



粉末压制 Al-5Ti-1B 合金的 显微组织与晶粒细化性能

王顺成, 康跃华, 周 楠, 宋东福, 郑开宏

(广东省材料与加工研究所, 广州 510650)

摘 要: 采用雾化工艺制备 Al-5Ti-1B 合金粉, 然后压制 Al-5Ti-1B 合金, 研究了粉末压制 Al-5Ti-1B 合金的显微组织与晶粒细化性能, 并与铸造 Al-5Ti-1B 合金进行了比较。结果表明: 雾化快速凝固可以抑制 TiB_2 粒子的团聚和细化 $TiAl_3$ 相, 使 TiB_2 粒子和 $TiAl_3$ 相均匀分布在粉末压制 Al-5Ti-1B 合金的 $\alpha(Al)$ 基体上。在纯铝熔体中添加 0.2%(质量分数)的粉末压制 Al-5Ti-1B 合金并保温 2 min, 可使纯铝的晶粒组织从粗大的柱状晶细化为平均直径为 183 μm 的等轴晶。保温时间延长至 180 min, 纯铝的晶粒平均直径仍保持在 229 μm 。与铸造 Al-5Ti-1B 合金相比, 粉末压制 Al-5Ti-1B 合金具有更强的晶粒细化能力和抗细化衰退能力。

关键词: 晶粒细化剂; Al-Ti-B 合金; 气体雾化; 粉末压制; 快速凝固

文章编号: 1004-0609(2019)-08-1583-08

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

晶粒细化可以提高铝及铝合金铸锭的组织成分均匀性和塑性加工性能。Al-Ti-B 合金是目前铝加工行业最常用的晶粒细化剂, 大部分的铝及铝合金在铸造过程中都需要添加 Al-Ti-B 合金^[1]。目前, Al-Ti-B 合金主要采用氟盐铝热反应法生产, 即先制备成 Al-Ti-B 合金液, 然后再铸造成合金锭或连铸连轧成合金杆。由于 TiB_2 粒子之间具有较强的亲和性以及合金液的非平衡凝固原因, 导致 Al-Ti-B 合金中 TiB_2 粒子团聚严重。 TiB_2 粒子团聚首先会降低 Al-Ti-B 合金的晶粒细化性能, 其次还会阻塞铝及铝合金液的过滤板或过滤管, 甚至使铝材和箔材表面产生砂眼、针孔和撕裂等缺陷, 无法满足高性能、高精密、高光亮等高端工业铝材的生产需要^[2]。

为了提高 Al-Ti-B 合金的质量, 研究人员先后研究了电磁搅拌^[3-4]、超声振动^[5-6]、甩带快冷^[7]、剧塑性变形^[8]、合金元素^[9-12]等对 Al-Ti-B 合金显微组织与晶粒细化能力的影响。这些方法虽然可以提高 Al-Ti-B 合金的组织均匀性和晶粒细化能力, 但都无法完全克服 TiB_2 粒子的团聚问题。雾化是一种快速凝固工艺, 常用于制备金属及合金粉^[13-14]。但迄今为止, 未见有采用雾化工艺制备 Al-Ti-B 合金的报道。因此, 本文采用雾化工艺制备 Al-5Ti-1B 合金粉, 然后压制 Al-5Ti-1B 合金, 研究了粉末压制 Al-5Ti-1B 合金

的显微组织与晶粒细化能力, 并与铸造 Al-5Ti-1B 合金进行了比较。

1 实验

实验材料为纯铝(99.85%, 质量分数, 下同)、 K_2TiF_6 和 KBF_4 粉。实验设备为中频感应电炉、雾化制粉机和 200 t 四柱油压机。采用氟盐铝热反应法制备 Al-5Ti-1B 合金液, 先将 K_2TiF_6 和 KBF_4 粉按质量比为 2.2:1 的比例混合, 再在中频感应电炉内加热熔化纯铝并过热至 850 $^{\circ}C$, 然后加入 K_2TiF_6 和 KBF_4 的混合粉并搅拌反应 30 min, 经精炼、除渣后得到 Al-5Ti-1B 合金液。对 Al-5Ti-1B 合金液进行取样, 经 JY-ULTIMA2 型等离子体发射光谱仪分析, Al-5Ti-1B 合金液的化学成分(质量分数)为: Ti 5.02%, B 1.05%, Fe 0.08%, Si 0.09%, V 0.01%, 其余为 Al。

取部分 Al-5Ti-1B 合金液降温至 750 $^{\circ}C$ 后浇注到钢模内, 铸造成 Al-5Ti-1B 合金。将其余 Al-5Ti-1B 合金液转移到雾化制粉机内, 在氮气压力为 3.5 MPa、雾化温度为 750 $^{\circ}C$ 和氮气保护条件下雾化成 Al-5Ti-1B 合金粉, 然后在温度为 500 $^{\circ}C$ 、压强为 90 MPa 条件下将合金粉压制 Al-5Ti-1B 合金。

基金项目: 广东省科学院属骨干科研机构创新能力建设项目(2017GDASCX-0117); 广东省科技厅公益研究与能力建设项目(2017A070702019)

收稿日期: 2018-08-08; **修订日期:** 2018-12-11

通信作者: 王顺成, 教授级高工, 博士; 电话: 020-61086333; E-mail: wangsunceng@163.com

晶粒细化实验对象为纯铝,实验设备为 7.5 kW 石墨坩埚电阻炉。将纯铝置于石墨坩埚电阻炉内加热熔化并过热至 720 ℃,经精炼和扒渣后,分别加入质量分数为 0.2% 的粉末压制 Al-5Ti-1B 合金和铸造 Al-5Ti-1B 合金,搅拌并保温 2、60、120、180 min 后,分别取纯铝液浇注到置于耐火砖上外径 75 mm、高 25 mm、壁厚 5 mm 的环状钢模内,铸造成直径 65 mm、高 25 mm 的纯铝锭试样。

采用 NANOSEM430 型高分辨率场发射扫描电子显微镜观察 Al-5Ti-1B 合金粉的形貌。在 D/MAX-RC 型 X 射线衍射仪对 Al-5Ti-1B 合金粉的物相组成进行分析。将 Al-5Ti-1B 合金粉镶嵌制样,在粉末压制和铸造 Al-5Ti-1B 合金上分别取样,试样经磨制和抛光后,在 NANOSEM430 型高分辨率场发射扫描电子显微镜上进行显微组织观察和能谱分析。将细化实验的纯铝锭试样沿高度的中间部位锯开,经车削、磨制、抛光并用混合酸溶液(70 mL HCl+25 mL HNO₃+5 mL HF)腐蚀后,观察纯铝锭试样的晶粒组织,采用截线法测量纯铝锭的晶粒平均直径。

2 结果与分析

2.1 显微组织

图 1 所示为 Al-5Ti-1B 合金粉的形貌和显微组织。雾化制粉过程可分为液流的破碎和液滴的飞行冷却两个阶段^[15]。Al-5Ti-1B 合金液在高速气流的喷射冲击作用下首先破碎成液滴,液滴在飞行过程中由于表面张力的作用而发生球化,冷却凝固后得到球形 Al-5Ti-1B 合金粉。部分液滴在飞行过程中受到高速气流的喷射冲击作用而发生变形,冷却凝固后则得到椭圆形的 Al-5Ti-1B 合金粉。从图 1(a)可看到,大部分 Al-5Ti-1B 合金粉的形状呈球形,合金粉的粒径小于 100 μm,少部分 Al-5Ti-1B 合金粉的形状呈椭圆形。

图 2 所示为 Al-5Ti-1B 合金粉的 XRD 谱。从图 2 可看到,Al-5Ti-1B 合金粉由 $\alpha(\text{Al})$ 、TiAl₃ 和 TiB₂ 组成。采用雾化工艺制备 Al-5Ti-1B 合金粉,在高速气流的喷射冲击作用下,Al-5Ti-1B 合金液首先雾化成液滴,该过程会把合金液中的大量 TiB₂ 粒子和 Ti 原子分散到液滴内。液滴在飞行过程中的冷却速度可高达 10³~10⁷ K/s^[16-18],液滴的尺寸越小,冷却速度越快,快速凝固可抑制液滴内 TiB₂ 粒子发生聚集和 TiAl₃ 相的长大。从图 1(b)可看到,TiB₂ 粒子和 TiAl₃ 相均匀分布在粉内的 $\alpha(\text{Al})$ 基体上,未见有 TiB₂ 粒子的偏析团聚现象和粗大的 TiAl₃ 相。由于液滴的尺寸越小,飞

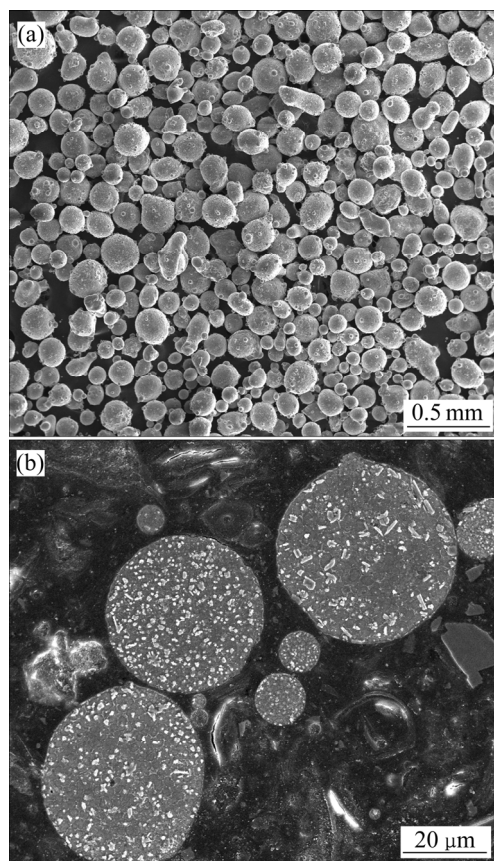


图 1 Al-5Ti-1B 合金粉的形貌和显微组织

Fig. 1 Morphology (a) and microstructure (b) of Al-5Ti-1B alloy powders

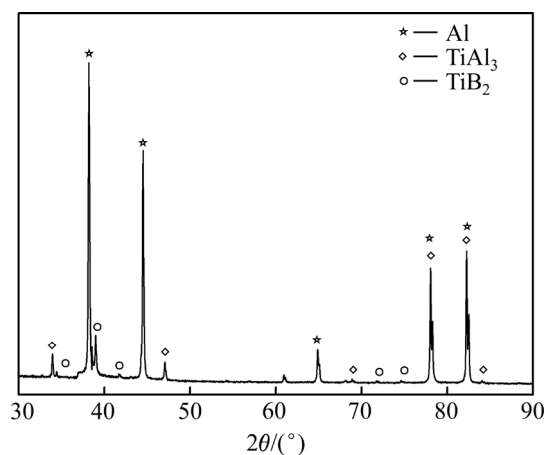


图 2 Al-5Ti-1B 合金粉的 XRD 谱

Fig. 2 XRD pattern of Al-5Ti-1B alloy powders

行过程中的冷却凝固速度越快,越有利于抑制液滴内 TiB₂ 粒子的团聚和 TiAl₃ 相的长大。因此,Al-5Ti-1B 合金粉的粒径越小,粉内的 TiAl₃ 相尺寸越细小,TiB₂ 粒子和 TiAl₃ 相分布也越均匀。

图 3 所示为粉末压制 Al-5Ti-1B 合金的显微组织,

图 4 所示为 TiB_2 粒子和 TiAl_3 相的扫描电镜能谱。从图 3 可看到, TiB_2 粒子和 TiAl_3 相均匀分布在粉末压制 Al-5Ti-1B 合金的 $\alpha(\text{Al})$ 基体上, 未见有 TiB_2 粒子的团聚块和粗大的 TiAl_3 相。结合扫描电镜能谱分析结果(见图 4)可看到, 图 3(b)中的细小颗粒状物为 TiB_2 粒子, 板条状和方块状物为 TiAl_3 相, 其中, TiB_2 粒子的尺寸小于 $1\text{ }\mu\text{m}$, TiAl_3 相的尺寸小于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。上述结果表明, 采用气雾化工艺将 Al-5Ti-1B 合金液雾化成粉, 可以抑制 TiB_2 粒子的团聚和细化 TiAl_3 相, 然后再将合金粉压制成 Al-5Ti-1B 合金, 最终可使 TiB_2 粒子和 TiAl_3 相均匀分布在粉末压制 Al-5Ti-1B 合金的 $\alpha(\text{Al})$ 基体上。

图 5 所示为铸造 Al-5Ti-1B 合金的显微组织。从图 5 可看到, 由于 Al-5Ti-1B 合金液在铸造过程中的冷却凝固速度较慢, 且合金液的冷却凝固属于非平衡凝固, 最终导致大量的 TiB_2 粒子偏析于 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒的晶界上, 形成粗大的 TiB_2 粒子团聚块, 而 TiAl_3 相则长大成粗大的板条状或方块状, TiAl_3 相的最大尺寸达到 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。

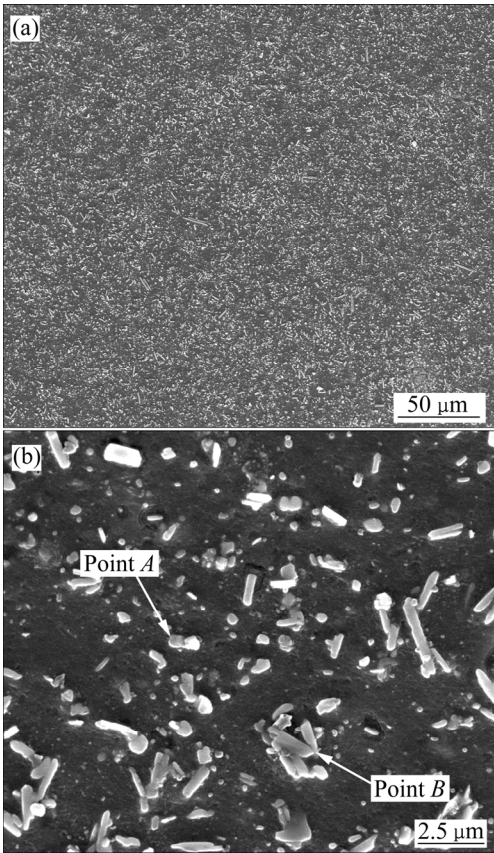


图 3 粉末压制 Al-5Ti-1B 合金的显微组织
Fig. 3 Microstructures of powder compacted Al-5Ti-1B alloy: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification

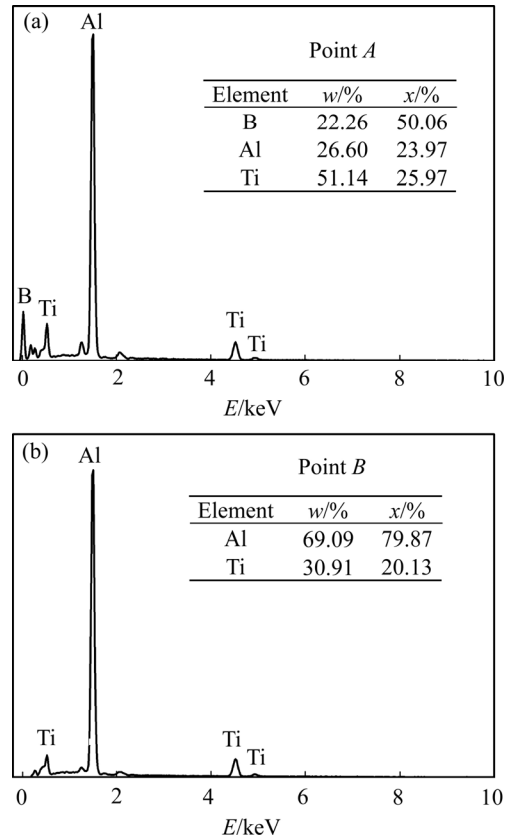


图 4 TiB_2 粒子和 TiAl_3 相的扫描电镜能谱
Fig. 4 EDS spectra of TiB_2 particle and TiAl_3 phase: (a) Point A in Fig. 3(b); (b) Point B in Fig. 3(b)

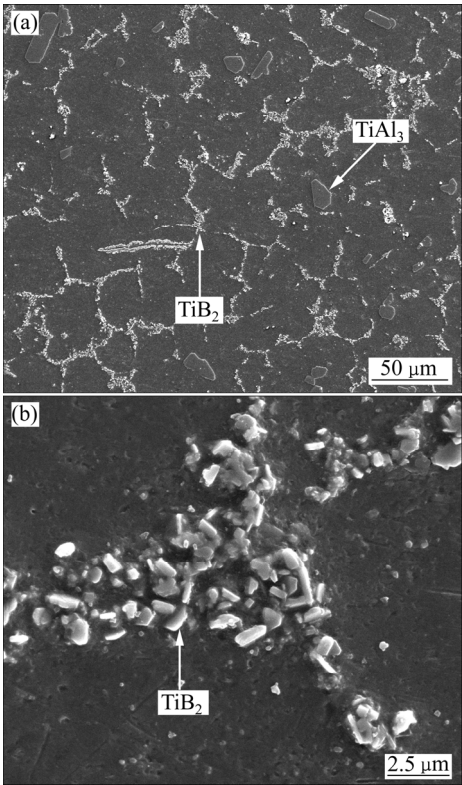


图 5 铸造 Al-5Ti-1B 合金的显微组织
Fig. 5 Microstructures of as-cast Al-5Ti-1B alloy: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification

2.2 晶粒细化性能

图6所示为未添加 Al-5Ti-1B 合金时纯铝的晶粒组织。从图6可看到,未添加 Al-5Ti-1B 合金时,纯铝的晶粒组织为发达的柱状晶,受钢模激冷作用,距离纯铝锭表层约 5 mm 宽的区域形成一层细小的柱状晶,纯铝锭中心区域为粗大的等轴晶,其余区域均为粗大的柱状晶,晶粒平均直径达到 2500 μm 。



图6 未添加 Al-5Ti-1B 合金时纯铝的晶粒组织

Fig. 6 Grain structure of pure aluminum without adding Al-5Ti-1B alloy

图7和8所示分别为添加 0.2% 的粉末压制 Al-5Ti-1B 合金和铸造 Al-5Ti-1B 合金后保温不同时间时纯铝的晶粒组织。从图7和8可看到,添加粉末压制 Al-5Ti-1B 合金和铸造 Al-5Ti-1B 合金后,纯铝的晶粒组织都被细化为细小均匀的等轴晶,晶粒尺寸显著减小。但添加 0.2% 的粉末压制 Al-5Ti-1B 合金并保温 2 min 时,纯铝锭被细化为平均直径 183 μm 的等轴晶,而添加 0.2% 的铸造 Al-5Ti-1B 合金并保温 2 min 时,纯铝锭被细化为平均直径 218 μm 的等轴晶。通过比较可看到,粉末压制 Al-5Ti-1B 合金比铸造 Al-5Ti-1B 合金具有更强的晶粒细化能力。

图9所示为纯铝的晶粒平均直径随保温时间的变化曲线。从图9可看到,添加粉末压制 Al-5Ti-1B 合金和铸造 Al-5Ti-1B 合金后,随着保温时间的延长,纯铝的晶粒尺寸都逐渐增大,表明晶粒细化效果都出现了衰退现象。但添加粉末压制 Al-5Ti-1B 合金,当保温时间延长至 180 min 时,纯铝的晶粒平均直径为 229 μm ;而添加铸造 Al-5Ti-1B 合金,当保温时间延长至 180 min 时,纯铝的晶粒平均直径增大到了 305 μm 。通过比较可看到,粉末压制 Al-5Ti-1B 合金比铸造 Al-5Ti-1B 合金具有更强的抗细化衰退能力。

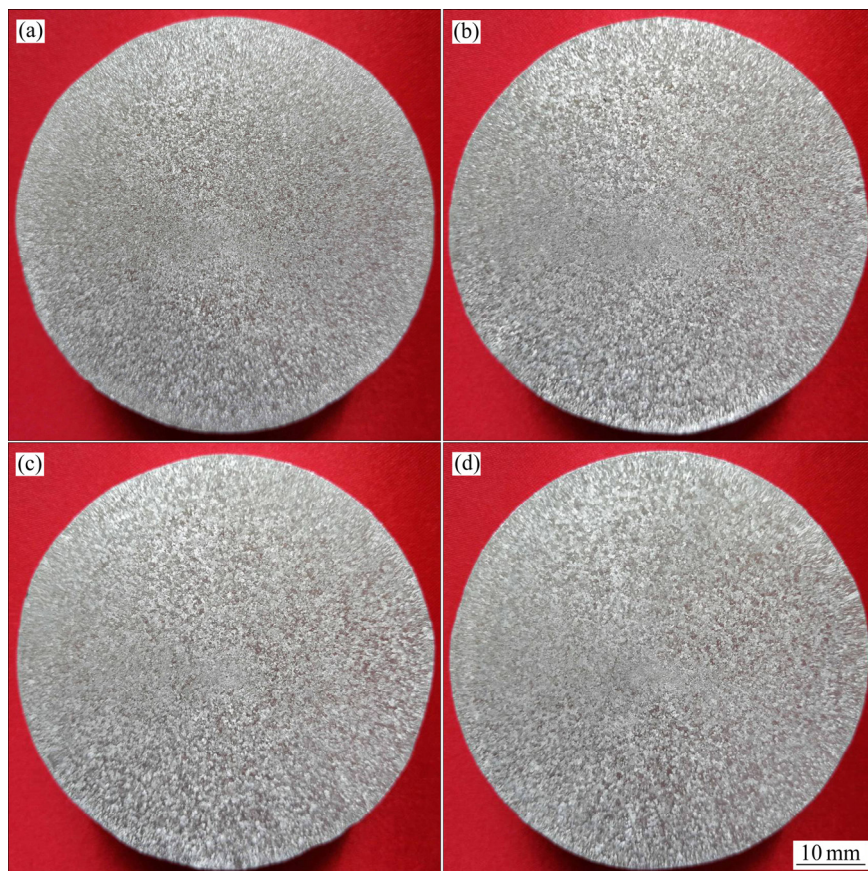


图7 添加粉末压制 Al-5Ti-1B 合金后保温不同时间时纯铝的晶粒组织

Fig. 7 Grain structures of pure aluminum with adding powder compacted Al-5Ti-1B alloy and holding different time: (a) 2 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 180 min

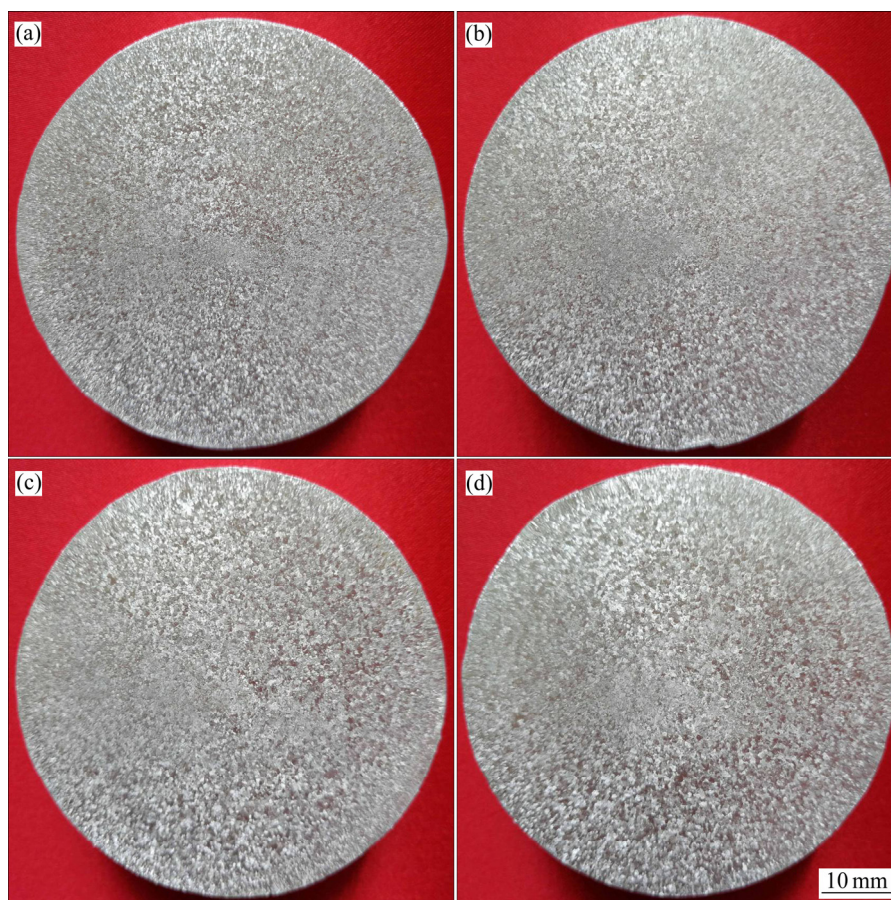


图 8 添加铸造 Al-5Ti-1B 合金后保温不同时间时纯铝的晶粒组织

Fig. 8 Grain structures of pure aluminum with adding as-cast Al-5Ti-1B alloy and holding different time: (a) 2 min; (b) 60 min; (c) 120 min; (d) 180 min

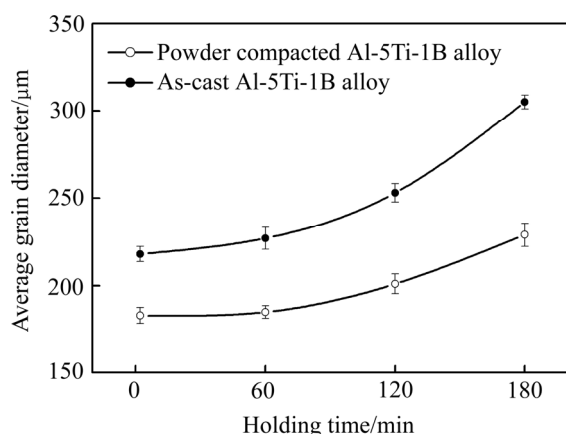


图 9 纯铝的晶粒平均直径随保温时间的变化曲线

Fig. 9 Change curves of average grain diameter of pure aluminum with holding time

3 讨论

采用氟盐铝热反应法制备 Al-5Ti-1B 合金液,

K_2TiF_6 和 KBF_4 与铝液的总反应式如下^[19-20]:



Al-5Ti-1B 合金液中含有大量 TiB_2 粒子, 由于 TiB_2 粒子之间具有较强的亲和性而容易聚集成团^[21]。Al-5Ti-1B 合金液是 Ti 原子的过饱和熔体, 并且 $TiAl_3$ 相的生长具有择优取向, 在合金液的非平衡凝固过程中, $TiAl_3$ 相容易长大成粗大的板块状。

气雾化制粉过程可分为液流的破碎和液滴的飞行冷却两个阶段, 在高速气流的喷射冲击作用下, Al-5Ti-1B 合金液首先被雾化成液滴, 该过程把合金液中的大量 TiB_2 粒子和 Ti 原子分散到液滴内, 这为抑制 TiB_2 粒子的团聚和 $TiAl_3$ 相的长大奠定了基础。液滴在随后的飞行过程中快速冷却凝固, 从而可以抑制液滴内 TiB_2 粒子发生团聚和 $TiAl_3$ 相的长大。当合金粉压制成 Al-5Ti-1B 合金后, 最终使 TiB_2 粒子和 $TiAl_3$ 相都均匀分布在粉末压制 Al-5Ti-1B 合金的 $\alpha(Al)$ 基体上。而在传统铸造过程中, 由于 Al-5Ti-1B 合金液的冷却凝固速度较慢, 导致 TiB_2 粒子偏聚在 $\alpha(Al)$ 晶粒

的晶界上,形成粗大的 TiB_2 粒子团聚块,而 TiAl_3 相则长大成粗大的板条状。

根据 Al-5Ti-1B 合金的双重形核细化机制^[22-23],当 Al-5Ti-1B 合金加入到铝熔体后,Al-5Ti-1B 合金发生熔解, TiB_2 粒子由于熔点高(2980 °C)而直接保留在铝熔体中, TiAl_3 相则会逐渐熔解并释放出游离 Ti 原子。在铝熔体冷却凝固过程中,由于 Ti 原子与 TiB_2 粒子之间存在活性梯度,Ti 原子会逐渐向 TiB_2 粒子的表面富集,并在 TiB_2 粒子的表面上重新形成 TiAl_3 相。当铝熔体温度降到包晶反应温度 665 °C 时, TiB_2 粒子表面的 TiAl_3 相与铝熔体发生包晶反应生成 $\alpha(\text{Al})$ 晶核,最后长大成 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒,即 TiB_2 粒子作为 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒异质形核的核心起到晶粒细化作用。

由于铸造 Al-5Ti-1B 合金中的 TiB_2 粒子聚集成团,当铸造 Al-5Ti-1B 合金加入到铝熔体后, TiB_2 粒子难以均匀分散到铝熔体中,使参与 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒异质形核的 TiB_2 粒子数量减少,从而降低了铸造 Al-5Ti-1B 合金的晶粒细化能力。由于 TiB_2 粒子的密度较大(4.52 g/cm³),在铝熔体静置保温过程中会发生自然沉降,使参与 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒异质形核的 TiB_2 粒子数量逐渐减少,即 Al-5Ti-1B 合金的晶粒细化效果出现衰退^[24]。而 TiB_2 粒子聚集成团则会加速 TiB_2 粒子在铝熔体中的沉降速度,使 Al-5Ti-1B 合金的晶粒细化效果的衰退速度加快。正是由于 TiB_2 粒子聚集成团,使铸造 Al-5Ti-1B 合金的抗细化衰退能力较差。粉末压制 Al-5Ti-1B 合金的 TiB_2 粒子和 TiAl_3 相分布均匀, TiAl_3 相尺寸细小,当 Al-5Ti-1B 合金加入到铝熔体后, TiB_2 粒子会更容易分散到铝熔体中,使参与 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒异质形核的 TiB_2 粒子更多, TiAl_3 相也更容易熔解释放出游离 Ti 原子,使粉末压制 Al-5Ti-1B 合金的具有更强的晶粒细化能力。 TiB_2 粒子分布均匀又可以减缓 TiB_2 粒子在铝熔体中的沉降速度,使粉末压制 Al-5Ti-1B 合金具有更强的抗细化衰退能力。

4 结论

1) 雾化快速凝固可以抑制 TiB_2 粒子偏析团聚并细化 TiAl_3 相,使 TiB_2 粒子和 TiAl_3 相均匀分布在粉末压制 Al-5Ti-1B 合金。

2) 雾化快速凝固 Al-5Ti-1B 合金粉的粒径越小, TiB_2 粒子和 TiAl_3 相分布越均匀, TiAl_3 相尺寸越小。

3) 添加 0.2% 的粉末压制 Al-5Ti-1B 合金并保温 2 min,可使纯铝晶粒组织细化为平均直径 183 μm 的

等轴晶,保温 180 min,纯铝的晶粒平均直径为 229 μm 。

4) 粉末压制 Al-5Ti-1B 合金比铸造 Al-5Ti-1B 合金具有更强的晶粒细化能力和抗细化衰退能力。

REFERENCES

- [1] 马世光,熊 慧,王祝堂. 回顾与展望全球铝产品产量及对晶粒细化剂的需求[J]. 轻合金加工技术, 2011, 39(10): 1-9.
MA Shi-guang, XIONG Hui, WANG Zhu-tang. Review and outlook of output of aluminum product and grain refiner requirement in the world[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2011, 39(10): 1-9.
- [2] 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): 11-15.
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): 11-15.
- [3] 李润霞,张文华,张 鹏,张博通,陈建春,于宝义. 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.
LI Run-xia, ZHANG Wen-hua, ZHANG Peng, ZHANG Bo-tong, CHEN Jian-chun, YU Bao-yi. Effect of electromagnetic stirring on the microstructure and refinement of Al-5Ti-B master alloy[J]. Foundry, 2016, 65(1): 1-5.
- [4] 王顺成,郑开宏,戚文军,石 路,宁长维. 电磁搅拌对 Al-5Ti-1B 的显微组织与晶粒细化能力的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(1): 58-62.
WANG Shun-cheng, ZHENG Kai-hong, QI Wen-jun, SHI Lu, NING Chang-wei. Effect of electromagnetic stirring on microstructure and grain refining efficiency of Al-5Ti-1B grain refiner[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(1): 58-62.
- [5] HAN Yan-feng, LI Ke, WANG Jun, SHU Da, SUN Bao-de. Influence of high-intensity ultrasound on grain refining performance of Al-5Ti-1B master alloy on aluminum[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 405: 306-312.
- [6] 缪 欢,阎峰云,江海霞,杨 飞,刘景山. 超声制备 Al-5Ti-1B 晶粒细化剂的组织和细化效果[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(1): 110-113.
MIAO Huan, YAN Feng-yun, JIANG Hai-xia, YANG Fei, LIU Jing-shan. Microstructure and grain refining

- performance of Al-5Ti-B grain refiner prepared under ultrasound treatment[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2018, 38(1): 110–113.
- [7] 董天顺, 崔春翔, 刘双进, 刘福才. 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, 37(1): 29–32.
- DONG Tian-shun, CUI Chun-xiang, LIU Shuang-jin, LIU Fu-cai. Study on the rapid solidification and refining mechanism of Al-Ti-B refiner[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(1): 29–32.
- [8] GHADIMI H, NEDJHAD H S, EGHBALI B. Enhanced grain refinement of cast aluminum alloy by thermal and mechanical treatment of Al-5Ti-B master alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(6): 1563–1569.
- [9] WANG Zheng-jun, SI Nai-chao. 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.
- [10] WANG Xue-jiao, XU Cong, MUHAMMAD A, HANADA S, YAMAGATA H, WANG Wen-hong, MA Chao-li. Effects of Al-Ti-B-RE grain refiner on microstructure and mechanical properties of Al-7.0Si-0.55Mg alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(7): 2244–2250.
- [11] 廖成伟, 陈欢, 罗成志, 陈建春, 潘春旭. 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, 24(8): 2026–2034.
- LIAO Cheng-wei, CHEN Huan, LUO Cheng-zhi, CHEN Jian-chun, PAN Chun-xu. Preparation and application of novel Al-Ti-B-Sr composite master alloy wire[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(8): 2026–2034.
- [12] MA Teng-fei, CHEN Zi-yong, NIE Zuo-ren, HUANG Hui. Microstructure of Al-Ti-B-Er refiner and its grain refining performance[J]. *Journal of Rare Earths*, 2013, 31(6): 622–627.
- [13] CAI Zhi-yong, ZHANG Chun, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, QIU Ke, FENG Yan. Preparation of Al-Si alloys by a rapid solidification and powder metallurgy route[J]. *Materials and Design*, 2015, 87: 996–1002.
- [14] DING Pei-pei, MAO Ai-qin, ZHANG Xiang, JIN Xia, WANG Biao, LIU Min, GU Xiao-long. Preparation, characterization and properties of multicomponent AlCoCrFeNi_{2.1} powder by gas atomization method[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 721: 609–614.
- [15] 赵雷, 江鸿翔, AHMAD Tauseef, 赵九洲. Cu-Co-Fe 合金雾化合金液滴凝固过程研究[J]. *金属学报*, 2015, 51(7): 883–888.
- ZHAO Lei, JIANG Hong-xiang, AHMAD Tauseef, ZHAO Jiu-zhou. Study of solidification for gas-atomized droplet of Cu-Co-Fe alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(7): 883–888.
- [16] CAI Zhi-yong, ZHANG Chun, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, QIU Ke, WANG Nai-guang. Effect of solidification rate on the coarsening behavior of precipitate in rapidly solidified Al-Si alloy[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2016, 26(4): 391–397.
- [17] HE Shi-wen, LIU Yong, GUO Sheng. Cooling rate calculation of non-equilibrium aluminum alloy powders prepared by gas atomization[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(S1): 353–356.
- [18] 解立川, 彭超群, 王日初, 蔡志勇, 刘文水, 马如龙. 冷却速度对气雾化非平衡 Al-27%Si 合金粉末组织形貌特征的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2015, 44(4): 1006–1011.
- XIE Li-chuan, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, CAI Zhi-yong, LIU Wen-shui, MA Ru-long. Influences of cooling rate on microstructures and morphologies of non-equilibrium Al-27%Si alloy powders by gas atomization[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(4): 1006–1011.
- [19] YUCEL B. An improved practice to manufacture Al-Ti-B master alloys by reacting halide salts with molten aluminium[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 420: 71–76.
- [20] LI Peng-ting, LI Yun-guo, NIE Jin-feng, LIU Xiang-fa. Influence of forming process on three-dimensional morphology of TiB₂ particles in Al-Ti-B alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(3): 564–570.
- [21] 李喜珍, 边秀房, 李秀军, 刘相法. Al-Ti-B 合金中 TiB₂ 和 AlB₂ 的从头算研究[J]. *金属学报*, 2001, 37(3): 235–238.
- LI Xi-zhen, BIAN Xiu-fang, LI Xiu-jun, LIU Xiang-fa. Ab initio studies of TiB₂ and AlB₂ in the Al-Ti-B alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(3): 235–238.
- [22] FZN Z, WANG Y, ZHANG Y, QIN T, ZHOU X R, THOMPSON G E, PENNYCOOK T, HASHIMOTO T. Grain refining mechanism in the Al/Al-Ti-B system[J]. *Acta Materialia*, 2015, 84: 292–304.
- [23] 戚文军, 王顺成, 陈学敏, 农登, 周志. Al-5Ti-1B 合金的有效形核相与晶粒细化机制[J]. *稀有金属*, 2013,

37(2): 179–185.

QI Wen-jun, WANG Shun-cheng, CHEN Xue-min, NONG Deng, ZHOU Zhi. Effective nucleation phase and grain refinement mechanism of Al-5Ti-1B master alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(2): 179–185.

[24] LIMMANE C, EIDHEB W. Fading mechanism of grain refinement of aluminum-silicon alloy with Al-Ti-B grain refiners[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 349: 197–206.

Microstructure and grain refining performance of Al-5Ti-1B alloy prepared by powder compaction

WANG Shun-cheng, KANG Yue-hua, ZHOU Nan, SONG Dong-fu, ZHENG Kai-hong

(Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The Al-5Ti-1B alloy powder was prepared by gas-atomization process and then compacted into Al-5Ti-1B alloy. The microstructure and grain refining performance of powder compacted Al-5Ti-1B alloy were studied and compared with that of conventional cast Al-5Ti-1B alloy. The results show that the rapid solidification during the gas-atomization can inhibit the aggregation of TiB_2 particles and refine the size of TiAl_3 phase. The TiB_2 particles and TiAl_3 phases are uniformly distributed in the powder compacted Al-5Ti-1B alloy. With adding 0.2% (mass fraction) powder compacted Al-5Ti-1B alloy in the pure aluminum melt and holding for 2 min, the pure aluminum can be refined from coarse columnar grains to fine equiaxed grains with an average diameter of 183 μm . When the holding time is prolonged to 180 min, the average grain diameter of pure aluminum is still remained at 229 μm . Compared with the conventional cast Al-5Ti-1B alloy, the powder compacted Al-5Ti-1B alloy has a stronger grain refining ability and resistance to grain refinement fading.

Key words: grain refiner; Al-Ti-B alloy; gas atomization; powder compaction; rapid solidification

Foundation item: Project(2017GDASCX-0117) supported by the Innovation Capacity Building of Key Scientific Research Institutions of Guangdong Academy of Sciences, China; Project(2017A070702019) supported by the Special Fund for Public Welfare Research and Capacity Building of Guangdong Province, China

Received date: 2018-08-08; **Accepted date:** 2018-12-11

Corresponding author: WANG Shun-cheng; Tel: +86-20-61086333; E-mail: wangsunceng@163.com

(编辑 何学锋)