

脉冲电流对 Al-12Si 半固态压铸板组织及性能影响

黄国萱¹ 苏鑫^{1,2} 肖瑶¹ 路迪¹ 沈善忠³ 田锡天²

(1.沈阳大学机械工程学院; 2.西北工业大学机电学院; 3.浙江华朔科技股份有限公司)

摘要 将 12 V 脉冲电流引入 Al-12Si 合金半固态浆料制备过程中,并压铸成形表面品质良好的 3 组板坯。对比研究发现,控制温度为 570 ℃下,脉冲电流可有效细化 α-Al 枝晶并使其分布更均匀。共晶相中 Si 含量下降,共晶相得到细化;在脉冲电流与变质剂的共同处理下,α-Al 枝晶最为细小,其共晶相中 Si 含量最低,呈细小短棒状及颗粒状。另外,电脉冲结合 Sr 变质处理下板坯的抗拉强度为 226.5 MPa,较传统产品提高了约 13%。断口呈现以微孔聚集为主、沿晶断裂为辅的韧性断裂机制。

关键词 半固态压铸; Al-12Si 铝合金; 脉冲电流; Sr 变质剂

中图分类号 TG146.21; TG249.2⁺6 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Pulse Current on Microstructure and Properties of Al-12Si Semisolid Die-casting Plate

Huang Guoxuan¹, Su Xin^{1,2}, Xiao Yao¹, Lu Di¹, Shen Shanzhong³, Tian Xitian²

(1.College of Mechanical Engineering, Shenyang University; 2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Northwest Polytechnical University; 3.Zhejiang Huashuo Technology Co., Ltd.)

Abstract: Pulse current of 12 V was induced into preparing process of Al-12Si semisolid slurry to fabricate three groups of plates. The results indicate that α-Al dendrites are effectively refined with uniform distribution by pulse current at 570 ℃, where the Si content in eutectic phase is decreased and eutectic phase is refined. Under the synergy of pulse current and Sr modifier, α-Al dendrites are refined to minimum value, presenting small short rods and particles shapes with the lowest Si content. Moreover, the tensile strength of die-casting plates modified by pulse current combined with modifier Sr reaches 226.5 MPa, which is 13% higher than that of traditional ones. The fracture is dominated by micropore aggregation, supplemented by intergranular fracture.

Key Words: Semisolid Die-casting, Al-12Si Alloy, Pulse Current, Sr Modifier

Al-Si 系合金是常见的压铸合金,以其较高的比强度和良好的铸造加工性能,在轨道交通、汽车制造、航空航天等领域应用广泛^[1-2]。Si 是该系合金中重要的强化元素,其一般在合金中以共晶相、β-Al₅FeSi 相及初生 Si 等形式存在。同时,随着 Si 含量增加,合金强度及耐磨性也提高^[3-5]。然而,针状共晶 Si 和粗大的无定形初生 Si 的存在使得合金塑性严重恶化,难以满足使用要求^[6]。一般采用含 Se、Na、Ba 和 P 等变质剂来改善 Si 相的存在形态,进而改善合金的使用性能,这不仅提高了 Al-Si 合金的生产成本,也造成了产品的合金元素污染^[7]。

近年来,电磁场在合金凝固中应用快速发展,为铝合金凝固组织细化和结构均匀化提供了可行方案。

VIVES C^[8-9]在亚共晶 Al-Si 合金凝固过程引入直流磁场和交流电场,发现合金柱状组织显著细化,呈现流变凝固特征;RADJAI A 等^[10]对过共晶和亚共晶 Al-Si 合金电磁细化机制进行了详细研究;许光明等^[11]、张翼翀^[12]研究发现,脉冲电流及其电磁场能促进 Al-Si 合金结构均匀化,其产品力学性能优于 Sr 变质的 Al-Si 合金等。研究者借鉴电磁场显著影响合金熔体的凝固过程,提出电磁凝固加工技术,这对电磁场控制凝固过程、提高合金成形加工性能具有积极意义。

半固态压铸 Al-Si 合金能够避免传统压铸技术带来的产品内部气孔缺陷,然而无法改善熔体快速凝固带来结果偏析和粗大的共晶相。目前大多采用传统机械搅拌、变质、剪切低温浇注法、气体诱导半固态加工工艺

收稿日期:2022-09-28;修改稿收到日期:2023-07-28
基金项目:辽宁省自然科学基金资助项目(20170520310);沈阳大学创新创业项目成果(202311035310)
第一作者简介:黄国萱,女,2003 年出生,硕士研究生,沈阳(110003),E-mail:2857748322@qq.com
通信作者:苏鑫,男,1986 年出生,讲师,沈阳(110003),E-mail:neuniversity_epm@163.com
引用格式:黄国萱,苏鑫,肖瑶,等. 脉冲电流对 Al-12Si 半固态压铸板组织及性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 497-1 500.
HUANG G X, SU X, XIAO Y, et al. Effects of pulse current on microstructure and properties of Al-12Si semisolid die-casting plate[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 497-1 500.

(GISS)和快速成浆(RSF)等方式改善合金品质^[13]。

本研究提出将脉冲电流引入 Al-12Si 合金半固态浆料中,通过电磁搅拌方式控制合金处于一定的固相率,并将合金浆料压铸成板坯,对比研究半固态浆料在电磁影响下的形貌及组织,并分析和探讨压铸板坯的力学性能变化等,为半固态压铸生产提供参考。

1 试验材料和方法

压铸材料采用 Al-12Si 铝合金,其成分见表 1。按照 Al-Si 相图计算半固态压铸用铝合金原料配比。将纯度为 99.83%(质量分数,下同)的工业纯铝及 Al-20Si 中间合金通过 RJ2-20-5kW 中频电阻炉熔炼。在 635℃下保持炉温 2 h,随后取 0.3 kg 的合金液置于石墨坩埚内,同时引入 YS9000 脉冲电源。输入三相 AC380V,20 Hz~2 000 kHz,无级微调,脉冲占空比为 10%~90%,无级可调。

表 1 Al-12Si 合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of Al-12Si alloy %						
w_B						
Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Al
11.0	≤0.7	≤0.25	≤0.1	≤0.05	≤0.05	余量

脉冲电压为 12 V,脉宽为 0.01 s,将脉冲电流引入熔体中处理约 300 s。同时保持半固态合金浆料温度约为 570℃时,随后将半固态浆料导入压铸机压室内并开始压铸,压铸机合模力为1 600 kN,压射力为200 kN。

半固态压铸试验分为 3 组:第 1 组为无脉冲处理工艺(传统半固态压铸);第 2 组为施加固定脉冲参数(频率为 20 Hz、输出电压为 12 V、占空比为 20%)的电磁处理工艺(电脉冲半固态压铸);第 3 组为熔体加入质量分数为 0.04%的 Sr 变质剂处理 10 min,随后取出浆料并施加脉冲电流。铸件尺寸示意图见图 1。

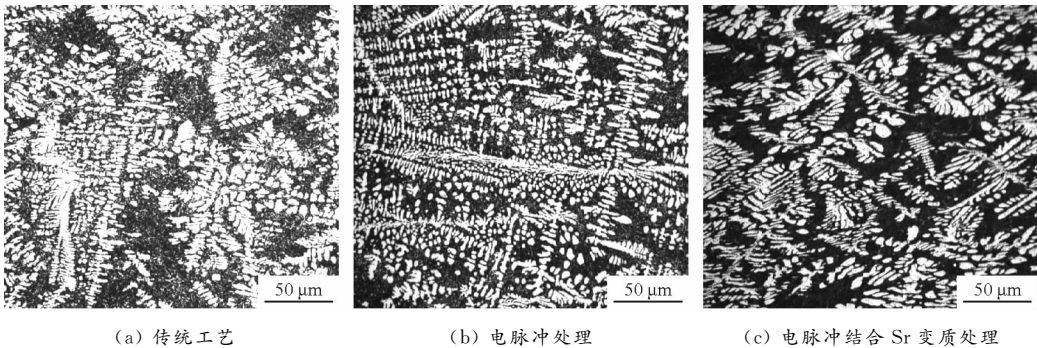


图 2 不同半固态凝固处理条件下的铝合金压铸板坯退火后中心处显微组织

Fig.2 Central microstructure of aluminum alloy strip under varies semi-solid treatments after annealing

乱,枝晶择优聚集生长。同时,高冷却速率和枝晶的择优聚集生长导致共晶成分的富 Si 相富集^[14],导致了材料的力学性能较差。

由图 2b 可以看出,电脉冲处理试样的初生 α -Al 相

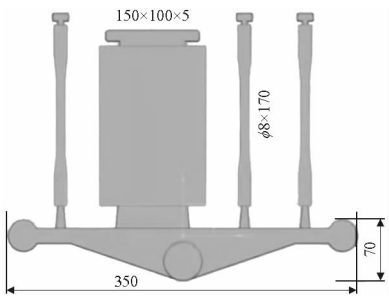


图 1 铸件尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of die-casting plates

将铸件取出,经 175℃保温 2 h 后空冷至室温。试样表面清理后,采用 Leica DMI 5000M 光学显微镜观察压铸板坯中心部位金相组织,试样尺寸为10 mm×10 mm×5 mm。利用 CMT5105 微型控制电子万能试验机进行室温拉伸性能测试,拉伸速率为 1 mm/min,试验结果取 3 根试棒测试结果的平均值。硬度测试采用 452SVD 自动转塔数显维氏硬度计,试样尺寸为 15 mm×15 mm×5 mm,每个试样靠近表面中心处打 5 个点并求其平均值。采用 JSM-6480LV 扫描电镜观察试样断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 板材的微观组织

图 2 为 3 组压铸板坯中心处横截面的金相组织。由图 2a 可以发现,传统半固态压铸制备的 Al-12Si 铝合金初生 α -Al 相粗大,且枝晶臂生长较发达,方向性较差。同时, α -Al 相择优聚集生长,分布不均匀。这是因为 Al-12Si 合金凝固潜热较大,初生 α -Al 相生长时间较为充分。然而,板坯表面接触模具,保压过程迅速降温,其冷却速度可达 $10^2\sim10^3$ ℃/s,因而柱状晶生长并不充分,凝固界面前沿不规则,导致枝晶生长方向混

相细化、二次枝晶臂的球化现象非常明显,且枝晶分布均匀,多呈现颗粒状。这是由于脉冲电流处理后,压铸机压室内熔体内部产生与脉冲同频率的电磁压力。熔体凝固时,在初生 α -Al 相枝晶尖端处脉冲电流富集。

高的电流密度所产生的高焦耳热,能够使得二次枝晶重熔,甚至被熔断形成新的形核核心。控制固相率,冲头快速挤压半固态熔体进入并填满压铸机型腔。其保压凝固过程与传统凝固过程相似,随着快速冷却进行,枝晶得不到充分生长而显著细化、球化且均匀分布。

由图 2c 可以看出,经金属 Sr 变质+脉冲电磁搅拌后,半固态压铸板坯组织中 α -Al 相枝晶多呈现圆润的羽毛状和蔷薇状,其尺寸被细化,同时分布较均匀。熔炼过程 Sr 的加入使得熔体系统的界面能降低,临近的 α -Al 相形核核心互溶,熔体内部易形成大量形核核心。在压室内与脉冲电流相互作用下,核心融合处电流富集。电流焦耳热熔断融合处 α -Al 相基体从而形成圆润形貌。在压铸保温阶段,由于大量热量被快速带出,形成了尺寸较为细小、结构较为均匀的凝固组织。

对比前期试验可知^[15],本研究所采用的脉冲电流

对凝固组织的细化作用较为明显。 α -Al 相形核核心受到洛伦兹力的影响,在凝固界面前沿处非线性增大。电磁压力促进了枝晶间合金元素的传热、传质过程的进行。生长中的枝晶周围的合金浓度过冷显著降低,合金成分分布更加均匀^[16]。

2.2 共晶组织观察

图 3 为压铸 Al-12Si 合金板材的共晶组织形貌。由图 3a 可知,传统工艺板材的共晶组织尺寸差距较大,多以针状、层片状分叉形式,共晶组织尺寸较为粗大。在脉冲电流半固态凝固处理条件下,共晶相边缘无明显尖锐组织,共晶组织内部的 α -Al 相组织呈颗粒状,见图 3b。共晶组织明显细化,组织分布均匀化,存在微小共晶态 Si 颗粒;在 Sr 变质条件再进行脉冲电流凝固处理后, α -Al 相组织边界清晰,较为圆润。共晶组织分布较为均匀,生长方向性不明显,多呈短棒和颗粒状,见图 3c。

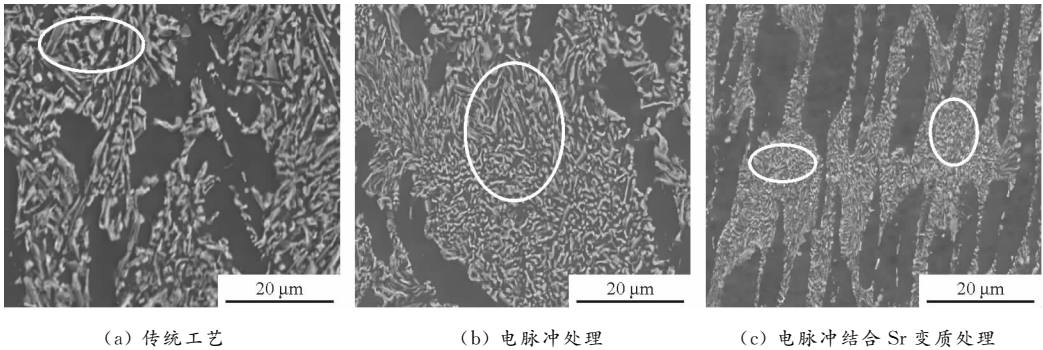


图 3 Al-12Si 压铸板的不同半固态处理下的微观组织

Fig.3 Microstructure of Al-12Si alloy stripe under varies semi-solid treatments

Al-Si 共晶相是 Al-Si 合金体系中最主要的相组成。针状和复杂粗大的共晶组织,使得合金的性能严重下降。因而常采用变质处理等改变其尺寸、形态,进而改善合金的力学性能。在本研究中,经过不同半固态凝固处理后,对半固态压铸 Al-Si 共晶组织通过能谱进行分析,见表 2。检测标记范围见图 3 圆圈。由表 2 可知,脉冲电流处理的半固态压铸板坯的 Si 平均含量为 27.9%,低于传统半固态压铸产品。说明在凝固过程中, Si 元素进行了有效的电磁诱导扩散;金属 Sr 变质处理结合脉冲电流处理的 Al-12Si 合金压铸板坯,其共晶相中 Si 平均含量进一步降低,为 22.8%。可见在变质剂处理下,形成更多的形核质点,共晶组织进一步细化,脉冲电磁诱导合金元素扩散效果进一步增强。

表 2 共晶组织的化学成分分析

工艺	w_B		x_B	
	Al	Si	Al	Si
传统工艺	67.5	32.5	68.7	31.3
电脉冲处理	72.1	27.9	72.9	27.1
Sr 变质+电处理	77.2	22.8	78.1	21.9

2.3 板坯的力学性能

表 3 为压铸板坯的力学性能。可以看出,传统半固态压铸条件下,试样的平均硬度(HV)为 71.8,平均抗拉强度及伸长率分别为 200.6 MPa 和 19.3%;脉冲电流半固态处理后,试样的平均硬度(HV)为 81.0,平均抗拉强度及伸长率分别为 210.7 MPa 和 22.6%。另外,在电脉冲和 Sr 变质共同处理条件下的产品,平均硬度(HV)为 73.3,平均抗拉强度及伸长率分别为 226.5 MPa 和 26.0%。

表 3 铝合金压铸产品的常温力学性能

Tab.3 Mechanical properties of aluminum alloy die-casting plates at room temperature

工艺条件	硬度(HV)	抗拉强度/MPa	伸长率/%
传统工艺	71.8	200.6	19.3
电脉冲处理	81.0	210.7	22.6
Sr 变质+电脉冲处理	73.3	226.5	26.0

脉冲处理后板坯表层形成了伪共晶组织层,该区域共晶 Si 相致密,因此试样表面硬度得到提高;添加 Sr 变质后,板坯表层 α -Al 枝晶密度明显增加,伪共晶相含量降低,导致表层硬度值相对较低。另外,脉冲电流作

用有效地分散变质形核核心,继而板坯内部的共晶 Si 形态细化及其分布均匀化,提升板坯抗拉强度和伸长率。可见,经过电流处理后半固态压铸板坯的硬度、强度及塑性均得到不同程度提高,而电脉冲和 Sr 变质共同处理条件下的产品拉伸性能改善最明显,韧性理想。

图 4 为经过不同半固态处理的压铸试样的拉伸断口形貌。可以看出,材料在断裂前,均存在明显的塑性

变形阶段。传统工艺下,存在大量分布的细小微坑,分布较为均匀,且深度较浅。断口呈现微孔聚集,表现为韧性断裂特征,见图 4a;从图 4b 可见,电脉冲处理后,断口表面存在微小波浪状起伏,微孔聚集的微小韧窝呈现河流状纹理分布。其断裂机制与传统工艺相似;经电脉冲结合 Sr 变质处理后,断口表面呈海浪状纹理,断口中以微孔聚集为主、沿晶断裂为辅的韧性断裂机制。

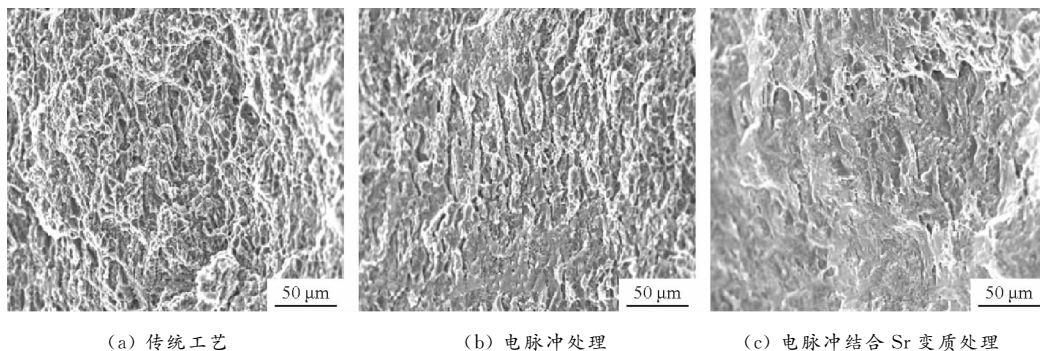


图 4 不同半固态处理的 Al-12Si 合金板坯退火后的拉伸断口微观形貌

Fig.4 Fracture morphologies of Al-12Si alloy stripes under varies semi-solid treatments after annealing

3 结 论

(1)与传统半固态压铸工艺相比,脉冲电流处理的 Al-12Si 铝合金可以得到细小且均匀的微观组织。 α -Al 枝晶多呈现颗粒状;而在 Sr 变质和电流共同处理条件下的微观组织枝晶尺寸进一步细化,且更为均匀, α -Al 枝晶多呈现圆润的羽毛状和蔷薇状。

(2)Al-Si 共晶形貌和成分上出现明显差异。与传统半固态压铸产品相比,脉冲电流同样细化了共晶相尺寸。脉冲电流处理使得共晶 Si 含量降低;电流结合 Sr 变质条件下,共晶组织进一步细化,多呈现棒状和颗粒状。其 Si 含量进一步减低,且分布均匀。

(3)对半固态压铸板坯进行硬度和抗拉强度测试,发现电流处理结合 Sr 变质的半固态处理能够有效提高产品力学性能,同时,韧性进一步改善。断口观察发现,压铸 Al-12Si 铝合金呈明显的韧性断裂特征,电流处理和 Sr 变质处理均能够有效提高产品的韧性。

参 考 文 献

- [1] 樊振中,袁文全,王端志,等.压铸铝合金研究现状与未来发展趋势[J].铸造,2020,69(2):159-166.
- [2] 赖华清.压铸工艺及模具[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [3] 李贞宽,边秀房,韩娜,等.热变形对共晶 Al-Si 合金铸件组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2006,26(12):800-801.
- [4] 李学朝.铝合金材料组织与金相图谱[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [5] CHANG J Y. Crystal morphology of eutectic Si in rare earth modified Al-7Si alloy[J]. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20: 1 305-1 307.

- [6] SHAMSUZZOHA M, HOGAN L M. The crystal morphology of fibrous silicon in strontium-modified Al-Si eutectic[J]. Philosophical Magazine, 1986, A54(4): 459-476.
- [7] 曾斌,罗佑新,刘奇元.过共晶 Al-Si 合金中初晶硅的变质机理探讨[J].轻金属,2008(5):48-50.
- [8] VIVES C. Effect of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminium alloys: Part I, Solidification in the presence of crossed alternating electric fields and stationary magnetic fields[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1996, B27(3): 445-455.
- [9] VIVES C. Effect of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminium alloys: Part II. Solidification in the presence of collinear variable and stationary magnetic fields[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1996, B27(3): 457-464.
- [10] RADJAI A, MIWA K. An investigation of the effects caused by electromagnetic vibrations in a hypereutectic Al-Si alloys melt[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1998, A29: 1 477-1 484.
- [11] 许光明,包卫平,郑佳伟,等.静磁场作用下镁合金 AZ61 凝固过程研究[J].稀有金属,2004,28(1):89-92.
- [12] 张翼翀.电磁铸轧 4045 铝合金组织及性能研究[D].沈阳:东北大学,2015.
- [13] CUI J Z, ZHANG Z Q, LE Q C. Direct-chilling casting of Mg alloy under electromagnetic and ultrasonic combined field[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(S2): 297-305.
- [14] 李霞.脉冲电流在金属凝固过程中的作用及研究进展[J].化工机械,2010,37(4):528-531,536.
- [15] 韩盼文,袁灵洋,GHULAM A,等. Zn 对压铸 Al-Si 合金共晶 Si 的粗化及粗化后变质处理[J].特种铸造及有色合金,2021,41(4):483-489.
- [16] 肖尧,AlTiB 对电磁振荡铸轧 5052 铝合金板材组织性能的影响[D].沈阳:东北大学,2014.

(编辑:刘晨辉)