

半固态搅拌制备颗粒增强铝基复合材料

白月龙^{1,2} 张志峰^{1,2} 樊建中²

(1.有研工程技术研究院有限公司; 2.有研金属复合材料技术有限公司)

摘 要 采用半固态搅拌铸造法制备了 SiC_p 含量为 17% 的 SiC_p/A357 铝基复合材料,研究了搅拌温度、搅拌速度和搅拌时间对 SiC_p 分布均匀性的影响并进行了优化。结果发现,与液态搅拌相比,在铝合金半固态温度区间搅拌有利于减少吸气和促进 SiC_p 的均匀分布,但搅拌温度太低会使 SiC_p 在搅拌过程中被较大的初生相推挤到边界处,导致 SiC_p 分布不均匀;提高搅拌速度和延长搅拌时间可以提高 SiC_p 分布均匀性,但搅拌时间过长, SiC_p 分布均匀性将变差。试验条件下优化后搅拌工艺参数:搅拌温度为 610 ℃,搅拌速度为 800 r/min,搅拌时间为 25 min。制备的 ϕ 240 mm×330 mm、质量为 41 kg 的大规格铝基复合材料铸锭组织中 SiC_p 分布均匀。

关键词 SiC_p; 铝基复合材料; 半固态搅拌

中图分类号 TB331;TG249.9

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.04.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preparation of Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites by Semi-solid Stirring

Bai Yuelong^{1,2}, Zhang Zhifeng^{1,2}, Fan Jianzhong²

(1.GRIMAT Engineering Institute Co., Ltd.; 2.Grimm Metal Composites Technology Co., Ltd.)

Abstract: The semi-solid stirring casting method was employed to prepare the 17% SiC_p/A357 aluminum matrix composites. The effects of the processing parameters including stirring temperature, stirring rate and stirring time on the homogeneous distribution of SiC_p particles were investigated and the process was optimized. The results reveal that the stirring in semi-solid temperature range of the alloy is beneficial to reduce inspiratory and promote uniform distribution of SiC_p particles compared with liquid stirring, while SiC_p particles will be pushed to the boundary by larger primary phase during the process with a lower temperature, resulting in uneven distribution of SiC_p particles. The distribution uniformity of SiC_p can be increased by increasing stirring rate and prolonging stirring time, which will tend to be deteriorated with a longer time. The optimized stirring process parameters under test conditions are presented as follows: stirring temperature of 610 ℃, stirring speed of 800 r/min, stirring time of 20 min. SiC_p particles are evenly distributed in the ingot structure of large-scale aluminum matrix composites with ϕ 240 mm×330 mm and 41 kg.

Key Words: SiC_p Particles, Aluminum Matrix Composites, Semi-solid Stirring

SiC_p增强铝基复合材料因具有比强度、比模量高,耐磨性、耐疲劳性、导热性能好和热膨胀系数低等特点,成为研究热点,并获得了广泛关注^[1~4]。

目前,制备 SiC_p增强铝基复合材料的主要方法有粉末冶金法、压力浸渗法、喷射沉积法和液态搅拌铸造法等^[5~9]。其中,液态搅拌铸造法工艺流程短、成本低,能够制备形状复杂的复合材料零部件^[10,11],因此具有广阔的应用前景。但是该方法存在的 SiC 颗粒加入难、均匀分散难、易发生界面反应等缺陷,限制了其应用范围。

本课题采用半固态搅拌铸造法制备了 SiC_p增强铝

基复合材料,充分利用铝合金在半固态区间的粘滞作用,将 SiC_p加入熔体中,并在高速剪切作用下使 SiC_p与半固态初生相颗粒发生剪切碰撞,从而制备出 SiC_p分布均匀的铝基复合材料^[12]。采用半固态搅拌铸造法非常有利于 SiC_p的加入,而低的熔体温度又能有效防止界面反应发生。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

基体合金为 A357 铝合金,其化学成分见表 1。固、

收稿日期:2020-08-06

第一作者简介:白月龙,男,1975 年出生,教授,北京(100088),E-mail: bai_yuelong@163.com

引用格式:白月龙,张志峰,樊建中. 半固态搅拌制备颗粒增强铝基复合材料[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(4): 402-405.

BAI Y L, ZHANG Z F, FAN J Z. Preparation of particle reinforced aluminum matrix composites by semi-solid stirring[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4):402-405.

液相线温度分别为 577、613 ℃。

表 1 A357 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of A357 aluminum alloy %					
w_B					
Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Al
7.05	0.52	0.07	0.12	0.02	余量

增强体为 α -SiC_p 颗粒,其平均直径为 12 μ m,形貌见图 1,体积分数为 17%。

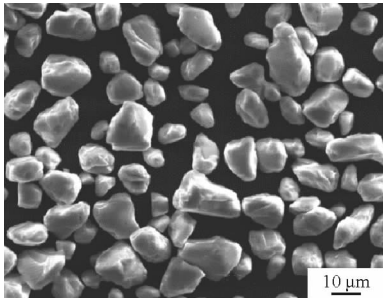


图 1 SiC_p 的形貌

Fig.1 The morphology of SiC_p particle

1.2 试验方法

搅拌铸造装置见图 2。A357 铝合金熔体在中频感应炉 ZGL-100 中熔化,熔化后 SiC_p 颗粒由送粉器送入 A357 铝合金熔体中,然后开启搅拌电机进行强剪切搅拌,搅拌过程在 Ar 气保护下进行。

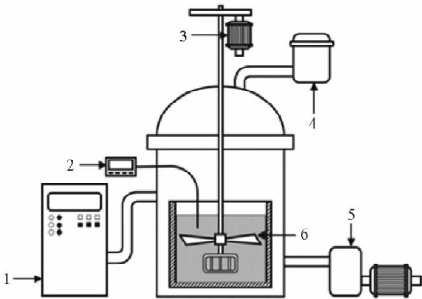


图 2 搅拌铸造设备示意图

Fig.2 Schematic diagram of stirring casting apparatus

1.控制柜 2.测温系统 3.搅拌电机 4.送粉器 5.充气系统 6.搅拌器

首先,采用中频感应熔炼炉将 A357 合金熔炼到 720 ℃,采用石墨坩埚熔炼,然后对合金熔体进行精炼除气;随后降温至设定温度并启动搅拌器,同时通过特

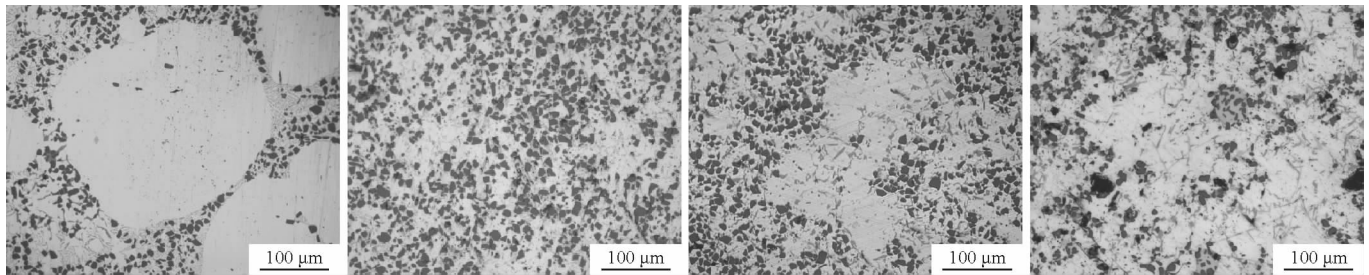
制的加粉器将 SiC_p 从合金熔体上部缓慢加入,观察不同的搅拌温度、搅拌速度和搅拌时间下 SiC 颗粒的分布状况。搅拌完成后浇注到金属型中获得铝基复合材料铸锭,模具预热温度为 200 ℃。

选取铸锭具有代表性的位置用线切割取样并制备成金相试样,依次经过多道次砂纸粗磨、细磨并抛光后,用质量分数为 0.5% 的 HF 溶液进行腐蚀,然后在 Ziess-Axiovert 200 金相显微镜上进行组织观察与分析。

2 试验结果分析

2.1 搅拌温度对 SiC_p 分布的影响

分别采用液态搅拌工艺和半固态搅拌工艺研究搅拌温度对复合材料显微组织的影响。半固态温度区间的设置为 595~610 ℃,液态搅拌的温度设置为 630 ℃ 和 650 ℃,搅拌转速为 500 r/min,搅拌时间为 15 min。图 3 为在不同搅拌温度下制备的复合材料中 SiC_p 的分布状况。可以看出,595 ℃ 下搅拌时,合金呈现出明显的半固态组织,由于熔体中的初生 α -Al 体积分数较大,大量的 SiC_p 围绕在近球形初生 α -Al 周围,呈项链状排列,基体合金的枝晶组织在搅拌过程中被打碎和消除。随着温度降低,基体合金中初生 α -Al 不断长大,此时大部分的 SiC_p 在搅拌过程中被初生相推挤到边界处,金相组织分布很不均匀, SiC_p 团聚明显,见图 3a。610 ℃ 搅拌时,基体中有一定量的初生 α -Al 相生成,但由于体积分数较低,其晶粒较为细小,在凝固后的组织中难以观察到。这些细小的初生相颗粒在搅拌时对 SiC_p 团簇进行撞击和摩擦,促进其分散,此时熔体的粘度较完全液态时显著增大。在搅拌转速相同的情况下,熔体的粘度越高,所形成的内摩擦力越大。熔体中大的内摩擦力能有效粉碎颗粒自身的团聚,形成较大剪切力以保证 SiC_p 的均匀分散。同时由于温度处于半固态区间,部分凝固潜热得到释放,浇注后熔体能够迅速冷却,且基体合金晶粒细小,减少了在凝固过程中对 SiC_p 的推挤,提高了 SiC_p 的均匀性,见图 3b。当搅拌温度升高到 630 ℃ (液相线温度以上)时,熔体中无初生 α -Al 相生成,粘



(a) 595 ℃

(b) 610 ℃

(c) 630 ℃

(d) 650 ℃

图 3 搅拌温度对 SiC_p 分布的影响

Fig.3 The effect of stirring temperature on the distribution of SiC_p in the composites

度迅速下降,搅拌时的内摩擦力大幅减弱,初生 α -Al 对 SiC_p 团聚的研磨和冲击作用消失, SiC_p 的分散性变差。另外由于粘度降低,在停止搅拌后 SiC_p 更容易发生迁移,一方面颗粒易发生沉降,导致宏观上的不均匀,另一方面,原本已经分散的相邻 SiC_p 可能重新聚集以使表面自由能降低,使得搅拌效果难以保持。同时由于浇注时冷却速度慢,在凝固过程中 SiC_p 被推挤的可能性增大,使得 SiC_p 的均匀性较 610 $^{\circ}\text{C}$ 搅拌时降低,见图 3c。随着温度继续升高到 650 $^{\circ}\text{C}$,组织的均匀性进一步降低,见图 3d。

2.2 搅拌速度对 SiC_p 分布的影响

采用半固态搅拌工艺,搅拌温度为 610 $^{\circ}\text{C}$,搅拌时间为 15 min,搅拌转速分别为 200、500、650、800 r/min,制备的复合材料中的 SiC_p 分布见图 4。可以看

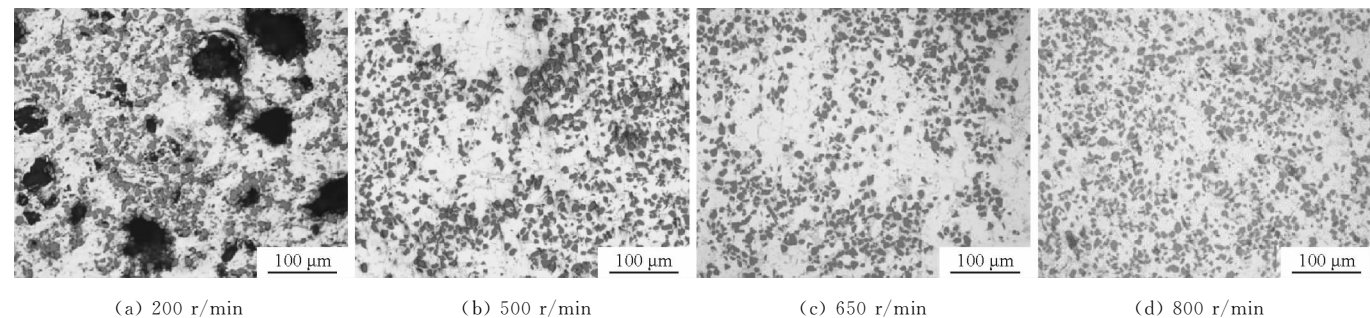


图 4 搅拌转速对半固态搅拌复合材料 SiC_p 分布的影响

Fig.4 The effect of rotating speed on the distribution of SiC_p in the composites by semi-solid stirring

剪切力已经达到最大,组织均匀性最好,见图 4d。

2.3 搅拌时间对 SiC_p 分布的影响

图 5 是搅拌温度为 610 $^{\circ}\text{C}$,搅拌速度为 800 r/min,不同搅拌时间下制备的复合材料中 SiC_p 分布情况。 SiC_p 在 A357 合金基体中的分散是一个缓慢的过程。在搅拌中颗粒在熔体内部的混合包括“宏观混合”和“微观混合”两个过程^[13],“宏观混合”是破坏 SiC_p 团聚的过程,“微观混合”是 SiC_p 的扩散过程。当搅拌时间为 10 min 时,显微组织中 SiC_p 分布不均匀,出现面积较大的颗粒团聚区,不均匀现象明显,且在 SiC_p 团聚处有许多

出,搅拌转速为 200 r/min 时, SiC_p 与气体的润湿性好,极易吸附气体,使气体难以逸出,导致较多的气孔存在,且熔体剪切力不足, SiC_p 团聚难以分散, SiC 分布不均匀现象明显,导致复合材料中有大量的微观孔洞存在,见图 4a。当搅拌转速提高到 500 r/min 时, SiC_p 的团聚程度减弱,微观孔洞也有所减少,见图 4b,搅拌速度的增大会使得基体中初生 α -Al 颗粒对 SiC_p 的撞击频率和速度增加,熔体内部的速度差和压力差随之增大,熔体内部的小气泡能够在机械搅拌作用下随着熔体的运动而上浮,减小上升阻力,到达熔体表面后破裂逸出,材料的气孔减少, SiC_p 分布也变得均匀。剪切力的增大能够显著减少 SiC_p 的团聚,改善组织的均匀性。随着搅拌转速继续增加到 650 r/min,剪切力增大,组织均匀性继续升高,见图 4c。当搅拌转速为 800 r/min 时,搅拌

微小气孔,见图 5a。此时“宏观混合”过程尚未完成,必须通过延长搅拌时间打碎颗粒的团聚。当搅拌时间延长至 15 min 时,组织的不均匀现象减轻,“宏观混合”过程已经完成,但“微观混合”不充分。搅拌 20 min 时, SiC_p 分散均匀性进一步提高,“微观混合”基本完成,见图 5c,这是由于颗粒在熔体中的分散是随着搅拌时间的延长而逐步实现的,只有保证足够长的搅拌时间才能使 SiC_p 在熔体中均匀分散。延长搅拌时间至 30 min 时, SiC_p 的均匀性有所降低,见图 5e。这是由于基体合金中低熔点的 Mg 元素易于烧损,而 Mg 有利于提高

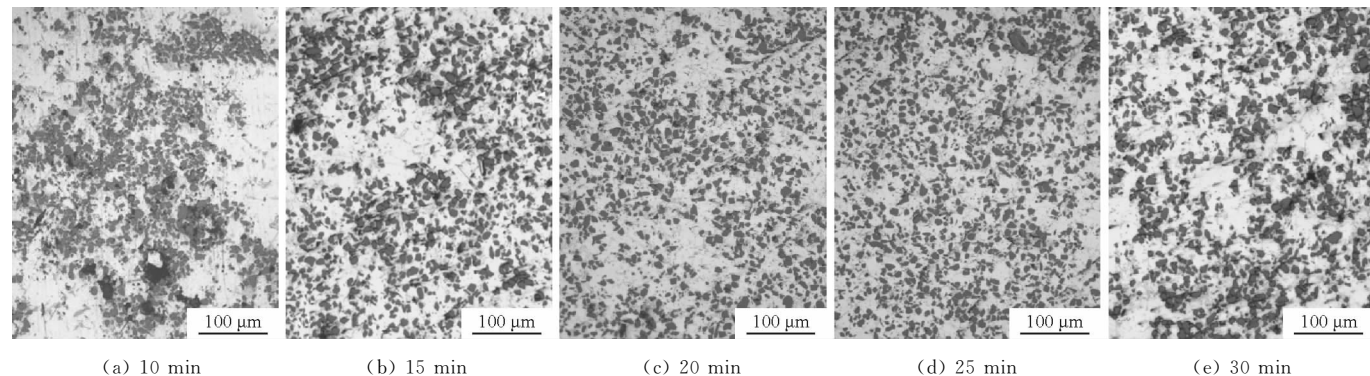


图 5 搅拌时间对半固态搅拌复合材料中 SiC_p 分布的影响

Fig.5 The effect of stirring time on the distribution of SiC_p in the composites by semi-solid stirring

SiC_p与基体的润湿性,改善 SiC_p的分布,因此搅拌时间不宜过长。在颗粒已经分散均匀的情况下,延长搅拌时间对颗粒的分散有负面效果。

2.4 工艺参数优化及生产应用

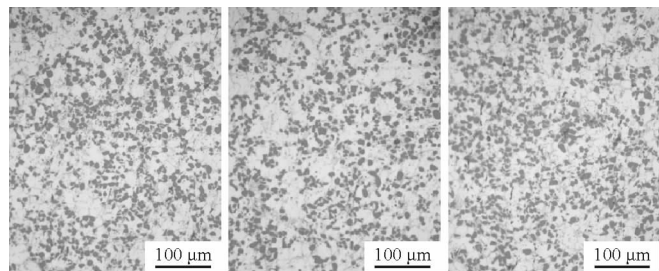
综上,试验条件下优化后的工艺参数:搅拌温度为 610 ℃,搅拌速度为 800 r/min,搅拌时间为 25 min。根据优化后的工艺制备了尺寸为 $\phi 240\text{ mm} \times 330\text{ mm}$ 、质量为 41 kg 的大规格铝基复合材料铸锭,见图 6。



图 6 搅拌铸造法制备的 SiC_p/A357 复合材料铸锭

Fig.6 The ingots of SiC_p/A357 composites manufactured by stirring casting method

从铸锭的上、中、下 3 个部位的中心处分别取样,观察 SiC_p分布的均匀性,见图 7。可以看出,复合材料组织中 SiC_p分布均匀,获得了理想的效果。



(a) 上部

(b) 中部

(c) 下部

图 7 大铸锭不同位置的 SiC_p分布

Fig.7 The distribution of SiC_p at different locations of ingots

3 结 论

(1)与液态搅拌相比,在铝合金半固态温度区间搅拌有利于减少吸气和促进 SiC_p的均匀分布,但是太低的搅拌温度,会使 SiC_p在搅拌过程中被较大的初生相推挤到边界处,导致 SiC_p分布很不均匀。在本试验条件下,搅拌温度为 610 ℃时有利于获得 SiC_p分布均匀的铝基复合材料。

(2)搅拌速度对 SiC_p的均匀分布影响很大,随着搅拌速度的提高, SiC_p的均匀性逐渐增加,同时,较高的搅拌速度也有利于熔体中气体的排出。在本试验条件下,

搅拌速度为 800 r/min 时 SiC_p分布更为均匀。

(3)搅拌时间也是影响 SiC_p分布均匀性的关键因素。随着搅拌时间延长, SiC_p分布均匀性增加,但搅拌时间过长, SiC_p分布均匀性反而趋于恶化。在本试验条件下,搅拌时间 25 min 时 SiC_p分布最均匀。

(4)优化后搅拌工艺参数:搅拌温度为 610 ℃,搅拌速度为 800 r/min,搅拌时间为 25 min。根据优化后的工艺制备了尺寸为 $\phi 240\text{ mm} \times 330\text{ mm}$ 、质量为 41 kg 的大规格铝基复合材料铸锭,铸锭组织中 SiC_p分布均匀。

参 考 文 献

- [1] ZHOU W, XU Z M. Casting of SiC reinforced metal matrix composites[J]. Mater. Process. Technol., 1997, 63(1-3): 358-363
- [2] 武高辉.金属基复合材料发展的挑战与机遇[J].复合材料学报, 2014,31(5):1 228-1 237.
- [3] XAVIOR M A, KUMAR J P A. Machinability of hybrid metal matrix composite-A review[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 1 110-1 118.
- [4] KACZMAR J W, PIETRZAK K, WŁOSIŃSKI W. The production and application of meta matrix composite materials [J]. Mater. Process. Technol., 2000, 106(1-3): 58-67.
- [5] ZHANG H W, GENG L, GUAN L N, et al. Effects of SiC particle pretreatment and stirring parameters on the microstructure and mechanical properties of SiC_p/Al-6.8Mg composites fabricated by semi-solid stirring technique[J].Mater. Sci. Eng., 2010, A528(1): 513-518.
- [6] GENG L, ZHANG H W, LI H Z, et al. Effects of Mg content on microstructure and mechanical properties of SiC_p/Al-Mg composites fabricated by semi-solid stirring technique[J].Trans. Nonferrous Met. Soc. China,2010,20(10): 1 851-1 855.
- [7] BALASIVANANDHA P S, KARUNAMOORTHY L, KATHIRESAN S, et al. Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite[J]. Mater. Process. Technol., 2006, 171(2): 268-273.
- [8] 潘利文,林维捐,唐景凡,等.颗粒增强铝基复合材料制备方法及相关研究现状[J].材料导报,2016,30(S1):511-515.
- [9] 樊建中,桑吉梅,石力开.颗粒增强铝基复合材料的研制、应用与发展[J].材料导报,2001,15(10):55-57.
- [10] HASHIM J, LOONEY L, HASHMI M S J. Metal matrix composites: Production by the stir casting method[J]. Mater. Process. Technol., 1999, 92-93: 1-7.
- [11] DU Y H, ZHANG P, ZHANG J, et al. Radial distribution of SiC Particles in mechanical stirring of A356-SiC_p liquid[J]. Mater. Sci. Technol., 2012, 28(10): 951-955.
- [12] ZHANG H, ZHANG Z F, ZHANG Z L, et al. Numerical simulation on filling process of SiC_p/A357 composites[J]. Materials Science Forum, 2017, 898: 859-864.
- [13] 李昊,桂满昌,周彼德.搅拌铸造金属基复合材料的热力学和动力学机制[J].中国空间科学技术,1997,17(1):9-16.

(编辑:彭瑾)