

# 铸造铝合金熔体处理技术发展现状

杜明<sup>1</sup>, 程颖<sup>2</sup>, 张花蕊<sup>2</sup>, 张虎<sup>2</sup>

(1. 诸城航大新材料技术有限公司, 山东诸城 262200; 2. 北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院, 北京 100191)

**摘要:** 铸造铝合金具有轻质、高比强度、铸造性能好等一系列优点, 是一种优异的轻量化材料, 在汽车行业具有广阔的应用前景。合金熔体质量对铸件最终性能具有重要影响, 铸造前对其进行净化、晶粒细化和变质处理是获得高性能铸件的必要前提条件。本文介绍了铸造铝合金熔体净化技术、晶粒细化技术以及共晶Si变质处理技术的发展现状, 以为先进铝合金熔体处理技术的开发与应用提供参考。

**关键词:** 铸造铝合金; 熔体净化; 晶粒细化; 变质处理

## 作者简介:

杜明(1984-), 男, 博士, 主要研究方向为高性能铸造铝合金的设计与制备。

E-mail: duming@hdmater.com

## 通讯作者:

张虎, 男, 教授, 博士, 博士生导师。E-mail: zhanghu@buaa.edu.cn;

程颖, 男, 助理研究员, 博士, 硕士生导师。E-mail: cying@buaa.edu.cn

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)06-0738-08

## 基金项目:

北京航空航天大学青年拔尖人才支持计划(YWF-22-L-1284); 北京航空航天大学前沿交叉基金项目(YWF-23-Q-1097)。

## 收稿日期:

2024-03-26 收到初稿,  
2024-04-26 收到修订稿。

随着全球汽车产业的快速发展, 逐年上升的汽车保有量成为世界能源消耗和污染物排放的主要来源<sup>[1-2]</sup>。为应对日益严峻的能源危机和环境污染问题, 节能环保已成为当今社会发展所迫切关注的问题, 低能耗、低污染是汽车产业的重要发展方向。已有研究表明, 轻量化是实现汽车有效节能减排的重要途径之一, 以汽车整车减重100 kg为例, 可节省燃油0.3~0.6 L/(100 km), CO<sub>2</sub>排放量将减少8~11 g(100 km)<sup>[3-6]</sup>。铝合金因其比强度高、气密性好、铸造和耐腐蚀性能优异等一系列优点, 成为实现汽车轻量化, 替代钢铁的主要应用材料<sup>[7-10]</sup>。预计到2024年, 北美等发达地区单车用铝量将增加到320 kg, 国内单车用铝量也将达到220 kg<sup>[11]</sup>。以铝合金车轮、副车架、转向节、电动汽车电机壳等为代表的铝合金零部件将在汽车行业得到更加广泛的应用。

铸造铝合金具有优良的铸造性能, 能够以近净成型的方式生产大尺寸复杂薄壁铸件, 是汽车中使用最多的铝合金材料。其中又以铝硅合金应用最为广泛, 约占铸造铝合金总用量的80%~90%<sup>[12]</sup>。几乎所有铝合金铸件在其生产制造过程中都要经历一次或多次熔化和凝固过程, 合金熔体的质量对后续加工过程以及产品最终组织与性能具有重要的影响。在铸造前对合金熔体进行净化<sup>[13-14]</sup>、晶粒细化<sup>[15]</sup>和变质<sup>[16]</sup>处理已成为获得高性能铝合金铸件所必不可少的重要环节。本文对铸造铝合金熔体处理技术的发展现状进行介绍, 以为开发新的先进铝合金熔体处理技术提供参考。

## 1 熔体净化技术

实现高性能铝合金铸件制备的首要条件是获得纯净度满足要求的合金熔体, 当杂质元素、气体和夹杂物含量超标时, 合金的铸造性能及力学性能会受到负面影响。熔体净化主要包括去除杂质元素、提高合金纯度的纯化处理以及去除气体和夹杂物的净化处理。用于降低以Fe为主的杂质元素含量的纯化技术主要包括稀释法、重力沉降法、离心分解法、电磁分离法以及变质过滤法等<sup>[17]</sup>。对于纯度要求更高的应用场合, 则需采用三层液电解精炼法、真空挥发法、偏析法以及区域熔炼法等方式进行提纯<sup>[18]</sup>。根据工作原理不同, 用于去除以H和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为主的气体 and 夹杂物的净化技术可以分为吸附净化和非吸附净化两大类。吸附净化主要包括气泡浮游法、熔剂法和过滤法等, 非吸附净化主要包括静置法、真空净化、超声净化和电磁净化等<sup>[19]</sup>, 目前工业生产中主要采用吸附净化技术对铝合金熔体进行净化

处理。根据应用场合的不同，各行业对含氢量的要求也有所不同<sup>[16, 20-21]</sup>：对于铸造合金锭，含氢量要求低于0.18 mL/100 g Al；对于挤压铝棒，含氢量要求低于0.16 mL/100 g Al；对于压延用铝扁锭，含氢量要求低于0.15 mL/100 g Al；对于航空航天用铝材，含氢量要求低于0.10 mL/100 g Al。下文重点对基于吸附净化原理的熔体净化工艺发展历史及现状进行介绍。

图1所示为基于吸附净化原理的铝合金熔体净化工艺的发展历程<sup>[22]</sup>。在近40年的发展中，精炼气体的引入方式由静态喷吹演变为旋转喷吹，实现了精炼气泡尺寸的显著减小；精炼气体从毒性较大的Cl<sub>2</sub>转变为对环境更为友好的Ar和N<sub>2</sub>；精炼工艺由单一的气泡浮游法演变为同时采用气泡浮游法、熔剂法和过滤法的综

合精炼工艺，精炼效果得到了显著提升。旋转喷吹法是目前研究最多、应用最广泛的一种高效除气工艺。利用高速旋转的喷头对喷吹入合金熔体中的精炼气泡进行剪切破碎，可以获得尺寸更加细小（3~8 mm）、分布更加均匀弥散的气泡，大幅增加了精炼气泡与合金熔体间的有效接触面积<sup>[23]</sup>。同时，在转子的搅拌作用下，细小的精炼气泡会沿螺旋状轨迹上浮至液面，延长了精炼气泡在合金熔体的停留时间，从而显著改善了除氢动力学条件。根据喷吹的精炼介质，旋转喷吹法可以细分为仅喷吹精炼气体的旋转喷吹气体法（Rotary Gas Injection，简称RGI）和同时喷吹精炼气体和精炼熔剂的旋转喷吹熔剂法（Rotary Flux Injection，简称RFI）。

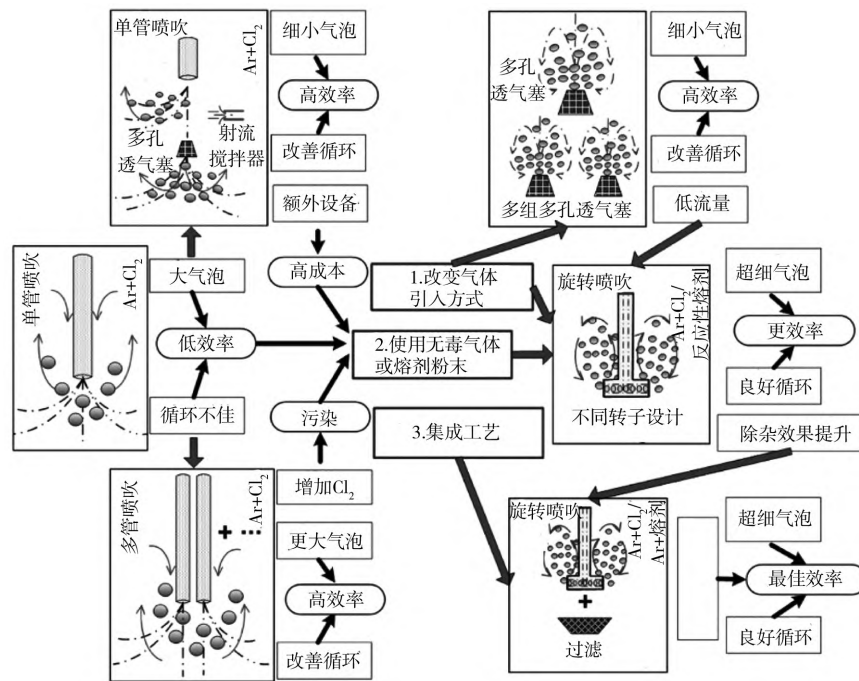


图1 基于吸附净化原理的铝合金熔体净化工艺发展历程

Fig. 1 Development of the aluminum alloy melt purification process based on absorption theory

RGI法的代表工艺包括美国Union Carbide公司的SNIF（Spinning Nozzle Inert Floatation）<sup>[24]</sup>、法国Pechiney Aluminum公司的ALPUR<sup>[25]</sup>、英国FOSECO公司的RDU（Rapid Degassing Unit）<sup>[26]</sup>以及日本Showa

Aluminum公司的GBF（Gas Bubbling Filtration）<sup>[27]</sup>。表1所示为SNIF、ALPUR、RDU以及GBF的主要设备及工艺参数对比。

表1中所示RGI法工艺的核心技术均在于其转子

表1 几种RGI法的主要设备及工艺参数对比

Table 1 Comparison of main equipment and process parameters of several RGI methods

工艺	精炼容器尺寸/mm	转子数量	转子转头尺寸/mm	转子转速/rpm	气体流量/(L·min <sup>-1</sup> )
SNIF	长：700，宽：600，高：800	1~3	200	400~500	<140
ALPUR	长：600，宽：600，高：900	1~3	250	200	50~250
RDU	底面直径：450，高：600	1	250	225~400	45~60
GBF	长：535，宽：535，高：700	1~2	200	600~950	40~200

转头的设计,一方面可以对喷吹入合金熔体中的精炼气体进行强力剪切破碎,从而获得尺寸细小的精炼气泡;另一方面可以改善合金熔体流动状态,使得破碎后的精炼气泡能够均匀分散并与熔体充分接触。这两方面的作用显著改善了除气和除杂的动力学条件,从而可以获得优异的净化效果。各种工艺的精炼效果见表2<sup>[23]</sup>。

表2 几种RGI法的精炼效果对比  
Table 2 Comparison of refining effect of several RGI methods

工艺	精炼后熔体含氢量/ [mL·(100 g Al) <sup>-1</sup> ]	精炼后Na含量/ (1×10 <sup>-6</sup> )	夹杂去 除率/%
SNIF	0.07~0.08	0.1~3	95
ALPUR	0.1	≤3	-
RDU	0.07	-	-
GBF	0.05	-	≥60

上述RGI法工艺中,精炼熔剂是通过转子旋转在液面产生的漩涡卷入合金熔体内部,存在添加困难的问题,导致其净化效果无法得到充分发挥。此外,漩涡增大了合金熔体与空气的接触面积,会加剧熔体氧化过程并增大夹杂和气体卷入量,从而对净化过程产生不利影响。20世纪90年代提出的RFI法改进了精炼熔剂的添加方式,以精炼气体为载体直接将精炼熔剂经由转子底部喷吹送入合金熔体内部,大大降低了添加难度,改善了除气和除杂的动力学条件,从而进一步提升了精炼效果。美国Pyrotek公司的PHD-50型移动式和HD2000型固定式旋转喷吹熔剂装置,加拿大STAS公司的Rotary Flux Injector<sup>®</sup>以及挪威Hydro公司的RAM (Removal of Alkaline Metals) 工艺是RFI法的典型代表。目前RFI法在变形铝合金的熔体净化中已取得较好的应用效果,通过精炼熔剂与精炼气体的同时采用,可以在高效去除合金熔体中的氢气、夹杂物及碱金属和碱土金属杂质元素(Li、Na、Ca等)的前提下,减少精炼熔剂添加量、缩短精炼时间。

然而,RFI法用于铸造铝合金的熔体净化处理时,存在精炼熔剂易于堵塞转子内部喷吹通道的问题,使得其难以获得广泛推广应用。引起堵塞的主要原因是

喷吹过程中精炼熔剂与高温的喷吹通道内壁接触后会迅速升温,高温下变软而粘附于通道内壁。因此,避免精炼熔剂在喷吹过程中温升过高是解决堵塞问题的关键。对转子结构进行改进,在精炼熔剂喷吹通道外围增设冷却通道,喷吹熔剂时施加强制冷却条件,削弱高温的合金熔体对熔剂的热影响,是防止熔剂堵塞通道,保证精炼过程能够稳定连续进行的可行途径之一<sup>[28-29]</sup>。

随着铝合金产量和用量的不断增加,废铝资源量也迅速增加。而以废铝为原料生产再生铝,能耗仅为原生铝的4.86%,温室气体排放量仅为原生铝的4.21%<sup>[30]</sup>。因此,废铝的再生利用不仅能节省资源,更能降低能耗、减少环境污染,是必然发展趋势。在美国、德国等西方发达国家,再生铝产量在铝总产量中的占比均超过50%,日本更是高达95%。目前我国再生铝产量占比仅为20%左右,具有广阔的发展前景。相比于以电解铝为原料的原生铝,以废铝为原料的再生铝中杂质种类更加复杂,杂质含量也更高,净化难度大幅提升。为获得与原生铝相当的净化效果,一方面需要针对再生铝所含杂质开发更为高效的精炼熔剂<sup>[31]</sup>;另一方面要系统研究返回料种类及添加比例对熔体净化的影响,并开发与之相匹配的精炼工艺<sup>[32]</sup>。

在铝合金铸件的实际生产过程中,最终的铝液纯净度不仅取决于熔体净化环节的除气除杂精炼效果,同时也受后续工艺环节中铝合金熔体吸氢行为的影响。以低压铸造为例,研究表明,在合金熔体向低压铸造机保温炉转运过程中含氢量的增量可以高达0.61 mL/100 g Al<sup>[33]</sup>。因此,精炼处理完毕后,还需关注合金熔体在后续环节中的含氢量变化,找出影响熔体吸氢的关键环节和因素,并有针对性的采取措施防止合金熔体过度吸氢。

## 2 晶粒细化技术

细化晶粒可以同时提升合金强度和塑性,已成为制备高性能铝合金铸件不可或缺的一个重要工艺环节。目前,工业生产中普遍采用添加细化剂的方式来实现晶粒细化。图2所示为铝合金晶粒细化剂的研究历史

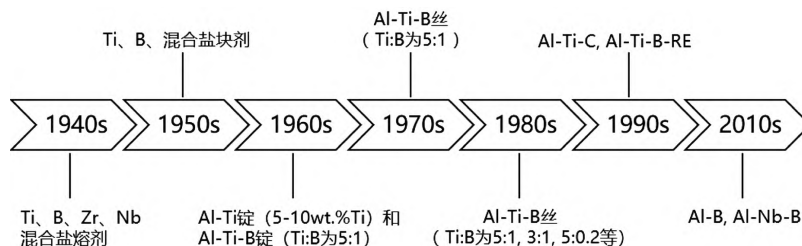


图2 铝合金晶粒细化剂的研究历程

Fig. 2 Research history of the grain refiners for the aluminum alloys

程<sup>[34]</sup>。经过近80余年的发展,细化剂已由最初的盐熔剂、盐块剂演变为中间合金,合金元素的种类逐渐增多,应用范围也由变形铝合金向铸造铝合金扩展。综合考虑细化效果和使用成本,Al-5Ti-1B是目前应用最为广泛的商用细化剂。

商用Al-5Ti-1B细化剂主要以直径9.5 mm的中间合金线材形式供应,其制备工艺为“氟盐法+连铸连轧”

或“氟盐法+连续铸挤”。目前,Al-5Ti-1B在工业生产中已取得良好且稳定的晶粒细化效果,在0.2wt.%添加量条件下即可将纯铝及变形铝合金中初生 $\alpha$ -Al晶粒尺寸细化至220  $\mu\text{m}$ 以下。行业标准<sup>[35]</sup>中针对不同行业的应用需求将Al-5Ti-1B分为了三个等级,相应的牌号依次为AlTi5B1A、AlTi5B1B和AlTi5B1C。各牌号细化剂的显微组织要求和应用示例见表3<sup>[35]</sup>。

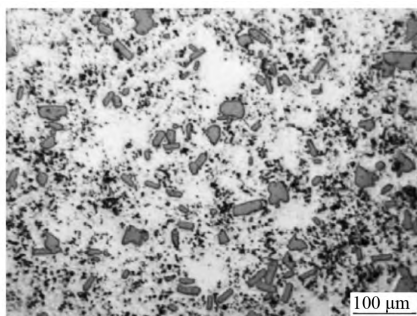
表3 各牌号Al-5Ti-1B的显微组织要求及应用示例  
Table 3 Microstructure requirements and application examples of the Al-5Ti-1B with different grades

牌号	显微组织要求			应用示例
	TiB <sub>2</sub>	TiAl <sub>3</sub>	固体夹杂	
AlTi5B1A	任意1 cm <sup>2</sup> 的纵截面中TiB <sub>2</sub> 质点平均尺寸<2 $\mu\text{m}$ ,分布大致均匀弥散,允许有尺寸<25 $\mu\text{m}$ 的TiB <sub>2</sub> 疏松团块,最多不超过3个	任意1 cm <sup>2</sup> 的纵截面中TiAl <sub>3</sub> 成块状或杆状,分布大致均匀,质点平均尺寸<30 $\mu\text{m}$ ,单个质点最大尺寸<150 $\mu\text{m}$	任意1 cm <sup>2</sup> 的纵截面中Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 及盐类附着物的长度总和<1 000 $\mu\text{m}$ 。不允许存在任何形式的硼化物(AiB <sub>2</sub> 、AlB <sub>3</sub> 、…、AlB <sub>12</sub> 等)及未溶解的固体杂质(如硅化物、耐火材料等)	双零箔和CTP印刷用热轧带材、饮料罐用板材、AA级、A级探伤制品及重要工程用材料等对内部组织要求高的铝及铝合金材料
AlTi5B1B	任意1 cm <sup>2</sup> 的纵截面中TiB <sub>2</sub> 质点平均尺寸 $\leq$ 2 $\mu\text{m}$ ,分布大致均匀弥散,允许有尺寸<50 $\mu\text{m}$ 的TiB <sub>2</sub> 疏松团块,最多不超过6个	任意1 cm <sup>2</sup> 的纵截面中TiAl <sub>3</sub> 成块状或杆状,分布大致均匀,质点平均尺寸<50 $\mu\text{m}$ ,单个质点最大尺寸<200 $\mu\text{m}$	任意1 cm <sup>2</sup> 的纵截面中Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 及盐类附着物的长度总和<3 000 $\mu\text{m}$ 。不允许存在任何形式的硼化物(AiB <sub>2</sub> 、AlB <sub>3</sub> 、…、AlB <sub>12</sub> 等)及未溶解的固体杂质(如硅化物、耐火材料等)	单零箔、PS板基、深冲用板材、1XXX、3XXX、5XXX和8XXX合金加工产品
AlTi5B1C	任意1 cm <sup>2</sup> 的纵截面中TiB <sub>2</sub> 质点平均尺寸 $\leq$ 5 $\mu\text{m}$ ,分布大致均匀弥散,TiB <sub>2</sub> 聚合团块长度不作要求	任意1 cm <sup>2</sup> 的纵截面中TiAl <sub>3</sub> 成块状或杆状,分布大致均匀,质点平均尺寸<50 $\mu\text{m}$ ,单个质点最大尺寸<200 $\mu\text{m}$	任意1 cm <sup>2</sup> 的纵截面中Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 及盐类附着物的长度不作要求。不允许存在任何形式的硼化物(AiB <sub>2</sub> 、AlB <sub>3</sub> 、…、AlB <sub>12</sub> 等)及未溶解的固体杂质(如硅化物、耐火材料等)	2XXX、4XXX和7XXX合金加工产品

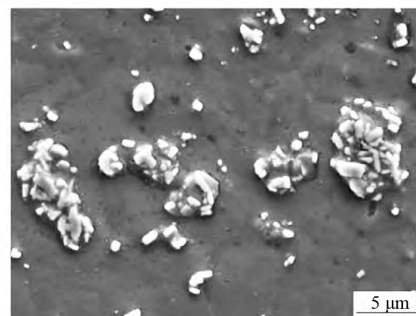
图3所示为高品质Al-5Ti-1B细化剂的显微组织<sup>[36]</sup>,主要由 $\alpha$ -Al、TiAl<sub>3</sub>和TiB<sub>2</sub>三相组成。其中TiAl<sub>3</sub>相呈块状和板条状,平均尺寸为16.7  $\mu\text{m}$ ; TiB<sub>2</sub>相呈颗粒状,平均尺寸为0.73  $\mu\text{m}$ ,并且均匀弥散分布于 $\alpha$ -Al基体中。TiAl<sub>3</sub>相和TiB<sub>2</sub>粒子的尺寸大小、形貌和分布对细化效果具有重要影响,高性能细化剂应具备微观组织特征为<sup>[36]</sup>: 细小块状的TiAl<sub>3</sub>相以及呈弥散分布的细小

颗粒状的TiB<sub>2</sub>粒子。采用具有图3所示显微组织特征的Al-5Ti-1B作为细化剂,在0.2wt.%添加量条件下,可以将纯铝晶粒尺寸细化至75.7  $\mu\text{m}$ ,且细化效果在120 min内无明显衰退<sup>[36]</sup>。

Al-5Ti-1B中起细化作用的物相为TiAl<sub>3</sub>和TiB<sub>2</sub>,当添加到待细化合金熔体中后,TiAl<sub>3</sub>会溶解并释放出溶质Ti,TiB<sub>2</sub>则可以稳定存在并成为异质形核基底。高形



(a) 光学显微镜组织



(b) 扫描电镜组织

图3 高品质Al-5Ti-1B细化剂显微组织

Fig. 3 Microstructures of the high quality Al-5Ti-1B grain refiner

核潜能的形核粒子（表面覆盖由TiAl<sub>3</sub>改性层的TiB<sub>2</sub>）配合上高生长限制因子的溶质元素（Ti）是Al-5Ti-1B能够实现铝合金晶粒尺寸显著细化的关键原因<sup>[37]</sup>。然而，由于存在Si中毒现象，当铝合金中Si含量超过3wt.%后，Al-5Ti-1B的晶粒细化效果随Si含量升高而减弱直至失效，导致其难以实现高Si含量铸造铝合金的有效细化<sup>[38]</sup>。

为克服Al-5Ti-1B的Si中毒问题，Al-B、Al-Ti-C、Al-Nb-B、Al-Ti-B-C、Al-Ti-B-RE、Al-Ti-Nb-B体系被相继提出并用于高Si含量铸造铝合金的细化。由于TiC粒子在铝合金熔体中的稳定性差，而AlB<sub>2</sub>粒子会被Ti毒化而失效，Al-Ti-C和Al-B在商用铸造铝合金细化中的应用受到了限制。Al-Ti-B-RE在Al-Ti-B的基础上引入了RE元素（如La、Ce等），可以作为表面活性物质吸附到TiAl<sub>3</sub>和TiB<sub>2</sub>表面，起到改善TiAl<sub>3</sub>和TiB<sub>2</sub>粒子分散状态、提高其细化潜能以及抗衰老能力。此外，对于含稀土元素的细化剂，其细化效果具有更低的冷速敏感性<sup>[39-40]</sup>，可以在大尺寸复杂薄壁铸件上取得更均匀的整体细晶效果<sup>[41-42]</sup>。在Al-Ti-B-C体系中，最新报道的Al-TCB晶种合金<sup>[43-45]</sup>含有B掺杂型TiC以及C掺杂型TiB<sub>2</sub>两种形核粒子，不仅可以在高Si含量铝合金中稳定存在，而且具有显著的抗Si中毒能力。

Nb与Ti性质相似，NbAl<sub>3</sub>与TiAl<sub>3</sub>、NbB<sub>2</sub>与TiB<sub>2</sub>晶体结构相同、晶格参数相近，且Nb基化合物在Al-Si合金熔体中的化学稳定性更高，近年来Al-Nb-B体系受到了研究人员的广泛关注并已在高Si含量铸造铝合金上取得了优于Al-5Ti-1B的细化效果<sup>[46]</sup>。然而，虽然Nb具备良好的抗Si中毒能力，但其作为溶质元素所起到的晶粒生长限制作用远不如Ti，同时NbB<sub>2</sub>的密度要大于TiB<sub>2</sub>，导致其在细化处理过程中更容易沉降失效。因此，细化效率低及抗衰老性差的问题使得Al-Nb-B难以推广应用。最近提出的Al-Ti-Nb-B体系<sup>[47]</sup>综合了Al-Ti-B体系的高细化效率、高抗衰老性以及Al-Nb-B体系的抗Si中毒能力，有望成为具有工业实用价值的商用细化剂。

然而，目前已见报道的Al-Ti-Nb-B细化剂中Nb含量均远高于Ti含量，仍是以Nb作为起细化作用的主要元素，因此尚无法从根本上解决溶质Nb细化效率低以及Nb基形核粒子抗衰老性差的问题。为进一步提升Al-Ti-Nb-B体系的细化效率和抗衰老性，可以通过成分设计及组织调控，优化TiB<sub>2</sub>尺寸分布<sup>[48]</sup>，以Nb改性TiB<sub>2</sub>作为形核粒子<sup>[49-50]</sup>，并将Ti作为提供成分过冷、限制晶粒生长的主要溶质元素<sup>[45]</sup>。专利[51]提出了一种低Nb含量的Al-4Ti-1Nb-1B细化剂，其制备工艺分两步完成：首先将作为异质形核基底的TiB<sub>2</sub>粒子加入到Al-10Nb合金熔体中进行抗Si中毒改性；然后再根据合金设计成分以Al-5Ti中间合金的形式引入所需的Ti，以纯铝锭的

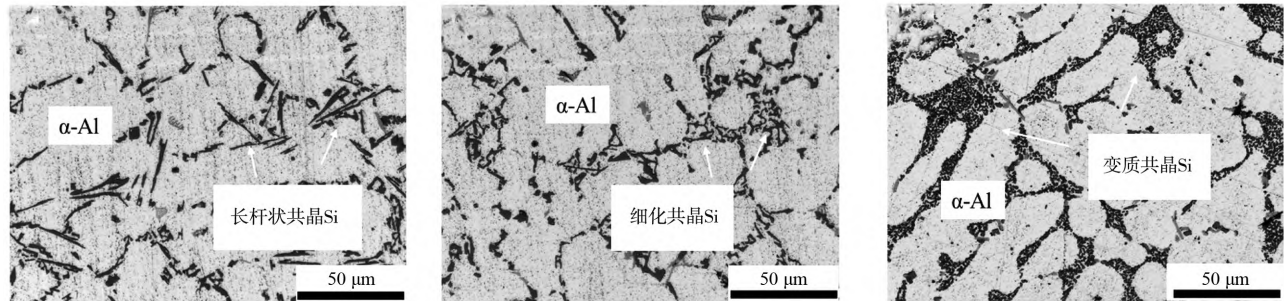
形式补充添加剩余的Al。通过前述两步合金化反应工艺制备的Al-4Ti-1Nb-1B细化剂中起细化作用的第二相粒子为TiAl<sub>3</sub>、NbAl<sub>3</sub>和表面具有Nb改性层的TiB<sub>2</sub>，兼具高细化能力、高抗Si中毒能力以及高抗衰老能力。在0.5wt.%添加量条件下，可以将Al-7Si合金晶粒尺寸细化至168 μm左右，而且在经120 min的长时保温后仍然具有243 μm左右的细晶效果，是一种十分有效的铸造铝合金用晶粒细化剂。

### 3 共晶Si变质处理技术

未经变质处理的亚共晶铝硅合金中共晶Si相会呈粗大的针状或层片状，严重割裂α-Al基体，削弱合金力学性能，尤其是会显著降低合金塑性。因此，必须对共晶Si进行变质处理，以将其从粗大的针状或层片状转变为细小的颗粒状。最初共晶Si的变质是通过向合金熔体中添加Na来实现，但是Na的蒸汽压较低，在熔炼过程中容易挥发和烧损，导致其变质效果随时间延长而迅速衰退，存在有效变质时间短的问题。随后研究人员发现Sr同样对共晶Si具有变质作用，并且可以克服Na有效变质时间短、腐蚀和污染环境的缺点。Sr被证实是一种长效变质剂，已经在工业生产中得到了广泛应用。以Al-10Sr中间合金的形式向铝硅合金熔体中加入微量Sr（0.02wt.%）就可以获得显著的变质效果。但Sr是一种比较活泼的金属，在加入过程中容易氧化烧损，同时会加剧合金熔体的吸氢行为，增加铸件针孔度以及缺陷含量。

为克服Na和Sr所存在的缺点，采用更加高效、环保的稀土元素作为变质剂是未来的发展趋势。图4所示为不同变质处理条件下铸态Al-7Si-0.45Mg合金中共晶Si颗粒形态的金相显微组织图<sup>[52]</sup>。未变质时，共晶Si呈长针状，形状不规则。添加Sr和La后，共晶Si的尺寸均明显减小。但与添加Sr后共晶Si形貌更加规则和圆整不同，La只起到细化共晶Si尺寸的作用，对共晶Si形貌则影响不大。

图5所示为经La变质处理后共晶Si的TEM明场像及相应的选区衍射斑点<sup>[52]</sup>。图5b中的衍射斑点对应于图5a中的带状位置，标定结果表明，该共晶Si颗粒内部并不存在孪晶。除此之外，共晶Si颗粒内部也没有观察到富La相。与Sr或Na的孪晶诱导机制不同，La对共晶Si的变质作用主要归因于吸附细化。由于La在铝基体中的固溶度较低，在共晶反应发生的过程中，La将会聚集在生长界面前沿，当La富集到一定浓度，就会与Al和Si反应生成Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>La相，该相会阻碍共晶Si的进一步生长。同时，当共晶区域形成较多的富La相时，会阻碍溶质原子的扩散过程，成分过冷减弱，因此共晶Si的生长速度减慢，尺寸相应的得到了细化。



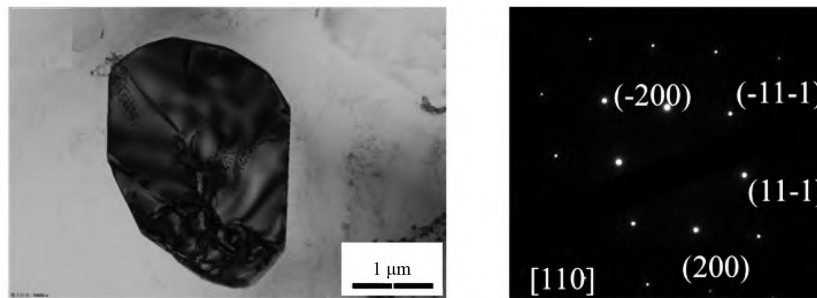
(a) 无变质剂

(b) 0.15wt.%La

(c) 0.015wt.%Sr

图4 不同变质处理条件下铸态Al-7Si-0.45Mg合金中的共晶Si形貌

Fig. 4 Morphologies of the eutectic silicon in as-cast Al-7Si-0.45Mg alloy under different modification conditions



(a) TEM明场像

(b) 选区衍射花样

图5 经La变质处理后的共晶Si

Fig. 5 Eutectic silicon after La modification

## 4 结束语

高质量的合金熔体是获得高性能铸件产品的必要前提条件，合金熔体中的气体和夹杂物等杂质若不能在铸造前被有效去除，则在凝固后会成为铸件的薄弱环节，显著削弱铸件性能，甚至造成铸件报废。而未经有效细化和变质处理的合金熔体在凝固后则会形成粗大的 $\alpha$ -Al晶粒和共晶Si相，同样会对铸件性能造成不利影响。合金熔体的净化、晶粒细化和变质处理是

获得高性能铝合金铸件的关键技术。随着铸造行业对绿色铸造及循环经济的重视程度不断提高，以及飞速推进的汽车轻量化进程对铝合金材料性能提出的日益严苛的要求，合金熔体的净化及细化变质处理也将面临更加严峻的挑战，开发无毒环保、成本低廉的高效精炼剂、细化剂和变质剂以及相配套的熔体处理工艺是未来的重点研究方向。

### 参考文献:

- [1] 马鸣图, 李志刚, 易红亮, 等. 汽车轻量化及铝合金的应用 [J]. 世界有色金属, 2006 (10): 10-14.
- [2] 王孟君, 黄电源, 姜海涛. 汽车用铝合金的研究进展 [J]. 金属热处理, 2006, 31 (9): 34-38.
- [3] 贾泮江, 陈邦峰. 高强高韧铸造铝合金的研究现状及发展 [C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会学术年会, 2007.
- [4] 赵丽娟. 高强韧铸造铝合金材料的研制 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (7): 63-65.
- [5] 马鸣图, 易红亮, 路洪洲, 等. 论汽车轻量化 [J]. 中国工程科学, 2009, 11 (9): 20-27.
- [6] 郑晖, 赵曦雅. 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用 [J]. 锻压技术, 2016, (2): 1-6.
- [7] BAYOUMI M A, NEGM M I, EL-GOHR Y A M. Microstructure and mechanical properties of extruded Al-Si alloy (A356) in the semi-solid state [J]. Materials & Design, 2009, 30 (10): 4469-4477.
- [8] NAFISI S, LASHKARI O, GHOMASHCHI R, et al. Microstructure and rheological behavior of grain refined and modified semi-solid A356 Al-Si slurries [J]. Acta Materialia, 2006, 54 (13): 3503-3511.
- [9] WU X, ZHANG H, ZHANG F, et al. Effect of cooling rate and Co content on the formation of Fe-rich intermetallics in hypoeutectic

- Al7Si0.3Mg alloy with 0.5%Fe [J]. *Materials Characterization*, 2018, 139: 116–124.
- [10] GUTIERREZ-URRUTIA I, MUÑOZ-MORRIS M A, MORRIS D G. Contribution of microstructural parameters to strengthening in an ultrafine-grained Al-7% Si alloy processed by severe deformation [J]. *Acta Materialia*, 2007, 55 (4): 1319–1330.
- [11] 马震. 基于半固态流变性能的铝合金成形过程中流动行为研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2022.
- [12] LI Y, JIANG Y, HU B, et al. Novel Al-Ti-Nb-B grain refiners with superior efficiency for Al-Si alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2020, 262–267.
- [13] 敖晓辉. 废杂铝熔炼再生过程工艺能效与质量预报研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [14] 傅高升, 陈文哲, 陈鸿玲, 等. 铝熔体高效净化的理论及净化处理技术的现状分析 [J]. *铸造技术*, 2004, 25 (4): 290–292.
- [15] FAN Z, GAO F, WANG Y, et al. Effect of solutes on grain refinement [J]. *Progress in Materials Science*, 2022, 123: 100809.
- [16] 万兵兵. 再生铝硅合金熔体净化及变质处理技术研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2018.
- [17] 周博. 再生航空铝合金热处理制度及腐蚀行为研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [18] 段梦平. 区域熔炼法制备5N高纯铝的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [19] 唐小龙. 铝及铝-硅合金熔体净化处理及其机理研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2011.
- [20] 谭群燕, 王燕红. 铝合金熔体处理技术 [J]. *热加工工艺*, 2007, 36 (17): 65–67.
- [21] 张辉, 孙彦华, 岳有成, 等. 再生铝合金熔体净化技术的发展现状 [J]. *铸造技术*, 2020, 41 (6): 573–575.
- [22] ZHANG L, LÜ X, TORGERSON A T, et al. Removal of impurity elements from molten aluminum: A review [J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2011, 32 (3): 150–228.
- [23] STEPHEN K, JOHN R. Flux injection/rotary degassing process provides cleaner aluminum [J]. *Modern Casting*, 1995 (4): 37–40.
- [24] EISTER W C, KRUMME W R. An evaluation of a SNIF unit as an inclusion removal and degassing device [J]. *Light Metals*, 1991: 1171–1177.
- [25] BILDSTEIN J, VENTRE I. Alpur technology present and future [J]. *Light Metals*, 1993: 755–763.
- [26] HAMPTON D T, MOORES A, TESSANDORI J L. Review of operation and performance of the rapid degassing [J]. *Light Metals*, 1991: 1159–1163.
- [27] MIRGAUX O, ABLITZER D, WAZ E, et al. Mathematical modeling and computer simulation of molten aluminum purification by flotation in stirred reactor [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2009, 40: 363–375.
- [28] 徐惠彬, 张虎, 张花蕊, 等. 一种基于三通道转子的铝合金旋转喷吹精炼方法. 北京市: CN117604311A [P]. 2024–02–27.
- [29] 程颖, 张虎, 张花蕊, 等. 一种精炼剂与精炼气体共吹的合金熔体净化方法. 北京市: CN117587239A [P]. 2024–02–23.
- [30] 丁宁, 高峰, 王志宏, 等. 原铝与再生铝的能耗和温室气体排放对比 [J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22 (10): 2908–2915.
- [31] 张花蕊, 陈焕良, 张虎. 一种含高比例回炉料铝合金用精炼剂及其使用方法. 北京市: CN106834876B [P]. 2017–12–29.
- [32] 程颖, 洪涛, 魏怀远, 等. 返回料及精炼工艺对A356铝合金净化效果的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42 (11): 1325–1330.
- [33] 张花蕊, 马晗雨, 杜明, 等. 低压铸造A356铝合金熔体氢含量及其对铸件针孔影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42 (11): 1321–1325.
- [34] 许晋. 亚共晶铸造铝硅合金用Al-Nb-B细化剂优化及晶粒尺寸预测模型 [D]. 上海: 上海大学, 2020.
- [35] YS/T 447.1-2011, 铝及铝合金晶粒细化用合金线材 第1部分: 铝-钛-硼合金线材 [S].
- [36] 戚文军, 王顺成, 陈学敏, 等. 高品质Al-5Ti-1B合金线的组织与晶粒细化性能 [J]. *轻合金加工技术*, 2013, 41 (1): 28–32.
- [37] 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.
- [38] LI Y, HU B, LIU B, et al. Insight into Si poisoning on grain refinement of Al-Si/Al-5Ti-B system [J]. *Acta Materialia*, 2020, 187: 51–65.
- [39] ZHANG H R, LIU Z B, LI Z Z, et al. Cooling rate sensitivity of RE-containing grain refiner and its impact on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2016, 29 (5): 414–421.
- [40] WU X Y, ZHANG H R, JIANG F, et al. Microstructure and grain refinement performance of a new Al-5Nb-RE-B master alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47 (7): 2017–2022.
- [41] 张花蕊, 张虎. 一种铸造铝合金用低冷速敏感高形核能力AlNbTiBRE晶粒细化剂及其制备方法. 北京市: CN105624477B [P]. 2017–03–15.
- [42] 张花蕊, 张虎. 一种铝合金用低冷速敏感高形核能力AlNbTiBRE复合细化变质剂及其制备方法. 北京市: CN105568022B [P]. 2017–4–19.
- [43] 姜坤, 刘桂亮, 赵凯, 等. 抗Si“中毒”AlTiC-B晶种合金对ZL114铝合金组织和力学性能的影响 [J]. *材料导报*, 2021, 35 (16): 16076–16080.
- [44] 王旭, 李道秀, 赵凯, 等. Al-7Si-0.35Mg合金的强韧化设计 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43 (9): 1246–1251.
- [45] LI D, YAN X, FANG Y, et al. An anti Si/Zr-poisoning strategy of Al grain refinement by the evolving effect of doped complex [J]. *Acta Materialia*, 2023, 249: 118812.
- [46] BOLZONI L, NOWAK M, BABU N H. Grain refinement of Al-Si alloys by Nb-B inoculation. Part II: Application to commercial alloys [J].

- Materials and Design, 2015, 66: 376–383.
- [47] XU J, LI Y, MA K, et al. In-situ observation of grain refinement dynamics of hypoeutectic Al-Si alloy inoculated by Al-Ti-Nb-B alloy [J]. Scripta Materialia, 2020, 187: 142–147.
- [48] 程颖, 张花蕊, 张虎, 等. 一种实现TiB<sub>2</sub>尺寸可控的Al-Ti-B细化剂制备方法. 北京市: CN115558821B [P]. 2023-03-10.
- [49] 程颖, 张花蕊, 张虎, 等. 一种铸造铝硅合金用Al-Nb-TiB<sub>2</sub>细化剂的制备方法. 北京市: CN115627376B [P]. 2023-04-11.
- [50] 程颖, 张花蕊, 张虎, 等. 一种两步法制备铝基合金细化材料的方法. 北京: CN115652120B [P]. 2023-03-10.
- [51] 程颖, 张花蕊, 张虎, 等. 一种具有限制生长元素的铝硅合金用细化剂及制备方法. 北京市: CN115679161B [P]. 2023-03-28.
- [52] 武晓燕. 汽车车轮用Al-Si合金的组织控制和性能优化 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2019.

---

## Development Status of Melt Treatment Technologies of Cast Aluminum Alloy

DU Ming<sup>1</sup>, CHENG Ying<sup>2</sup>, ZHANG Hua-rui<sup>2</sup>, ZHANG Hu<sup>2</sup>

(1. Hangda Material Technologies (Zhucheng) Co., Ltd., Zhucheng 262200, Shandong, China; 2. Research Institute of Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

### Abstract:

Cast aluminum alloy has several advantages such as lightweight, high specific strength and good casting properties, etc. It is an excellent lightweight material and has broad application prospects in automobile industry. The quality of alloy melt has an important effect on the final properties of the castings, and the purification, grain refinement and modification treatment before casting are necessary prerequisites for obtaining castings with high properties. This article introduces the development status of cast aluminum alloy's purification technology, grain refinement technology and eutectic Si modification technology, aiming to provide reference for the development and application of the advanced aluminum alloy melt treatment technology.

### Key words:

cast aluminum alloy; melt purification; grain refinement; modification treatment

---

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundry.com)