

铝合金晶粒细化方法及机理研究进展

张建英¹ 张洪亮² 李海燕¹ 曹仁伟¹ 朱明伟²

(1. 海洋化工研究院有限公司, 青岛 266071; 2. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 沈阳 110136)

摘要 铝合金铸造时容易产生粗大晶粒组织, 导致其力学和耐蚀性能不佳。采用适当的晶粒细化方法可避免粗晶产生, 并促进等轴晶区的形成, 进而改善合金的综合性能。综述了有关铝合金晶粒细化的方法和效果, 分析了主要细化方法的作用机理。总结了各种细化方法存在的问题, 并对其未来的发展进行了展望。

关键词 铝合金; 凝固; 晶粒细化; 细化机理; 稀土元素

中图分类号 TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240345

Research Progress in Grain Refinement Methods and Mechanisms of Aluminum Alloys

ZHANG Jianying¹, ZHANG Hongliang², LI Haiyan¹, CAO Renwei¹, ZHU Mingwei²

(1. Marine Chemical Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266071;

2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136)

Abstract: Aluminum alloy is prone to coarse grain structure during casting, resulting in poor mechanical properties and corrosion resistance. The grain refinement method can avoid the production of coarse grains and promote the formation of equiaxed crystal zone, thus improving the comprehensive properties of aluminum alloy. The grain refinement methods of aluminum alloy and effects were reviewed, and the action mechanism was analyzed. The existing problems of grain refinement methods were summarized, and the future development was prospected.

Key Words: Aluminum Alloy, Solidification, Grain Refinement, Refinement Mechanism, Rare Earth Elements

收稿日期: 2024-08-26; 修订日期: 2024-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52371097); 辽宁省教育厅高等学校基本科研资助项目(LJKZ0170)

第一作者简介: 张建英, 男, 1986年出生, 高级工程师, E-mail: ying110011@126.com

通信作者: 张洪亮, 男, 1983年出生, 副教授, E-mail: hlzhang@sau.edu.cn

引用格式: 张建英, 张洪亮, 李海燕, 等. 铝合金晶粒细化方法及机理研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1340-1347.

ZHANG J Y, ZHANG H L, LI H Y, et al. Research progress in grain refinement methods and mechanisms of aluminum alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1340-1347.

- [22] 王茹, 邱铨强, 吴蔚, 等. Ag微合金化对Al-Mg-Si合金析出相结构的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(8): 1127-1132.
- [23] 赵燕, 张宇博, 李廷举, 等. 稀土元素La对Al-0.5Mg-0.24Si合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(10): 1219-1223.
- [24] 陈保安, 李梦琳, 迟铨, 等. 稀土添加对Al-Mg-Si合金微观组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(7): 100-105.
- [25] FLORES F U, SEIDMAN D N, DUNAND D C, et al. Development of high-strength and high-electrical-conductivity aluminum alloys for power transmission conductors[J]. Light Metals, 2018, 2: 247-251.
- [26] 雷文魁, 王顺成, 郑开宏, 等. La, Ce混合稀土对6201电工铝合金组织性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2015, 9(1): 20-24.
- [27] 王海生, 闵洁, 王鸿钧. 含Zr, Ce稀土元素铝合金导线的微结构与导电性能研究[J]. 稀有金属, 2020, 44(7): 716-721.
- [28] KARABAY S. Influence of AlB₂ compound on elimination of incoherent precipitation in artificial aging of wires drawn from redraw rod extruded from billets cast of alloy AA-6101 by vertical direct chill casting[J]. Materials & Design, 2006, 29(7): 1364-1375.
- [29] 李东阳, 李艳霞. Al-Si-Mg-B-Sr合金的均匀化退火工艺[J]. 金属热处理, 2024, 49(2): 199-203.
- [30] ROMETSCH P A, XU Z, ZHONG H, et al. Strength and electrical conductivity relationships in Al-Mg-Si and Al-Sc alloys[J]. Materials Science Forum, 2014, 794-796: 827-832.
- [31] LIN G Y, ZHANG Z P, WANG H Y, et al. Enhanced strength and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloy by thermo-mechanical treatment[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A650: 210-217.
- [32] SAUVAGE X, BOBRUK E, MURASHKIN M, et al. Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al-Mg-Si alloys[J]. Acta Materialia, 2015, 98: 355-366.
- [33] GB/T 23308-2009. 架空绞线用铝-镁-硅系合金圆线[S].
- [34] ASTM B398-2015. Standard specification for aluminum-alloy 6201-T81 and 6201-T83 wire for electrical purposes[S].
- [35] 林锐, 张礼朝, 张培勇, 等. 1000 kV特高压交流输电线路大跨越导线选型[J]. 电力建设, 2015, 36(5): 91-98.
- [36] 胡静, 周天国, 李振山, 等. Al-Mg-Si合金导线的生产现状及其发展前景[J]. 轻合金加工技术, 2018, 46(1): 5-8.

(编辑: 栗万仲)

铝合金具有密度低、耐腐蚀性好、比强度高和导电导热性能优异等特点,被广泛应用于航空航天、汽车、电子和建筑等领域^[1-7]。铝合金铸造时,由于熔炼、铸造工艺不当,会出现粗大晶粒缺陷,如浇注温度过高,型壁表面生成的游离晶粒再熔化,致使组织粗大等^[8];或当冷却速度过快时,由于消除了过冷区,在含Ti或Si的铸造铝合金中存在明显的晶粒粗化^[9]。粗晶组织会大幅降低构件的力学性能、耐腐蚀性能和抗疲劳性能,因此必须得到有效控制。根据 Hall-Petch 公式 $\sigma_s = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$ (其中, σ_0 、 k 为与金属晶体类型有关的常数)^[10],材料的晶粒尺寸 d 越小,屈服强度 σ_s 越高。晶粒越细小,晶界面积越大,塑性变形可以均匀地分散在更多的晶粒中,减少应力集中,裂纹在扩展时需要穿越的晶界也越多,消耗更多的能量,从而提高材料的塑性和韧性。同时,

细晶组织还可起到防止铸锭开裂、细化第二相并改善其加工性能的作用^[11-12]。目前,铝合金晶粒细化的方法主要有机械振动^[13-14]、电磁场振动^[15-16]、超声振动^[17]和添加细化剂^[18-21]等方法。早期使用较多的是 Ti、B、Zr 和 Nb 等盐类细化剂^[18],后发展为 Al-Ti、Al-Ti-B、Al-Ti-C 等合金细化剂^[19-21],之后由于稀土元素的引入又出现了稀土细化剂和复合细化剂。本研究综述铝合晶粒细化的方法、效果以及主要方法的细化机理,指出铝合金晶粒细化领域存在问题,并对其发展进行展望。

1 晶粒细化常用方法

表 1 为铝合金晶粒细化常采用的方法及其细化效果,包括快速冷却、机械振动搅拌、电磁搅拌、超声振动和添加细化剂等。

表 1 铝合金晶粒细化方法及其效果^[13-17, 19-40]
Tab.1 Grain refinement methods of aluminum alloys and its effect^[13-17, 19-40]

细化方法		铝合金类型	细化效果
快速冷却		7A09 铝合金	α -Al 晶粒尺寸明显减小,硬度也逐渐提高
		高硅铝合金	随着冷速提高,初生 Si 晶粒由粗大针状变为细小针状
机械振动搅拌	凝固过程中振动	Al-5Cu 合金	在凝固初期施加机械振动可以有效细化 α -Al 晶粒
		2A14 铝合金	随振动频率提高, α -Al 等轴树枝晶逐渐细化,频率为 45 Hz 时,合金力学性能最优
	凝固后振动	A356 合金	粗大 α -Al 晶粒和 Si 颗粒破碎并均匀分布
电磁搅拌	电磁复合场	ZL114A 铝合金	α -Al 晶粒得到细化,共晶 Si 析出相减少
	磁场	铝	结晶中心的形核速率增加,大大缩短了结晶时间
	电磁复合场	LY12 铝合金	α -Al 树枝晶被折断、晶粒细化明显
超声振动	无搅拌	2024 铝合金	超声振动击碎了初生 α -Al 枝晶,细化了晶粒
		Al-11Cu 合金	超声的细化作用使铸锭组织产生大区域 α -Al 等轴晶粒
	有搅拌	6061 铝合金	与不施加超声搅拌处理相比, α -Al 晶粒细化了约 20 倍
添加细化剂	K ₂ TiF ₆ 、KBF ₄		细化不均匀且不稳定,而且 Ti、B 的回收率较低
	Al-10Ti	罐用铝材	生产成本较低廉,但 α -Al 晶粒细化效果及稳定性都不佳
	Al-5Ti-B	5052 铝合金	随细化剂含量增加,铸锭 α -Al 晶粒平均尺寸不断减小
	Al-Ti-B	5A06 铝合金	随 Ti、B 含量的增加, α -Al 晶粒得到细化
	Al-5Ti-B	Al-Mg 合金	添加 0.4% 的 Al-5Ti-1B, α -Al 晶粒尺寸由 88.5 μm 降至 44.9 μm
	Al-5Ti-0.2C	PS 版用铝板基	第二相粒子细小、分布均匀,无团聚现象
	Al-5Ti-0.25C	2024 铝合金	随细化剂含量增加, α -Al 晶粒逐渐细化,添加量为 0.3% 最佳
	Al-Ti-Nb-B	Al-10Si 合金	将合金 α -Al 晶粒细化至 109~125 μm ,显著低于商用 Al-5Ti-B 细化剂的细化效果(不低于 1 000 μm),且具有良好的抗 Si 中毒效果
	Al-5Ti-B-Er	3104 铝合金	随 Er 含量增加, α -Al 晶粒组织显著细化,晶粒等轴化倾向明显
	Al-3Ti-B-RE	罐用铝材	RE 的加入使 α -Al 晶粒细小等轴晶,细化剂的抗衰减能力提高 50%
	Er	Al-6Zn-2Mg	Er 含量为 0.4% 时, α -Al 晶粒细化效果最显著
	Sc	7055 铝合金	添加 0.25% 的 Sc,使合金 α -Al 晶粒尺寸减小了约 50%
	La	2024 铝合金	随 La 含增加, α -Al 晶粒组织逐渐细化,当 La 含量为 0.3% 时最佳
	Sc 和 Y	7055 铝合金	Sc 和 Y 的添加量都为 0.25% 时,合金的性能最佳
Gd、Nd、Ce 等	A356 铝合金	初生 α -Al 晶粒尺寸整体减小,有少量球状组织出现	

2 外场处理

2.1 快速冷却

通过控制铸造工艺,如采用快速冷却技术(如水冷、风冷、喷雾冷却等)来增大过冷度,提高形核率,从

而获得细晶。夏龙等^[22]研究了冷却速率对快速凝固制备 7A09 铝合金晶粒尺寸的影响,发现不仅合金的晶粒尺寸随冷却速率的增加而减小,而且合金的硬度也随之提高。孟瑞林等^[23]在对高硅铝合金凝固组织的影响研究中得到了类似的结果,冷速为 10 K/s 时获得含粗大针状初生 Si 晶粒的铝合金。冷速上升到 20 K/s 时,

可获得细小针状初生Si组织。冷速在 $10\sim 10^3$ K/s之间时存在临界冷速,使初生Si相的形态转变为块状和多角状。当冷速达到 10^6 K/s时即可获得超细晶初生Si组织。

2.2 机械振动

机械振动细化晶粒的方法可分为两种,一是在铝合金凝固过程中通过振动作用促使枝状晶粒断裂使晶粒细化;二是在铝合金凝固后,通过搅拌头对铸锭组织的高速搅拌摩擦作用,促使 α -Al晶粒发生动态再结晶获得细小等轴晶粒。GUO H M等^[24]发现,在Al-5Cu合金凝固过程中,随着机械振动加速度的升高,晶粒细化效果逐渐显著,见图1。邓嘉宏等^[25]探究了机械振动对2A14铝合金TIG焊接接头组织与性能的影响,发现高温焊接作用下促使焊接处组织迅速熔化,施

加的振动使组织在凝固时产生晶粒细化效果,振动频率由25 Hz上升到35、45和55 Hz,组织晶粒也由90 μm 不断细化至50 μm 左右。振动频率为45 Hz时合金力学性能最好,抗拉强度和伸长率达到最大值。在合金凝固后,对其施加高速搅拌摩擦,在大塑性变形和热作用下,组织发生动态再结晶,也可以获得良好的细化效果。MA Z Y等^[13-14]采用搅拌摩擦工艺处理A356铝合金,发现粗大 α -Al晶粒和Si颗粒产生破碎并均匀分布于合金中,使晶粒得到细化。马琳等^[26]采用搅拌摩擦加工技术对A356合金进行表面处理,发现粗大的第二相共晶Si被打碎, α -Al晶粒在变形下发生动态再结晶得到了细小的等轴晶粒,但是由于加工时产生的热量可以加速晶粒的长大,从而减弱晶粒细化的效果。

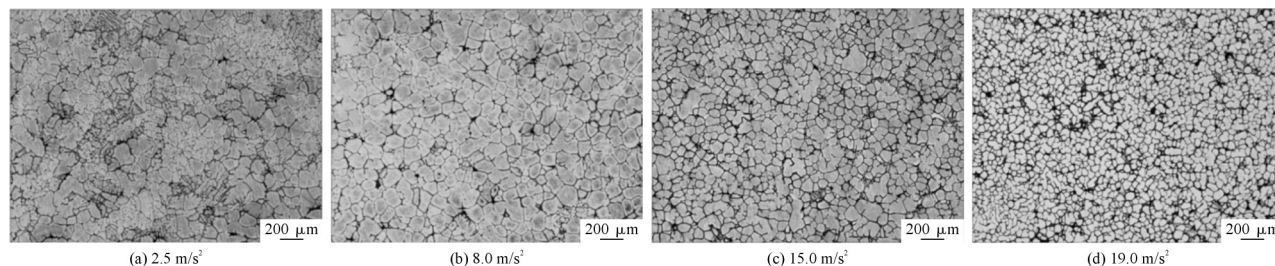


图1 不同振动加速度时Al-5Cu合金的显微组织^[24]

Fig.1 Microstructures of Al-5Cu alloy under different vibration acceleration^[24]

2.3 电磁搅拌

铝合金熔体在电场或磁场中凝固时会产生剧烈搅拌,使枝晶断裂或重新形核起到晶粒细化的作用。常云龙等^[16]发现,ZL114A铝合金在励磁电流为1 A、励磁频率为70 Hz的磁场条件下制备的 α -Al晶粒由大片状变为小片状,共晶Si的粗大花纹也变得细小,晶粒细化效果显著。VDOVIN K N等^[27]研究了磁场对铝熔体过冷度的影响,发现施加磁场后,铝熔体结晶的起始过冷度较高,结晶中心的形核速率增加,缩短了结晶时间,使晶粒细化。訾炳涛等^[15]采用强脉冲磁场和电流处理LY12铝合金,发现树枝晶被折断,获得细晶组织。且在一定范围内,晶粒细化效果与电磁场强度成正比,电磁场强度越大,晶粒越细小。

2.4 超声振动

铝合金凝固时引入超声振动,促使树枝晶断裂而获得细晶组织。张立杰等^[28]研究发现,2024铝合金凝固时经过超声振动处理后,其硬度和耐腐蚀性都得到了很大的提升,其原因为超声波的空化作用对熔体中的固体颗粒产生了强烈振动作用,击碎了枝状晶,增加了形核率,使晶粒得到细化。BALASUBRAMANI N

等^[29]研究发现,超声声流产生的低温梯度可以导致大部分熔体过冷,使铸锭组织产生大区域等轴晶。袁涛等^[17]通过超声搅拌焊接工艺处理6061铝合金,在焊接电流为70 A、焊接速度为1.69 mm/s的条件下,发现超声搅拌后合金的晶粒尺寸由不施加超声搅拌的188 μm 减小至9~10 μm ,晶粒得到明显细化。

3 添加细化剂

3.1 传统细化剂

铝合金细化最早使用的细化剂是盐类细化剂(如 K_2TiF_6 和 KBF_4),该类细化剂的稳定性不佳,Ti、B的回收率低,而且制备工艺难控制,对环境和熔炉腐蚀较严重,逐渐被淘汰^[30]。之后出现了Al-Ti合金细化剂,其细化效果强于盐类细化剂,且成本较低,得到了广泛的使用^[41-42],但其主要问题是Al-Ti二元合金存在细化后的持久性不高和晶粒细化的稳定性不高的缺陷^[43]。研究发现,随着时间延长,作为异质形核部位的 TiAl_3 颗粒会逐渐溶解在铝液中,导致细化效果下降^[44]。

后期在Al-Ti细化剂中加入了B,使其稳定性和细化效果得以改善,开启了Al-Ti-B合金细化剂的时代^[18]。目前,Al-Ti-B合金线材仍是应用最为广泛的细

化剂。与国外相比,早期国产Al-Ti-B细化剂的B含量低、杂质较多^[45-46],细化效果不稳定。纪剑峰等^[19]研究了Al-5Ti-B细化剂含量对5052铝合金板锭晶粒尺寸的影响。发现随细化剂含量增加,铸锭平均晶粒尺寸减小,由较大的菊花状等轴晶粒转变为细小的球状等轴晶粒。细化剂含量(质量分数,下同)从0.06%提升至0.46%时,铸锭晶粒度由2.0级提升到4.0级,细化效果显著。许晨玲^[31]制备了不同Ti、B含量的5A06铝合金,发现随Al-Ti-B细化剂添加量的增加,合金晶粒度逐渐减小。WANG L等^[32]添加0.4% Al-5Ti-1B细化剂对Al-Mg合金进行改性,观察到平均晶粒尺寸由88.5 μm 减小至44.9 μm 。Al-Ti-B细化剂也存在一些不足,如其内部的TiB₂粒子团聚现象比较严重^[47-49],会减少有效形核数目,还会导致高熔点的Fe、Si在TiB₂粒子处首先形核,使组织晶粒不均匀,影响合金的力学性能。同时,当Al-Ti-B细化剂作用于含Zr^[47]或Si($\geq 7\%$)^[50-51]元素的铝合金中,常常会导致细化效果不好或者抗衰退能力不良的现象,即产生细化剂“中毒”现象。LI Y等^[51]采用电镜、第一性原理计算和热力学计算相结合的方法,系统研究了Al-Si/Al-5Ti-B体系中的Si中毒现象。通过热力学计算表明,即使在Si含量为10%的合金中,硅化物也不容易形成。同时,发现在TiAl₃二维化合物中溶解了较高含量的Si,形成了较强的Ti-Si共价键,扰乱了TiAl₃二维化合物的晶格,降低了其与 α -Al的化学相互作用,阻碍了 α -Al的外延成核,从而导致Si中毒。此结果与通常认为的硅化物包裹并因此毒害TiB₂^[50]不同,表明Al-5Ti-B导致的Si中毒主要是由于形成了Si掺杂的TiAl₃二维化合物所致。

BANERJI A等^[52]发现在Al-Ti合金中引入C元素形成的Al-Ti-C合金的细化效果良好,但遇到Zr等元素容易发生“中毒”现象。Al-Ti-C主要由TiAl₃相、TiC粒子以及 α -Al基体组成,其中的TiAl₃和TiC具有细化作用,TiC粒子聚集倾向小,导致形核中心多且均匀,使晶粒大小和第二相分布均匀^[53]。黄元春等^[20]用Al-5Ti-1B和Al-5Ti-0.2C分别作为铝板的细化剂,发现添加前者的铝板中Fe、Si等第二相粒子尺寸粗大且分布杂乱,局部出现了团聚的现象。但添加Al-5Ti-0.2C的铝板,第二相粒子细小且分布均匀,无团聚现象。王海超等^[33]采用Al-5Ti-0.25C中间合金细化2024合金,合金中 α -Al晶粒平均尺寸随细化剂含量增加呈先降低后缓慢升高的趋势。当未添加Al-5Ti-0.25C时,组织呈现粗大的树枝晶,平均晶粒尺寸为150 μm ;添加0.2%的Al-5Ti-0.25C细化剂时,得到平均粒径约为82 μm 的等轴晶;Al-5Ti-0.25C添加量增加到0.5%时,晶粒尺寸继续减小至48 μm 左右。Al-Ti-C表现出了良好

的细化效果,但由于制备技术的限制,以及细化剂本身明显的衰减性,使其不能长期有效地发挥细化作用^[54-55]。

3.2 稀土改性细化剂

研究发现,向传统的Al-Ti-B和Al-Ti-C细化剂中加入稀土元素可进一步提高细化效果。上官晶晶等^[36]采用Al-5Ti-B-Er细化3104铝合金,发现随Er含量的增加,合金组织细化明显,晶粒尺寸下降至 $(159 \pm 45) \mu\text{m}$,比采用Al-5Ti-B的细化效果提高了45%。张建新等^[21]研究了Al-10Ti、Al-5Ti-B和Al-3Ti-B-RE等细化剂对压力罐用铝材晶粒的细化效果,发现未经细化的合金组织为粗大柱状晶,平均晶粒尺寸为526.4 μm 。经Al-10Ti细化剂处理后的组织为粗大等轴晶,平均晶粒尺寸下降至451.3 μm 。经Al-5Ti-B和Al-3Ti-B-RE细化剂处理的组织均为细小等轴晶,平均尺寸分别为338.7 μm 和332.2 μm 。LI J G等^[56]研究了稀土元素与变质剂Sr复合细化的效果,发现添加Sr不仅可以使共晶Si变质,还可以使初生 α -Al相细化。此外,稀土元素与变质剂Sr复合(如La+Sr^[57]、Ce+Sr^[58])后比各自单一添加时具有更显著的细化效果。

稀土元素的添加还可以使合金二次枝晶间距减小,改善晶粒形态^[59]。杨军军等^[37]研究了Er含量对Al-6Zn-2Mg合金晶粒尺寸的影响,发现当Er含量低于0.25%时,枝晶间距减小,但晶粒细化效果不明显。当Er含量提升至0.4%时,晶粒细化效果明显,继续增加Er含量,晶粒略微缩小。黄锴^[38]发现添加了微量Sc的7055铝合金在凝固过程中会析出Al₃(Sc,Zr)相并起到异质形核的作用。相比未添加Sc的合金,晶粒尺寸从80 μm 减小到40 μm 。温杨等^[39]发现随La添加量的增加,2024铝合金的组织先明显细化后又略微粗化,当La含量为0.3%时,细化效果最好。La含量过高导致晶粒粗化的原因是过量La会形成较多初生相并与Ti作用,降低Ti在合金中形核的效果。

单一稀土元素的加入可以起到一定的晶粒细化效果,稀土元素与铝的共晶反应发生在某一特定温度,而熔体的凝固是在一个温度区间内完成的。为了弥补这一缺陷,研究者展开了对La+Ce^[60]、Pr+Ce^[61]、Er+Sr^[62]等多元稀土元素的研究。在熔体中加入的多元稀土元素会在不同温度下与铝发生共晶反应,较加入单一稀土元素相比反应产物更多,增加了形核基底的数量,使细化效果进一步加强^[63]。孙梦桐等^[40]在923 K下浇注A356铝合金,发现未经细化的A356铝合金初生 α -Al晶粒形状以长杆状为主,尺寸较大,平均等积圆直径为124.7 μm 。加入四元稀土(0.5%的Gd+0.4%的Y+0.2%的Nd+0.2%的Ce)的A356铝合金凝固组织

尺寸整体减小,存在少量球状形貌,平均等积圆直径为 $103.4\ \mu\text{m}$ ^[64]。

3.3 新型合金细化剂

近些年涌现出了类似 Al-Ti-B 的新型合金细化剂 Al- $x\text{Zr-yB}$, Zr 可形成 Zr 金属间化合物 (ZrB_2 、 AlZr_3)^[65],具有与含 Ti 金属间化合物同质的结构和相似的晶格常数,与 $\alpha\text{-Al}$ 有着良好的匹配关系。Al-2Zr-1B 中间合金对 Al-Si 合金和 Al-Mg-Si 合金的细化效果更好,甚至优于常用的 Al-5Ti-1B 中间合金^[66]。张国君^[67]基于 Al-Ti-B 遇 Zr 中毒的现象和 Al-Ti-C 的不稳定现象,采用了 Al-5Ti-0.8B-0.2C 中间合金,发现其比单独添加 Al-5Ti-1B 或 Al-4Ti-1C 具有更佳的细化效果,同时还具备抗 Zr“中毒”能力。王鹰等^[68]研究了 Al-Mg 中间合金及其对 8079 铝合金晶粒大小及组织形貌的影响。发现 Al-Mg 中间合金显著改善了 8079 铝合金的组织形貌,大尺寸的树枝晶碎裂成为短杆状等轴晶。当合金添加量为 3% 时, $\alpha\text{-Al}$ 的最小尺寸可达 $30\ \mu\text{m}$ 。

由于 Al-5Ti-1B 细化剂用于铝硅合金会产生“中毒”现象,姚利军等^[69]开发了 Al-TiB₂-Mg 新型细化剂用于 A356 合金的细化。结果表明,与 Al-5Ti-1B 细化剂相比,新型晶粒细化剂可以更为有效地细化 A356 合金,使其晶粒尺寸由 $600\ \mu\text{m}$ 减小至 $300\ \mu\text{m}$ 。李岩桥^[70]研究了 Al-Zr-B 新型中间合金的成形工艺、Zr 含量、细化剂添加量及细化保温时间对 A356 合金细化效果的影响,发现当添加 0.4% 连续流变挤压态 Al-5Zr-1B 中间合金,细化保温 20 min 时, A356 合金细化改性效果最佳。此时, A356 合金的晶粒尺寸为 $182\ \mu\text{m}$, 抗拉强度为 $180.76\ \text{MPa}$, 伸长率为 4.89%。ZHENG Q J 等^[71]开发了 Al-2La-1B 细化剂用于铸造 Al-Si 合金的细化。当加入 0.5% 的 Al-2La-1B 合金后, Al-7Si 合金的平均晶粒尺寸可细化至 $(67\pm5)\ \mu\text{m}$ 。优异的晶粒细化性能可归因于细化剂中存在细小的 LaB₆ 颗粒,这些颗粒在 Al-Si 合金熔体中具有很高的稳定性,由于晶格失配小,界面能低,可以直接作为 $\alpha\text{-Al}$ 的有效形核位点。此外, LaB₆ 粒子的成核能力不受溶质 Si 元素的影响。以上研究成果在一定程度上解决了 Al-5Ti-1B 细化剂的 Si“中毒”现象,有望在汽车轮毂用铝合金中获得应用。

4 细化机理

对于机械振动、电磁、超声等物理细化方法的核心是熔体凝固时的振荡作用, NAKADA M 等^[72]发现熔体在振荡的过程中可以增大熔体凝固过程中的过冷度, 形核率 N 和过冷度 ΔT 满足关系式 $N\propto\exp(\frac{A}{\Delta T^2 kT})$ ^[73],

其中 k 和 A 为常数。增大过冷度相当于增大了形核率, 达到了细化晶粒的效果。此外, 振荡的另一作用是使树枝晶破裂^[72-74], 致使晶粒增殖^[8,75], 进一步使晶粒细化。而对于快速冷却方法则是直接增大了过冷度, 进而提高了形核率, 细化了晶粒尺寸。对凝固后的熔体施加搅拌摩擦, 则是通过搅拌使大的共晶 Si 破碎, 并依靠大的塑性变形和热, 促使 $\alpha\text{-Al}$ 动态再结晶, 生成细小的等轴晶粒, 达到晶粒细化的效果^[76]。对于添加细化剂进行晶粒细化的机理, 主要有包晶理论、碳化物-硼化物理理论和稀土元素辅助细化理论等。

4.1 包晶理论

包晶理论早在 1951 年被 CROSSLEY F A 等提出^[77], 并且得到认同^[78-80]。在铝合金凝固过程中, TiAl_3 是异质形核的中心, 随着 TiAl_3 开始溶解产生 Ti 粒子, 当温度低于 938 K 且 Ti 含量超过 0.15% 时, 在 TiAl_3 表面会发生包晶反应: $L+\text{TiAl}_3\rightarrow\alpha\text{-Al}$ 。由于包晶反应温度高于铝的熔点 (933.4 K), 故在未达到熔点之前就已经形成了大量的 $\alpha\text{-Al}$ 晶核, 增加了形核率, 细化了晶粒尺寸。但包晶反应未涉及 B 元素, 无法解释随着 B 含量的增加, 细化的效率提高这一现象。按包晶理论, 熔体中的 Ti 含量要达到 0.15% 以上包晶反应才能发生, 但实际熔体中的 Ti 含量远低于这个值。对于上述情况, 有研究者指出向铝合金熔体中引入 Al-Ti-B(C) 系合金, 其中的 B、C 元素可以使包晶点左移, 即包晶反应在 Ti 浓度较低时也可以进行^[81]。

4.2 碳化物-硼化物理理论

碳化物-硼化物理理论被 CIBULA A^[82] 首次提出, 得到了 JONES G P 等^[83] 的支持。此理论认为, Al-Ti 合金会与熔体中的杂质 C 反应生成 TiC 质点, Al-Ti-B 中生成 TiB_2 。TiC 和 TiB_2 的熔点较高, 且与 Al 的晶格相似。以 TiC 和 TiB_2 为异质形核中心, 液态 Al 在 TiC 和 TiB_2 表面结晶, 晶粒数目增加, 达到了晶粒细化的效果。不过随着保温时间增加, TiC 和 TiB_2 容易在熔体中团聚和沉淀从而丧失活性, 降低细化效果^[84]。Al-Ti-C 合金细化效果比 Al-Ti 更好, 因为前者加入熔体中生成的是 TiC 质点群, 曲率比单个 TiC 质点更小, 更容易形核^[85]。但研究者认为 TiB_2 和 TiC 并不是铝的有效形核中心, 而是通过聚集在晶界抑制 $\alpha\text{-Al}$ 的长大, 从而使其细化^[32]。MOHANTY P S 等^[86-87] 研究发现, TiB_2 在铝熔体中是稳定的化合物, 且 TiB_2 与 $\alpha\text{-Al}$ 的晶格缺少相似关系, 认为 TiB_2 并不能直接作为 $\alpha\text{-Al}$ 的形核中心, 而是间接参与了 $\alpha\text{-Al}$ 的形核过程。也有研究者认为 B 不能单独起到细化作用^[88], 而是富集在 TiAl_3 中, 提高 $\alpha\text{-Al}$ 在 TiAl_3 表面的形核率, 这与

MOHANTY P S 的理论相似。上述观点中,不管 TiB_2 是作为异质形核核心增加形核数目,还是通过在 $\alpha\text{-Al}$ 边界抑制 $\alpha\text{-Al}$ 的长大,或是辅助 $\alpha\text{-Al}$ 在 TiAl_3 表面形核来增加形核数目,都肯定了 B 的细化作用。

4.3 稀土元素辅助细化理论

稀土元素细化理论认为稀土元素是一种表面活性物质,容易与熔体中的 Si、Fe 等杂质反应生成高熔点化合物,其不仅可以作为异质形核促进 $\alpha\text{-Al}$ 形核,还可以起到钉扎晶界的作用阻止晶核长大^[41]。也有研究表明,稀土元素在熔体中固溶度很低,在固液界面处凝固时,造成成分过冷使 $\alpha\text{-Al}$ 细化^[89]。此外,对于 Al-Ti-B-RE、Al-Ti-C-RE 这类新型合金细化剂,RE 与熔体反应生成的 AlTiRE 和 $(\text{Ti,RE})\text{Al}_3$ 易溶解,降低了铝熔体的表面能,增加了 TiB_2 和 TiC 的铺层系数,使 TiB_2 和 TiC 不易发生沉积,增大了 TiB_2 和 TiC 的活性,使细化剂的抗衰减性得到提高。

5 总结与展望

快速冷却、机械振动、电磁搅拌和超声振动等细化方法绿色环保,不产生污染性气体,目前已经取得了一定的应用。但上述方法采用的仪器设备通常较复杂且昂贵,随着设备轻便化和使用成本的降低,其在市场中的应用会更加普遍。目前铝合金晶粒细化应用最广泛的方法是添加细化剂,其中 Al-Ti-B 和 Al-Ti-C 合金细化剂市场占比较多,但仍存在一些问题,如 Al-Ti-B 中第二相粒子容易聚集沉淀,使形核效果减弱,且遇到 Si、Zr 等元素会出现“中毒”现象。Al-Ti-C 中的 TiC 虽不易偏聚沉淀,但 Ti 易与铝反应生成 Al_4C_3 及复杂碳化物 Ti_3AlC ,包裹住 TiC 使其失去形核效果。加入稀土元素的新型细化剂细化效果更好、更稳定,也由单一稀土元素向多元稀土元素发展。但目前稀土元素昂贵的价格增加了产品的成本,我国是稀土资源大国,如何降低成本,提高产品性价比,是未来研究的重点。

快速冷却、机械振动、电磁搅拌和超声振动等细化方法的细化机理已较成熟,但是添加细化剂使铝合金细化的过程较为复杂,晶粒形核和长大的过程有可能是多种机理共同作用的结果,尚无理论可以解释其细化产生的所有现象。目前,对于铝合金晶粒细化的研究,多局限于某一种细化方法单独作用时的效果,对于多种方法复合运用产生协同细化效果的报道较少,未来有可能会对复合细化方法进行探索和研究,以期产生更显著的细化效果。

参 考 文 献

- [1] 洪润洲,左强,范学斌,等.航空铝合金铸造型芯技术及应用[J].特种铸造及有色合金,2022,42(3):337-341.
- [2] 文超,朱正锋,王群,等.7XXX系超高强铝合金在我国轨道交通车辆的研究应用现状与展望[J].金属热处理,2024,49(3):302-312.
- [3] SONG C R, DONG B X, ZHANG S Y, et al. Recent progress of Al-Mg alloys: Forming and preparation process, microstructure manipulation and application[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 31:3 255-3 286.
- [4] 李德奇.海洋铝合金的抗蚀性及其在舰船上的应用[J].铝加工,2023(6):7-11.
- [5] 李虎田,宋炜,钟鼓,等.铸造耐热铝合金研究及应用现状与展望[J].铸造,2024,73(7):891-897.
- [6] GODBOLE K, BHUSHAN B, NARAYAN M, et al. Al-Si controlled expansion alloys for electronic packaging applications [J]. Progress in Materials Science, 2024, 144: 101 268.
- [7] SATHIYASEELAN G, BHAGYANATHAN C, SRINATH P, et al. Enhancing the strength and structure of Al-Si alloys for bio-medical applications through the addition of Sr and Zr grain refiners on secondary AlSi7Mg aluminum alloys [J]. Chemical Physics Impact, 2024(8):100 557.
- [8] 大野笃美.金属凝固学[M].宋先华译.南宁:广西人民出版社,1982.
- [9] LIANG G F, ALI Y H, YOU G Q, et al. Effect of cooling rate on grain refinement of cast aluminium alloys[J]. Materialia, 2018(3): 113-121.
- [10] HALL E O. The deformation and ageing of mild steel.3. Discussion of results[J]. Proceedings of the Physical Society of London, 1951, B64:747-753.
- [11] 侯军占,赵志龙,阎光明,等.晶粒细化对高温合金 K4169 切削加工性能的影响[J].金属功能材料,2007(4):11-14.
- [12] 杨林洁,张丽丽,赵九洲,等.铝合金熔体中 TiB_2 粒子原位沉淀析出行为研究[J].特种铸造及有色合金,2024,44(6):823-829.
- [13] MA Z Y, SHARMA S R, MISHRA R S. Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum [J]. Materials Science and Engineering, 2006, A433(1-2):269-278.
- [14] MA Z Y, SHARMA S R, MISHRA R S. Microstructural modification of as-cast Al-Si-Mg alloy by friction stir processing[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2006, A37(11):3 323-3 336.
- [15] 訾炳涛,巴启先,崔建忠,等.强脉冲电磁场对金属凝固组织影响的研究[J].物理学报,2000(5):1 010-1 014.
- [16] 常云龙,刘天羽.磁场对铝合金电弧增材成形及组织性能的影响[J].沈阳工业大学学报,2021,43(3):277-283.
- [17] 袁涛,陈树君,罗震,等.基于超声搅拌的铝合金焊缝晶粒细化方法[J].焊接学报,2018,39(5):21-24,129-130.
- [18] CIBULA A. The mechanism of grain refinement of sand castings in aluminium alloys [J]. Journal of Institute Metals, 1949, 76: 321-360.
- [19] 纪剑峰,王欢,刘兆全. Al-5Ti-1B 细化剂添加量对 5052 铝合金板锭晶粒度的影响研究[J].新疆有色金属,2021,44(1):91-92.
- [20] 黄元春,宋满新,肖政兵,等.晶粒细化剂对 PS 版用铝板基腐蚀性能的影响[J].材料工程,2014(1):41-46.

- [21] 张建新, 钟建华. 用于铝合金晶粒细化的中间合金研究现状与分析[J]. 铝加工, 2002(1):24-26.
- [22] 夏龙, 刘洪伟. 单辊法制备快速凝固7A09铝合金[J]. 轻合金加工技术, 2010, 38(12):43-46.
- [23] 孟瑞林, 王亚平, 宋晓平, 等. 冷却速率对高硅铝合金凝固组织的影响[A]//2008全国功能材料科技与产业高层论坛论文集[C]. 天津, 2008:335-337.
- [24] GUO H M, ZHANG A S, YANG X J, et al. Grain refinement of Al-5Cu aluminum alloy under mechanical vibration using meltable vibrating probe[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2014, 24(8):2 489-2 496.
- [25] 邓嘉宏, 刘红, 刘继帼. 机械振动对2A14铝合金TIG焊接接头组织与性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(5):56-61.
- [26] 马琳, 宋雨键, 崔庆贺, 等. 搅拌摩擦加工工艺及水冷对A356铸铝合金晶粒细化作用及变形控制[J]. 材料导报, 2021, 35(24):24 122-24 127.
- [27] VDOVIN K N, DUBSKI G A, EGOROVA L G. Influence of the magnetic field on the crystallization of aluminum melts[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2018, 59(3):269-275.
- [28] 张立杰, 闫洪. 超声振动功率对2024铝合金显微组织、显微硬度及耐腐蚀性能的影响[J]. 锻压技术, 2021, 46(9):138-144.
- [29] BALASUBRAMANI N, STHOHN D, DARGUSCH M, et al. Ultrasonic processing for structure refinement: An overview of mechanisms and application of the interdependence theory[J]. Materials, 2019, 12(19):3 187.
- [30] 高泽生. 世界铝晶粒细化剂供应工业(1)[J]. 轻金属, 1999(9):50-53.
- [31] 许晨玲. Al-Ti-B细化剂对5A06铝合金组织性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2002(4):15-16.
- [32] WANG L W, WU T, LIU A P, et al. Effect of Al-5Ti-1B grain refiner on microstructure and properties of arcadditive manufactured Al-Mg alloy[J]. Vacuum, 2022, 200:111 012.
- [33] 王海超, 杨化冰, 刘桂亮, 等. Al-5Ti-0.25C细化剂对2024铝合金组织及力学性能的影响[J]. 材料导报, 2016, 30(20):81-84.
- [34] XU J L, LI Y, MA K F, 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.
- [35] 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, 187:262-267.
- [36] 上官晶晶, 段瑞斌, 张文达, 等. Al-5Ti-1B-Er复合粉末对再生3104铝合金细化效果[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(11):2 236-2 241.
- [37] 杨军军, 聂祚仁, 金头男, 等. 稀土钨在Al-Zn-Mg合金中的存在形式与细化机理[J]. 中国有色金属学报, 2004(4):620-626.
- [38] 黄锴. 稀土Sc、Y及热处理工艺对7055铝合金组织和性能的影响[D]. 南宁:广西大学, 2021.
- [39] 温杨, 于长富, 孙巍, 等. 稀土元素La对2024铝合金铸态组织及性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2021, 42(6):6-9.
- [40] 孙梦桐, 刘政, 陈志平, 等. 双重梯度保温下多元稀土对A356铝合金初生相细化的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(3):449-457.
- [41] LI P J, KANDALOVA E G, NIKITIN V I. Grain refining performance of Al-Ti master alloys with different microstructures [J]. Material Letter, 2005, 59(6):723-727.
- [42] SOFYAN B T, KHARISTAL D J, TRIJATI L, et al. Grain refinement of AA333 aluminium cast alloy by Al-Ti granulated flux [J]. Materials & Design, 2010, 31(S1):S36-S43.
- [43] 陈亚军, 许庆彦, 黄天佑. 铝合金晶粒细化剂研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(12):57-61.
- [44] 汤林志, 王向杰. 铝合金细化剂的进展研究[J]. 世界有色金属, 2024(6):65-68.
- [45] 苏学常. 国产Al-Ti-B细化剂的冶金质量[J]. 轻金属, 1996(1):48-51.
- [46] 曹建峰. 国外铝-钛-硼细化剂及其应用[J]. 轻合金加工技术, 1997(7):17-19.
- [47] 曹富春. Al-5Ti-1B和Al-10Sr-X对ZL101铝合金晶粒细化的影响[J]. 轻合金加工技术, 2013, 41(8):26-28.
- [48] 李喜珍, 边秀房, 李秀军, 等. Al-Ti-B合金中TiB₂和AlB₂的从头算研究[J]. 金属学报, 2001(3):235-238.
- [49] WANG Y, FANG C M, ZHOU L, et al. Mechanism for Zr poisoning of Al-Ti-B based grain refiners[J]. Acta Materialia, 2019, 164:428-439.
- [50] QIU D, TAYLOR J A, ZHANG M X, et al. A mechanism for the poisoning effect of silicon on the grain refinement of Al-Si alloys[J]. Acta Materialia, 2007, 55:1 447-1 456.
- [51] LI Y, HU B, LIU B, et al. Insight into Si poisoning on grain refinement of Al-Si/Al-5Ti-1B system[J]. Acta Materialia, 2020, 187:51-65.
- [52] BANERJI A, REIF W. Grain refinement of aluminum by TiC[J]. Metallurgical Transactions, 1985, A16(11):2 065-2 068.
- [53] 谭敦强, 黎文献, 余琨, 等. 新一代铝合金晶粒细化剂Al-Ti-C[J]. 铸造, 2000(7):388-392.
- [54] 衡雪梅, 刘俊, 黄振翅. 中间合金细化剂在铝合金中的应用及细化机理[J]. 理化检验(物理分册), 2004, 40(6):300-303.
- [55] 马洪涛, 李建国, 张柏清, 等. AlTiC中间合金细化铝时结晶核心的研究[J]. 金属热处理, 1999(10):1-3.
- [56] LI J G, ZHANG B Q, WANG L, et al. Combined effect and its mechanism of Al-3Ti-4B and Al-10wt.% Sr master alloy on microstructures of Al-Si-Cu alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2002, A328(1-2):169-176.
- [57] QIU C R, MIAO S N, LI X R, et al. Synergistic effect of Sr and La on the microstructure and mechanical properties of A356. 2 alloy [J]. Materials & Design, 2017, 114:563-571.
- [58] 赵品, 赵恩生. Ce+Sr复合变质对过共晶Al-Si合金铸态组织及性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2002(S1):133-136.
- [59] 郭旭涛, 李培杰, 熊玉华, 等. 稀土在铝、镁合金中的应用[J]. 材料工程, 2004(8):60-64.
- [60] 雷文魁, 王顺成, 郑开宏, 等. La, Ce混合稀土对6201电工铝合金组织性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2015, 9(1):20-24.
- [61] SONG X C, YAN H, ZHANG X J. Microstructure and mechanical properties of Al-7Si-0.7Mg alloy formed with an addition of (Pr+Ce)[J]. Journal of Rare Earths, 2017, 35(4):412-418.
- [62] WU Z P, SHI Z P, YAN H, et al. Modification and strengthening mechanism of high strength-toughness as-cast Al-11Si-3Cu alloy modified with minor Sr and Er content[J]. Materials Science and Engineering, 2024, A903:146 670.
- [63] 刘政, 谏庆春, 许鹤君, 等. 多元稀土细化半固态A356铝合金初生

- α 相的研究[J]. 轻金属, 2015(1):49-53.
- [64] 范靖亚. 稀土元素在变形铝合金中的应用现状[J]. 轻合金加工技术, 1987(7):46-48.
- [65] BROWN A J, DONG H B, HOWES P B, et al. In situ observation of the orientation relationship at the interface plane between substrate and nucleus using X-ray scattering techniques [J]. Scripta Materialia, 2014, 77:60-63.
- [66] 何立子, 王新宇, 王鑫, 等. Al- x Zr- y B 中间合金制备及其对铸造铝合金晶粒细化效果研究[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(11):27-31.
- [67] 张国君. 抗 Zr“中毒”Al-Ti-B-C 中间合金及其对 7050 合金细化新工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [68] 王鹰, 李成栋, 周熠智. 原位反应制备新型 Al-Mg 中间合金及其对 8079 铝合金组织的细化作用[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(5):74-80.
- [69] 姚利军, 张海军, 王悦博, 等. 新型晶粒细化剂在 A356 汽车轮毂铝合金中的应用研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(2):360-363.
- [70] 李岩桥. Al-Zr-B 细化-耐热双效合金对 A356 的改性研究[D]. 辽宁大连: 大连交通大学, 2023.
- [71] ZHENG Q J, ZHANG B, CHEN T, et al. Achieving superior grain refinement efficiency for Al-Si casting alloys through a novel Al-La-B grain refiner[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30:52-60.
- [72] NAKADA M, SHIOHARA Y, FLEMINGS M C. Modification of solidification structures by pulse electric discharging[J]. ISIJ International, 1990, 30(1):27-33.
- [73] 胡汉起. 金属凝固[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985.
- [74] VIVES C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys: Part I. Solidification in the presence of crossed alternating electric fields and stationary magnetic fields[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1996, B27(3):445-455.
- [75] 大野笃美. 金属的凝固理论、实践及应用[M]. 邢建东 译. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [76] LIN Y Y, LIU C L, WU B B, et al. The progress of friction stir processing employed in the surface treatment of aluminum alloys (I) [J]. Material Review, 2013, 27(8):139-144, 154.
- [77] CROSSLEY F A, MONDOLFO L F. Mechanism of grain refinement in aluminum alloys[J]. JOM, 1951, 191(12):1143-1148.
- [78] ANTONIO J A, LFO L F. Grain refinement in aluminum alloyed with titanium and boron[J]. Metallurgical Transactions, 1971, 2(2):465-471.
- [79] MAXWELL I, HELLAWELL A. An analysis of the peritectic reaction with particular reference to Al-Ti alloys[J]. Acta Metallurgica, 1975, 23(8):901-909.
- [80] HASHIMOTO S, KOBAYASHI K F, MIURA S. Roles of lattice coherency to the heterogeneous nucleation in the Al-Ti system[J]. International Journal of Materials Research, 1983, 74(12):787-792.
- [81] MAXWELL I, HELLAWELL A. A simple model for grain refinement during solidification [J]. Acta Metallurgica, 1975, 23(2):229-237.
- [82] CIBULA A. The grain refinement of aluminium alloy castings by additions of titanium and boron[J]. J. Inst. Metals, 1951. DOI: 10.1016/0502-8205(52)90007-5.
- [83] JONES G P, PEARSON J. Factors affecting the grain-refinement of aluminum using titanium and boron additives [J]. Metallurgical Transactions, 1976, B7(2):223-234.
- [84] LIMMANEEVICHITR C, EIDHED W. Fading mechanism of grain refinement of aluminum-silicon alloy with Al-Ti-B grain refiners [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A349(1-2):197-206.
- [85] 胡宪正. 新型 AlTiCRE 细化剂的制备及对纯铝组织与性能的影响 [D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [86] MOHANTY P S, GRUZLESKI J E. Mechanism of grain refinement in aluminium [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(5):2001-2012.
- [87] MOHANTY P S, GRUZLESKI J E. Grain refinement mechanisms of hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Acta Materialia, 1996, 44(9):3749-3760.
- [88] 孝云祯, 马宏声, 路贵民, 等. Al-Ti-B 晶粒细化合金中的有效形核相[J]. 中国有色金属学报, 1997(3):140-142.
- [89] 谌庆春. 多重铝-稀土共晶反应细化半固态 A356 铝合金初生 α 相的研究[D]. 江西赣州: 江西理工大学, 2014.

(编辑: 栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊, 是对国内外公开发行的中文核心期刊, 中国科技论文统计与分析用刊, INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊, 并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿, 征稿内容包括: 各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验, 此外还包括各相关学科和交叉学科, 如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址: 武汉市江岸区建设大道融玺 1001 大厦 10 楼

邮编: 430015

电话: 027-85358206, 85486024,

85358127

投稿网址: www.special-cast.com

邮箱: tzzz@special-cast.com

