

Al-TCB 晶种合金对 A356 合金抗“中毒”的长效细化行为

徐 英¹ 张 将¹ 彭银江¹ 朱鸿磊¹ 洪晓露¹ 侯林冲¹ 韩梦霞² 刘相法² 孙谦谦³
(1.中国兵器科学研究院宁波分院; 2.山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室;
3.山东吕美熔体技术有限公司)

摘 要 利用一种新型 Al-Ti-C-B(Al-TCB)晶种合金对 A356 铝合金进行细化,并研究了该晶种合金细化 A356 合金时的抗 Si 致“中毒”行为。结果表明,Al-TCB 晶种合金对 A356 合金细化效果远优于 Al-5Ti-1B 细化剂。向 A356 合金中添加 0.3% 的 Al-TCB 晶种合金,在 730 ℃保温 15~480 min,细化效果稳定、无衰退,保温时间为 60 min 时细化效果最佳,A356 合金的平均晶粒尺寸为(135.3±3.5) μm。以上结果表明,Al-TCB 晶种合金具有优异的抗 Si 致细化“中毒”的能力,从而对 A356 合金具有高效、长效、稳定的细化效果。

关键词 A356 合金;Al-TCB 晶种合金;晶粒细化;抗中毒

中图分类号 TG146.21;TG115.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.018 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Anti-poisoning and Long-acting Grain Refining Behavior of Al-TCB Seed Alloy on A356 Alloy

Xu Ying¹, Zhang Jiang¹, Peng Yinjiang¹, Zhu Honglei¹, Hong Xiaolu¹, Hou Linchong¹, Han Mengxia², Liu Xiangfa², Sun Qianqian³

(1.Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science; 2.Key Laboratory for Liquid-solid Structural Evolution & Processing of Materials, Ministry of Education, Shandong University;
3.Shandong Al & Mg Melt Tech. Co., Ltd.)

Abstract: A new kind of Al-TCB seed alloy was adopted to refine A356 aluminum alloy, and the anti-poisoning refining behavior of Al-TCB seed alloy on A356 alloy was further investigated. The results indicate that the Al-TCB seed alloy has far better refining effect on the A356 alloy than the Al-5Ti-1B refiner. When A356 alloy with addition of 0.3% Al-TCB seed alloy is held from 15 min to 480 min at 730 ℃, the refining effect is stable without failure basically. When the holding time is 60 min, the refining effect is optimal, where the average grain size reaches (135.3±3.5) μm. The above results demonstrate that the Al-TCB seed alloy has excellent anti-poisoning ability and has an efficient, long-lasting and stable refining effect on A356 alloy.

Key Words: A356 Alloy, Al-TCB Seed Alloy, Grain Refinement, Anti-poisoning

Al-Si 系合金是应用最广的一类铸造铝合金,特别是 A356 铝合金因具有密度低、铸造性能和加工性能优良,且经过变质处理和热处理后具有较高的强韧性等特点,在汽车制造等领域获到广泛应用^[1~3]。A356 铝合金属于亚共晶 Al-Si 合金,主要包含 α-Al 和共晶 Si 两相,其中 α-Al 提供合金的塑韧性,而共晶 Si 的高硬度用以提高合金的强度。然而,初生 α-Al 相的晶粒往往比较粗大,板条状或针片状的共晶 Si 容易割裂基体,成为裂纹萌生和扩展的源头,导致 A356 合金的力学性能难以提高^[4,5]。

目前,通过引入变质剂(如 Al-10Sr 中间合金)可以改善共晶 Si 的形貌及分布,将板条状或针片状的粗大共晶 Si 变质为细密的珊瑚状形貌,大幅提高 A356 合金的力学性能^[6~8]。因此,亚共晶 Al-Si 合金的 Sr 变质处理技术已在铸造生产中获得广泛应用。

然而,亚共晶 Al-Si 合金中粗大 Al 枝晶问题仍未得到解决,由此带来的一系列问题也十分突出^[9~11],如导致成分偏析、“雪花斑”、缩松、缩孔等缺陷,显著降低组织致密性,恶化铸件的强韧性和疲劳性能。因此,细化 A356 铝合金中的 α-Al 晶粒至关重要。但是,目前

收稿日期:2021-05-08;修改稿收到日期:2021-07-08
基金项目:宁波市重大 2025 专项基金资助项目(2019B10099)
第一作者简介:徐英,女,1969 年出生,副研究员,浙江宁波(315000),E-mail: xuy100@126.com
引用格式:徐英,张将,彭银江,等. Al-TCB 晶种合金对 A356 合金抗“中毒”的长效细化行为[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 539-1 543.
XU Y, ZHANG J, PENG Y J, et al. Anti-poisoning and long-acting grain refining behavior of Al-TCB seed alloy on A356 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 539-1 543.

最常用的铝合金细化剂(如 Al-5Ti-1B、Al-4Ti-1C)应用于 A356 铝合金时,其形核衬底会与 Si 发生反应导致细化效果丧失,即产生 Si 致“中毒”现象^[12,13]。因而,有效解决 A356 铝合金 α -Al 晶粒的细化问题成为研究热点之一。

近年来,铝合金细化研究取得了一定进展,通过研制新型细化剂 Al-(Ti)-Nb-B、Al-V-B、Al-Ti-B-C 及添加合金元素 Sc、La 等^[14~18],但难以达到高效、稳定的细化效果。在此背景下,亟需一种少量添加即具有明显细化效果、在熔体中长时间保温的情况下,细化效果仍然稳定的新型细化剂。因此,本课题利用一种新型的抗 Si“中毒”的 Al-Ti-C-B(Al-TCB)晶种合金,对 A356 铝合金进行细化,并且进一步研究了 Al-TCB 晶种合金在 A356 熔体中保温不同时间的细化行为,旨在为 A356 铝合金提供一种高效、长效的晶种合金,以细化晶粒尺寸、改善晶粒形貌、优化微观组织、消除铸造缺陷并提高其综合力学性能,为 A356 铝合金的生产及应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验原料为 99.7%(质量分数,下同)的工业纯 Al、99.9%的纯 Si、99.7%的工业纯 Mg、Al-10Ti、Al-5Ti-1B 中间合金,以及 Al-TCB 晶种合金。

首先利用工业纯 Al、纯 Si、工业纯 Mg、Al-10Ti 中间合金等在感应炉中配制 A356 铝合金,使用氩气进行精炼处理后浇注成合金锭。将合金锭表面加工成洁净无污染的平面,利用光电直读光谱仪(SPECTRO-MAXx LMX06)进行成分分析,至少选取 5 个点进行测试,取其平均值,结果见表 1。

表 1 试验用 A356 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of A356 aluminum alloys %						
w_B						
Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Zn	Al
6.77	0.43	0.082	0.11	0.003	—	余量

取 A356 铝合金锭在电阻炉中熔化并升温至 730℃,待温度稳定后,根据设定的试验方案,向 A356 铝合金熔体中添加一定质量的 Al-TCB 晶种合金或 Al-5Ti-1B 中间合金,在此过程中使用石墨棒搅拌使其充分熔化及弥散分布。在电阻炉中保温一定时间后,再次使用石墨棒搅拌 3 s 左右,最终将合金熔体浇注于预热至 200℃的 KBI 环形模具中,见图 1。经测试,在试验条件下,A356 铝合金熔体的冷却速度为 0.65℃/s。由于在将合金熔体浇注至模具的瞬时会快速降温,冷却速度实际上是采集的快速降温之后 660~530℃段的温度及时间数据计算得到的。使用王水(体积分数为 60%

HCl+30% HNO₃+5% HF+5% H₂O)对 A356 合金的 KBI 试样与耐火砖接触的表面腐蚀 15~30 s,利用数码相机拍摄宏观组织,利用数码显微镜在 1/2 半径处拍摄微观组织,采用截点法统计 A356 合金的平均晶粒尺寸。在 Al-TCB 晶种合金上取样并镶嵌,经由不同目数的砂纸进行打磨和抛光,制备金相试样,采用场发射扫描电镜(JSM-7800F)进行组织观察。

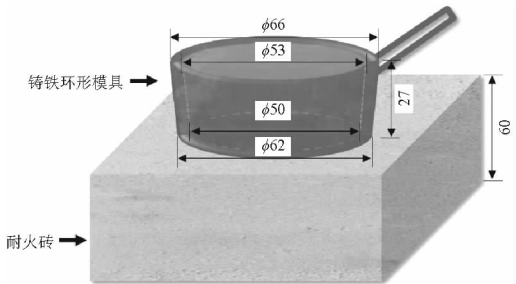


图 1 KBI 环模浇注试验成套工具示意图及其尺寸
Fig.1 Schematic diagram and dimensions of tool sets in KBI annular mold casting test

2 试验结果与分析

2.1 Al-TCB 晶种合金

图 2 为 Al-TCB 晶种合金的微观组织。晶种合金为 ϕ 9.5 mm 的细丝。可以看出,在铝基体上均匀弥散地分布着大量晶种粒子(Al_3Ti 、 TiB_2 、 AlB_2 、 TiC 、TCB 等),其尺寸为亚 μ m 及 nm 级,且在不存在粗大的 Al_3Ti 化合物。

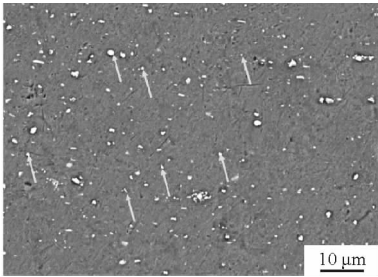


图 2 Al-TCB 晶种合金微观组织
Fig.2 Microstructure of Al-TCB seed alloy

2.2 Al-TCB 晶种合金与 Al-5Ti-1B 中间合金对 A356 铝合金细化效果对比分析

不同细化条件下 A356 铝合金的宏观及微观晶粒组织见图 3。可以看出,未细化的 A356 铝合金的平均晶粒尺寸可达 $(1\,166.2\pm177.1)\,\mu$ m,且枝晶非常发达,一次枝晶轴长度可至 mm 级,二次枝晶臂间距约为 42 μ m。当向 A356 铝合金中添加 0.3%的 Al-5Ti-1B 细化剂并保温 30 min 后,晶粒得到一定程度的细化,但仍然较为粗大,平均晶粒尺寸为 $(726.3\pm95.9)\,\mu$ m,且晶粒尺寸并不均匀,此外,其晶粒形貌仍为粗大的枝晶状,且

存在明显的二次枝晶。添加 0.3% 的 Al-TCB 晶种合金对 A356 铝合金进行细化并保温 30 min 后,其平均晶粒尺寸细化至 $(150.6 \pm 3.8) \mu\text{m}$,晶粒尺寸均匀性大大

提高,而且晶粒不再呈发达的枝晶形貌特征,而是细小的蔷薇状或近球状等轴晶,发生了粒化或球化现象,晶粒趋于圆整^[19~21]。

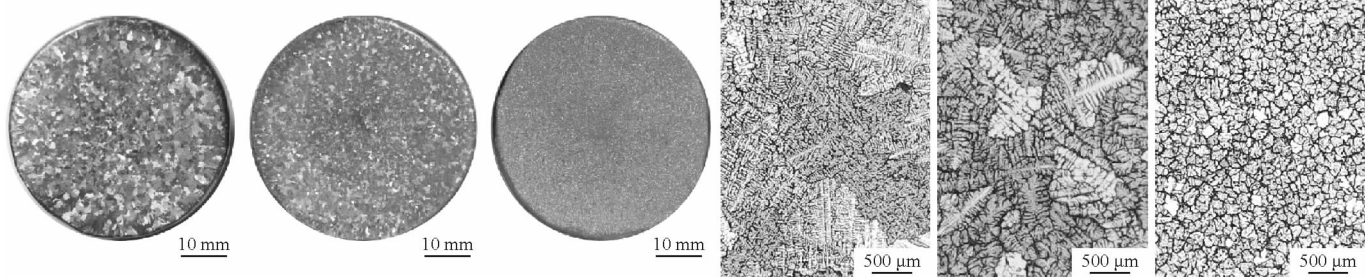


图 3 未细化、Al-5Ti-1B、Al-TCB 晶种合金细化 A356 铝合金的宏观及微观晶粒组织

Fig.3 Macro and micro grain structure of unrefined A356, Al-5Ti-1B, Al-TCB seed alloys

在 A356 铝合金中加入 Al-TCB,起到异质形核的作用,同时可使合金成分均匀,消除羽毛状晶,对合金铸态组织起到强烈的细化作用。经过细化后固液界面前沿的元素成分偏析减轻,降低了成分过冷度,从而抑制了一次枝晶延伸及二次枝晶生长,而且形核数量增加,延长了晶粒尖端生长相遇时间,同时增加晶粒扩散场重叠度,这进一步限制枝晶高阶分化和促进晶粒球化。此外,高效形核释放的大量结晶潜热促使枝晶熔断也是晶粒球化的一个原因。对比试验表明,Al-TCB 晶种合金细化效率远高于 Al-5Ti-1B 细化剂,且 Al-5Ti-1B 细化剂不能抗 Si“中毒”;Al-TCB 晶种合金中的 TiC 粒子团、TCB 粒子尺寸大多为亚微米及纳米范围,弥散分布且不易沉降,具有较低的表面曲率,易形成 Ti 原子富集区,促进与 Al 的形核,成为 Al 的有效形核衬底。因而,Al-5Ti-1B 细化后的组织中仍具有发达的一次枝晶

和二次枝晶,而 Al-TCB 细化得到的晶粒形貌发生了粒化或球化。粒化或球化的细小晶粒,一方面会降低组织中元素偏析程度,提高热处理效率和效果;另一方面,能够减少缩孔、缩松等铸造缺陷。由于枝晶越发达,枝晶之间会更快地相互搭接形成网络,在液相中析出更少的固相时就形成枝晶网络,阻碍液相的流动,补缩通道减少,导致缩孔、缩松产生。当晶粒细化且球化后,补缩通道和毛细输送管道增多,而且液相流动的阻力降低,提升了其补缩能力,因而能够减少缩孔、缩松等铸造缺陷。

2.3 保温时间对 Al-TCB 晶种合金细化 A356 铝合金效果的影响

向 A356 铝合金中添加 0.3% 的 Al-TCB 晶种合金,并分别保温 15、30、60、120、240、480 min,得到的微观晶粒组织见图 4,平均晶粒尺寸随保温时间的变化规律见图 5。

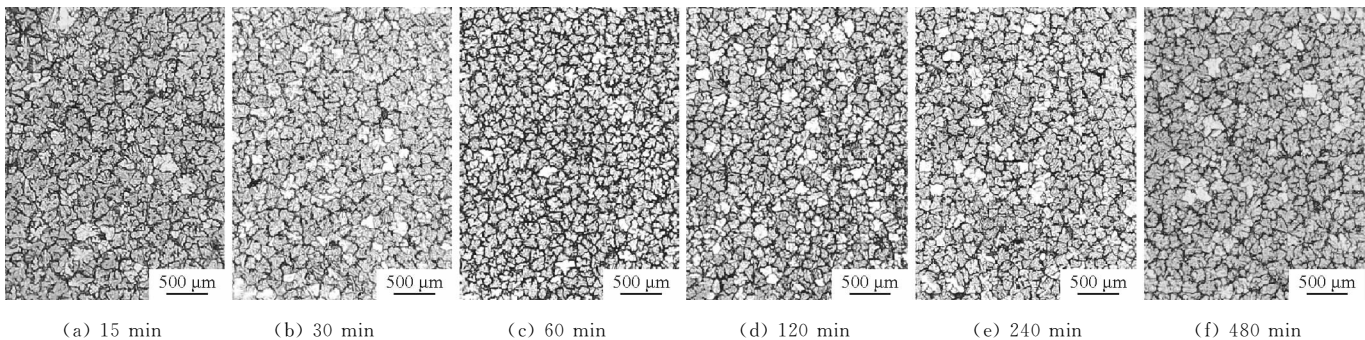


图 4 添加 0.3% Al-TCB 晶种合金的 A356 合金的微观组织

Fig.4 The microstructure of A356 alloy with addition of 0.3% Al-TCB seed alloy

可以看出,保温 15 min 时,A356 合金即可达到较为优异的细化效果,平均晶粒尺寸为 $(187.7 \pm 19.8) \mu\text{m}$,说明 Al-TCB 晶种合金对 A356 铝合金具有良好的细化效果。继续延长保温时间至 30、60 min,细化效果不断优化,保温 60 min 时,其平均晶粒尺寸可减小到 $(135.3 \pm 3.5) \mu\text{m}$,见图 4b、图 4c 及图 5。当保温时间

延长至 120、240 和 480 min 时,其晶粒尺寸稍有增加,但均维持在较为稳定的状态,平均晶粒尺寸均保持在 $150 \mu\text{m}$ 以下,且晶粒保持细小蔷薇状或近球状的等轴晶形貌。说明 Al-TCB 晶种合金对 A356 铝合金具有长效的细化效果。Al-TCB 晶种合金的加入,形成 Al_3Ti 、 TiB_2 、 AlB_2 、 TiC 、TCB 等可以起到异质形核或促

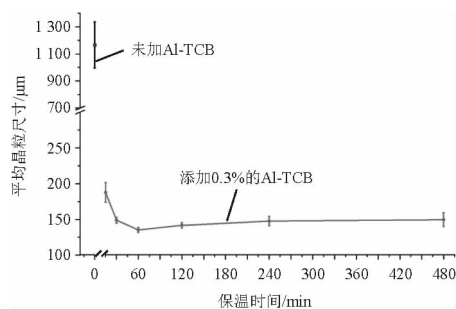


图5 A356 铝合金及添加 0.3% 的 Al-TCB 晶种合金的 A356 合金平均晶粒尺寸随保温时间的变化

Fig.5 The average grain size variation of A356 alloy and A356 alloy with addition of 0.3% Al-TCB seed alloy with holding time

进形核的作用。细化 A356 铝合金组织, Al_3Ti 、 TiC 、TCB 可直接作为 Al 的结晶中心, 起异质形核的作用, 且 TiC 粒子熔点高, 较 Al_3Ti 更不易因重熔而丧失细化作用, 因此具有更长效的细化效果; TiB_2 化合物与铝无共格关系, 不是 α 固溶体的异质核心, 但 TiB_2 可使 Al_3Ti 生核加快, 有促进 α 固溶体晶粒细化的效果。TCB 晶粒为亚微米或纳米级, 不易沉淀, 能提供更多的形核质点, 从而保证高的形核率, 长效、稳定地起到异质形核的作用。此外, 从标准差来看, 保温时间在 30~480 min 之间时, 晶粒尺寸的均匀性更佳, 优于 15 min 保温的效果。总体来看, 在本试验条件下, 向 A356 铝合金中添加 0.3% 的 Al-TCB 晶种合金, 保温时间为 15~480 min, 均能获得优异且稳定的细化效果, 证明 Al-TCB 晶种合金具有优异的抗 Si“中毒”的能力, 对 A356 铝合金具有高效、长效、稳定的细化效果。

3 结 论

(1) 未经细化的 A356 铝合金平均晶粒尺寸可达 $(1\ 166.2 \pm 177.1) \mu\text{m}$, 枝晶非常发达; 向 A356 铝合金中添加 0.3% 的 Al-5Ti-1B 细化剂并保温 30 min 后, 平均晶粒尺寸为 $(726.3 \pm 95.9) \mu\text{m}$, 晶粒形貌仍为粗大的枝晶状。

(2) 向 A356 铝合金添加 0.3% 的 Al-TCB 晶种合金, 保温 15 min 时, A356 合金平均晶粒尺寸可细化至 $(187.7 \pm 19.8) \mu\text{m}$; 保温 30 min, 平均晶粒尺寸细化至 $(150.6 \pm 3.8) \mu\text{m}$, 晶粒为细小的蔷薇状或近球状等轴晶, 发生了晶粒粒化或球化现象; 保温 60 min 时, 细化效果最佳, 平均晶粒尺寸为 $(135.3 \pm 3.5) \mu\text{m}$; 继续延长保温时间至 120~480 min, A356 铝合金的平均晶粒尺寸稍有增加, 但均保持在 $150 \mu\text{m}$ 以下。

(3) Al-TCB 晶种合金具有优异的抗 Si“中毒”的能力, 对 A356 铝合金具有高效、长效、稳定的细化效果。

参 考 文 献

- [1] 杜青春, 臧立根, 董艳宾. 稀土元素变质 A356 铝合金的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(2): 152-155.
- [2] WANG M J, HU K Q, LIU G L, et al. Synchronous improvement of electrical and mechanical performance of A356 alloy reinforced by boron coupling nano- AlN_p [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 814: 152-217.
- [3] 阿拉腾, 白帮伟, 吴群虎, 等. 固溶处理对 A356.2 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2015, 43(1): 60-62.
- [4] LI G R, XU T, WANG H M, et al. Microstructure study of hot rolling nanosized in-situ Al_2O_3 particle reinforced A356 matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 855: 107-157.
- [5] LI Q, QIU F, DONG B, et al. Investigation of the influences of ternary Mg addition on the solidification microstructure and mechanical properties of as-cast Al-10Si alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2020, 798: 140-247.
- [6] 王正军, 司乃潮, 王宏健, 等. 熔体混合细化变质处理对 A356 铝合金组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(1): 164-170.
- [7] ZHANG J H, XING S M, HAN Q Y, et al. Effect of Sr additive amount and holding time on microstructure of A390 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2017, 269(1): 12-15.
- [8] LIU G L, DING R, GUAN Y P, et al. Effects of Al-Ti-B-RE+Al-10Sr master alloys on refinement and modification performances of A356 alloy[J]. Earth and Environmental Science, 2018, 113(1): 12-34.
- [9] 欧翔翔, 汪樟锋, 刘锋睿, 等. A356 铝合金轮毂 Si 偏析现象及力学性能[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(1): 60-66.
- [10] 吴建华, 周吉学, 唐守秋, 等. 冷却速率对铸态 A356 铝合金微观组织和拉伸性能的影响[J]. 功能材料, 2016, 47: 63-66.
- [11] 赵海玉, 柏振海, 张久明. A356.2 合金铸锭内硅元素偏析控制的研究[J]. 铝加工, 2005, 163(4): 10-12.
- [12] 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.
- [13] FAN Z Y, WANG Y, ZHANG Y, et al. Grain refining mechanism in the Al/Al-Ti-B system[J]. Acta Materialia, 2015, 84: 292-304.
- [14] 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.
- [15] ZHANG Y H, YE C Y, SHEN Y P, et al. Grain refinement of hypoeutectic Al-7%Si alloy induced by an Al-V-B master alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 812: 22-152.
- [16] 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 & Design, 2013, 47: 522-528.
- [17] XU C, MA C L, SUN Y F, et al. Optimizing strength and ductility of Al-7Si-0.4Mg foundry alloy: Role of Cu and Sc addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 810: 151-944.
- [18] ZHENG Q J, ZHANG L L, JIANG H X, et al. Effect mechanisms of micro-alloying element La on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 47: 142-151.

Cu 和 Er 对原位 Mg₂Si/Al 复合材料组织与性能的影响

张莉¹ 王振成² 程婷¹ 伍复发² 武晓峰^{1,2}

(1.南昌工学院新能源车辆学院; 2.辽宁工业大学材料科学与工程学院)

摘 要 采用金属型铸造制备原位自生亚共晶 Mg₂Si/Al 复合材料,研究了 Cu 和 Er 对其组织与力学性能的影响。结果表明,添加 Cu 和 Er 能够使共晶 Mg₂Si 晶粒显著减小,其形貌由粗大的条状和汉字状转变为细条状、点状和纤维状。同时使针状的 β-Al₅FeSi 相转变为细小的不规则富 Er 和富 Cu 颗粒。经 T6 处理后含 0.45% 的 Er 和 3.5% 的 Cu 的复合材料中共晶 Mg₂Si 相完全全球化,且含 Er 和 Cu 的颗粒相大部分消失。Er 和 Cu 复合添加提高了铸态的抗拉强度、屈服强度和伸长率,分别为 351 MPa、187 MPa 和 2.8%,与未添加 Er 和 Cu 的试样相比,分别提高了 57.4%、37.5% 和 86.7%;添加 Er 和 Cu 的复合材料经 T6 处理后抗拉强度提高至 408 MPa。

关键词 Mg₂Si/Al 复合材料;Er;Cu;共晶 Mg₂Si

中图分类号 TB331;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cu and Er on Microstructure and Properties of in-situ Mg₂Si/Al Composites

Zhang Li¹, Wang Zhencheng², Cheng Ting¹, Wu Fufa², Wu Xiaofeng^{1, 2}

(1.New Energy Vehicle College, Nanchang Institute of Technology;

2.School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology)

Abstract: The effects of Cu and Er on the microstructure and mechanical properties of in situ hypoeutectic Mg₂Si/Al composites prepared by conventional metal mold casting were investigated. The results indicate that the grain size of eutectic Mg₂Si is significantly refined and the morphology is transformed from coarse strip and Chinese character to fine strip, point and fiber after adding Cu and Er. Meanwhile, the needle-like β-Al₅FeSi is converted into fine and irregular Er, Cu-rich particles. After T6 heat treatment, the eutectic Mg₂Si phase containing 0.45% Er and 3.5%Cu reaches complete spheroidization, and most of the particulate phase containing Er and Cu disappear. The tensile strength, yield strength and elongation are improved with the simultaneous addition of Er and Cu, reaching up to 351 MPa, 187 MPa and 2.8%, which are increased by 57.4%, 37.5% and 86.7%, respectively, compared with the specimens without Er and Cu addition. After T6 treatment, the tensile strength are greatly increased to 408 MPa.

Key Words: Mg₂Si/Al Composites, Er, Cu, Eutectic Mg₂Si

Mg₂Si 颗粒增强铝基复合材料因具有密度低、比强度高、热膨胀系数小等特性^[1,2],在航空、航天及汽车等领域有着广阔的应用前景。但是采用常规铸造方法制

备亚共晶 Mg₂Si/Al 复合材料时,共晶 Mg₂Si 相常以粗大的板状和汉字状析出,严重地降低其力学性能,限制了应用范围^[1]。

收稿日期:2021-05-18;**修改稿收到日期:**2021-07-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51971106);江西省教育厅科技资助项目(GJJ191094)
第一作者简介:张莉,女,1989 年出生,讲师,南昌(330108),E-mail:815981293@qq.com
通信作者:武晓峰,男,1959 年出生,教授,南昌(330108),E-mail:hgd901w@126.com
引用格式:张莉,王振成,程婷,等. Cu 和 Er 对原位 Mg₂Si/Al 复合材料组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 543-1 548.
ZHANG L, WANG Z C, CHENG T, et al. Effects of Cu and Er on microstructure and properties of in-situ Mg₂Si/Al composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 543-1 548.

[19] EWING B A, GREEN K A. Polycrystalline grain controlled castings for rotating compressor and turbine components[A]. Proceedings of the Fifth International Symposium on Superalloys, American Institute of Mining, 1984 [C]. Warrendale, PA: The Metallurgical Society of AIME, 1984.

[20] NAZMY M, WEISS B, STICKLER R. The effect of advanced fine grain casting technology on the static and cyclic properties of IN713LC[J]. High Temperature Materials for Power Engineering (II). Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1990: 1 397-1 404.

[21] 熊玉华, 李培杰, 曾大本, 等.铸造工艺参数和细化剂对 K4169 高温合金铸态组织的影响 II.枝晶组织及晶粒球化机理[J]. 金属学报, 2002(5): 534-538.