

Al-Ti-B 晶粒细化剂的研究进展

缪 欢¹, 阎峰云^{1,2}, 陈体军^{1,3}, 刘洪军^{1,3}

(1. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃兰州 730050;

2. 兰州理工大学有色金属合金及加工教育部重点实验室, 甘肃兰州 730050;

3. 甘肃省有色金属及复合材料工程技术研究中心, 甘肃兰州 730050)

摘要: 综述了 Al-Ti-B 晶粒细化剂的制备方法及其特点, 介绍了电磁搅拌和高能超声制备 Al-Ti-B 中间合金的熔体处理新技术, 对快速凝固、连续流变挤压成型等细化相二次分散技术进行了对比分析, 对新型 Al-Ti-B-RE 和 Al-Ti-B-C 晶粒细化剂进行了介绍。

关键词: Al-Ti-B 晶粒细化剂; 制备方法; 熔体处理; 成型技术

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9658.2018.04.002 **文章编号:** 1006-9658(2018)04-0011-06

铝合金由于质轻、性价比高、综合性能好, 在机械制造、汽车、船舶、航空、航天及化学工业等高科技领域得到了广泛的应用。使用 Al-Ti-B 中间合金对铝及铝合金铸态组织进行晶粒细化, 可使铸锭、铸件组织均匀, 减少偏析, 提高塑性, 防止裂纹、缩孔等缺陷产生, 同时显著提高铸件强度^[1,2]。

根据 Al-Ti-B 中间合金的 Ti/B 比与 TiB₂ 的化学计量比之间的关系, 可将 Al-Ti-B 晶粒细化剂分为两类。第一类为 Ti/B 质量比大于 2.2 的细化剂, 主要用于工业纯铝及低合金含量的变形铝合金晶粒细化; 第二类为 Ti/B 质量比小于 2.2 的细化剂, 主要用于含 Si 量较大的铸造铝合金晶粒细化^[3]。Al-5Ti-1B 是第一类细化剂中使用最广泛的, 也是目前国内外研究最多的细化剂。

1 Al-Ti-B 晶粒细化剂的制备方法

收稿日期: 2018-04-20; 修订日期: 2018-05-21

作者简介: 缪欢(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为铝钛硼晶粒细化剂的制备。E-mail: miaoh1203@163.com

通讯作者: 阎峰云(1962-), 男, 教授, 主要从事有色金属熔体处理、先进成型技术和金属基复合材料制备等工作。

1.1 氟盐反应法

氟盐反应法是目前使用最广的 Al-Ti-B 中间合金制备工艺, 国外 LSM、KBM、KBA 公司及国内深圳新星、湖南金联星、河北四通新材等大多数 Al-Ti-B 生产厂家均采用此方法生产^[4]。氟盐反应法的一般流程是将 K₂TiF₆ 和 KBF₄ 添加到 800℃ 的 Al 熔体中, 通过两种氟盐与 Al 熔体之间的界面反应制备 Al-Ti-B 中间合金。其优点是原料价格低廉, 制备工艺相对较简单, 熔融状态的低密度反应产物浮于熔体上, 利于去除。但也存在很大的缺点, 如界面反应速度慢, 导致合金化反应时间过长, 生产效率低; 浮于熔体之上的熔融态氟盐易挥发, 造成环境污染; 合金化过程中产生的氟铝酸钾盐副产物和带入的金属化合物杂质, 以及熔盐对耐火材料腐蚀而产生的夹杂物不能完全去除干净, 导致最终制备的 Al-Ti-B 中间合金洁净度较差^[5]等。

针对氟盐反应法制备 Al-Ti-B 细化剂的缺点, 国内外学者通过改进氟盐加料顺序、合金化反应温度、反应时间等工艺参数对其制备工艺进行优化。廖成伟等^[6]分别从理论计算和实验研究两个

方面对氟盐法制备 Al-Ti-B 中间合金过程中 K_2TiF_6 和 KBF_4 的添加顺序对合金组织的影响进行讨论。结果表明,不同的加料顺序对 Al-Ti-B 中间合金的物相组成、 $TiAl_3$ 颗粒尺寸、洁净度等影响很大;在保证高细化效果和洁净度的情况下,使用混合添加 K_2TiF_6 和 KBF_4 制备 Al-Ti-B 中间合金的工艺最佳。孙小平^[7]通过对 Al-5Ti-1B 合金熔体反应机理的分析与合金制备实验的研究,明确了工艺条件对合金组织的影响规律,优化了熔体制备工艺参数,得到合金化最佳反应温度为 860~890℃,反应时间为 60~80min。

1.2 纯钛法

Y ü cel Birol^[8]用海绵钛代替 K_2TiF_6 ,采用向 800℃的 Al 液中先添加海绵钛,再加入 KBF_4 ,或海绵钛与 KBF_4 混合添加的方式,制备 Al-Ti-B 中间合金。此种方法降低了氟盐的使用量,但中间合金中 TiB_2 粒子相对较少,主要为 AlB_2 粒子,中间合金晶粒细化效果不理想。针对海绵钛和 $TiAl_3$ 的沉淀问题,以及后续与 B 的反应问题,Y ü cel Birol 对制备原料进行改进,使用海绵钛加入到铝液中先获得 Al-2.8Ti 中间合金液,再加入 Ti/B 质量比 2.2/1 的 K_2TiF_6 和 KBF_4 混合盐,制备 Al-Ti-B 细化剂。海绵钛提供的 Ti 反应生成 $TiAl_3$,而 K_2TiF_6 提供形成 TiB_2 粒子所需的 Ti。此种工艺制备的 Al-Ti-B 中间合金中 $TiAl_3$ 和 TiB_2 的尺寸和数量几乎与氟盐法制备的中间合金一致。细化效果明显优于纯钛法制备的 Al-Ti-B 细化剂,与氟盐法制备的 Al-Ti-B 细化剂的细化效果接近。在 2min 内就能使纯铝粗大的柱状晶完全转变为细小的等轴晶,在 60min 内没有明显的细化衰退现象。

1.3 单质溶解合成法

单质溶解合成法是将 Al、Ti、B 单质粉末按比例混合压块,加入 Al 熔体中,通过单质与 Al 反应制得 Al-Ti-B 晶粒细化剂^[9-10]。理论上通过控制熔

体温度、单质粉末配比和粉末尺寸等工艺参数可以优化 Al-Ti-B 中间合金的组织,提高其细化效果。但由于 B 单质粉末原料价格较高,反应温度不易控制,很难在实际的工业生产中应用。

1.4 熔盐电解法

熔盐电解法是指在 Al 熔体中加入 Na_3AlF_6 、 MgF_2 等作为电解质,用石墨坩埚作为电解槽,以 Al 熔体作为阴极,石墨棒作为阳极,通过电解 TiO_2 和 B_2O_3 制备 Al-Ti-B 晶粒细化剂^[11,12]。电解法制备 Al-Ti-B 晶粒细化剂,可以减少中间合金中的氧化夹杂物和元素偏析,提高合金质量。但与氟盐法相比,其生产效率低,无法大规模应用在工业生产中。

2 Al-Ti-B 中间合金的熔体处理方法

2.1 电磁搅拌

东北大学孙小平、管仁国等^[13]对 Al-Ti-B 合金熔体进行电磁搅拌,研究了搅拌温度及搅拌时间对化合物 $TiAl_3$ 颗粒的大小、形态及分布的影响。结果表明,电磁搅拌时间的延长可以使 $TiAl_3$ 颗粒的聚集现象消除,颗粒破碎细化,分布趋于均匀,电磁搅拌 30min 可达到最佳效果;搅拌温度直接影响熔体粘滞力的大小,搅拌温度升高可消除 $TiAl_3$ 颗粒团聚带,改善颗粒的分布,电磁搅拌温度控制在 800℃为最佳。

李润霞等^[14]研究了电磁搅拌对 Al-5Ti-1B 中间合金组织、成分及细化效果的影响。结果表明,在浇注前对熔体施加 220A 的电磁搅拌 10min,可使熔体的洁净度大幅提升,并且使 Al-5Ti-1B 中间合金的 TiB_2 相均匀分布于 Al 基体上,细化效果良好。

2.2 超声处理

上海交通大学韩延峰等^[15,16]研究了高能超声处理对 Al-Ti-B 合金的组织 and 细化效果的影响。结果表明,使用商业 Al-5Ti-1B 细化剂进行重熔,

并施加超声处理能改善中间合金的组织 and 细化效果。在 Al-5Ti-1B 细化剂的制备过程中,对熔体施加超声处理,高能超声能促进氟盐与铝液的反应,改善 TiAl_3 相的形貌,降低 TiB_2 颗粒的平均尺寸和尺寸分布,提高 Al-Ti-B 中间合金的细化效果,能将工业纯铝晶粒细化至最小 $45\mu\text{m}$ 。超声处理对 Al-Ti-B 合金的组织 and 细化效果影响明显,但受限于高能超声处理仪器自身的功率限制,目前还未应用在实际的工业生产中。

2.3 熔体净化

Al-Ti-B 中间合金制备过程中, K_2TiF_6 、 KBF_4 盐与 Al 发生反应,生成 KAlF_4 和 K_3AlF_6 两种副产物渣(水渣)。水渣是最终制得的 Al-Ti-B 中间合金的主要夹杂物。其次,若合金化反应不彻底,会有少量 K_2TiF_6 和 KBF_4 盐也夹杂到 Al-Ti-B 中间合金中。另外,氟盐的腐蚀性较大,熔炼过程中对坩埚和工具产生腐蚀而形成 Fe、Si、Cr、Zr 等的夹杂元素。因此,使用洁净度不高的 Al-Ti-B 中间合金进行细化晶粒,夹杂物易与细化相 TiAl_3 和 TiB_2 颗粒产生缠绕,使其发生团聚,产生偏析,降低细化效果。Cr、Zr 元素还会使 Al-Ti-B 中间合金产生“细化中毒”现象。除此之外,Al-Ti-B 中间合金中夹杂引入到被细化合金中,导致合金的热加工性能和焊接性能的恶化,产生热裂现象。故对 Al-Ti-B 中间合金熔体进行净化处理尤为重要。

张作贵等^[47]研究了电磁搅拌对铝钛硼中间合金净化的影响。结果表明,电磁搅拌能去除铝钛硼中间合金中的夹渣,并且交流磁场比直流磁场除渣效果好;铝钛硼中间合金在磁感应度为 0.24T 的交流磁场下搅拌 3min ,除渣效果最明显;电磁搅拌还在一定程度上改善了铝钛硼中间合金的细化效果。初步探讨了电磁搅拌的除渣机理,认为电磁场不仅能引起熔体的旋转,而且在熔体中固液界面约 1cm 范围内还存在一个附加环流(次级流),附加环流的存在是电磁搅拌除渣的根本原因。

廖成伟等^[48],利用氧化铝陶瓷过滤技术,使 Al-5Ti-1B 合金中的杂质减少、洁净度大幅度提高。其采用将 $900\sim 950^\circ\text{C}$ 的 Al-Ti-B 中间合金熔体经氧化铝陶瓷过滤箱过滤,过滤箱由过滤孔径为 $0.7\sim 2.0\mu\text{m}$ 的 7 根氧化铝陶瓷过滤管组成的。过滤有效地分离并排出了合金液中的氟化盐产物及 Fe、Si、Mg、Ca 等杂质,最终获得的 Al-Ti-B 细化剂中 99% 的夹杂物尺寸小于 $2.0\mu\text{m}$ 。由于熔体温度较高, TiAl_3 几乎全部溶解,不会被过滤箱阻挡,可以有效避免过滤过程中 Ti 元素的损失。

陈邵龙、马涛^[49]使用静置-电极吸附-超声处理的联合净化处理方式对制备了 Al-Ti-B 中间合金,显著改善 Al-Ti-B 中间合金中 TiAl_3 、 TiB_2 粒子的尺寸与分布情况,处理后的细化剂中 TiAl_3 的尺寸为 $20\mu\text{m}$ 左右, TiB_2 粒子尺寸小于 $1\mu\text{m}$ 。经联合净化处理后的 Al-Ti-B 中间合金,细化工业纯铝的效果显著增强。

3 细化相二次分散技术

通常细化剂无论是块体还是杆棒材,如果凝固速度较低(如采用定模浇注和普通连铸),则组织中的第二相颗粒会出现粗大化、团聚和偏析等诸多不利于发挥第二相颗粒作用的弊端,因此如何在凝固成型过程中获得均匀弥散的细化粒子,是我们应该关注的一个重要问题。快速凝固是提高 Al-Ti-B 中间合金细化效果的有效途径。

张忠华、边秀房等^[48]研究了熔纺制备 Al-5Ti-1B 中间合金的组织及细化效果。结果表明,快速凝固制备 Al-5Ti-1B 中间合金由亚稳态过饱和 α -Al 固溶体和均匀分散的 TiB_2 颗粒组成,与传统的 Al-5Ti-1B 细化剂线材组成相不同。快速凝固对 Al-5Ti-1B 合金的细化效果有重要影响,能提高合金的形核率,比传统的 Al-5Ti-1B 细化剂线材的细化效果好。

李克、孙宝德等^[49]用单辊甩带法和旋转液体纺绩法分别制备了 Al-Ti-B 中间合金薄带和细

线,研究快速凝固处理对中间合金组织和细化效果的影响。结果发现:采用快速凝固方法处理 Al-Ti-B 中间合金可提高 Ti 在 α -Al 基体中的固溶度,细化 TiAl_3 相和分散 TiB_2 粒子,从而显著提高其细化效果。分别添加 0.2% 的 Al-Ti-B 快淬薄带和 Al-Ti-B 细线处理工业纯铝,可获得粒径约为 50~100 μm 的等轴晶组织。旋转水纺绩法可连续生产线径均匀的线材,比单辊甩带法更具有实用化前景。

董天顺等^[20]对 Al-Ti-B 中间合金熔体进行快淬处理,在冷却速度为 105~106 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,得到了薄丝带状细化剂。通过分析,快速凝固后细化剂中的 TiAl_3 由纳米晶和少量非晶态合金组成,尺寸由 30~35 μm 变为 50~100 nm。分别用薄丝带状和杆状 Al-Ti-B 中间合金对 ZL109 进行细化处理,发现薄丝带状细化剂比杆状细化剂的细化效果好,使 ZL109 的力学性能有了进一步的提高,抗拉强度提高 32.9%,断后伸长率提高 15.6%,硬度提高 5.69%。

上述采用的快速凝固成型技术(旋转水纺绩法、甩带法等),均会造成细化剂中氧化铝夹杂物增多,且制备的均为较细的丝材和薄带,在铝合金薄带毛料和扁锭生产中并不适应,故产品应用受到限制。

东北大学商迎秋、管仁国等^[24]使用连续流变挤压技术制备了高性能 Al-Ti-B 晶粒细化剂。该技术制备的 Al-Ti-B 晶粒细化剂中 TiAl_3 相细小分散, TiB_2 相均匀的分布在组织中,细化效果优于国外同类产品。在连续流变挤压制备 Al-Ti-B 晶粒细化剂过程中,型腔中的剪切作用、型腔出口的 ECAP 作用及挤压模具中的挤压作用使 TiAl_3 相发生脆断,形成细小分散的 TiAl_3 相,提高了细化效果。且连续流变挤压技术设备投资小,工艺流程短,节能高效,生产成本低,适合应用于工业生产中。

4 新型 Al-Ti-B-RE 中间合金

添加稀土对 Al-Ti-B 中间合金的 TiAl_3 相的大小、形貌及分布有显著影响。添加适量的稀土能减小铝熔体与 TiB_2 之间的润湿角,使 TiB_2 不易聚集和沉淀,增强中间合金的细化性能。

江苏大学王正军等^[22]采用熔配法工艺合成新型 Al-Ti-B-RE 中间合金晶粒细化剂,新型中间合金细化工业纯铝时,其平均晶粒尺寸小于 150 μm 。工业纯铝中加入 0.2% 自制的 Al-5Ti-1B-1RE 中间合金晶粒细化剂后有更优的机械性能,与未细化的工业纯铝相比,抗拉强度提高了 28.39 MPa,伸长率增加了 29.97%。

廖成伟等^[23]利用三步加料法和热挤压工艺制备 Al-5Ti-1B-10Sr 复合中间合金线材。用该复合中间合金对 Al-13Si 合金细化与变质处理后,Al-13Si 合金基体的 α -Al 晶粒得到明显细化,共晶 Si 相也由粗大的针状组织转变成细小的纤维状或颗粒状结构。同时,Al-13Si 合金的硬度提高 43.2%,达到 96.5HB,细化和变质效果明显。

北京工业大学马腾飞等^[24]使用接触反应法制备了 Al-Ti-B-Er 细化剂,研究了其组织结构及细化效果。结果表明,Er 能改善 TiAl_3 、 TiB_2 相的形貌,分散 TiB_2 和 TiAl_3 。在 Al-10Zn-1.9Mg-1.6Cu-0.12Zr 合金中添加 1wt.% 的 Al-Ti-B-Er 细化剂能获得优良的细化效果,晶粒平均尺寸达到 40 μm 。

Kui Wang 等^[25, 26]使用商业 Al-5Ti-1B 中间合金和富铈的稀土材料为原料,利用单辊旋转法制备了 Al-Ti-B-RE 纳米细化剂。微观组织观察显示,制备的 Al-Ti-B-RE 细化剂由球状的 TiB_2 和核壳状的 $\text{TiAl}_3/\text{Ti}_2\text{Al}_{20}\text{Ce}$ 组成, TiAl_3 颗粒的平均尺寸约为 5 μm ,比商业细化剂丝更好。由于薄壳状的 $\text{Ti}_2\text{Al}_{20}\text{Ce}$ 相包裹在 TiAl_3 相的周围,降低 TiAl_3 的表面能,阻止 TiAl_3 的团聚和长大,使 TiAl_3 作为异质形核质点在铝液中存在很长时间,延迟细化

衰退,提高细化剂的细化效果。对A356合金细化实验表明,Al-Ti-B-RE纳米细化剂能显著提高A356合金的机械性能。

5 Al-Ti-B-C中间合金

Pengting Li、Xiangfa Liu等^[27]用熔体反应法制备了组织均匀的Al-3Ti-1B-0.2C中间合金。中间合金中的TiB₂粒子呈现台阶形的树枝状形貌,TiC粒子为有微量的B掺杂的多面体。细化实验表明,添加0.2%的Al-3Ti-1B-0.2C中间合金能明显细化A356合金。合金中 α -Al的平均晶粒尺寸从1570 μ m降低到167 μ m左右,且在60min内无明显的细化衰退现象。被细化的A356合金的机械性能明显提高,极限抗拉强度和屈服强度分别提高了5.9%和11.7%,伸长率从4.2%提高到9.2%,比使用Al-5Ti-1B中间合金细化的效果更好。

6 讨论

(1)由于原材料价格昂贵、生产效率低、生产成本高等原因,导致单质溶解合成法、熔盐电解法和快速凝固法制备Al-Ti-B细化剂的工艺还未应用在大规模的工业生产中,目前仅限于实验研究阶段。氟盐法仍然是工业生产Al-Ti-B细化剂的主要应用方法。

(2)对熔体施加电磁搅拌和高能超声处理能明显改善Al-Ti-B中间合金中TiAl₃和TiB₂相的组织形态,提高其晶粒细化效果。电磁搅拌在工业生产中已有应用,高能超声处理在工业上的应用仍存在问题。但随着大功率超声处理设备和耐高温工具杆的研制,超声场的建立及相应超声效应的研究深入,超声处理将有望在Al-Ti-B细化剂的工业生产上得到广泛应用。

(3)连续流变挤压技术制备的Al-Ti-B晶粒细化剂细化效果优良,且制备成本低,适用于工业生产。

(4)新型Al-Ti-B-RE中间合金和Al-Ti-B-C中间合金是未来铝用晶粒细化剂的主要研究和发展方向,具有进一步研究和应用价值。

参考文献:

- [1] 陈邵龙,马涛.联合净化对Al-Ti-B合金组织和细化能力的影响[J].特种铸造及有色合金,2015(7): 687-690.
- [2] 张作贵,刘相法,边秀房,等. Al-Ti-B中间合金的遗传性研究与推广应用[J].铸造,2000(10): 758-763.
- [3] Monhanty P S, Gruzleski J E. Grain refinement mechanisms of hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Acta Materialia,1996, 44(9): 3749-3760.
- [4] 韩延峰. 超声制备Al-5Ti-1B中间合金及 α -Al/异质核心界面研究[D]. 上海交通大学, 2007.
- [5] 廖成伟,李洋,涂睿,等. 高洁净度Al-5Ti-1B晶粒细化剂的制备与微结构特征 [J]. 特种铸造及有色合金,2012(3): 203-207.
- [6] 廖成伟,陈闻天,陈欢,等.原料添加顺序对氟盐法制备Al-Ti-B中间合金的影响[J].中国有色金属学报,2016(1): 204-211.
- [7] 孙小平. 高品质Al-5Ti-1B合金线材的制备及其细化性能的研究[D]. 东北大学, 2011.
- [8] Birol Y. Production of Al-Ti-B master alloys from Ti sponge and KBF₄ [J]. Journal of Alloys and Compounds,2007, 440(1-2): 108-112.
- [9] Nikitin V I, Wanqi J, Kandalova E G, et al. Preparation of Al-Ti-B grain refiner by SHS technology [J]. Scripta Materialia,2000(42): 561-566.
- [10] Peijie L, Kandalova E G, Makarenko A G, et al. SHS process and structure formation of Al-Ti-B grain refiner made with the use of fluxes[J]. Materials Letters,2004, 58(12-13): 1861-1864.
- [11] Yucel O, Sahin F. Production of aluminum-titanium-boron master alloy by aluminothermic process[J]. High Temperature Materials and Processing,2001, 20(2): 137-142.
- [12] Liu Z, Wang M, Weng Y, et al. Crystal nucleation and growth of Al-based alloys produced by electrolysis[J]. Journal of Materials Science and Technology,2003, 19(5): 427-430.
- [13] 孙小平,石路,管仁国,等. 电磁搅拌对Al-Ti-B线材微观组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2011(3): 248-251.
- [14] 李润霞,张文华,张鹏,等. 电磁搅拌对Al-5Ti-B中间合金组织及细化效果的影响[J].铸造,2016, 65(1): 1-5.

- [15] Han Y, Li K, Wang J, et al. Influence of high-intensity ultrasound on grain refining performance of Al-5Ti-1B master alloy on aluminium [J]. Materials Science and Engineering A, 2005(405): 306-312.
- [16] Han Y, Shu D, Wang J, et al. Microstructure and grain refining performance of Al-5Ti-1B master alloy prepared under high-intensity ultrasound [J]. Materials Science and Engineering A, 2006 (430): 326-331.
- [17] 张作贵, 刘相法, 高振, 等. 电磁搅拌铝钛硼中间合金的洁净化[J]. 铸造, 2000(2): 70-73.
- [18] Zhang Z, Bian X, Wang Y, et al. Microstructure and grain refining performance of melt-spun Al-5Ti-1B master alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2003(352): 8-15.
- [19] 李克, 饶磊, 闫洪, 等. 快速凝固处理对 Al-Ti-B 中间合金组织和细化效果的影响[J]. 铸造, 2006(9): 894-897.
- [20] 董天顺, 崔春翔, 刘双进, 等. Al-Ti-B 细化剂的快速凝固及其细化机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008(1): 29-32.
- [21] 商迎秋, 王祥, 王宇翔, 等. 连续流变挤压技术在制备高性能铝材中的应用[J]. 精密成形工程, 2017, 9(4): 36-42.
- [22] Zhengjun W, Naichao S. Synthesis and Refinement Performance of the Novel Al-Ti-B-RE Master Alloy Grain Refiner[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(12): 2970-2975.
- [23] 廖成伟, 陈欢, 罗成志, 等. 新型 Al-Ti-B-Sr 复合中间合金线材的制备及其应用 [J]. 中国有色金属学报, 2014(8): 2026-2034.
- [24] Tengfei M, Ziyong C, Zuoren N, et al. Microstructure of Al-Ti-B-Er refiner and its grain refining performance [J]. JOURNAL OF RARE EARTHS, 2013, 31(6): 622-627.
- [25] Wang K, Cui C, Wang Q, et al. The microstructure and formation mechanism of core-shell-like TiAl₃/Ti₂Al₂₀Ce in melt-spun Al-Ti-B-Re grain refiner [J]. Materials Letters, 2012(85): 153-156.
- [26] Kui W, Chunxiang C, Qian W, et al. Microstructure of Al-5Ti-1B-1RE nanoribbon and its refining efficiency on as-cast A356 alloys [J]. Journal of Rare Earths, 2013, 31(3): 313-318.
- [27] Li P, Liu S, Zhang L, et al. Grain refinement of A356 alloy by Al-Ti-B-C master alloy and its effect on mechanical properties[J]. Materials and Design, 2013(47): 522-528.

Research progress of Al-Ti-B grain refiner

MIAO Huan¹, YAN Fengyun^{1,2}, CHEN Tijun^{1,3}, LIU Hongjun^{1,3}

- (1.State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu China;
- 2.Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu China;
3. Gansu Nonferrous and Composite Materials Engineering Technology Research Centre, Lanzhou 730050, Gansu China)

Abstract: The preparation method and characteristics of Al-Ti-B grain refiner have been reviewed. The new melt processing technology of Al-Ti-B master alloy prepared by electromagnetic stirring and high energy ultrasonic has been introduced. The comparative analysis has been made on refined phase secondary dispersion technology such as rapid solidification and continuous rheology extrusion. The new Al-Ti-B-RE and Al-Ti-BC grain refiners have been introduced.

Key words: Al-Ti-B grain refiner; Preparation method; Melt treatment; Forming technology