

新型 Al-Ti-B-Sr 复合中间合金线材的制备及其应用

廖成伟¹, 陈欢², 罗成志¹, 陈建春², 潘春旭¹

(1. 武汉大学 物理科学与技术学院, 武汉 430072;

2. 湖南金联星特种材料股份有限公司, 岳阳 414005)

摘要: 以 Al、K₂TiF₆、KBF₄ 和 Al-20Sr(质量分数, %)中间合金为原料, 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(*d* 9.5 mm)。该线材表面光滑, 无气泡、起皮、裂纹等缺陷。组织结构分析表明: 金属间化合物 Al₄Sr 相为块状, 平均长度为 43.2 μm, 宽度为 26.8 μm, 其内部或边缘存在许多孔洞和细缝; Al₃Ti 相呈颗粒状, 平均直径为 14.4 μm; TiB₂ 颗粒非常细小, 平均尺寸为 1.42 μm, 其中 95.77%为尺寸 ≤ 1.97 μm 以下的颗粒。将该复合中间合金应用于 Al-13Si 合金的细化与变质处理后, 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。

关键词: Al-5Ti-1B-10Sr 中间合金线材; 细化; 变质; 微结构; 硬度

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Preparation and application of novel Al-Ti-B-Sr composite master alloy wire

LIAO Cheng-wei¹, CHEN Huan², LUO Cheng-zhi¹, CHEN Jian-chun², PAN Chun-xu¹

(1. School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hunan Jinlianxing Special Materials Technology Co., Ltd., Yueyang 414005, China)

Abstract: The Al-5Ti-1B-10Sr master alloy wire (*d* 9.5 mm) was prepared by three-stage-feedstock method and hot extrusion process, with pure Al, K₂TiF₆, KBF₄ and Al-20Sr master alloy (mass fraction, %) as raw materials. The wire surface is smooth, and without bubbles, peeling and cracks. The results show that, the Al₄Sr phase is in the shape of block with many pores and cracks, and with an average size of 43.2 μm in length and 26.8 μm in width; the Al₃Ti phase exhibits granular shapes with an average diameter of 14.4 μm; the TiB₂ phase is very fine with an average size of 1.42 μm, and the percent of TiB₂ particles with size no larger than 1.97 μm reaches 95.77%. When Al-5Ti-1B-10Sr is added into the Al-13Si alloy, not only the grain size of α(Al) is significantly refined, but also the eutectic Si phase changes from the coarse acicular into fine fibrous or granular. Compared with the untreated Al-13Si alloy, the hardness increases by 43.2% after adding Al-5Ti-1B-10Sr, up to 96.5HB, showing a good performance of both refinement and modification.

Key words: Al-5Ti-1B-10Sr master alloy wire; refinement; modification; microstructure; hardness

铸造 Al-Si 合金由于具有密度优, 比强度高、焊接性能好、热膨胀系数低, 以及耐蚀、耐热和耐磨性能优良等特点, 已经在机械工业、汽车工业、航空与军事工业等高科技领域得到了广泛的应用^[1-3]。一般来

说, 未进行细化与变质处理的铸造 Al-Si 合金主要由粗大的树枝状 α(Al)相基体和枝晶间粗大的针片状共晶 Si 及块状初晶 Si 相组成。其中, 粗大的初晶 Si 和共晶 Si 相硬而脆, 严重地割裂了 α(Al)相基体, 在变

形过程中容易产生微裂纹,从而降低 Al-Si 合金的力学性能和加工性能,尤其是塑性下降更多^[4-6]。为了解决这个问题,实际应用中一般需在 Al-Si 合金中添加变质剂进行变质处理,通过改变 Si 相的形态和尺寸,减小其对 $\alpha(\text{Al})$ 基体的削弱作用,以达到提高合金力学性能的目的^[7]。然而,常规的变质处理虽然能够改变 Si 相的形貌和尺寸,但对 $\alpha(\text{Al})$ 相基体却影响较小^[8]。众所周知,当 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒尺寸较小时,不仅可以明显提高铸件的力学性能,减少偏析,降低热裂倾向,还可以改善铸件凝固过程中的补缩、提高铸件的气密性和表面质量等^[9-11]。因此,为了进一步提高铸造 Al-Si 合金的综合性能,除了细化 Si 相外,同时对 $\alpha(\text{Al})$ 相基体晶粒进行细化处理也具有重要意义^[12-14]。例如,CHANDRASHEKHARIAH 等^[9]研究了分别添加 Al-1Ti-3B 细化剂和 Al-10Sr 变质剂处理后,Al-12Si 合金干滑动磨损性能得到提高;元效刚等^[15]分析了分别添加 Al-Ti-B 细化剂和 Al-5Sr 变质剂中间合金后,Al-7Si-0.35Mg 合金微观组织及其力学性能的变化。但是在实际生产中,这种分开添加细化剂和变质剂的方法具有明显的缺点,如延长了工艺流程,增加了操作时间,更主要的是提高了细化变质成本。

近年来,研制具有细化和变质双重作用的 Al-Ti-B-Sr 复合中间合金成为当前的研究热点。一般的制备工艺是在 Al-Ti-B 合金熔体里直接添加 Sr 元素,然后浇注得到 Al-Ti-B-Sr 复合中间合金^[16]。但是,该工艺在实际产生中会遇到如下问题:1) 金属 Sr 与 Al 液的反应温度较高,在生产中需要消耗大量能源用于熔体升温;2) 金属 Sr 活性很高,高温下直接与 Al 液发生反应时烧损较大,增加了生产成本;3) 由于没有二次破碎处理,Al-Ti-B-Sr 合金中的金属间化合物 Al_3Ti 、 TiB_2 和 Al_4Sr 相等尺寸较大,会影响到对 Al-Si 合金的细化和变质效果。

本文作者提出一种制备 Al-Ti-B-Sr 复合中间合金的新工艺,即采用三步加料法和热挤压工艺生产高质量的 Al-5Ti-1B-10Sr 复合中间合金线材。

1 实验

以工业纯 Al(99.7%)、 K_2TiF_6 (98%)、 KBF_4 (98%) 和 Al-20Sr 中间合金线材(d 14.5 mm)为原料,采用三步加料法和热挤压结合的工艺来生产 Al-5Ti-1B-10Sr 中间合金线材。具体工艺如下。

1) 将工业纯铝在熔铝炉内加热到 700~750 °C 熔化,倒入中频感应炉内准备合金化。

2) 将按特殊比例混合均匀的 K_2TiF_6 和 KBF_4 原料在铝液强烈搅拌的作用下加入熔体;一定时间后再将第二份 K_2TiF_6 和 KBF_4 混合料加入熔体。

3) 反应全部结束后将熔体上层的水渣排出。

4) 之后升高熔体温度至 850~900 °C,在升温的同时通入 N_2 对熔体进行除气和除渣处理。

5) 当熔体达到预设温度时,将 Al-20Sr 中间合金线材按一定比例逐步加进熔体。

6) 待 Al-20Sr 添加完毕并熔化后,进行一定时间的机械搅拌促使熔体内各元素分布均匀,之后再用旋转除气机进行除气操作,并动态测量 H_2 的含量。

7) 当 H_2 含量达标后($\leq 2 \mu\text{L/g}$),将熔体浇铸成直径 100 mm 的棒材。

8) 最后,将该棒材在 400~500 °C 下热挤压变形加工,制成直径 9.5 mm 的 Al-5Ti-1B-10Sr 合金线材(见图 1)。经 SPECTROMAXx 型直读光谱仪测试分析,该合金的实际成分如表 1 所列。

表 1 Al-5Ti-1B-10Sr 中间合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of Al-5Ti-1B-10Sr master alloy (mass fraction, %)

Sr	Ti	B	Fe	Si	V	Al
9.77	4.92	0.913	0.254	0.143	0.109	Bal.

金相样品制备为将线材试样经粗磨、细磨、 Al_2O_3 和清水抛光,最后用 0.5%HF 水溶液进行腐蚀。组织观察在 Olympus BX51F 型光学金相显微镜上进行,并利用 Image-Pro Plus 6.0 图像分析软件对金属间化合物 Al_3Ti 和 Al_4Sr 相的尺寸进行统计测量。合金样品中 TiB_2 颗粒经浓盐酸溶液提取后,配成悬浮液,然后用欧美克 LS-pop(6)型激光粒度仪进行粒径测量。样品的化学成分在带有能谱仪(EDS)的 FEI 公司 Sirion 型场发射扫描电子显微镜上进行;样品的物相分析在 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪上进行。

为了研究 Al-5Ti-1B-10Sr 复合中间合金线材的细化和变质能力,对工业上常用的 Al-13Si 合金进行了实验,并与其他中间合金 Al-5Ti-1B、Al-10Sr、Al-5Ti-1B+Al-10Sr 及 Al-5Ti-1B-10Sr 等进行了对比,研究其对 Al-13Si 合金微观组织和力学性能的影响。具体实验步骤如下。

1) 将一定量的 Al-13Si 铝合金(用纯铝稀释 Al-20Si 合金所得)放入石墨坩埚(d 8.6 cm),在 YG 系高频感应电炉中加热,预设温度为 760 °C。

2) 待其完全融化,静置 5 min。

3) 除渣后,加入一定量的细化剂或变质剂,并不

断搅拌 30 s, 之后在 730 °C 静置 30 min, 再搅拌 15 s 后扒渣出炉。

4) 在预先烘烤过的铸铁模内浇注, 并在空气中冷却, 获得铸锭。

5) 在铸锭中间部位取样, 经初磨和细磨后, 再进行电解抛光。用电解液(10 mL 的高氯酸(70%)+10 mL 甘油+80 mL 的乙醇(70%))进行腐蚀, 显示铸锭样品的显微组织, 并进行观察分析。铸锭硬度的测试在 DHB-3000 型电子布氏硬度计上进行。

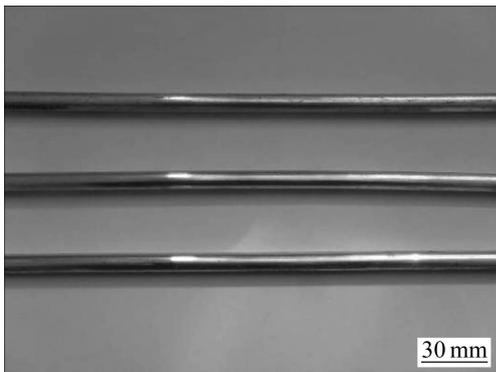


图1 Al-5Ti-1B-10Sr 中间合金线材宏观形貌

Fig.1 Macroscopic feature of Al-5Ti-1B-10Sr master alloy wire

2 结果与讨论

2.1 Al-5Ti-1B-10Sr 复合中间合金线材的显微结构特征

图 2 所示为 Al-5Ti-1B-10Sr 复合中间合金线材的 XRD 谱。结果显示, 其主要由 $\alpha(\text{Al})$ 、 Al_3Ti 、 TiB_2 和 Al_4Sr 相组成, 这与 Al-5Ti-1B 和 Al-20Sr 中间合金中关于 Ti、B 和 Sr 元素生成的中间化合物完全一致^[17-18]。另外, 有研究报道^[19-20], 当 Sr 和 B 同时存在的时候, 会形成 SrB_6 相, 从而影响其细化和变质的效果, 然而在图 2 中并没有明确观察到 SrB_6 相特征峰的出现, 说明采用本工艺制备的 Al-5Ti-1B-10Sr 中间合金中 SrB_6 相的数量较少, 对细化和变质的影响有限。因此, 可以认为在 Al-5Ti-1B 熔体中添加 Al-20Sr 合金基本上没有引起其他合金化合物的生成, 这为采用本工艺制备兼具 Al-Ti-B 和 Al-Sr 合金性能的复合细化变质剂提供了理论依据。

大量的研究已经表明^[21-24], Al_3Ti 和 TiB_2 是晶粒形核的关键因素。即在 Ti 和 B 含量一定的情况下, 其形状、尺寸大小和分布状态对 Al-Si 合金的细化效果

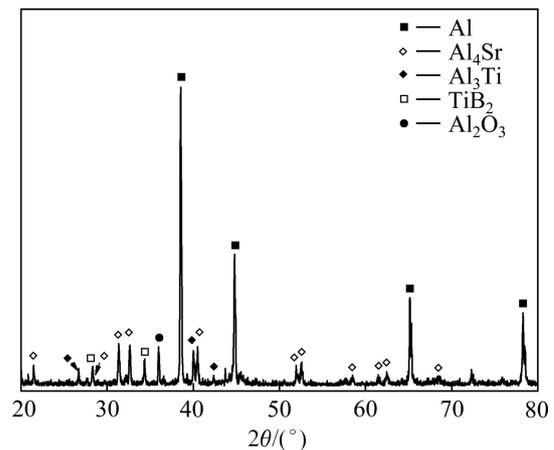


图2 Al-5Ti-1B-10Sr 中间合金线材的 XRD 谱

Fig.2 XRD pattern of Al-5Ti-1B-10Sr master alloy wire

起着决定性的作用。而 Al_4Sr 相的结构特征又与 Al-Si 合金中 Si 相的变质效果紧密相关。因此, Al_3Ti 、 TiB_2 和 Al_4Sr 相的分析对研究 Al-5Ti-1B-10Sr 中间合金线材的细化和变质性能非常重要。

图 3 所示为 Al-5Ti-1B-10Sr 复合中间合金线材的金相组织及 EDS 谱。从图 3 可以看到大量块状和颗粒状的白色第二相, 经 EDS 检测确认这些白色第二相分别是 Al_4Sr 和 Al_3Ti 相。其中尺寸较大, 内部或边缘有很多孔洞、缝隙的白色块状物是 Al_4Sr 相; 而尺寸细小、内部完整的白色颗粒状物是 Al_3Ti 相。尺寸测量统计分析表明, Al_4Sr 相的长度在 5~110 μm 之间(平均 43.2 μm), 宽度在 5~55 μm 之间(平均 26.8 μm)(见图 4(a)和(b))。 Al_3Ti 相的平均直径为 14.4 μm , 直径 $\leq 36 \mu\text{m}$ 的所占比例达到 92.58%, 最大直径为 43.55 μm , 而且在 1 cm \times 2 cm 范围内没有出现尺寸特别大(尺寸大于 50 μm)或长条形的 Al_3Ti 相(见图 4(c))。 TiB_2 颗粒分布均匀, 没有出现大的团聚现象, 经激光粒度仪检测分析后所得 TiB_2 粒径分布范围为 0.24~2.89 μm , 尺寸不大于 1.97 μm 的所占比例为 95.77%, 平均尺寸为 1.42 μm (见图 4(d))。

以上结果表明, 在采用三步加料法和热挤压工艺制备的 Al-5Ti-1B-10Sr 复合中间合金线材中, Al_4Sr 、 Al_3Ti 和 TiB_2 相具有尺寸细小和分布更加均匀的特点, 这主要是该工艺本身的特点所造成的。具体来说, 新工艺的作用如下。

1) 由于在第一步加料时采用了非常特殊的 K_2TiF_6 和 KBF_4 配料比例, 因此, 在保证合金化过程中不出现 AlB_2 相的前提下, 得到了仅含 TiB_2 相或还存在少量 Al_3Ti 相的熔体。通过控制合适的加料速度和搅拌速度, 使新鲜的铝液不断暴露在反应界面并及

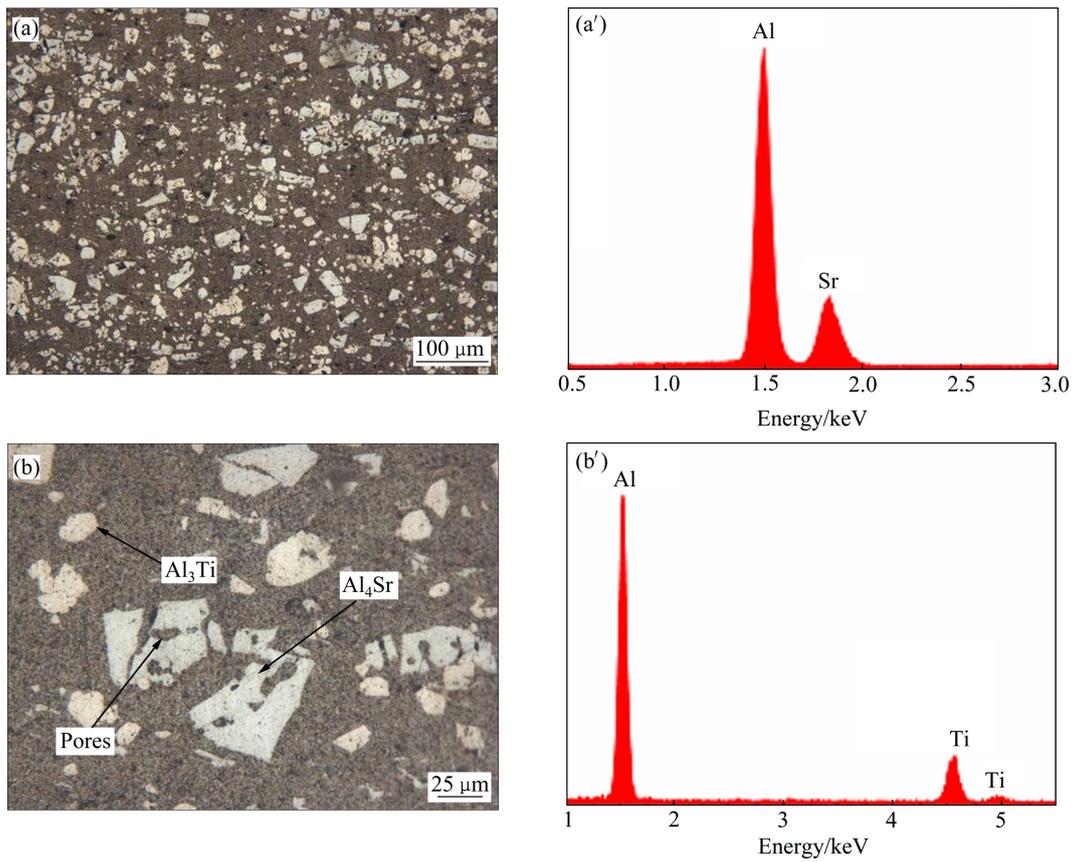


图 3 Al-5Ti-1B-10Sr 中间合金线材的金相组织及 EDS 谱

Fig. 3 Metallographs and EDS patterns of Al-5Ti-1B-10Sr master alloy wire: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification

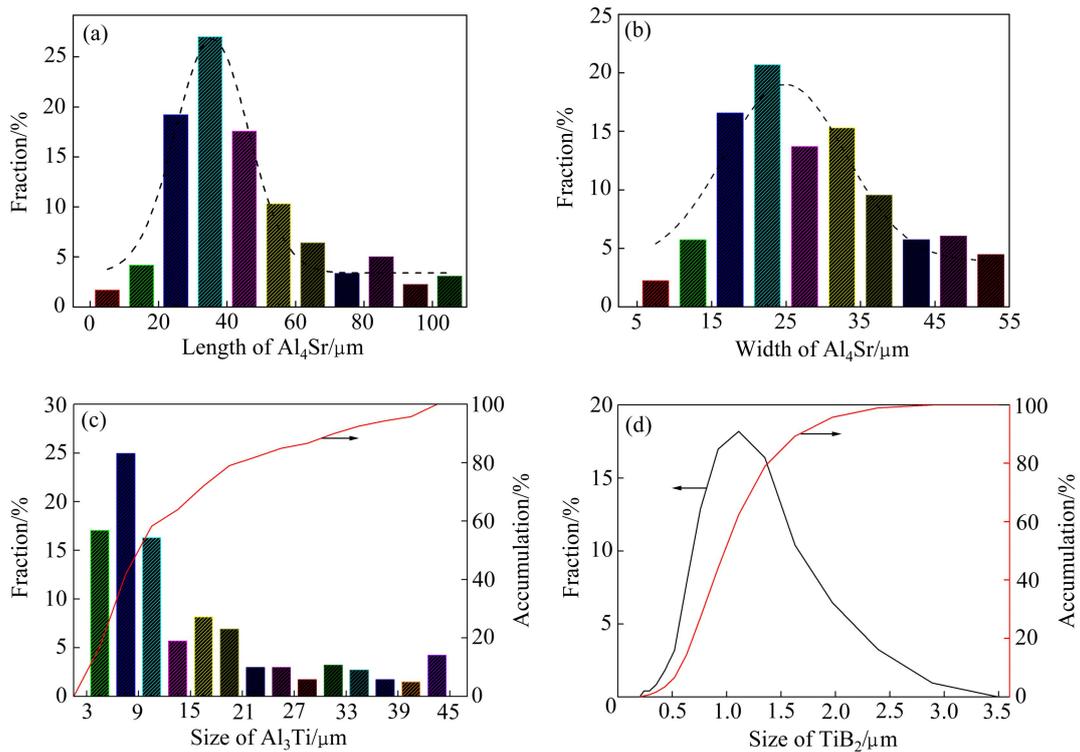


图 4 Al-5Ti-1B-10Sr 合金中 Al₄Sr、Al₃Ti 和 TiB₂ 相尺寸分布曲线

Fig. 4 Size distributions of Al₄Sr, Al₃Ti and TiB₂ phases in Al-5Ti-1B-10Sr master alloy wire: (a) Length distribution of Al₄Sr; (b) Width distribution of Al₄Sr; (c) Size distribution of Al₃Ti; (d) Size distribution of TiB₂

时与 K_2TiF_6 、 KBF_4 发生反应, 减少了 KBF_4 的挥发, 提高了 B 的实收率。同时, 强烈的搅拌作用不断破坏富 B 区域, 影响了熔体中的传质过程, 进而阻止了 TiB_2 相的生长, 使最后生成的 TiB_2 颗粒尺寸细小。

2) 在进行第二步加料时, 正是受到这些细小 TiB_2 相的影响, Al_3Ti 相的晶核形成及长大也明显不同。一方面, 由于 TiB_2 相的异质形核作用, 使 Al_3Ti 晶核的形成变得容易, Al_3Ti 形核率得到了提高; 另一方面, 当 Al_3Ti 相长大到一定尺寸后, 由于表面大量 TiB_2 颗粒的包覆作用, 减缓甚至阻止 Al_3Ti 相的长大, 从而使 Al_3Ti 相的尺寸得到明显减小。

3) 第三步加料采用的是 Al-20Sr 中间合金线材, 而不是金属 Sr 的单独加入。由于 Sr 元素是以 Al_4Sr 相的形式存在于熔体中^[7], 因此 Sr 的氧化程度减小, 烧损率明显下降。一定时间后, 熔体中部分 Al_4Sr 相发生分解, 这些分解后的 Sr 原子会吸附在没有完全分解的 Al_4Sr 相表面重新生长, 从而引起 Al_4Sr 相尺寸的长大。然而, 由于 Al-20Sr 中间合金线材中原来的 Al_4Sr 相尺寸非常细小^[24], 这时虽然有一个长大的过程, 但是总体上 Al_4Sr 相尺寸都不会生长得太大。

4) 在完成整个合金化过程后, Al-5Ti-1B-10Sr 合金又经历了一次截面积大变形热挤压加工过程, 将

Al_4Sr 和 Al_3Ti 又进行了一次破碎处理, 使其尺寸进一步减小, 同时也改变了 Al_4Sr 、 Al_3Ti 和 TiB_2 相的分布状况, 尤其是 TiB_2 相, 其分布更加均匀弥散^[25]。

众所周知, Al_3Ti 和 TiB_2 颗粒的尺寸越小、分布越均匀, 其细化效果就越好; 而 Al_4Sr 相越细小, Sr 原子释放的速度就越快, 变质潜伏期就越短, 变质效果就越好^[24, 26-27]。由此可见, Al-5Ti-1B-10Sr 中间合金线材内细小的 Al_4Sr 、 Al_3Ti 和 TiB_2 相充分保障了它的细化和变质能力。

2.2 Al-5Ti-1B-10Sr 复合中间合金线材的细化变质效果

图 5 所示为未经细化变质处理 Al-13Si 合金的铸态组织。由图 5 可以看出, 未细化变质处理时, Al-13Si 合金主要由粗大的树枝状 $\alpha(Al)$ 、针状共晶 Si 相 ($\alpha(Al)+Si$) 和少量的其他相(如块状初晶 Si、鱼骨状 $\alpha-AlFeSi$ 、条状 Mg_2Si 等)组成。其中, 共晶 Si 相尺寸非常粗大, 平均长度为 $22.46 \mu m$, 严重割裂了基体, 从而引起合金力学性能的大幅度下降。

图 6 所示为添加 0.5%Al-5Ti-1B 中间合金线材(相应的 Ti 含量为 0.025%)处理后 Al-13Si 合金的铸态组织。可以看出, 共晶 Si 相依然显示为粗大的针状, 平

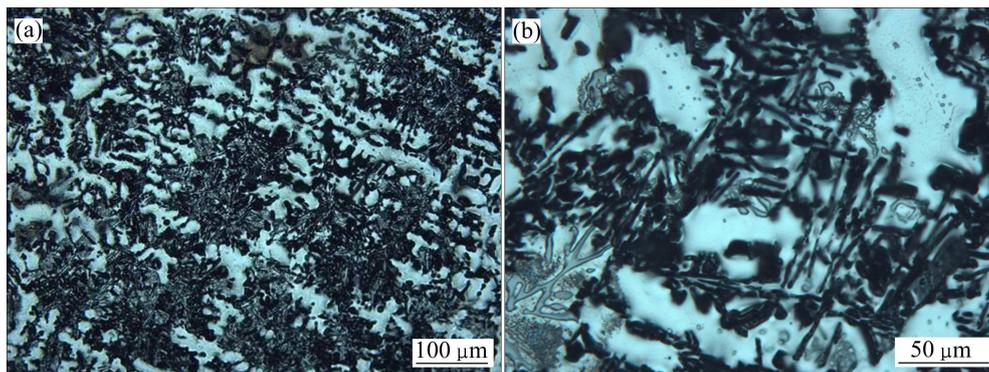


图 5 未细化变质 Al-13Si 合金的金相组织

Fig. 5 Metallographs of untreated Al-13Si alloy: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification

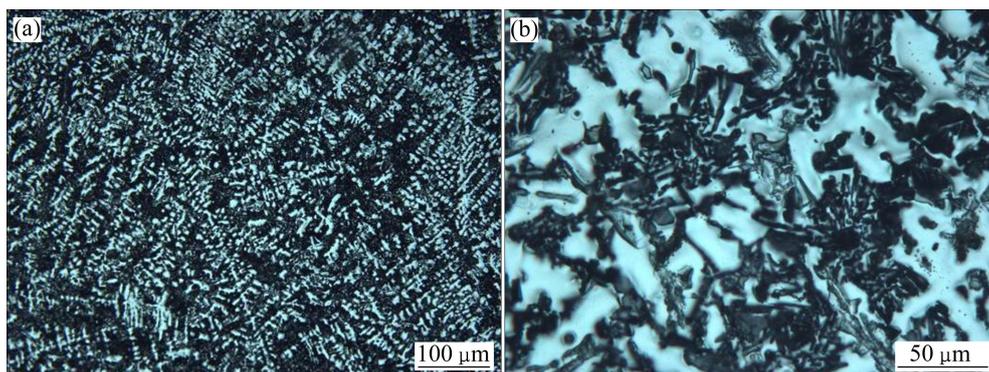


图 6 Al-5Ti-1B 细化处理后 Al-13Si 合金的金相组织

Fig. 6 Metallographs of Al-13Si alloy after adding Al-5Ti-1B master alloy: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification

均长度为 $16.44\ \mu\text{m}$ 左右, 比未细化时减小 26.8% 。但 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒尺寸明显减小, 二次枝晶臂间距从未细化的 $33.2\ \mu\text{m}$ 减小到 $17.9\ \mu\text{m}$ 。

图 7 所示为添加 0.5% 的 Al-10Sr 中间合金线材(相应的 Sr 含量为 0.05%)处理后 Al-13Si 合金的铸态组织。与图 6 不同, 添加 Al-10Sr 后不仅 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒得到一定程度的细化, 二次枝晶臂间距减小为 $28.7\ \mu\text{m}$, 更重要的是共晶 Si 相从粗大的针状转变成了细小的纤维状或颗粒状, 平均长度仅为 $2.22\ \mu\text{m}$ 左右。

以上结果表明, Al-5Ti-1B 对 Al-13Si 合金中 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒具有明显的细化作用, 但对于共晶 Si 相影响较小; 而 Al-10Sr 虽然对 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒的细化作用一般, 但在细化共晶 Si 相上有十分显著的作用。这主要是因为 Al-5Ti-1B 合金内 Al_3Ti 和 TiB_2 颗粒成为 $\alpha(\text{Al})$ 的非均质形核基底, 使晶核数量增多, 但它们对共晶 Si 相的形貌基本上没有影响^[28], 最终只能使 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒得到细化。而 Al-10Sr 合金中 Al_4Sr 相分解出来的游离 Sr 原子一方面以孪晶凹谷机制^[29]或界面台阶机制^[30]对共晶 Si 相的生长起到抑制作用, 使其形貌和尺寸发生改

变; 另一方面又引起合金熔液中固液界面能下降, 导致 $\alpha(\text{Al})$ 的二次枝晶臂间距和一次分枝间距都减小^[31], 因而 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒也得到细化。

图 8 所示为同时添加 0.5% 的 Al-10Sr 和 0.5% 的 Al-5Ti-1B 中间合金线材处理后 Al-13Si 合金的铸态组织。可以看到, 同时添加 Al-10Sr 和 Al-5Ti-1B 后, 不仅 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒尺寸得到明显的细化, 二次枝晶臂间距减小为 $20.6\ \mu\text{m}$, 而且共晶 Si 相也由粗大的针状转变成了细小的纤维状或颗粒状, 平均长度为 $2.45\ \mu\text{m}$ 左右。

图 9 所示为添加 0.5% Al-5Ti-1B-10Sr 复合中间合金线材处理后 Al-13Si 合金的铸态组织。可以看出, $\alpha(\text{Al})$ 和共晶 Si 相的形貌与图 8 的结果相似, 二次枝晶臂间距和平均共晶 Si 相长度分别为 $21.3\ \mu\text{m}$ 和 $2.51\ \mu\text{m}$ 。这说明在添加量相同的情况下, 添加 Al-5Ti-1B-10Sr 中间合金线材具有与同时添加 Al-5Ti-1B 细化剂和 Al-10Sr 变质剂中间合金线材相同的细化和变质效果。

图 10 所示为不同细化剂和变质剂处理后 Al-13Si 合金的硬度测试结果。可以看出, 细化处理和变质处

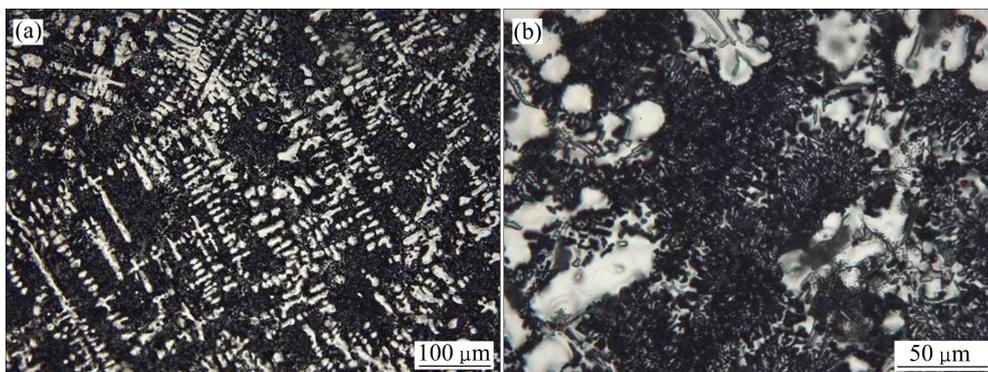


图 7 添加 Al-10Sr 变质处理后 Al-13Si 合金的金相组织

Fig. 7 Metallographs of Al-13Si alloy after adding Al-10Sr master alloy: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification

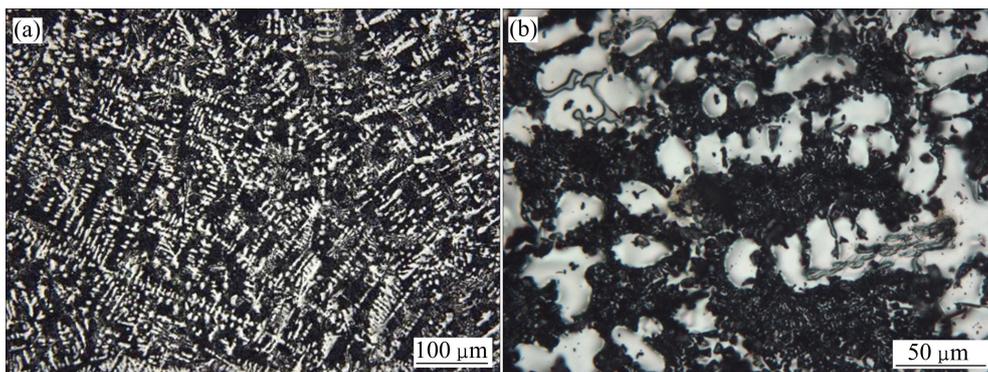


图 8 添加 Al-5Ti-1B+Al-10Sr 细化变质处理后 Al-13Si 合金的金相组织

Fig. 8 Metallographs of Al-13Si alloy after adding Al-5Ti-1B+Al-10Sr master alloy: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification

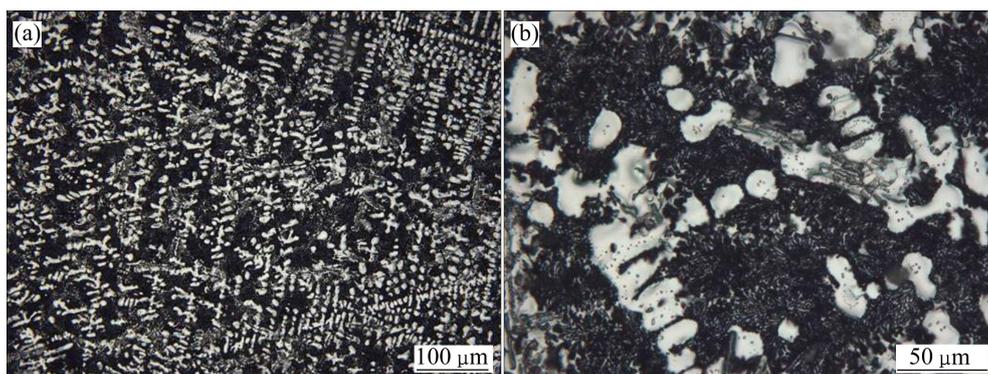


图9 添加 Al-5Ti-1B-10Sr 细化变质处理后 Al-13Si 合金的金相组织

Fig. 9 Metallographs of Al-13Si alloy after adding Al-5Ti-1B-10Sr master alloy: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification

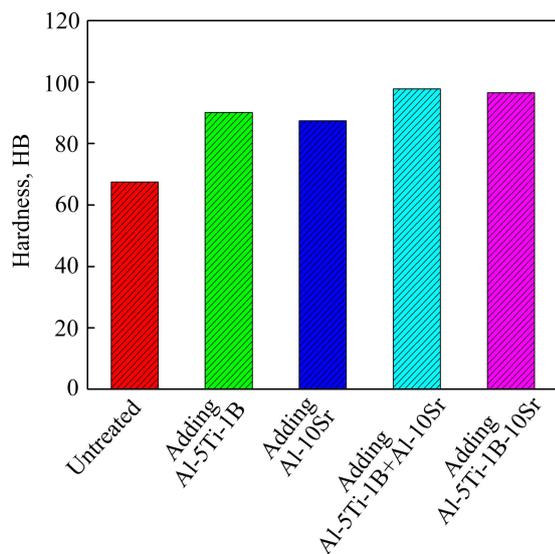


图10 Al-13Si 合金细化变质处理前后的硬度测试结果

Fig. 10 Hardness of Al-13Si alloy before and after refinement/modification treatment

理对合金的力学性能影响显著。未处理时,合金的硬度为 67.4HB, Al-5Ti-1B 细化处理后,合金力学性能得到改善,硬度达到 90.1HB。Al-10Sr 变质处理后,合金力学性能同样也得到改善,硬度达到 87.4HB。与原来相比,细化处理后硬度提高了 33.7%,而变质处理后硬度只提高了 29.7%。这表明细化 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒比改善共晶 Si 相更有利于提升合金的力学性能。另外,与单独添加细化剂或者单独添加变质剂相比,当在 Al-13Si 合金中同时添加细化剂和变质剂,或者添加 Al-5Ti-1B-10Sr 复合中间合金以后,由于 $\alpha(\text{Al})$ 和共晶 Si 相同时得到了细化和变质,使 Al-Si 合金的力学性能得到了更大程度的提升,硬度分别达到 97.7HB 和 96.5HB。

3 结论

1) 提出一种采用三步加料法和热挤压工艺制备 Al-Ti-B-Sr 复合中间合金线材的新工艺。由该工艺制备的复合中间合金能够有效地控制 Al_4Sr 、 Al_3Ti 和 TiB_2 相的尺寸和分布,使其细化和变质能力得到提高。另外,该工艺制备的复合中间合金线材表面光滑,无气泡、起皮和裂纹等。

2) 与常规的细化与变质工艺相比,采用本工艺生产复合中间合金对 Al-Si 合金进行细化和变质处理,具有 Sr 元素利用效率高、细化与变质效果好、简化生产工艺、节能减排等特点。

REFERENCES

- [1] DOLATA-GROSZ A, DYZIA M, ŚLEZIONA J. Influence of modification on structure, fluidity and strength of 226D aluminium alloy[J]. Archives of Foundry Engineering, 2008, 8: 13-16.
- [2] SHIN S S, KIM E S, YEOM G Y, LEE J C. Modification effect of Sr on the microstructures and mechanical properties of Al-10.5Si-2.0Cu recycled alloy for die casting[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 532: 151-157.
- [3] KORI S A, CHANDRASHEKHARAI AH T M. Studies on the dry sliding wear behaviour of hypoeutectic and eutectic Al-Si alloys [J]. Wear, 2007, 263: 745-755.
- [4] LIPIŃSKI T. Tensile strength of the Al-9%Si alloy modified with Na, F and Cl Compounds[J]. Archives of Foundry Engineering, 2010, 10: 89-92.
- [5] BAO Guo-ju, ZUO Min, LI Da-kui, LI Yun-guo, LIU Xiang-fa. The improvement of microstructures and mechanical properties

- of near eutectic Al-Si multicomponent alloy by an Al-8Zr-2P master alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 531: 55-60.
- [6] GUO Jian-ting, DU Xing-hao. Morphological change and its mechanism of eutectic silicon for strontium-modified alloy A357[J]. *J Iron Steel Res Int*, 2004, 11(1): 47-51.
- [7] LIAO Cheng-wei, CHEN Jian-chun, PAN Chun-xu. Microstructure of Al₄Sr phase in Al-Sr master alloy and its effect on modification properties[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 27: 805-814.
- [8] LU S Z, HELLAWELL A. Modification of Al-Si Alloys: Microstructure, thermal analysis and mechanics[J]. *JOM*, 1995, 47: 38-40.
- [9] CHANDRASHEKHARAI AH T M, KORI S A. Effect of grain refinement and modification on the dry sliding wear behaviour of eutectic Al-Si alloys[J]. *Tribology International*, 2009, 42: 59-65.
- [10] PRASADA RAO A K, DAS K, MURTY B S, CHAKRABORTY M. Al-Ti-C-Sr master alloy-A melt inoculant for simultaneous grain refinement and modification of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 480: L49-L51.
- [11] 高 耸, 疏 达, 王 镭, 韩延峰, 王 俊, 孙宝德. Al-Ti-B 晶粒细化剂的研究进展[J]. *轻合金加工技术*, 2007, 35(2): 7-10.
- GAO Song, SHU Da, WANG Lei, HAN Yan-feng, WANG Jun, SUN Bao-de. Research progress of Al-Ti-B grain refiner[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2007, 35(2): 7-10.
- [12] 廖恒成, 孙 瑜, 孙国雄, 汤崇熙. Al-5%Ti-1%B 对 Sr 变质 Al-13%Si 合金组织影响的研究[J]. *铸造*, 2000, 49(5): 251-256.
- LIAO Heng-cheng, SUN Yu, SUN Guo-xiong, TANG Chong-xi. Effect of Al-5%Ti-1%B on the microstructure of Al-13.0%Si alloys modified with Sr[J]. *Foundry*, 2000, 49(5): 251-256.
- [13] 王 军, 赵红亮, 宋 勇, 张立超, 卢广玺. 含 C 细化剂和含 Sr 变质剂对 A356 铝合金组织的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2009, 37(10): 27-30.
- WANG Jun, ZHAO Hong-liang, SONG Yong, ZHANG Li-chao, LU Guang-xi. Effects of refiner contained C and modifier contained Sr on structures of A356 alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2009, 37(10): 27-30.
- [14] 陈忠伟, 何 志, 介万奇. Al-5Ti 细化剂和 Al-10Sr 变质剂对 A357 合金微观组织和力学性能的影响[J]. *铸造*, 2005, 54(2): 129-133.
- CHEN Zhong-wei, HE Zhi, JIE Wan-qi. Effect of Al-5Ti refiner and Al-10Sr modifier on microstructure and mechanical properties of A357 alloy[J]. *Foundry*, 2005, 54(2): 129-133.
- [15] 亓效刚, 边秀房, 王玉厚. Al-Ti-B 和 Al-5%Sr 中间合金对轮毂铝合金的晶粒细化和变质作用[J]. *铸造*, 2000, 49(6): 321-326.
- QI Xiao-gang, BIAN Xiu-fang, WANG Yu-hou. Grain refinement and modification effects of Al-Ti-B and Al-5%Sr master alloy on the wheel aluminum alloy[J]. *Foundry*, 2000, 49(6): 321-326.
- [16] 亓效刚, 王玉厚, 边秀房. Al-Ti-B-Sr 对 Al-Si-Mg 合金的变质细化作用[J]. *轻合金加工技术*, 2000, 28(7): 10-12.
- QI Xiao-gang, WANG Yu-hou, BIAN Xiu-fang. The refining effect of Al-Ti-B-Sr master alloy on the Al-Si-Mg alloy [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2000, 28(7): 10-12.
- [17] 廖成伟, 李 洋, 涂 睿, 陈建春, 潘春旭. 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, 32(3): 203-207.
- LIAO Cheng-wei, LI Yang, TU Rui, CHEN Jian-chun, PAN Chun-xu. Preparation of high purity Al-5Ti-1B grain refiner and its microstructural characterizations[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2012, 32(3): 203-207.
- [18] CHEN Jian-chun, LIAO Cheng-wei, PAN Chun-xu. Technique for producing high effective, fast modification and high Sr content Al-Sr₂₀ master alloy and its application[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 396/398: 2361-2365.
- [19] 李建国, 马洪涛, 张柏清, 方鸿生. Al-3Ti-4B 细化剂和 Al-10Sr 变质剂对 ZL104 合金的联合作用[J]. *金属学报*, 2000, 36(6): 579-583.
- LI Jian-guo, MA Hong-tao, ZHANG Bai-qing, FANG Hong-sheng. The combination effect of Al-3Ti-4B and Al-10Sr master alloy on ZL104 alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2000, 36(6): 579-583.
- [20] 韩延峰, 刘相法, 边秀房. Al-10Sr 对 TiB₂/ZL102 复合材料变质效果的研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2001, 3: 21-23.
- HAN Yan-feng, LIU Xiang-fa, BIAN Xiu-fang. The modification effects of Al-10Sr on TiB₂/ZL102 composite[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2001, 3: 21-23.
- [21] NOMOTO S, MINAMOTO S, NAKAJIMA K. Numerical simulation for grain refinement of aluminum alloy by multi-phase-field model coupled with CALPHAD[J]. *ISIJ International*, 2009, 49(7): 1019-1023.
- [22] 王顺成, 张彩锦, 戚文军, 郑开宏, 李建湘. 国外几种 Al-Ti-B 晶粒细化剂的质量评价[J]. *轻合金加工技术*, 2011, 39(6): 11-14.
- WANG Shun-cheng, ZHANG Cai-jin, QI Wen-jun, ZHENG Kai-hong, LI Jian-xiang. Quality evaluation of overseas Al-Ti-B grain refiners[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2011, 39(6): 11-14.
- [23] 李 克, 饶 磊, 闰 洪, 王 俊, 孙宝德. 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, 55(9): 894-897.
- LI Ke, RAO Lei, YAN Hong, WANG Jun, SUN Bao-de. Effect of rapid solidification on the microstructure and grain refinement

- of Al-Ti-B master alloy[J]. Foundry, 2006, 55(9): 894-897.
- [24] LIAO Cheng-wei, CHEN Jian-chun, LI Yang, TU Rui, PAN Chun-xu. Morphologies of Al₄Sr intermetallic phase and its modification property upon A356 alloys[J]. Journal of Material Science & Technology, 2012, 28(6): 524-530.
- [25] 曲 哲, 雷荣滋. AlTiB 晶粒细化剂微观组织的电镜观察[J]. 轻合金加工技术, 2008, 36(2): 49-55.
QU Zhe, ALEX Louie. SEM observation of AlTiB master alloy microstructure[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2008, 36(2): 49-55.
- [26] 周玉辉, 黄清民. 改善 Al-Ti-B 中间合金微观组织的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(4): 311-313.
ZHOU Yu-hui, HUANG Qing-min. Microstructure improvement of Al-Ti-B master alloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2008, 28(4): 311-313.
- [27] ZHANG Zhong-hua, BIAN Xiu-fang, WANG Yan. Microstructures and modification performance of Al-10Sr alloy prepared by molten salts electrolysis and direct mixing process[J]. Materials Science Forum, 2002, 396/402: 227-232.
- [28] 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: 94-104.
- [29] SHAMSUZZOHA M, HOGAN L M. Twinning in fibrous eutectic silicon in modified Al-Si alloys[J]. Journal of Crystal Growth, 1985, 72: 735-737.
- [30] LU S Z, HELLAWELL A. Growth mechanisms of silicon in Al-Si alloys[J]. Journal of Crystal Growth, 1985, 73: 316-328.
- [31] 廖恒成, 丁 毅, 孙国雄. Sr 对近共晶 Al-Si 合金中 α 枝晶生长行为的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(3): 245-249.
LIAO Heng-cheng, DING Yi, SUN Guo-xiong. Effect of strontium on growth of α dendrite in near-eutectic Al-Si alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(3): 245-249.

(编辑 龙怀中)