材料研究与应用　2021,15(3):220-224　　http://mra.ijournals.cn
Materials Research and Application　　Email:clyjyyy@gdinm.com

**文章编号**:1673-9981(2021)03-0220-05

# 电磁搅拌对 C19400-SiC 复合材料成分控制及性能的影响

廖钰敏,姜明珠,胡　蓉

广东松山职业技术学院,广东 韶关 512126

**摘　要**:在制备 C19400-SiC 复合材料过程中,SiC 的成分难以控制,实验引入电磁搅拌的方法.实验结果表明,电磁搅拌技术促进了合金中 SiC 的添加,C19400-SiC 复合材料的晶粒尺寸减小了 40%.此外,采用电磁搅拌后,复合材料硬度略有提高,导电性能得到改善.

**关键词**:C19400-SiC;复合材料;电磁搅拌

**中图分类号**:TG2　　**文献标识码**:A

**引文格式**:廖钰敏,姜明珠,胡蓉. 电磁搅拌对 C19400-SiC 复合材料成分控制及性能的影响[J]. 材料研究与应用,2021,15(3):220-224.

LIAO Yumin,JIANG Mingzhu,HU Rong. Effects of electromagnetic stirring on composition control and properties of C19400-SiC composite[J]. Materials Research and Application,2021,15(3):220-224.

随着 5G 时代的到来,对电子产品的导电及力学性能提出了更高的要求.引线框架材料是电子设备及产品的重要原材料,其综合性能优劣直接影响产品的生产与使用.引线框架材料良好的铸态性能[1-4],是保证使用性能的前提.C19400 是引线框架制备中常用的一款材料,因其高性价比而备受市场青睐.前期研究已对 SiC 对 C19400 在组织及性能上的影响做了初步探索,证实 SiC 的添加有利于 C19400 合金综合性能的提高.

电磁搅拌技术,因其具有无接触、参数可控,以及可获得细小晶粒而备受人们的关注[5],其优良的铸造特性备受铸造行业的欢迎,近年来在铜合金制备领域也逐渐发展.为进一步探索 C19400-SiC 复合材料的制备工艺,着重研究电磁搅拌对 C19400-SiC 复合材料的成分控制及性能的影响.

## 1　实验与分析

实验选用 C19400 合金圆棒坯(锯成小段)、SiC 粉末(熔炼前干燥处理)为原料,用石墨坩埚在工频炉中进行熔炼,熔炼温度为 1300 ℃,SiC 添加量为 0.8%.为减少氧化烧损,熔炼过程采用木炭作为覆盖剂.待 C19400 合金溶化后,其中一组进行无电磁搅拌的常规浇铸并制成 D40 mm×40 mm 的铸锭;第二组合金熔化后,迅速转移至电磁搅拌器中进行电磁搅拌处理,其中电流为 30 A、频率为 10 Hz.在电磁搅拌过程中,观察到熔体在剧烈震动,且有气泡上浮.

**收稿日期**:2021-01-20

**基金项目**:广东省教育厅重点平台及科研项目(2017GkQNCX034)

**作者简介**:廖钰敏(1989－),女,江西赣州人,讲师,主要从事有色金属新材料制备及工艺研究,E-mail:liaoyumin123@126.com

## 2　结果与分析

### 2.1　电磁搅拌对 C194 合金成分影响

图 1 分别为无电磁搅拌组和电磁搅拌组添加 0.8%的 SiC 的铸态 C194 合金的 SEM 照片及能谱图. 从图 1(a)和图 1(c)可观察到，直径为 1 μm 左右的亮白色颗粒物(图 1(a)中 A 点、图 1(c)中 B 点). 对图 1 中 A 点和 B 点进行能谱扫描，其结果见图 1(b)和图 1(d). 从图 1(b)和图 1(d)可见，经电磁搅拌的合金 SiC 含量达到 4.98%，比未进行电磁搅拌组的 Si 含量 1.95%，高出 2.6 倍，说明电磁搅拌能够促进合金熔炼过程中 SiC 的添加.

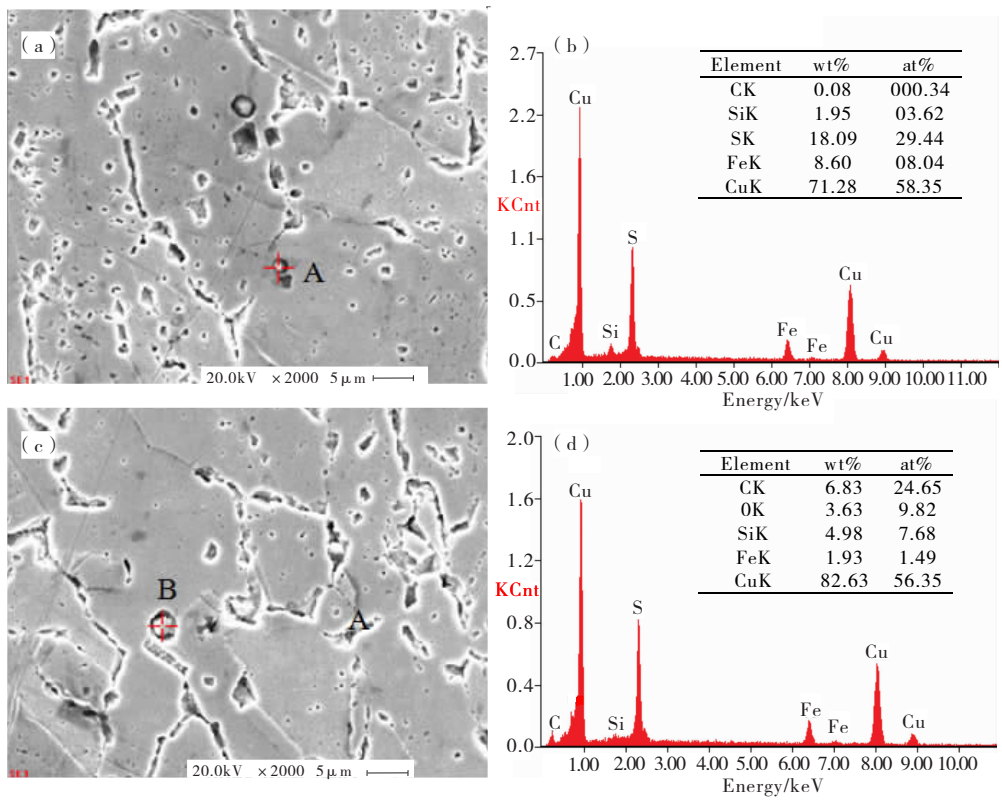


**图 1**　铸态 C19400-SiC 复合材料的 SEM 照片

(a)，(b)分别为无电磁搅拌的 SEM 图及 A 点的能谱扫描图；(c)，(d) 分别为电磁搅拌的 SEM 图及 B 点的能谱扫描图

Fig. 1　SEM images of as-cast C19400-SiC composites

(a) and (b) are SEM images and energy spectrum scanning images of point A without electromagnetic stirring; (c) and (d) are SEM images and energy spectrum scan images of point B with electromagnetic stirring

由于 Cu 与 SiC 密度相差较大，易发生 SiC 粉末浮于表面的现象，同时由于 SiC 粉末颗粒极小，在铸造过程中为了降低其表面能易出现 SiC 粉末团聚的现象. 电磁搅拌之所以可以增加合金中 SiC 含量，主要原因在于电磁搅拌作用下，通过线圈产生磁场，金属熔体则在磁场中成为许多细小的导体，磁场在熔体中引起感应电动势，而铜合金熔体形成回路产生了感应涡电流，熔体同时受到洛伦兹力的作用，在径向与切向上均有分力的作用[10]，形成熔体的运动，这种相对剧烈的旋转摩擦剪切运动能够增加 SiC 和气体间的表面能，从而减少 SiC 的团聚，使得液体铜合金与 SiC 接触更充分，二者润湿性能提高[6-7]. 由于 SiC 与铜合金熔体之间的气体和各种夹杂是影响二者润湿情况的关键，减少夹杂和气体的卷入是得到复合致密、界面性能良好的关键，SiC 熔炼前的烘干预处理也是为了更好减少 SiC 的表面水分以提高二者的润湿性能，最大限度地让 SiC 与合金熔体混合，从而使材料中 SiC 含量增加. 同时，由于搅拌过

程中散热迅速，熔体为半凝固浆料，使流动性降低、粘度提高，大大降低 SiC 粉末与熔体分离浮于表面的几率，从而得到充分的混合，大大提高合金中 SiC 的含量.

## 2.2 电磁搅拌对材料组织影响

图 2 为无电磁搅拌、电磁搅拌铸造的复合材料铸态金相组织照片. 从图 2 可见：经电磁搅拌的合金晶粒明显要比未经电磁搅拌的要细[8]，这是电磁搅拌与 SiC 协同对合金晶粒起到细化作用；两组晶粒均以等轴晶为主，由于等轴晶无各向异性，经电磁搅拌细化后晶界总表面积增加，从而可以使材料得到强化. 这里造成晶粒细化的原因：一是，SiC 的添加起到非均匀形核的作用，SiC（熔点为 2730 ℃）作为难熔质点形式存在于 C19400 合金熔体中，成为弥散的结晶核心，增加了结晶形核率，促进形核作用[9]，从而使晶粒得到细化；其次，电磁搅拌作用能够破碎已经形成的晶核，进一步促进晶核数量的增加，二者作用相互促进，起到较好的细化效果.

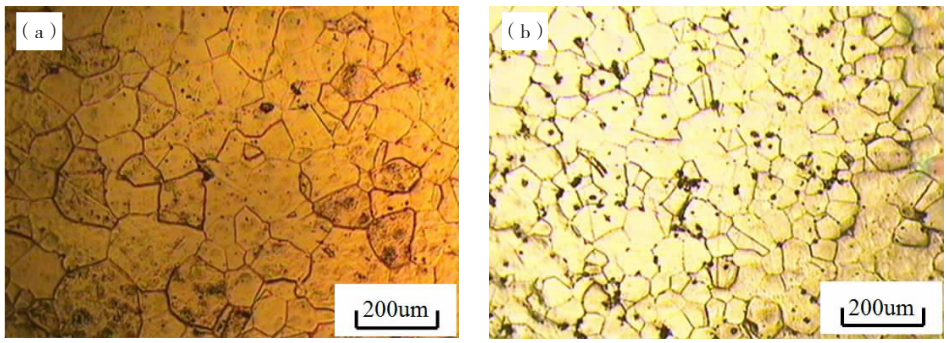


**图 2** 铸态 C19400-SiC 复合材料的组织金相照片

(a)未电磁搅拌；(b)电磁搅拌

Fig. 2 Microstructure of C19400-SiC composites as cast

(a) without electromagnetic stirring; (b) electromagnetic stirring

为了清楚的比较无电磁搅拌及电磁搅拌后合金晶粒的细化效果，采用 Image-pro plus 软件对各个试样的晶粒尺寸进行统计，统计结果如图 3 所示. 从图 3 可见：当无电磁搅拌铸造、SiC 添加量为 0.8% 时，晶粒尺寸为 65.3 μm；当采用电磁搅拌后，当 SiC 添加量为 0.8%时，晶粒尺寸为 39.4 μm，晶粒尺寸减少了 40%.

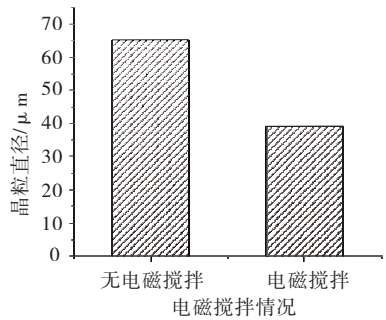


**图 3** 复合材料晶粒尺寸

Fig. 3 Grain size of composite material

电磁搅拌对材料的细化作用，其原因是通过电磁搅拌，能够在熔体内部形成对流运动，表面及外围散热较快的部位首先形核，在电磁搅拌作用下熔体冲刷，外部晶核冲入熔体内，迅速使内部晶核增加，同时又有新的晶核不断产生，从而使晶核增加速度加快，晶粒数目增多得到细化. 同时，在洛伦磁力的作用下熔体不断运动，使温度场分布更加均匀，形核区间变大，结晶过程中因温度分布不均及激冷而形成的晶粒大小不一致的现象得到很大改善[10-11]，促使材料的组织比无电磁搅拌的更加均匀. 再次，晶粒间在搅拌过程中易发生碰撞破碎，而进一步促进了晶核的增加. 此外，采用电磁搅拌时，改善了 SiC 的团聚现象，使基体金属与 SiC 充分混合而形成更多的结晶核心，所以采用电磁搅拌后能够使复合材料晶粒更为细小均匀.

## 2.3 电磁搅拌对 C19400-SiC 合金性能影响

图 4 为铸态组织硬度值图. 从图 4 可以看出，未经电磁搅拌时合金布氏硬度值为 76.7 HB，采用电磁搅拌铸造后合金的布氏硬度 77.9 HB，比未进行电磁搅拌略有增加. 合金材料硬度的提高：一方面源

于晶粒细化，晶粒在塑性变形过程中对位错运动的阻碍增加[12-13]；另一方面，因采用电磁搅拌后促进了 SiC 数量增加，且 SiC 更为均匀地分布在合金基体上，起到钉扎位错的作用，使合金的硬度进一步提高.

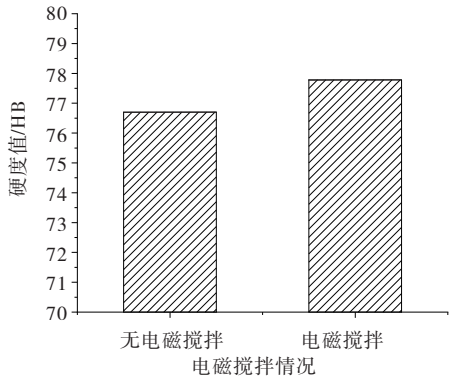


**图 4**　铸态合金布氏硬度值

Fig. 4　Brinell hardness of as-cast alloy

图 5 为复合材料铸态合金的电导率图. 从图 6 可见，无电磁搅拌时复合材料电导率为 1.95 S/m，采用电磁搅拌后复合材料的电导率为 2.34 S/m. 采用电磁搅拌后，铸态合金的电导率值并未受到太大的影响，反而比无电磁搅拌的合金提高了 4.5%，总体略有升高. 说明电磁搅拌除了起到晶粒细化的作用，还能够有效改善合金的导电性能. 这是由于电磁搅拌后，SiC 与基体金属间润湿性能提高、结合力增大，使得 SiC 与基体金属结合更加紧密，合金致密度提高，杂质、气孔等缺陷大为减少，从而减少因添加 SiC 而电导率降低的情况，材料的综合性能也能随之提高.

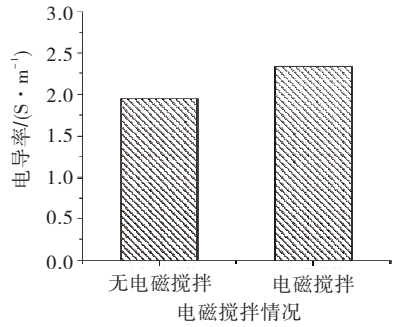


**图 5**　铸态合金的电导率

Fig. 5　Electrical conductivity of as-cast alloy

## 3　结　论

(1)在 C19400-SiC 复合材料铸造过程中，进行电磁搅拌能显著提高铸态合金晶粒细化效果，当 SiC 添加量为 0.8%时，进行电磁搅拌后的合金晶粒尺寸为 39.4 μm，比无电磁搅拌组合金晶粒减小了 40%.

(2)对复合材料进行电磁搅拌，能促进 SiC 含量的增加. 当 SiC 添加量为 0.8%时进行电磁搅拌后，能谱分析结果显示 Si 含量为 4.98%，比无电磁搅拌组增加了 2.6 倍.

(3)在 C19400-SiC 复合材料铸造过程中，进行电磁搅拌对复合材料的硬度及导电性能均有一定的促进作用.

**参考文献：**

[1] 王忠勇，高文理. 石墨烯增强铜基复合材料的制备与性能[J]. 热加工工艺，2019，48(18)：76-80.

[2] 叶芳，高雪松，周琴. 集成电路塑封中引线框架使用要求[J]. 电子与封装，2003(3)：26-29.

[3] 张衬新. 电磁搅拌技术在铜管连铸生产中的应用进展[J]. 有色冶金设计与研究，2016，37：31-33.

[4] 王佳康，接金川，李廷举. 不同凝固条件下 $Cu_{80}Fe_{20}$ 合金凝固组织以及磁性能研究[J]. 中国铸造装备与技术，2020，55(1)：19-24.

[5] SEONG-MOOK Cho，BRIAN G T. Electromagnetic forces in continuous casting of steel slabs[J]. Metals，2019(9)：471.

[6] 金文中，李素芳，李廷举，等. 复合电磁场作用下高温合金锭的真空熔铸技术研究[J]. 稀有金属材料与工程，2015，6(44)：1546-1549.

[7] 刘有金，张云龙，高晶，等. SiC 颗粒尺寸对 SiCp/Cu 基复合材料热膨胀系数的影响[J]. 兵器材料科学与工程，2013，36：118-120.

[8] 余永宁. 材料科学基础教程[M]. 北京：高等教育出版社，2012：467-470.

[9] YANO T，LING X，HIGASHIDA K，et al. Improvement of form-ability of leaded brass during hot working[J]. Science and Tech-Nology，1999，15：67-72.

[10] 张胜利，国秀花，宋克兴，等. 多粒径 TiB2 颗粒增强铜基复合材料制备与载流摩擦磨损的特性[J]. 复合材料学报，2019，36(10)：2348-2356.

[11] 胡文全,迟长志,战春阳.电磁搅拌对 ZL401 组织与性能的影响[J].金属铸锻焊技术,2011,40(23):30-32.
[12] 徐萌,陈刚,赵玉涛,等.电磁搅拌制备 TiB2 颗粒增强 7055 铝基复合材料的研究[J].铸造,2009,12:1233-1237.
[13] 刘政,谌庆春,罗浩林,刘骏义,等.电磁搅拌对半固态 A356-Y 铝合金凝固组织的影响[J].中国稀土学报,2014(1):61-68.

# Effects of electromagnetic stirring on composition control and properties of C19400-SiC composite

LIAO Yumin, JIANG Mingzhu, HU Rong
*Guangdong Songshan Polytechnic College, Shaoguan* 512126, *China*

**Abstract**: It is difficult to control the composition of SiC in the process of preparing C19400-SiC composites. The electromagnetic stirring method is introduced in the experiment. The experimental results show that the electromagnetic stirring technology promotes the addition of SiC in the alloy, and the grain size of C19400-SiC composites is reduced by 40%. In addition, after using electromagnetic stirring, the hardness of the composite material is slightly increased, and the electrical conductivity is improved.

**Key words**: C19400-SiC; composite; electromagnetic stirring