

脉冲磁场-倾斜管复合工艺制备 6063 铝合金半固态组织

李 卫 龙文元
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 采用脉冲磁场-倾斜管复合工艺制备了 6063 半固态铝合金资料。研究了不同浇注温度和脉冲电压对半固态合金组织及力学性能的影响。结果表明,在未施加脉冲电压时,随着温度升高,半固态合金熔体球化效果不明显;当通入脉冲电压后,初生相晶粒得到显著细化变得圆整。其中,当脉冲电压为 200 V,浇注温度为 670 ℃时,半固态组织最佳。半固态铝合金的抗拉强度与伸长率随着脉冲电压的升高而增大。力学性能的提高主要是由于脉冲磁场改善了半固态铝合金的凝固组织形貌和晶粒尺寸。

关键词 6063 铝合金;半固态;脉冲磁场;浇注温度;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.03.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure of 6063 Semi-solid Aluminum Alloy Fabricated by Pulsed Magnetic Field-inclined Pipe Compound Process

Li Wei, Long Wenyan

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: 6063 semi-solid aluminum alloy slurry was fabricated by pulsed magnetic field-inclined pipe casting compound method, and effects of different pouring temperatures and pulse voltages on the semi-solid microstructure of alloys were investigated. The results indicate that the spheridization effect of the semi-solid alloy melt is slight with the increase of temperature without applying pulsed magnetic field. In contrast, the primary phase grains are significantly refined and spheridized after pulse voltage applying, where desirable semi-solid microstructure is achieved with the pulse voltage of 200 V and pouring temperature of 670 ℃. With the increase of pulse voltage, the tensile strength and elongation of semi-solid aluminum alloy are improved, while the enhancement of mechanical properties is attributed to the solidification morphologies and grain size modified by pulsed magnetic field.

Key Words: 6063 Aluminum Alloy, Semi-solid, Pulsed Magnetic Field, Pouring Temperature, Mechanical Properties

半固态成形技术是一种介于固态成形和液态成形之间的工艺手段,最初由美国研究者发现并提出^[1]。半固态是指金属材料在凝固过程中,通过施加特定的处理

手段(如机械搅拌、振动、加入晶粒细化剂或改变合金熔体的温度场分布等),改变初生相的形核与晶粒的生长方式,最终获得一种在液态金属中均匀悬浮着大量颗粒

收稿日期:2022-06-01;**修改稿收到日期:**2022-08-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51165036)

第一作者简介:李卫,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:201841820@qq.com

通信作者:龙文元,男,1971 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:longwy@nchu.edu.cn

引用格式:李卫,龙文元. 脉冲磁场-倾斜管复合工艺制备 6063 铝合金半固态组织[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(3): 389-393.

LI W, LONG W Y, et al. Microstructure of 6063 semi-solid aluminum alloy fabricated by pulsed magnetic field-inclined pipe compound process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(3): 389-393.

[4] DEMIRER A, SOYDAN Y, KAPTI A O. An experimental investigation of the effects of hot runner system on injection moulding process in comparison with conventional runner system[J]. Materials & Design, 2007, 28(5): 1 467-1 476.

[5] 黄先.热流道模具的现状与发展前景[J].科技创新导报, 2011(15): 95.

[6] 沈江南. 锌合金压铸数值模拟及其热流道技术研究[D]. 福建厦门:集美大学, 2013.

[7] 余敏强,曹文炅,周照耀,等.基于数值模拟的镁合金压铸热流道系统的应用[J].热加工工艺, 2009, 38(5): 51-53, 56.

[8] 张双槽,米国发,王凯,等.滤清器壳体压铸工艺设计及数值模拟[J].特种铸造及有色合金, 2019, 39(7): 735-738.

[9] 黑玉龙,陈日军,宋彬.CAD/CAE 技术在铸造工艺设计及优化中的

应用[J].特种铸造及有色合金, 2011, 31(10): 921-923.

[10] 任卫新,王云龙,孙少纯.超薄笔记本风扇盖压铸工艺设计及数值模拟[J].铸造技术, 2018, 39(6): 1 274-1 277.

[11] 薛涛,古文全,于云峰,等.压铸锌合金应用研究进展[J].特种铸造及有色合金, 2016, 36(3): 260-264.

[12] 王成明,胡清和,邓敏杰,等.基于数值模拟的压铸锌合金化油器壳工艺研究[J].特种铸造及有色合金, 2019, 39(8): 850-854.

[13] 任立新,沈江南,阙福标,等.基于数值模拟的锌合金压铸热流道技术研究[J].热加工工艺, 2014, 43(7): 61-64, 67.

[14] 刘现,刘金海,李国禄,等.镁合金方向盘骨架压铸模溢流槽优化设计[J].铸造技术, 2007(12): 1 584-1 587.

状初生相的固液混合态金属浆料^[2]。

常见的半固态制浆方法有机械搅拌法、电磁搅拌法、剪切低温浇注法(LSPSF)、超声波振动法、倾斜板浇注法和近液相线浇注法等,其机理大致分为两大类:一是在合金熔体的凝固过程中,通过外力将树枝晶破碎,使其生长成为更加圆整的球状晶;另一类是控制合金熔体的形核率,使其在熔体内部自发形成大量形核质点,从而获得球状晶组织^[3-6]。倾斜板浇注法工艺简单,制浆效率高,但该工艺制备的半固态浆料晶粒尺寸较大且球状晶数量较少,而施加脉冲磁场可以在合金熔体凝固过程中起到促进形核、细化晶粒的作用^[7]。因此,本研究综合了两种制浆工艺的优势,采用脉冲磁场+倾斜管浇注的复合工艺制备 6063 铝合金半固态浆料,通过自制试验装置,研究了不同浇注温度 and 不同脉冲电压对复合制备 6063 铝合金半固态浆料组织的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为 6063 铝合金,属于 Al-Mg-Si 系高塑性合金,其化学成分见表 1。经 DSC 试验分析,该合金的固、液相线温度分别为 615、655 ℃。半固态温度区间较宽,适合于半固态成形。

表 1 6063 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 6063 aluminum alloy %							
wt%							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.43	0.12	0.02	0.02	0.55	0.10	0.05	余量

1.2 试验过程

图 1 为自行设计的脉冲磁场倾斜管半固态制浆装置。该装置主要由脉冲磁场发生器和倾斜圆管两部分组成。脉冲磁场发生器利用电磁感应技术,脉冲电压最高可达 300 V。倾斜圆管部分由铜制线圈、不锈钢圆管

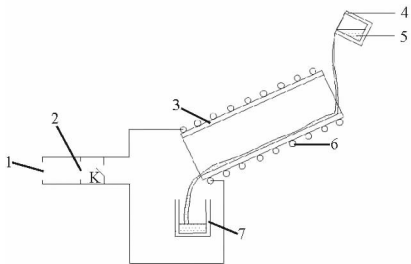


图 1 脉冲磁场-倾斜管半固态制浆装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of pulse magnetic field-inclined pipe pulping device
1. 交流电源 2. 脉冲电压调压器 3. 倾斜管 4. 浇杯
5. 金属液 6. 线圈 7. 模具

以及石棉保温套组成。铜制线圈用纱布包裹并逐层缠绕在外部包有石棉保温套的不锈钢圆管外侧,层数为 3 层,匝数为 120 匝,长度为 100 mm。不锈钢圆管内径为 60 mm,长度为 300 mm。该装置工作时,先将圆管倾斜一定的角度,然后连接电源,通过调压器对脉冲电压进行调控,从而对倾斜圆管内部产生的脉冲磁感应强度进行控制。根据毕奥·萨伐尔定律^[8]计算出不同脉冲电压下磁场中的磁感应强度,见表 2。

表 2 不同脉冲电压下的磁感应强度

Tab.2 Magnetic induction intensity under different pulse voltages	
电压/V	磁感应强度/mT
0	0
100	3.074 2
150	4.673 7
200	6.027 4

6063 铝合金在 SG2-5-12 坩埚式电阻炉内熔炼。采用石墨坩埚,铸型尺寸为 $\phi 30\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 。首先将坩埚加热至 400 ℃,装入经预热的 6063 铝锭,用电阻炉将 6063 铝合金加热至 750 ℃熔化,期间轻微搅动铝液以加速熔解。待炉料全部熔化后,再降至 720 ℃加入 C_2Cl_6 精炼剂进行除气,并扒去液面熔渣。清理结束后,将铝液降到 670 ℃(浇注温度)后静置约 10 min,然后将倾斜管的角度设定为 30°,再将此温度下的铝液通过倾斜管浇注到自制的半固态制浆装置中,分别取 4 组不同的脉冲电压(0、100、150 和 200 V)。将浇注温度分别设定为 665 和 660 ℃,重复上述试验。将所得试样处理后,在 RX-BH200M 光学显微镜下观察其金相组织,并使用 Image-Pro Plus 软件进行定量金相分析,计算初生 $\alpha\text{-Al}$ 相的平均等积圆直径 D 和平均形状因子 F :

$$D = 2(A/\pi)^{1/2} \tag{1}$$

$$F = 4\pi A/P^2 \tag{2}$$

式中, A 为晶粒面积; P 为晶粒周长。 D 值越小表明晶粒越小, F 值越接近 1 表明圆整度越高^[9]。另外依据 GB/T 228.1-2010 制备的半固态试样,尺寸为 50 mm $\times$ 10 mm $\times$ 3 mm,其中有效部位为 15 mm $\times$ 5 mm $\times$ 3 mm,采用 WH-5000 型万能试验机进行拉伸试验,拉伸速率为 1 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 浇注温度对半固态合金组织的影响

图 2 为不同浇注温度 and 不同脉冲电压下 6063 铝合金的半固态组织形貌,其中浅色区域为初生 $\alpha\text{-Al}$ 相,深色区域为共晶组织。图 3 为不同浇注温度下脉冲电压与晶粒平均等积圆直径和平均形状因子的关系。由图 2a、图 2e 和图 2i 可知,当未通入脉冲电压时,3 组不同

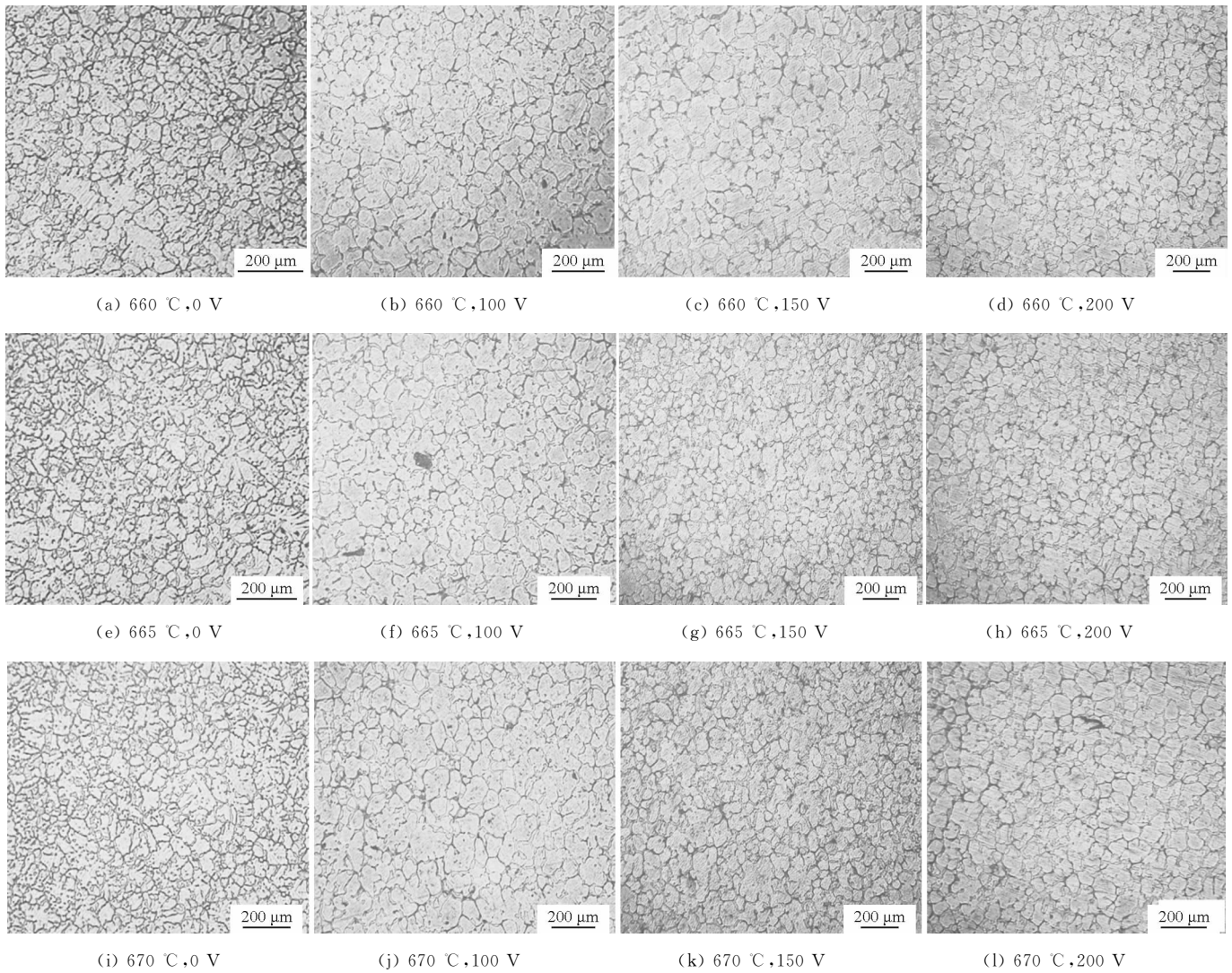


图 2 不同浇注温度和脉冲电压作用下的组织形貌

Fig.2 Morphologies of alloys under different pouring temperatures and pulse voltages

浇注温度下的合金组织几乎全部为树枝晶,仅有少量的蔷薇状组织和等轴晶存在。当浇注温度为 660 °C 时,半固态组织中的初生 α -Al 相呈粗大的条棒状或树枝状,且晶粒尺寸大小分布不均匀,此时晶粒的平均等积圆直径和平均形状因子分别为 185 μm 和 0.21。当浇注温度为 665 °C 时,少量的初生 α -Al 相从树枝状转变为蔷薇状,等轴晶的数量开始增多,但晶粒形貌依旧以铸态枝晶为主,且枝晶臂较为粗大,晶粒的圆整度也较差,平均等积圆直径为 179 μm ,平均形状因子为 0.27,球状晶的数量较为稀少。随着浇注温度升高到 670 °C,大量的初生 α -Al 相呈长条状或不规则多边形,半固态合金组织中开始出现了少量的颗粒状晶粒,此时初生 α -Al 相的平均等积圆直径与平均形状因子分别是 174 μm 和 0.34。由图 2b、图 2f 和图 2j 可知,当通入 100 V 脉冲电压,即存在脉冲磁场的作用时,半固态合金组织随着浇注温度的升高而发生明显变化,铸态枝晶基本消失,晶粒形貌主要表现为蔷薇状和颗粒状,大量的球状晶分

布在合金熔体内。当脉冲电压为 200 V,浇注温度为 670 °C 时,晶粒的球化效果最佳,绝大部分的初生 α -Al 相呈近球形的颗粒状,基本无明显铸态枝晶,此时平均等积圆直径与平均形状因子分别为 113 μm 和 0.79,见图 2l。

可以看出,当通入脉冲电压时,在较高的浇注温度

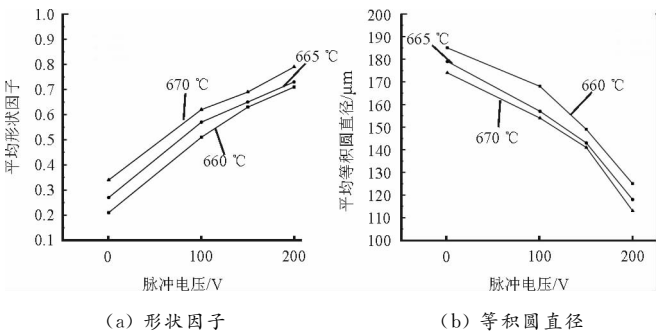


图 3 不同浇注温度下脉冲电压与晶粒尺寸的关系
Fig.3 Relationship between pulse voltage and grain size at different pouring temperatures

下,获得的半固态合金组织较好。这是由于在较高的浇注温度下,合金熔体的热量更大,凝固速度也更缓慢,熔体孕育细化晶粒的时间更长。随着合金熔体的过热度升高,在浇注时的激冷作用就愈加强烈,晶胚形核过程中的体积自由能的降低量无法补偿表面自由能的生长量,从而导致树枝晶的生长受到抑制^[9-12]。此外,温度较高的熔体流经倾斜圆管时,由于外层合金熔体直接与倾斜圆管内壁相接触,因此受到了圆管内壁的冲刷,增大了固液界面的过冷度,使得熔体外部产生了大量的形核质点,并随着脉冲磁场的搅拌和振动作用,这些形核质点被卷入到合金熔体的内部,均衡了熔体内部的温度场和溶质浓度,使形核率升高,因此产生了更多的颗粒状游离晶粒。

2.2 脉冲磁场对半固态合金组织的影响

未经过脉冲磁场处理的半固态合金组织具有明显的枝晶特征,除了表层激冷区的晶粒较为细小外,其余几乎全为粗大的枝晶,且晶粒大小不一,分布亦不均匀;当施加 100 V 的脉冲电压时,半固态组织中的初生 α -Al 相主要以蔷薇状为主,铸态枝晶基本消失,晶界轮廓较为明显,并且随着浇注温度升高,组织中出现了少量的球状晶粒。当浇注温度为 670 ℃ 时,晶粒的平均等积圆直径和平均形状因子分别为 154 μm 和 0.62。当脉冲电压升高为 200 V 时,合金组织中的初生相基本呈现为近球状,晶粒得到细化和圆整(见图 2d、图 2h 和图 2l)。由图 3 可知,随着脉冲电压升高,晶粒的平均等积圆直径随之降低,平均形状因子逐渐增大。其中,当脉冲电压为 200 V,浇注温度为 670 ℃ 时,半固态组织效果最佳。

由于在合金熔体凝固过程中施加脉冲磁场,可以对合金熔体起到搅拌和振动作用,使得树枝晶在长大的过程中,枝晶臂受到剪切作用,导致枝晶破碎,增加了熔体内晶核的数量,这些晶核经过熟化,最终成长为非枝晶组织。同时,随着脉冲电压增大,脉冲磁场的磁压强变化剧烈,使得合金熔体内部温度和溶质浓度发生变化,加剧了树枝晶的枝晶臂熔断,这些分布于合金熔体内部的游离枝晶臂会继续长大,进而导致晶核数量的增加,

极大地提高了形核率。另一方面,由于脉冲磁场可以对合金熔体产生强制对流,使得熔体外部首先形成的晶核被涡流卷入到熔体中心部分,形成了大量的形核质点,使得其在凝固结晶时的形核率升高,晶粒的球化效果更好。所以,脉冲电压越高,合金半固态组织中近球形的初生 α -Al 相越多,晶粒也越细小和圆整^[3,13-14]。

2.3 脉冲磁场对半固态合金力学性能的影响

图 4 为 6063 铝合金试样在浇注温度 670 ℃ 和不同脉冲电压下的力学性能。可以看出,当无脉冲磁场时,试样的抗拉强度为 174 MPa,伸长率为 2.1%;当脉冲电压为 200 V 时,试样的抗拉强度为 220 MPa,伸长率为 4.4%,经过脉冲磁场处理后试样抗拉强度和伸长率都较无脉冲磁场时有了明显的提升。这是由于在较高的脉冲电压下,合金熔体受到脉冲磁场的搅拌和振动作用更为强烈,因此初生相的晶粒更细且更圆整,晶界面积增大,晶界越曲折。当受到外力发生塑性变形时,更大面积的晶界不仅可以阻碍位错的移动,还可以使同样的变形量分摊到更多的晶粒之中进行,使得晶粒内部和晶界表面应变度的差值降低,避免了应力集中效应,抑制裂纹的扩展,因此材料在断裂前能够承受更大的应力,所以试样的抗拉强度随之提高。图 5 是浇注温度为 670 ℃ 时,不同脉冲电压下拉伸试样的断口形貌。可以看出,6063 铝合金半固态试样的塑形变形量很小,基本没有出现缩颈现象,但断口面上出现了一些准解理面,同时存在着大量不规则的孔洞和少量微小的韧窝,球状

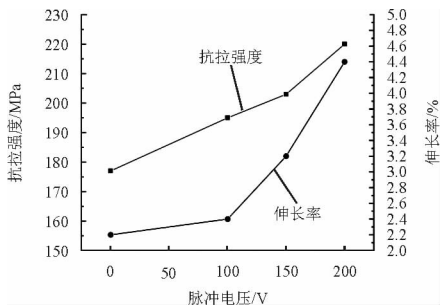


图 4 不同脉冲电压下铝合金试样力学性能的变化
Fig.4 Mechanical property variation of aluminum alloy specimens under different pulse voltages

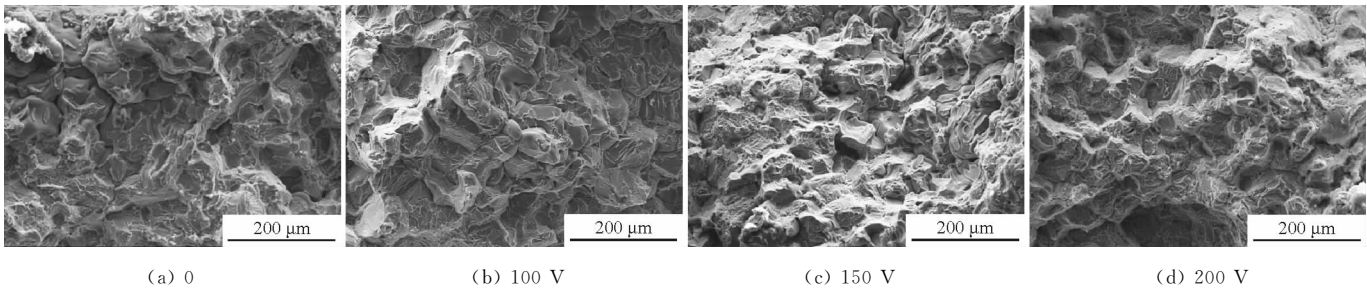


图 5 不同脉冲电压下拉伸试样的断口形貌

Fig.5 Fracture morphologies of tensile specimens under different pulse voltages

晶的外轮廓较为明显。因此,断口为脆性断裂与延性断裂的混合断口^[15-16]。裂纹主要是从基体中的夹杂物产生,随着应力的作用,沿着晶界开始延伸扩展。

3 结 论

(1)当未通入脉冲电压时,6063 铝合金的组织形貌主要是以发达树枝晶为主,仅有少量的颗粒状组织存在,且铸态枝晶臂较粗大。随着浇注温度升高,半固态组织形貌变化不明显,仍然以树枝晶状为主,存在少量的蔷薇状组织,晶粒并未得到明显细化和圆整。

(2)通入脉冲电压后,6063 铝合金半固态组织形貌发生显著变化,初生 α -Al 相呈近球状或颗粒状,且球状晶数量明显增多。随着脉冲电压升高,平均晶粒尺寸逐渐减小,形状因子逐渐增大。当脉冲电压为 200 V,浇注温度为 670 °C,半固态组织效果最佳。

(3)当浇注温度为 670 °C时,6063 铝合金试样的抗拉强度和伸长率随着脉冲电压的增大而提高,其中当脉冲电压为 200 V 时,试样的抗拉强度达到 220 MPa,伸长率为 4.4%。较未经过脉冲磁场处理的试样,力学性能明显提升。

参 考 文 献

- [1] 吴树森,吕书林,林冲,等.铝合金的半固态成形技术[J].湖北工业大学学报,2014,29(5):6-10.
- [2] FLEMINGS M C.Behavior of metal alloys in the semi-solid state [J]. Metallurgical Transaction, 1991, A22(5): 957-981.

- [3] 龙文元,刘焯,刘伟国.脉冲磁场-倾斜管复合制备半固态铝合金组织的研究[J].特种铸造及有色合金,2017,37(2):121-124.
- [4] 郭洪民,杨湘杰.半固态流变成形中浆料制备的基本思路[J].铸造,2006,55(8):794-798,802.
- [5] 薛克敏,朱广余,李萍,等.新复合工艺制备 A356.2 合金半固态坯料[J].塑性工程学报,2011,18(2):93-96,102.
- [6] WANG B, YANG Y S, MA X P, et al. Simulation of electromagnetic-flow fields in Mg melt under pulsed magnetic field[J].Trans. Non-ferr. Metal. Soc.China, 2010, 20(2): 283-288.
- [7] 罗守靖,姜巨福,杜之明.半固态成形研究的新进展、工业应用及其思考[J].机械工程学报,2004,39(11):52-60.
- [8] 黄丹.电磁场中磁感应强度的计算及解析[J].赤峰学院学报(自然科学版),2017,33(22):11-13.
- [9] 刘政,周翔宇,朱涛.浇注温度和电磁搅拌对半固态 6061 铝合金组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2015,35(2):113-118.
- [10] 周全,陈乐平,尹健.低压脉冲磁场下制备半固态 AZ91D-3Ca 镁合金的研究[J].特种铸造及有色合金,2010,30(12):1089-1092.
- [11] 毛卫民,甄子胜,陈洪涛.电磁搅拌对半固态 AZ91D 镁合金组织的影响[J].材料研究学报,2005,19(3):303-309.
- [12] 吴楠.7075 铝合金半固态浆料制备及组织性能研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [13] 肖蕴华,杨菲,原正兴,等.脉冲电流处理对 ZA12 合金凝固组织和力学性能的影响[J].热加工工艺,2002(6):32-33.
- [14] 李赫,路贵民,崔建忠.近液相线铸造 6063 铝合金二次加热组织[J].特种铸造及有色合金,2007(S1):364-367.
- [15] 钟培道.断裂失效分析[J].理化检验(物理分册),2005(7):375-378.
- [16] 吴旻.ZL107 铸造铝合金的力学性能及拉伸断裂原因分析[J].材料保护,2019,52(11):159-161,165.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

