

电磁搅拌吸铸技术及其在铝陶制动盘铸造中的应用

张桢林 徐 俊 向 俊 刘旭华 肖 赢 张一弛 刘可偲
(湖南文昌新材料科技股份有限公司)

摘 要 搅拌铸造法制备颗粒增强铝基复合材料具有流程短、成本低的特点,但在铸造过程中容易出现不成形、气孔、夹杂以及增强体颗粒分布不均匀等问题,导致制备大型复杂构件难度较大。采用电磁搅拌吸铸技术可实现电磁搅拌与吸铸同时进行,避免了铸造过程中增强体颗粒沉降,采用吸铸可解决熔体流动性差的问题,大幅提高充型速度和冷却均匀性。以 20SiC_p/A357 复合材料铸锭为原料,采用电磁搅拌吸铸技术成功制备出质量为 40 kg 的轨道交通用铝基复合材料轴装制动盘。与普通重力铸造相比,电磁搅拌吸铸技术可明显提高制动盘的宏观和微观组织均匀性、致密度和力学性能,从而获得高品质的铝基复合材料大型复杂构件。

关键词 铝基复合材料;电磁搅拌吸铸;大型复杂构件;均匀性;力学性能

中图分类号 TB331 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of Electromagnetic Stirring Suction Casting in Aluminum Matrix Composite Brake Disc

Zhang Zhenlin, Xu Jun, Xiang Jun, Liu Xuhua, Xiao Ying, Zhang Yichi, Liu Kecai
(Hunan Wenchang New Material Technology Co., Ltd.)

Abstract: The preparation of particle-reinforced aluminum matrix composites by stirring casting method has the advantages of short process and low cost. However, problems such as poor forming, pores, inclusions, and uneven distribution of reinforcement particles existing in the casting process make it difficult to fabricate large complex components. The electromagnetic stirring suction casting technology was proposed to solve the above problems. Compared with traditional gravity casting, the technology can simultaneously realize electromagnetic stirring and suction casting, avoiding the sedimentation of reinforcement particles during the casting process. Suction casting method can relieve poor melt fluidity, greatly increasing the filling speed and cooling uniformity. 20SiC_p/A357 composites was used as raw material, and electromagnetic stirring suction casting technology was adopted to successfully prepare a 40 kg aluminum-based composite shaft-mounted brake disc for rail transit. Compared with gravity casting, electromagnetic stirring suction casting technology can significantly improve the macroscopic and microstructure uniformity, density and mechanical properties of the brake disc, obtaining high-quality large-scale complex components of aluminum matrix composites.

Key Words: Aluminum Matrix Composite, Electromagnetic Stirring Suction Casting, Large Complex Components, Uniformity, Mechanical Properties

SiC 颗粒增强铝基复合材料具有耐磨性高、比刚度和比强度高、热膨胀系数小、耐蚀性优良等一系列特点,广泛应用于交通运输、航空航天及电子封装等领域^[1~5]。目前主要的制备方法有粉末冶金法、搅拌铸造法、喷射沉积法、真空压力浸渗法等^[6]。其中,搅拌铸造法具有生产成本低、工艺流程短、近终成形等特点,因而被认为是非常适合于生产大型复杂复合材料零部件的方法。然而由于 SiC 颗粒与铝液的密度差使得其容易

发生沉降。SiC 颗粒加入后使得熔体的粘度增大,流动性降低,难以充型,铸件易存在气孔、缩松等缺陷。在凝固过程中基体晶粒长大易将 SiC 颗粒推挤到晶界处,造成组织不均匀。具有良好力学性能的铝基复合材料大型复杂构件的铸造成形是搅拌铸造法面临的难题^[7,8]。本课题在搅拌铸造法研究基础上,通过将电磁搅拌与吸铸技术相结合,提出了电磁搅拌吸铸制备铝基复合材料大型复杂构件的新方法。该方法将电磁搅拌的无污染

收稿日期:2020-10-26;修改稿收到日期:2021-09-10
基金项目:湖南省科技攻关与重大科技成果转化资助项目(2018GK4034);娄底市科技重大专项资助项目
第一作者简介:张桢林,男,1988 年出生,博士,湖南娄底(417000),E-mail:zhangzhenlin819@126.com
引用格式:张桢林,徐俊,向俊,等. 电磁搅拌吸铸技术及其在铝陶制动盘铸造中的应用[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):171-174.
ZHANG Z L, XU J, XIANG J, et al. Application of electromagnetic stirring suction casting in aluminum matrix composite brake disc[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):171-174.

性、可控性、强剪切与吸铸的快速充型、均匀冷却相结合,制备出组织均匀、力学性能优异的轨道交通用轴装铝陶制动盘,实现了铝基复合材料大型复杂构件的直接铸造成形。

1 电磁搅拌吸铸技术原理

图 1 是电磁搅拌吸铸技术原理的示意图。其结构主要包括电磁搅拌系统、坩埚、抽气泵、吸液管、模具室、气压控制阀等。主要原理:模具室设在炉膛的上方,通过吸液管相连,完成加料后,将模具室与坩埚进行抽真空处理,对熔体进行电磁搅拌,此时吸液管插入熔体当中,形成环缝式电磁搅拌,避免了电磁场的集肤效应,提高了电磁搅拌的剪切强度。搅拌一定时间后,通过放气阀向坩埚所在腔室内充气至设定压力,同时保持模具室的真空状态,形成气压差,熔体在压力差作用下快速吸入模具室中,充型结束后保压一定时间完成铸造。

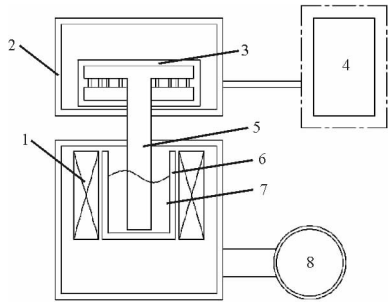


图 1 电磁搅拌吸铸技术的原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic stirring suction casting technology

- 1.电磁搅拌线圈 2.模具室 3.模具 4.气压控制气阀
5.吸液管 6.坩埚 7.熔体 8.真空泵

SiC_p 增强 Al 基复合材料由于 SiC 与 Al 基体之间存在密度差,在停止搅拌后会增强体颗粒沉降,造成铸件组织在宏观上的不均匀。因此可在搅拌熔体的同时进行吸铸,以保证熔体温度场和 SiC_p 的均匀性。在电磁搅拌过程中,由于吸液管的插入,在吸液管和坩埚内壁间形成环缝式电磁搅拌,大大提高了熔体的剪切强度,促进了 SiC_p 在熔体中的均匀分散。在吸铸过程中可通过控制充气速度实现熔体的快速充型,制备的轴装制动盘见图 2,其直径为 530 mm,厚度为 120 mm,形

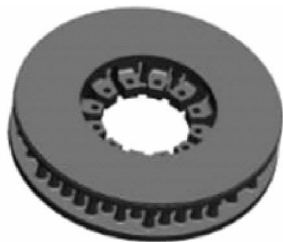


图 2 轴装制动盘示意图

Fig.2 Schematic diagram of brake disc

状复杂,质量约为 40 kg,而重力铸造的浇注时间较长,轴装制动盘的下盘面先凝固,组织细小,上盘面后凝固,组织粗大,造成在制动盘使用过程中发生上下盘面的不均匀磨损,影响使用性能。而采用吸铸技术通过气体压力差控制浇注速度,可在短时间内完成充型过程,提高了上下盘面组织的一致性。且由于模具室在坩埚的上方,熔体由底部进入型腔,充型更为平稳,减少了卷气。

2 熔体的温度场和 SiC 分布

在复合材料的铸造过程中,熔体的品质对最终铸件的性能有很大的影响,而 SiC_p 在熔体中分布的均匀性会影响最终铸件的组织。为验证电磁搅拌吸铸过程中温度场和 SiC_p 的均匀性,将 60 kg 的 20SiC_p/A357 复合材料铸锭置于坩埚中,采用中频感应熔炼加热至 680 ℃ 熔化,在频率为 50 Hz、搅拌电流为 30 A 下,电磁搅拌 10 min,并与不搅拌只保温 10 min 的熔体温度场进行对比。图 3 为未施加搅拌和施加电磁搅拌后坩埚中各区域位置的温度分布。可以看出,未施加搅拌的熔体炉壁区域温度与炉体中心区域温度存在明显差异,温差达到 40 ℃,而通过施加电磁搅拌有效改善了炉体内部的温度场,各区域温差稳定在 10 ℃ 以内。这是由于在复合材料熔炼过程中,随着 SiC_p 的加入使复合材料熔体粘度显著增加,导致熔炼过程中坩埚内熔体的对流传热被削弱,造成熔体温度场的不均匀性加剧。但施加电磁搅拌后熔体产生旋转运动,加强了对流传热,温度场分布更加均匀。

从施加电磁搅拌的坩埚内熔体的上、中、下部分别取样测量 SiC_p 质量分数,并与未搅拌的熔体进行对比,结果见图 4。可以看出,施加电磁搅拌的熔体 SiC_p 质量分布更加均匀,未搅拌的熔体中 SiC_p 发生沉降,底部的 SiC_p 含量明显高于上部。

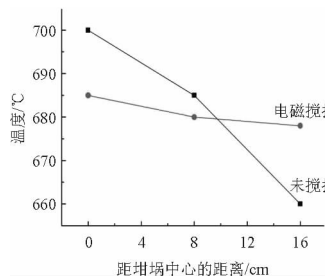


图 3 未搅拌与电磁搅拌熔体温度分布

Fig.3 Temperature distribution of unstirred and electromagnetic stirred melt

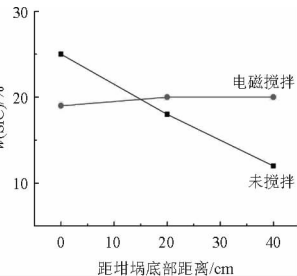


图 4 未搅拌与电磁搅拌熔体中 SiC_p 的分布

Fig.4 SiC_p distribution in unstirred and electromagnetic stirred melt

3 轴装制动盘电磁搅拌吸铸试验

采用颗粒平均直径为 12 μm 的 α-SiC 作为增强体,

质量分数为 20%，基体合金为 A357 铝合金。采用电磁搅拌吸铸和重力铸造分别制备轴装铝陶制动盘，对外观品质和内在组织进行对比分析；从重力铸造和电磁搅拌吸铸的上下盘面的内、中、外圈分别取样，对比 SiC_p 分布的均匀性，取样位置示意图见图 5。

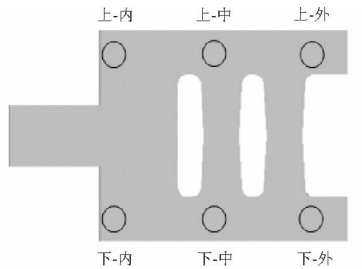


图 5 取样位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of sampling position

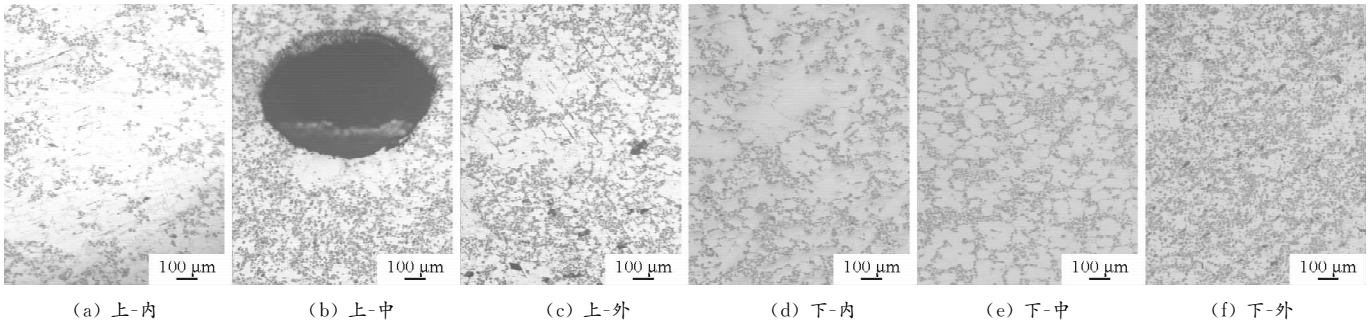


图 6 重力浇注上下盘面金相组织

Fig.6 Metallographic structure of upper and lower surface by gravity pouring casting

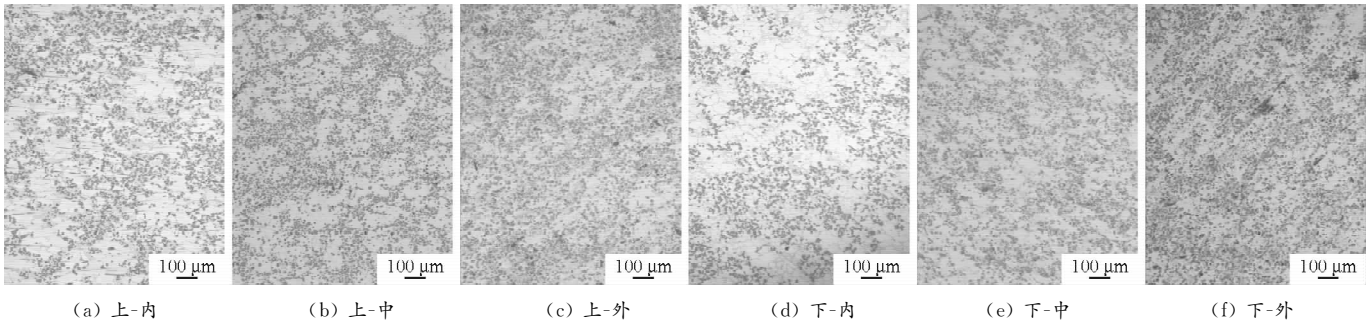
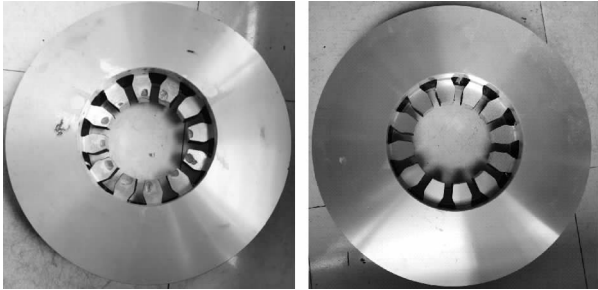


图 7 电磁搅拌吸铸上下盘面金相组织

Fig.7 Metallographic structure of upper and lower surface by electromagnetic stirring suction casting

4.2 充型和外观品质

图 8 为重力铸造和电磁搅拌吸铸制备的铸件。由



(a) 重力铸造 (b) 电磁搅拌吸铸

图 8 重力铸造与电磁搅拌吸铸产品外观

Fig.8 Appearance of products by gravity casting and electromagnetic stirring suction casting

4 试验结果与讨论

4.1 SiC_p 分布均匀性

图 6 和图 7 分别重力浇注、电磁搅拌吸铸上下盘面金相组织。从图 6 可以看出，重力铸造的下盘面金相组织较好，外圈品质好于内圈，上盘面金相组织粗大， SiC_p 分布不均匀。从图 7 可以看出，电磁搅拌吸铸法制备上下盘面金相组织整体更加均匀，内圈和外圈组织差异较小，上下盘面金相组织无明显差别。这是由于重力铸造的上盘面后凝固，凝固速度较慢，且补缩不足，导致上盘面金相组织粗大，且存在气孔等缺陷。而采用电磁搅拌吸铸时充型速度更快，上下盘面冷速一致，且补缩压力大、组织更为均匀致密。

图 8a 可看出，重力铸造法制备的制动盘的盘面和凸台处存在大量缩孔，而电磁搅拌吸铸法制备的制动盘外观品质优良，见图 8b。这是由于在较大压力的作用下熔体快速充型，充型结束后保持压力促进了熔体补缩。

4.3 致密度和力学性能

不同方式制备复合材料的致密度和力学性能见表 1。可以看出，电磁搅拌的致密度和力学性能明显高于重力铸造，这是由于吸铸时的熔体充型和补缩压力大于

表 1 重力铸造与电磁搅拌吸铸制动盘性能对比

Tab.1 Performance comparison of brake disc by gravity casting and electromagnetic stirring suction casting			
铸造方法	致密度/%	抗拉强度/MPa	伸长率/%
重力铸造	96.5	226.5	0.52
搅拌吸铸	99.4	264.8	0.97

烧结温度对 W-B₄C/Al 屏蔽复合材料组织和性能的影响

唐旭凤 唐德文
(南华大学核设施应急安全技术装备湖南省重点实验室)

摘 要 采用高能球磨-压制成形-真空烧结工艺制备了 10W-30B₄C/60Al 复合屏蔽材料。研究了烧结温度对其微观组织、物理性能及屏蔽性能的影响。结果表明,当烧结温度为 530~630 ℃时,复合材料颗粒之间的均匀度、密度及致密度均随烧结温度的升高先上升后下降,而孔隙率则先降低后升高,提高烧结温度还可以改善复合材料的中子与 γ 射线屏蔽性能,但当烧结温度达到一定值后,其屏蔽性能随烧结温度的升高会下降。当烧结温度为 600 ℃时,其复合性能最优,组织均匀致密,密度和致密度达到最大值,分别为 1.836 g/cm³ 和 62.3%,衰减系数也达到了最大值 0.121。

关键词 W-Al-B₄C 复合材料;烧结温度;致密度;屏蔽性能

中图分类号 TB331;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.009 开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Effects of Sintering Temperature on the Structure and Properties of W-B₄C/Al Composites
Tang Xufeng, Tang Dewen
(Hunan Provincial Key Laboratory of Emergency Safety Technology and Equipment for Nuclear Facilities, University of South China)

Abstract: The 10W-30B₄C/60Al composite shielding material was prepared by high energy ball milling, pressing forming and vacuum sintering process. The effects of sintering temperature on microstructure, physical properties and shielding properties of W-Al-B₄C composites were investigated systematically. The results indicate that with the sintering temperature of 530~630 ℃, the uniformity, density and compactness of 10W-30B₄C/60Al composite particles are increased firstly and then decreased with the increase of sintering temperature, while the porosity is decreased firstly and then increased. The increase of sintering temperature can also improve the shielding properties of neutron and γ ray in the composite, which, however, is decreased with the increase of sintering temperature when reaching a certain value. When the sintering temperature is 600 ℃, the performance of 10W-30B₄C/60Al composite is desirable, and the microstructure is uniform and compact, where the density and compactness reach the maximum value of 1.836 g/cm³ and 62.3%, respectively, and the attenuation coefficient also reaches the maximum value of 0.121.

Key Words: W-Al-B₄C Composites, Sintering Temperature, Relative Density, Shielding Performance

收稿日期:2021-08-30;修改稿收到日期:2021-09-28
第一作者简介:唐旭凤,女,1996 年出生,硕士研究生,湖南衡阳(421001),E-mail:tangxufeng2021@163.com
通信作者:唐德文,男,1976 年出生,教授,湖南衡阳(421001),E-mail:will998@163.com
引用格式:唐旭凤,唐德文. 烧结温度对 W-B₄C/Al 屏蔽复合材料组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):174-178.
TANG X F, TANG D W. Effects of sintering temperature on the structure and properties of W-B₄C/Al composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):174-178.

重力铸造的,使得铸件的气孔更少,组织更为致密。同时搅拌吸铸的冷却速度较重力铸造更快,SiC_p分布更为均匀,提高了制动盘的抗拉强度和伸长率。

5 结 论

电磁搅拌吸铸技术可有效提高 20SiC_p/A357 复合材料轴装铝陶制动盘中 SiC_p 分布的均匀性;能够提高 20SiC_p/A357 复合材料的充型能力,解决粘度大、流动性差的问题,实现大型复杂铸件的快速均匀冷却,提高产品的致密度和力学性能。

参 考 文 献
[1] LLOYD D J. Particle reinforced aluminium and magnesium matrix

composites[J].International Materials Reviews,1994,39(1):1-23.
[2] ELIASSON J, SANDSTRÖM R. Applications of aluminium matrix composites[J]. Key Engineering Materials, 1995, 104-107: 3-36.
[3] GNJIDI Z, BOZI D, MITKOV M. The influence of SiC particles on the compressive properties of metal matrix composites[J]. Materials Characterization, 2001, 47(2): 129-138.
[4] NAIR S V, TIEN J K, BATES R C. SiC-reinforced aluminium metal matrix composites [J]. International Materials Reviews, 1985, 30(1): 275-290.
[5] 肖荣林,郑化安,付东升,等. 铝基复合材料的制备及应用进展[J]. 铸造技术, 2015, 36(5): 1 118-1 121.
[6] 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研究现状[J]. 材料导报, 2016, 30(1): 511-515.
[7] 赵海芹,杨智勇,张雄飞,等. SiC_p/A356 制动盘铸造成形工艺设计和缺陷预测[J]. 铸造技术, 2019, 40(7): 671-674.
[8] 郑振兴,朱德智. 挤压铸造低体积分数 SiC_w/Al 复合材料的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(6): 635-637.

(编辑:刘卫)