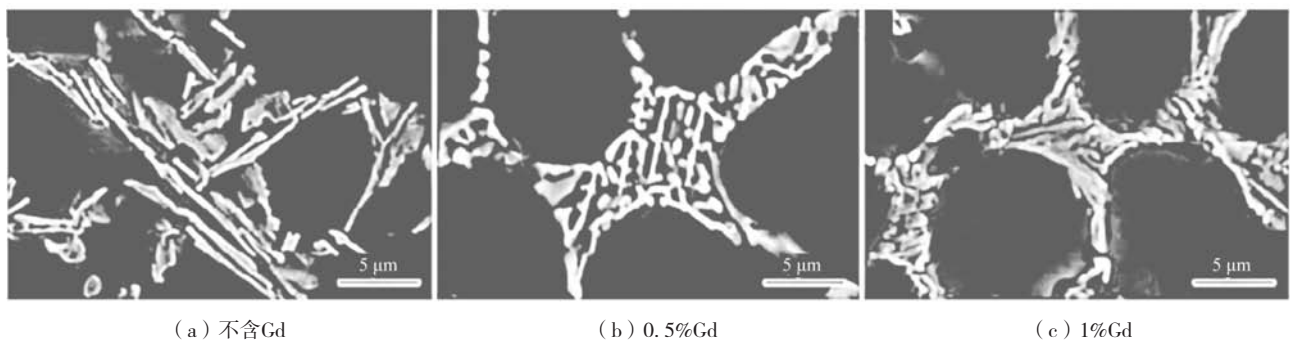
加后气体含量高易出现疏松、缩孔缺陷，且对砂型铸造有效变质时间短（ $<1\text{ h}$ ）。继Na盐变质剂之后，研究人员开发了一种长效Sr变质剂。与Na变质相比，Sr变质效果稳定，有效变质时间长，通常以Al-Sr中间合金的形式进行添加。Sr变质添加后，合金熔体中的[H]离子含量显著增加，易产生针孔缺陷，降低合金材料的力学性能，因此Sr变质剂通常与惰性气体（氩气、氦气等）和氮气复合使用<sup>[23]</sup>。

稀土元素对Al-Si铸造合金也具有良好的硅相变质效果，且有效变质作用时间可达5~7 h，稀土元素主要包括La、Sb、Ce、Nd、Sc、Y等。其中Sb元素因成本低、析氢倾向小、有效作用时间长、硅相变质效果显著而被广泛选用<sup>[24-25]</sup>。亚共晶Al-Si铸造合金添加Sb元素后，生成的AlSb相不断填充至Si相生长界面，可抑制Si相长大，细化Si相组织<sup>[26]</sup>。Li等人得出结论，Y可将共晶硅从粗大的片状和针状形貌转变为细枝状与均匀分布的纤维状形貌。当添加0.3% Y经T6热处理后，合金的抗拉强度、屈服强度与伸长率分别为353 MPa、287 MPa和12.1%<sup>[27]</sup>。刘文祎研究发现，添加Gd元素后，熔体成分过冷程度大幅增加，合金熔体中形成大量纳米相，可阻碍共晶硅相的一维快速生长；与不添加Gd元素相比，添加0.5%Gd元素后，A357合金T6态抗拉强度提高了37 MPa，图2所示为不同Gd元素添加量下A357铝合金共晶硅相形貌<sup>[28]</sup>。Jiang等人研究发现，加入稀土元素可大幅降低 $\alpha$ -Al初生相和共晶硅相的颗粒尺寸及二次枝晶臂间距（SDAS）<sup>[29]</sup>。随着对材料使用性能要求的提升及铸造环保标准要求的提高，采用单一的变质元素已很难达到理想的变质效果。研究表明，Sr元素与稀土元素复合变质可克服单独添加稀土元素作变质剂时用量大的缺点，Na与Sr、Sb、Te，RE与Sr的变质作用可相互叠加，而Sb、Te与Na、P之间的变质效果会互相抵消和削弱<sup>[30-31]</sup>。杨启杰采用Na-Ba复合变质剂对ZL101合金进行变质处理，发现保温4.5 h后仍具有较好的变质效果，且复合变质剂多次重熔使用仍具有较好的硅相变质效果<sup>[32]</sup>。Zhu团队发现，Na+Sr复

合变质呈现出的变质效果远优于单一变质效果，且显著缩短了单一使用Sr变质元素的潜伏期<sup>[33]</sup>。Xu研究指出选用Sc、Zr复合变质处理时，随着Zr元素添加含量的增加，铸态微观组织细化程度先增强后下降，当Sc、Zr元素添加含量分别为0.3%与0.2%时，A357铝合金T6态抗拉强度、屈服强度与伸长率可达379 MPa、329 MPa与6.1%，不同Sc元素添加含量下A357铝合金铸态组织形貌SEM测试结果见图3<sup>[34]</sup>。相比于国外，国内稀土变质铸造铝硅合金的商业化种类较少、产品较为单一。

### 1.2.3 T5/T6热处理研究现状

T5/T6热处理工艺作为提高合金材料强度与塑韧性的有效手段之一，得到了诸多研究者的重视。固溶保温处理可在改善共晶硅相形貌的同时，促进Mg元素充分溶入 $\alpha$ -Al基体，提高过饱和固溶度，为时效保温过程 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 的大量析出提供成分驱动。研究表明，当Al-Si铸造合金中Mg元素添加量 $\leq 0.5\%$ 时， $\text{Mg}_2\text{Si}$ 相经550 °C固溶保温2 h即可实现充分的溶解与均匀化，适当延长固溶保温时间与提高固溶保温温度，共晶硅相球化速度大幅增加，硅相形貌显著改善，但应避免出现固溶保温过烧；铸造组织中的非金属夹杂与针孔、气孔等缺陷降低了溶质原子的扩散速率，固溶保温时间过短时，强化元素不能充分溶入 $\alpha$ -Al基体<sup>[35, 36]</sup>。Pramod研究指出A356铝合金添加Sc元素并经T6热处理后，共晶硅相明显细化，形貌显著改善，力学性能得到提升<sup>[37]</sup>。Sersour研究了T5/T6热处理工艺对B413、AS10G与A356三种Al-Si铸造合金力学性能的影响，指出T5热处理可以获得更佳的综合力学性能<sup>[38]</sup>。樊振中研究指出ZL114A合金添加0.12%Sb元素结合分级固溶热处理，合金伸长率与抗拉强度可达9.6%与356 MPa<sup>[39]</sup>。综上，国内外研究学者对Al-Si-Mg铸造铝硅合金T5/T6热处理强化机理、微观组织演变规律、强化相析出次序及热处理工艺参数优化做了大量的工作，同时结合相图软件计算凝固组元，建立了 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 强化相的析出数学模型，用于指导工业生产。



(a) 不含Gd

(b) 0.5%Gd

(c) 1%Gd

图2 不同Gd元素含量A357铝合金的共晶硅形貌

Fig. 2 Eutectic silicon morphologies of the A357 aluminum alloys with different Gd contents

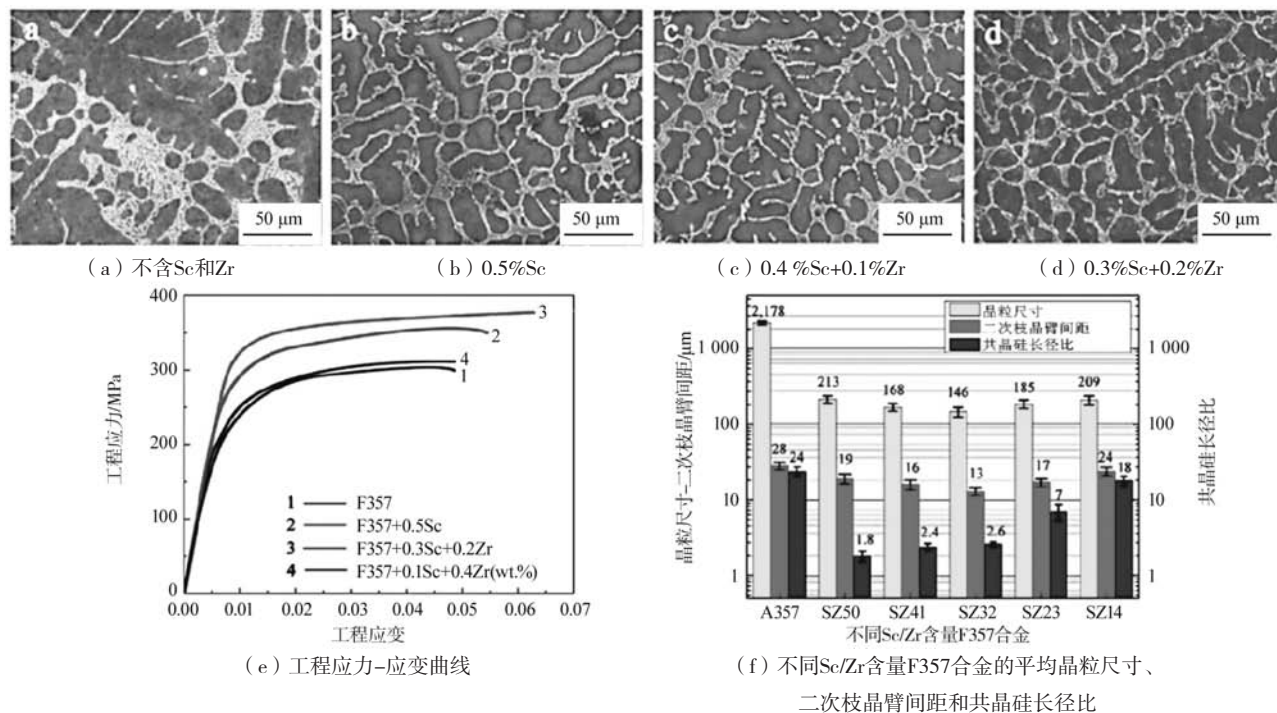
图3 不同Zr和Sc元素添加含量下A357铝合金力学性能与共晶硅相形貌<sup>[34]</sup>

Fig. 3 Mechanical properties and eutectic silicon morphologies of the A357 aluminum alloys with different Zr and Sc contents

## 2 强韧化的制备

### 2.1 合金元素在铸造铝硅合金中的作用

#### 2.1.1 Si元素

Si元素是Al-Si-Mg铸造合金的主要成分之一，可以提高合金铸造性能，改善流动性能，降低热裂倾向，减少缩松、缩孔倾向，提高气密性。随着Si元素添加量的增加，凝固组织中的SDAS明显减小，第二相数量不断增多，铸态强度有所增加；但当Si元素添加含量超出共晶点时（12.6%），凝固组织易产生粗大块状Si相，承载时易产生应力集中，合金的材料强度与塑韧性随之降低。

#### 2.1.2 Mg元素

当Al-Si-Mg铸造合金中Si元素含量固定时，Mg元素含量的增加可显著提高材料强度，但使伸长率下降。对于A356铝合金，Mg元素含量每增加0.01%，材料强度可提升6.89 MPa。由Al-Mg二元相图可知，室温下Mg元素在 $\alpha$ -Al基体中的最大固溶度为0.6%，Mg元素添加过高时，在铸态组织中易形成粗大 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 脆性相，降低材料的强度与塑韧性，因此添加适宜的Mg元素可在保持材料伸长率的前提下，有效提高材料的强度。樊振中研究指出，相比于Si、Fe、Ti等添加元素，Mg元素含量对凝固组织SDAS影响最为显著，相图计算结果表明，当Al-Si-Mg合金的SDAS由200  $\mu\text{m}$ 降至

20  $\mu\text{m}$ 时，材料抗拉强度可提高164 MPa<sup>[40]</sup>。

#### 2.1.3 其他微量元素

除添加晶粒细化与共晶硅相变质元素外，还可添加其他微量合金元素，通过微合金化法提高Al-Si-Mg铸造合金的综合力学性能，常添加的微量合金元素主要包括Be、Mn、Sc、Zr与Cr等。Be元素的添加可在降低Mg元素烧损的同时，改善富Fe相形貌，由长条状转变为短棒状，提高合金材料强度与伸长率，细化铸态晶粒尺寸，降低热裂倾向；但Be元素具有较高的毒性，近年来使用量逐年减少。Tzeng研究发现，A357合金添加0.05%Be与0.05%Sc元素后，质量指数分别提高11%、17%，断裂韧性缺口屈服比分别增加4.5%与9.0%<sup>[41]</sup>。Mn元素添加后可形成 $\text{Al}_6\text{Mn}$ 弥散质点，提高材料再结晶温度，与熔体中的Fe反应生成 $\text{Al}_3\text{FeMn}$ 化合物，降低Fe元素对力学性能的恶化影响，提高合金的耐蚀性能。与Mn元素作用类似，添加Cr元素后可在Al-Si-Mg合金中形成 $(\text{Cr}, \text{Fe})\text{Si}_4\text{Al}_3$ 团状化合物，降低Fe元素的毒害作用，改善合金的高温力学性能。部分研究者发现，在Al-Si-Mg系铸造合金中添加适当的Cr后，不仅能够消除 $\beta$ -Fe有害相，而且通过热处理可析出含Cr的纳米强化相，从而提高合金的力学性能<sup>[42-43]</sup>。Sc、Zr、Ti和B元素添加后可显著细化铸态晶粒尺寸， $\text{Al}_3\text{Sc}$ 、 $\text{Al}_3\text{Zr}$ 、 $\text{Al}_3\text{Ti}$ 与 $\text{TiB}_2$ 均可作为有效的形核质点，提高 $\alpha$ -Al基体的形核率<sup>[44-45]</sup>。但Ti、B元素添加含量

过高时易出现Si毒化现象, Ti元素添加量一般控制在0.05%~0.2%。P元素对初生硅具有良好的变质作用, 主要添加在过共晶Al-Si合金中。在金属型铸造中用于改善脱模性能时一般添加Fe元素, 砂型铸造与熔模精密铸造时需严格控制Fe元素的含量<sup>[46-47]</sup>。

## 2.2 铸造铝硅合金物理细化方法

铝硅合金晶粒细化的物理方法主要包括凝固过程中物理细化和形变处理细化, 具体包括快速凝固、凝固时振动搅拌、超声波处理、电磁场处理及大塑性变形 (SPD) 等。快速凝固可在极高的凝固速度下获得均匀细小的等轴晶组织。凝固振动搅拌主要是通过提高形核率来细化改善铸态组织。Limmaneevichitr与Taghavi研究发现, A356合金在50 Hz频率下持续振动15 min后, 晶粒尺寸由1 200  $\mu\text{m}$ 降至174  $\mu\text{m}$ , 随着振动频率与振幅的增加, 铸态晶粒尺寸与SDAS大幅降低<sup>[48-49]</sup>。Haghayeghi研究了振动频率对铸态合金微观组织细化效果的影响, 在10 kHz、14 kHz振动频率下, 铸态合金微观组织未发生明显变化, 当振动频率增至17.5 kHz与20 kHz时, 晶粒尺寸由118  $\mu\text{m}$ 降至68  $\mu\text{m}$ 与60  $\mu\text{m}$ <sup>[50]</sup>。熔体超声处理是当前材料工程领域的研究热点, 通过对液态金属施加超声波来调控熔体的流动与凝固过程, 从而改善疏松、偏析等缺陷, 实现晶粒细化、熔体除气的工艺效果。Jian研究发现A356合金在凝固过程中, 经20 kHz超声处理, 共晶硅形貌由粗大针片状转变为细散玫瑰花状, 共晶硅的长度从26  $\mu\text{m}$ 减小到2  $\mu\text{m}$ <sup>[51]</sup>。Abramov等人研究表明, 超声波的非线性效应使硅相尺寸更加细小, 硅相分布更加均匀。超声处理后, Al-12Si和Al-7Si合金硅相形状都得到了明显的球化<sup>[52]</sup>。电磁场处理是指在外加直流磁场、交变磁场或者脉冲磁场作用下实现对材料组织和性能的改善<sup>[53]</sup>。Zhang研究得出, 施加低频电磁场改善了铝合金半连续铸造过程中的宏观物理场, 使连铸坯的组织得到了显著细化, 消除了连铸坯中的裂纹<sup>[54]</sup>。班春燕等人得出结论, 在LY12铝合金凝固过程中施加脉冲电流或脉冲磁场均可实现晶粒细化、等轴化, 当电容器电容为80  $\mu\text{F}$ , 放电电压为5 kV时, 细化效果最显著<sup>[55]</sup>。SPD是有效的金属材料晶粒细化技术, 主要包括等径角挤压 (ECAP)、高压扭转 (HPT)、累积叠轧 (ARB)、循环挤压-压缩 (CEC)、搅拌摩擦加工 (FSW) 与多向锻造 (MDF) 等, SPD晶粒细化制备工艺可获得超细晶与纳米晶结构金属材料, 目前对SPD开展的研究多集中于理论研究阶段, 尚未有较成熟的工业化生产推广应用。A356合金经过固溶与HPT变形后, 析出大量纳米级Si沉淀, 位错密度大幅增加, 屈服

强度达440 MPa, 伸长率 $\geq 8.8\%$ <sup>[56]</sup>。

## 2.3 铸造成形一体化制备

相比于传统的砂型铸造, 金属型铸造导热强、冷速快, 所以铸件组织致密、质量稳定且生产率高。然而金属型模具导热系数大, 本身无透气性, 铸件易产生浇不足、气孔、裂纹甚至变形等缺陷, 因此合理设计浇注系统尤为关键。为方便脱模, 金属型铸造多用于制造批量生产的简单铸件。低压铸造是介于重力铸造和高压铸造之间的一种铸造方法, 其突出优势为充型速度可调以及凝固时补缩压力大, 因此充型平稳、铸件质量高、合金液利用率高, 多用于制备大型复杂薄壁结构铸件。由于保压时占据时间过长, 导致生产周期较长 (10 min), 生产效率不高。压力铸造 (高压) 的显著特点是快速充型、高压凝固, 是目前生产效率较高的铸造工艺, 所获得的铸件精度和质量比低压铸造更高。由于其充型速度快, 易卷入大量空气造成铸件中残留细密气泡、缩孔等缺陷, 若气泡过大还将导致铸件不能热处理, 甚至报废。目前监测技术与计算机控制技术在压铸生产中具有较好的应用, 很多工业发达国家生产的压铸机都实现了机床自动化 (CNC), 能够检测压力室温度、推杆位移和速度, 并实现铸造过程的伺服控制。虽然我国成形设备机电一体化越来越快, 且开始重视对柔性制造系统 (FMS) 的研究, 但发展速度相对缓慢, 在检测仪器、控制系统及模具制造等方面还存在关键技术空白<sup>[57]</sup>。为了解决压铸件内部气孔与疏松缺陷, 近年来国内外研究人员提出真空压铸、半固态压铸、挤压铸造和精密熔模铸造等新的制备工艺。半固态成形技术从20世纪70年代起, 由于其独特的技术优势而备受研究学者关注。在相当的屈服强度下, 半固态加工技术可实现更高伸长率, 缩小了锻造和铸造产品之间力学性能的差距<sup>[58]</sup>。熔模铸造的铸件尺寸精度高, 可达CT4-6, 广泛应用在汽轮机、泵的叶片、复杂仪器元构件、切削刀具以及各种兵器等零件的生产。该工艺适用于多种合金材料, 生产灵活性高, 但存在工序较多, 生产周期长的问题。

## 2.4 精密热处理强韧化调控

传统的热处理工艺不仅能耗和成本高, 而且对力学性能的改善没有新的突破。因此如何在保证性能优异的同时缩短热处理周期成为研究者们迫切关注的问题。近年来, 研究人员开发了多种时效热处理工艺, 如双级时效、多步时效、峰值时效、压缩载荷时效与分步时效等。章爱生采用548  $^{\circ}\text{C} \times 12 \text{ h}$ 单级固溶与

120 ℃ × 4 h + 175 ℃ × 5 h 双级时效热处理工艺, 使含钕 A357 合金材料抗拉强度与伸长率达到了 362 MPa 与 6%, 与传统热处理工艺相比, 力学性能提升明显<sup>[59]</sup>。樊振中采用 JMat-Pro 相图软件在完成 Al-Si-Mg 合金组元成分优选后, 采用三级固溶与二级时效热处理工艺, 使 Al-6.5Si-0.7Mg-0.2Fe-0.2Ti-0.1Zn-0.1Mn-0.1Cu 合金抗拉强度、屈服强度与伸长率分别达到了 371 MPa、310 MPa 与 5.84%<sup>[40]</sup>。Menargues 等人针对铸造 A356 和 A357 合金, 开发了短时 T6 热处理工艺, 该热处理工艺使 Mg 完全溶解同时使  $\alpha$ -Al 和共晶硅的晶粒生长最小化, 显示出更好的力学性能<sup>[60]</sup>。为评估材料强度与塑韧性的匹配关系, Drouzy 在 1980 年为铸造铝合金 A357 提出了质量指标  $Q$  ( $Q = UTS + d \times \log(EL\%)$ ), 其中  $d$  为与材料相关的常数, Al-Si-Mg 合金  $d$  值约为 150, EL 为材料伸长率) 这一概念, 作为 Al-Si-Mg 强韧化综合性能的判据<sup>[61]</sup>。Wang 等人对比研究了在铸态与 T6 态下, 添加不同含量 Ce 元素所达到的质量指标  $Q$ , 铸态下  $Q$  值最高达到 209.96 MPa, 经过 (540 ± 5) ℃ 固溶 5.5 h 与 (165 ± 5) ℃ 时效 4 h 的短时热处理后实现了 A357 合金强度和塑性的良好组合,  $Q$  值最高可达 425.74 MPa<sup>[62]</sup>。

### 3 发展技术展望

(1) 基于材料工艺性能参数测试与物化性能数据库构建, 结合材料相图设计软件调控 Al-Si-Mg 铸造铝合金的成分组成, 借助共晶硅相尺寸、形貌、分布、数量的调控, 可实现新型低成本高强韧 Al-Si-Mg 铸造合金的快速开发与强韧化制备。

(2) 环保、高效、低成本和高性能已成为铝合金晶粒细化制备发展趋势。凝固组织晶粒细化制备发展方向包括但不限于: 大熔体的电磁搅拌 (EMS) 技术、高磁场搅拌技术、振动模具设计、耐高温超声波变幅杆、低能耗和高效率的新一代晶粒细化剂。

(3) 加强专用传感器与检测设备研发及伺服控制技术和其他高新技术的应用, 加强压力铸造过程计算机辅助工程 (CAE) 软件的开发, 提高凝固组织冶金质量, 降低复杂结构模具制造周期及成本, 实现凝固过程可视、可检、可调及可控。

(4) 开发短时节能高效先进的热处理技术及工艺装备, 实现热处理生产的自动化与专业化是热处理技术发展的必然趋势。

#### 参考文献:

- [1] BEHERA R, CHATTERJEE D, SUTRADHAR G. Effect of reinforcement particles on the fluidity and solidification behavior of the stir cast aluminum alloy metal matrix composites [J]. American Journal of Materials Science, 2012, 2 (3): 53-61.
- [2] GEBRIL M A, OMAR M Z, MOHAMED I F, et al. Microstructural evaluation and corrosion resistance of semisolid cast A356 alloy processed by equal channel angular pressing [J]. Metals, 2019, 9 (3): 303.
- [3] 樊振中, 袁文全, 王端志, 等. 压铸铝合金研究现状与未来发展趋势 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 159-166.
- [4] 隋育栋, 王渠东. 铸造耐热铝合金在发动机上的应用研究与发展 [J]. 材料导报, 2015, 29 (3): 14-19.
- [5] 姜坤, 赵凯, 林翰, 等. 高强韧 Al-Si-Mg 合金材料设计与制备 [J]. 铸造, 2021, 70 (6): 681-686.
- [6] 刘闪光, 虞秀勇, 毛郭灵, 等. 钕在亚共晶铝硅合金中的作用研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36 (15): 101-107.
- [7] 焦雷, 赵玉涛, 夏天福, 等. 铝钛碳、铝钛硼细化剂对铝基体细化效果的评定研究 [J]. 材料导报, 2013, 27 (8): 14-17.
- [8] MARJANI O, EMAMY M, POURBAHARI B. Effects of grain refiners and cooling rates on the microstructure and tensile properties of A357 alloy [J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2021, 10 (5): 579-588.
- [9] 李飞, 廖怡君, 王旭, 等. Zr 元素对纯铝细化机理的电子理论研究 [J]. 材料导报, 2018, 32 (18): 3190-3194.
- [10] MURTY B S, KORI S A, CHAKRABORTY M. Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying [J]. International Materials Reviews, 2002, 47 (1): 3-29.
- [11] ZHANG M X, KELLY P M, EASTON M A, et al. Crystallographic study of grain refinement in aluminum alloys using the edge-to-edge matching model [J]. Acta Materialia, 2005, 53 (5): 1427-1438.
- [12] ZHANG Y H, YE C Y, SHEN Y P, et al. Grain refinement of hypoeutectic Al-7wt.% Si alloy induced by an Al-V-B master alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 812: 152022.
- [13] 相志磊, 马腾飞, 陈子勇, 等. 铸造铝合金的细化机理 [J]. 材料导报, 2013, 27 (5): 110-114.
- [14] 闫敬明, 黎平, 左孝青, 等. Al-Ti-B 晶粒细化剂研究进展: 细化机理及第二相控制 [J]. 材料导报, 2020, 34 (9): 9152-9157.
- [15] KORI S A, MURTY B S, CHAKRABORTY M. Influence of silicon and magnesium on grain refinement in aluminium alloys [J]. Materials Science and Technology, 1999, 15 (9): 986-992.
- [16] 谭群燕. 铝钛碳晶粒细化剂的制备及工业应用 [J]. 热加工工艺, 2007, 36 (13): 38-40.
- [17] MURTY B S, KORI S A, CHAKRABORTY M. Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying [J]. International Materials Reviews, 2002, 47 (1): 3-29.

- [18] 丁海民, 刘相法, 于丽娜. Zr和Mn对Al-Ti-B中间合金的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27 (5): 390-392.
- [19] LIANG S M, SCHMID FETZER R. Phosphorus in Al-Si cast alloys: thermodynamic prediction of the AlP and eutectic (Si) solidification sequence validated by microstructure and nucleation undercooling data [J]. Acta Materialia, 2014, 72: 41-56.
- [20] LI P T, MA X G, LI Y G, et al. Effects of trace C addition on the microstructure and refining efficiency of Al-Ti-B master alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 503 (2): 286-290.
- [21] KORI S A, MURTY B S, CHAKRABORTY M. Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium [J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 283 (1-2): 94-104.
- [22] BIROL Y. AlB<sub>3</sub> master alloy to grain refine AlSi<sub>10</sub>Mg and AlSi<sub>2</sub>Cu aluminium foundry alloys [J]. Journal of alloys and compounds, 2012, 513: 150-153.
- [23] 张佳虹, 邢书明. Al-Si合金变质元素及其交互作用 [J]. 材料导报, 2018, 32 (11): 1870-1877.
- [24] 胡中潮, 于慧, 崔元胜, 等. Sb、Te变质对ZL101合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (6): 502-506.
- [25] 余聪, 陈乐平, 周全. 稀土元素对铝合金组织与性能影响的研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (2): 241-246.
- [26] LIU Q. Effect of antimony on the growth kinetics of high purity Al-Si alloys [J]. Scripta Materialia, 1998, 38 (7): 1083-1089.
- [27] LI B, WANG H, JIE J, et al. Effects of yttrium and heat treatment on the microstructure and tensile properties of Al-7.5 Si-0.5 Mg alloy [J]. Materials & Design, 2011, 32 (3): 1617-1622.
- [28] 刘文祎, 徐聪, 刘茂文, 等. 稀土元素Gd对Al-Si-Mg铸造合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 材料工程, 2019, 47 (6): 129-135.
- [29] JIANG W, FAN Z, DAI Y, et al. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 597: 237-244.
- [30] 张启运, 郑朝贵, 韩万书. 稀土元素对Al-Si共晶合金的变质作用 [J]. 金属学报, 1981, 17 (2): 130-136.
- [31] 潘利文, 罗涛, 林覃贵, 等. 稀土铝合金最新研究进展 [J]. 轻合金加工技术, 2016, 44 (9): 12-16.
- [32] 杨启杰, 苏广才, 王文超. 改良铸造铝硅合金复合变质处理的研究 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (11): 40-43.
- [33] ZHU G L, GU N J, ZHOU B J. Effects of Combining Na and Sr additions on Eutectic Modification in Al-Si alloy [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 230 (1): 012015.
- [34] XU C, XIAO W, ZHENG R, et al. The synergic effects of Sc and Zr on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy [J]. Materials & Design, 2015, 88: 485-492.
- [35] SOKOLOWSKI J H, DJURDJEVIC M B, KIERKUS C A, et al. Improvement of 319 aluminum alloy casting durability by high temperature solution treatment [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109 (1): 174-180.
- [36] COLOMBO M, BUZOLIN R H, GARIBOLDI E, et al. Effects of Er and Zr additions on the As-cast microstructure and on the solution-heat-treatment response of innovative Al-Si-Mg-based alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51 (2): 1000-1011.
- [37] PRAMOD S L, RAO A P, MURTY B S, et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast and T6 treated Sc modified A356-5TiB2 in-situ composite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 739: 383-394.
- [38] SERSOUR Z, AMIROUCHE L. Effect of alloying additions and high temperature T5-treatment on the microstructural behavior of Al-Si-based eutectic and hypo-eutectic alloys [J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16 (3): 1276-1291.
- [39] 樊振中, 陈军洲, 陈鑫磊, 等. 二次固溶处理对Sb变质ZL114A合金组织性能的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (4): 336-343.
- [40] 樊振中, 王胜强, 陆政, 等. 高强韧Al-Si-Mg合金成分设计与优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (3): 232-236.
- [41] TZENG Y C, NIEH J K, BOR H Y, et al. Effect of trace Be and Sc additions on the mechanical properties of A357 alloys [J]. Metals, 2018, 8 (3): 194.
- [42] ZHAN H, HU B. Analyzing the microstructural evolution and hardening response of an Al-Si-Mg casting alloy with Cr addition [J]. Materials Characterization, 2018, 142: 602-612.
- [43] TOCCI M, DONNINI R, ANGELLA G, et al. Effect of Cr and Mn addition and heat treatment on AlSi<sub>3</sub>Mg casting alloy [J]. Materials Characterization, 2017, 123: 75-82.
- [44] SUN F, NASH G L, LI Q, et al. Effect of Sc and Zr additions on microstructures and corrosion behavior of Al-Cu-Mg-Sc-Zr alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33 (9): 1015-1022.
- [45] PRAMOD S L, RAVIKIRANA, RAO A K P, et al. Effect of Sc addition and T6 aging treatment on the microstructure modification and mechanical properties of A356 alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 674: 438-450.
- [46] 熊艳才, 刘伯操. 铸造铝合金现状及未来发展 [J]. 特种铸造及有色合金, 1998 (4): 3-7.
- [47] 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.
- [48] LIMMANEEVICHITR C, PONGANANPANYA S, KAJORNCHAIYAKUL J. Metallurgical structure of A356 aluminum alloy solidified under mechanical vibration: An investigation of alternative semi-solid casting routes [J]. Materials & Design, 2009, 30 (9): 3925-3930.
- [49] TAGHAVI F, SAGHAFIAN H, KHARRAZI Y H. Study on the effect of prolonged mechanical vibration on the grain refinement and density of A356 aluminum alloy [J]. Materials & Design, 2009, 30 (5): 1604-1611.

- [50] HAGHAYEGHI R, HEYDARI A, KAPRANOS P. The effect of ultrasonic vibrations prior to high pressure die-casting of AA7075 [J]. *Materials Letters*, 2015, 153: 175–178.
- [51] JIAN X, MEEK T T, HAN Q. Refinement of eutectic silicon phase of aluminum A356 alloy using high-intensity ultrasonic vibration [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54 ( 5 ) : 893–896.
- [52] ABRAMOV V, ABRAMOV O, BULGAKOV V. Solidification of aluminium alloys under ultrasonic irradiation using water-cooled resonator [J]. *Materials Letters*, 1998, 37 ( 1–2 ) : 27–34.
- [53] 曹阳, 陈乐平, 周全. 高强铝合金物理法晶粒细化研究进展 [J]. *铸造技术*, 2013, 34 ( 6 ) : 675–677.
- [54] ZHANG H T, CUI J Z. Production of super-high strength aluminum alloy billets by low frequency electromagnetic casting [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21 ( 10 ) : 2134–2139.
- [55] 班春燕, 崔建忠, 巴启先, 等. 在脉冲电流或脉冲磁场作用下LY12合金的凝固组织 [J]. *材料研究学报*, 2002, 16 ( 3 ) : 322–326.
- [56] ZHANG X, HUANG L K, ZHANG B, et al. Microstructural evolution and strengthening mechanism of an Al-Si-Mg alloy processed by high-pressure torsion with different heat treatments [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 794: 139932.
- [57] 张洪信, 姜勇, 张铁柱, 等. 铝合金压力铸造技术的现状与展望 [J]. *铸造*, 2007, 56 ( 12 ) : 1247–1250.
- [58] 李干, 卢宏兴, 罗敏, 等. 铝合金半固态流变成形技术研究进展 [J]. *精密成形工程*, 2020, 12 ( 3 ) : 29–48.
- [59] 章爱生, 黄为民. 预时效对A357合金组织与力学性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2014, 39 ( 10 ) : 21–24.
- [60] MENARGUES S, MARTÍN E, BAILE M T, et al. New short T6 heat treatments for aluminium silicon alloys obtained by semisolid forming [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 621: 236–242.
- [61] DROUZY M, JACOB S, RICHARD M. Interpretation of tensile results by means of quality index and probable yield strength-application to Al-Si7Mg foundry alloys-France [J]. *International cast metals journal*, 1980, 5 ( 2 ) : 43–50.
- [62] WANG Y, LIU Q, YANG Z, et al. Effect of Ce addition and heat treatment on microstructure evolution and tensile properties of industrial A357 cast alloy [J]. *Metals*, 2020, 10 ( 8 ) : 1100.

---

## Application Status and Advances of High Strength and Toughness Fabrication of Al-Si-Mg Cast Alloys

HU Hui-xiang<sup>1</sup>, FAN Zhen-zhong<sup>2,3</sup>, LUO Ting-rui<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>4</sup>, TIAN Yan-zhong<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials, Beijing 100095, China; 4. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

### Abstract:

This paper summarized the current status of Al-Si-Mg casting alloys and research progress on high toughness preparation, as well as grain refinement, silicon phase densification, precision heat treatment, composition design, and equipment for forming-property acquiring processes, summarized the effects of preparation processes on the microstructure and mechanical properties of the casting alloys and provided a summary of their mechanical properties. Mechanical properties of Al-Si-Mg casting alloy were discussed. Finally, the technical outlook on material composition design, casting of fine-grained specimen, computer-aided engineering development and high toughness precision heat treatment process development were presented.

### Key words:

Al-Si-Mg casting alloy; application status; microstructure; mechanical properties; grain refinement; silicon phase modification; high strength and toughness fabrication