

瞬时强峰磁脉冲对 7050 铝合金凝固组织的影响

罗天骄¹ 孙黎明² 董志国¹ 李应举¹ 冯小辉¹ 郑 策¹ 朱 成¹ 杨院生¹

(1. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016; 2. 重庆国创轻合金研究院有限公司, 重庆 400039)

摘 要 为了研究瞬时强峰磁脉冲条件下 7050 铝合金凝固过程中组织演化, 在不同脉冲电压和脉冲频率下对 7050 铝合金进行凝固试验研究。通过光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)对 7050 合金凝固后的宏观形貌、微观形貌和第二相形貌及尺寸进行分析。结果表明, 施加不同频率脉冲磁场, 7050 铝合金的晶粒均得到显著细化, 当模具温度为 300 °C, 浇注温度为 730 °C, 脉冲电压为 300 V, 脉冲频率为 5 Hz 时, 7050 铝合金凝固组织细化效果最显著, 平均晶粒尺寸为 106 μm, 相比未施加脉冲磁场的平均晶粒尺寸减小了 56%, 凝固组织中缩松和气孔平均含量减小了 56.3%。

关键词 瞬时强峰磁脉冲; 7050 铝合金; 凝固组织; 晶粒细化

中图分类号 TG146.21; TG249.6

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240224

Effects of Instantaneous Strong Peak Magnetic Pulse on Solidification Structure of 7050 Aluminum Alloy

LUO Tianjiao¹, SUN Liming², DONG Zhiguo¹, LI Yingju¹, FENG Xiaohui¹, ZHENG Ce¹, ZHU Cheng¹,

YANG Yuansheng¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Chinese, Shenyang 110016; 2. Chongqing Guochuang Light Alloy Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400039)

Abstract: In order to investigate the microstructure evolution of 7050 aluminum alloy during solidification process under the condition of instantaneous strong peak magnetic pulse, solidification experiments were conducted on 7050 aluminum alloy under different pulse voltages and pulse frequencies. The macro-morphology, micromorphology, second phase morphology and size of 7050 alloy after solidification were analyzed by optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). The results indicate that the grains of 7050 aluminum alloy are significantly refined after applying pulse magnetic fields with different frequencies, and the effects present desirable when the mold temperature is 300 °C, pouring temperature is 730 °C, pulse voltage is 300 V, and pulse frequency is 5 Hz, where the average grain size is 106 μm, which is reduced by 56% compared with that of ones without pulse magnetic field. The shrinkages and cavities in the solidified structure are significantly reduced by 56.3%.

Key Words: Instantaneous Strong Peak Magnetic Pulse, 7050 Aluminum Alloy, Solidification Structure, Grain Refinement

铝合金具有密度小、比强度高、加工性能优越及良好的综合力学性能, 是当前应用最广泛的金属之一, 随着铝及铝合金广泛应用和飞速发展, 尤其是在航空航天领域的应用, 对铸造铝合金和变形铝合金铸锭及其深加工产品的组织提出了严格的要求^[1-3]。但是, 在常规铸造条件下, 铝合金凝固组织枝晶发达、晶粒粗大、铸件的强度和塑性均较低。所以, 凝固晶粒细化对于提高铸件的力学性能极为重要。另外, 晶粒细化对于

变形铝合金的铸锭制备也很有意义, 可使铸锭的变形能力提高, 有利于后续挤压、轧制等塑性加工过程。因此, 对铝合金的凝固组织控制和晶粒细化给予极大的关注^[4-5]。

目前, 铝及铝合金凝固组织细化的方法主要有热控法^[6-8]和变质法^[9-14]等, 前者是通过控制铝及铝合金凝固时的冷却速度来调控凝固组织; 而变质法则添加各种晶粒细化剂或变质剂, 如 Al-Ti-B^[9-10]、Al-Ti-

收稿日期: 2024-05-22; 修订日期: 2024-08-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFA0702901)

第一作者简介: 罗天骄, 男, 1973 年出生, 副研究员, E-mail: tjluo@imr.ac.cn

通信作者: 李应举, 男, 1979 年出生, 研究员, E-mail: yjli@imr.ac.cn

引用格式: 罗天骄, 孙黎明, 董志国, 等. 瞬时强峰磁脉冲对 7050 铝合金凝固组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(7): 969-976.

LUO T J, SUN L M, DONG Z G, et al. Effects of instantaneous strong peak magnetic pulse on solidification structure of 7050 aluminum alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(7): 969-976.

C^[11-12]和Al-Ti-B-RE^[13-14]等,使铝合金晶粒得到显著细化。其中,热控法在复杂铸件及大型铸锭情况下很难控制金属凝固组织,达到细化晶粒的目的。变质法则是铝及铝合金工业生产中最常用的晶粒细化方法,但变质法会引入其他化学元素或化合物,对铝及铝合金造成一定的污染。因此,在不改变合金成分的前提下,开发对环境和铝及铝合金材料本身无污染的凝固组织细化技术,成为铝合金细化的重要方向。

研究表明,将脉冲电磁场作用于金属或合金的凝固过程,可以有效细化其凝固组织^[15-18]。NAKADA M等^[15]首先采用脉冲电流细化Sn-15Pb合金的凝固组织,发现不仅晶粒尺寸明显减小,而且发生初生相形貌由树枝状向球状的转变。BARNAK J P等^[16]在Sn-40Pb和Sn-37Pb合金的凝固过程中施加脉冲电流,同样发现树枝晶球化的现象,且高密度脉冲电流可以细化Sn-Pb合金共晶尺寸。更多的研究表明,脉冲电流还可以细化纯铝和铝合金的凝固组织^[17-18]。然而,由于在合金凝固过程中施加脉冲电流比较困难,迄今为止,脉冲电流仍未在工业上广泛应用。

为了克服脉冲电流的缺点,开发出新的脉冲磁场技术并用于细化金属或合金的凝固组织,而且施加的脉冲磁场不与金属熔体直接接触,不会造成熔体任何污染。研究表明,施加强脉冲磁场能够明显细化YL12(2024)铝合金晶粒尺寸^[19-20]。而且,利用强脉冲磁场还能够控制纯铝和奥氏体不锈钢的凝固组织,细化金属和合金晶粒尺寸^[21-22]。尽管施加强脉冲磁场能够细化晶粒,但强脉冲磁场不容易控制且高电压安全性低。因此,这项技术还没有进行大规模工业应用,需要开发出更安全有效的细化金属材料凝固组织的技术。

近年来,本研究团队开发了一种瞬时强峰低压脉冲磁场(LVPMF)细化技术,用于金属和合金凝固过程中组织控制,并研究了其细化效果。结果表明,低压脉冲磁场能够控制镁合金、合金钢和高温合金的凝固组织,显著细化晶粒尺寸^[23-30]。瞬时强峰低压脉冲磁场细化技术,因其无污染、操作安全、设备简单的特点,具有极大的工业应用前景。本研究将瞬时强峰低压脉冲磁场细化技术应用到7050铝合金铸造工艺中,并分析瞬时强峰脉冲磁场条件下7050铝合金铸锭凝固组织的演变及细化机制,以为该技术在铝合金熔铸中的应用提供借鉴。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本研究用材料为7050合金铸锭,其化学成分见表1。

表1 7050合金铸锭的化学成分

Fe	Si	Mn	Cr	Cu	Ti	Ni	Zn	Mg	Zr	Al
				2.0			5.7	1.9	0.08	
0.15	0.12	0.10	0.04	~	0.06	—	~	~	~	余量
				2.6			6.7	2.6	0.15	
0.16	0.12	0.08	0.04	2.15	0.058	—	6.58	2.44	0.10	余量

1.2 试验装置与方法

熔炼采用功率为12 kW的电阻炉,其额定温度为1 200 ℃,炉膛尺寸为 $\phi 200\text{ mm} \times 350\text{ mm}$,坩埚为铁坩埚,坩埚内壁涂抹冶金用氮化硼涂料。

首先将试验所用的合金锭表面打磨,放入保温炉中预热至300 ℃,去除水分。将坩埚加热至760 ℃,然后加入预热过的7050合金锭。合金熔化后采用高纯氩气搅拌除气5 min,然后除渣,保温15 min,浇注前将熔体降温至730 ℃或760 ℃。将三高石墨模具在电阻炉内预热至300 ℃或600 ℃。浇注前将脉冲电源打开,然后将铝熔体通过预热至300 ℃或600 ℃的溜槽浇入石墨模具,脉冲磁场作用时间为20 min。试验装置示意图和脉冲电流波形见图1。脉冲磁场条件下7050合金凝固试验参数见表2和表3。

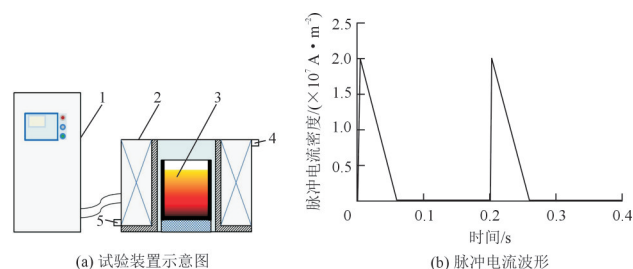


图1 试验装置示意图和脉冲电流波形

Fig.1 Schematic diagram of experimental device and waveform of pulse current

1.脉冲电源 2.脉冲发生器 3.铝合金熔体 4.冷却水出口
5.冷却水进口

表2 不同脉冲频率条件下凝固试验工艺参数

Tab.2 Process parameters of solidification experiments under different pulse frequencies

编号	模具温度/℃	浇注温度/℃	脉冲电压/V	磁场频率/Hz
1	300	730	0	0
2	300	730	300	2.5
3	300	730	300	5
4	300	730	300	10
5	300	730	300	20
6	600	760	0	0
7	600	760	300	2.5
8	600	760	300	5
9	600	760	300	10
10	600	760	300	20

用于显微组织观察分析的金相试样均取自铸锭中部(距离铸锭底部100 mm),切取25 mm厚圆片(见图2

表 3 不同脉冲电压条件下凝固试验工艺参数

Tab.3 Process parameters of solidification experiments under different pulse voltages

试验炉号	脉冲电压/V	凝固参数
11	100	最优凝固工艺、脉冲频率参数
12	200	
13	300	

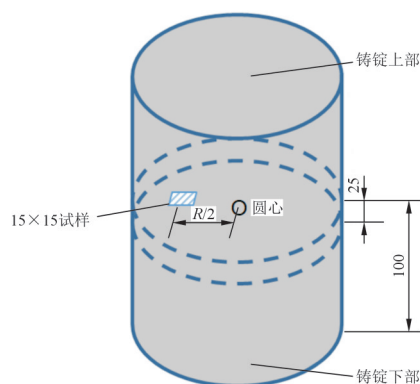


图 2 铸锭取样位置

Fig.2 Sampling position of specimen

中虚线位置)。宏观组织试样采用精密车床进行表面

加工并经磨床打磨,然后用 1 号化学腐蚀剂(5 mL 的 HF+25 mL 的 HNO₃+75 mL 的 HCL)进行表面腐蚀,然后用 ScanMaker i800 plus 高清晰扫描仪扫描宏观组织。微观组织观察金相试样尺寸为 15 mm×15 mm×25 mm,依次使用 200、600、1 200 和 2 000 号砂纸对金相试样进行预磨,细绒布抛光后,用 2 号化学腐蚀剂(5 mL 的 HF+95 mL 的去离子 H₂O)进行表面腐蚀。采用 Axiovert 200MAT 光学显微镜和 JSM-6460 型扫描电镜(SEM)进行显微组织分析。

2 试验结果与讨论

2.1 脉冲频率对凝固组织的影响

图 3 为不同脉冲频率下 7050 铝合金的宏观组织(脉冲电压为 300 V,模具温度为 300 ℃、浇注温度为 730 ℃)。可以看出,未施加脉冲磁场时,7050 合金铸锭内部和边缘组织不均匀,而施加不同频率的脉冲磁场后,铸锭内部和边缘的组织明显更均匀,且晶粒更细小。

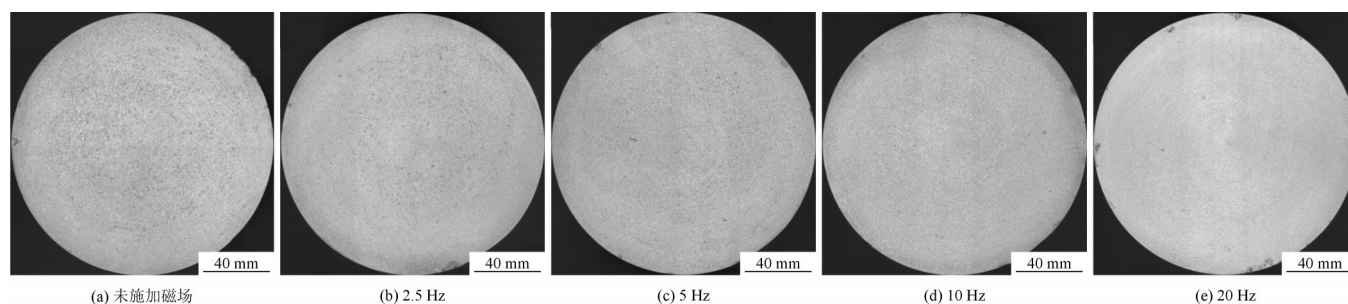


图 3 脉冲频率对 7050 合金宏观组织的影响

Fig.3 Effects of pulse frequencies on macrostructure of 7050 alloy

图 4 为不同频率脉冲磁场作用下获得的 7050 铝合金铸态显微组织(脉冲电压为 300 V 模具温度为 300 ℃,浇注温度为 730 ℃)。图 5 为平均晶粒尺寸统计结果。可以看出,未施加脉冲磁场时,7050 合金晶粒粗大且不均匀,平均晶粒尺寸为 240 μm,且部分晶粒为树枝晶形貌。施加脉冲磁场后,晶粒明显得到细化,随着脉冲频率升高,晶粒尺寸呈先减小再增大趋

势。当脉冲频率为 5 Hz 时,细化效果最为明显,晶粒细小且均匀,平均晶粒尺寸为 106 μm,且均为等轴晶形貌,相较未施加磁场时平均晶粒尺寸减小了 56%。

图 6 为不同脉冲频率下 7050 铝合金中第二相的形貌。图 7 为第二相尺寸(晶界分布第二相长度)统计结果。可以看出,7050 铝合金第二相主要分布在晶界上,未施加脉冲磁场的试样,第二相存在大面积聚集的现

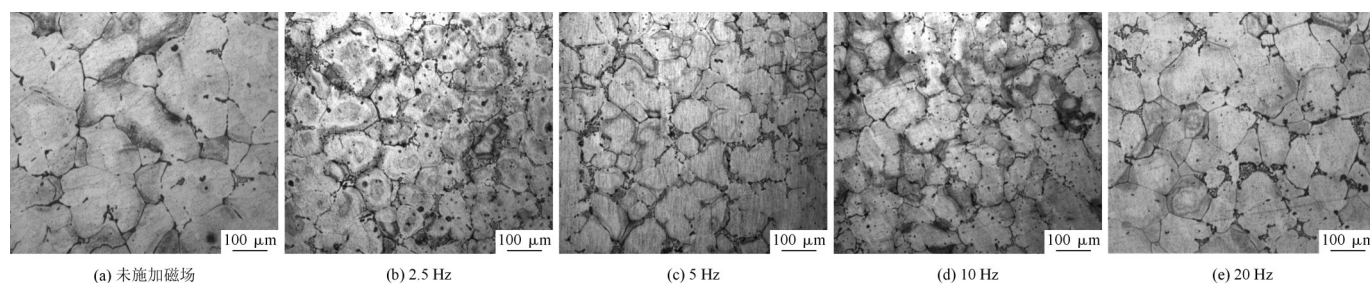


图 4 脉冲频率对 7050 合金微观组织的影响

Fig.4 Effects of pulse frequencies on microstructure of 7050 alloy

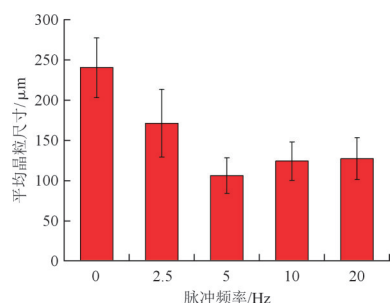


图5 脉冲频率对7050合金晶粒尺寸的影响

Fig.5 Effects of pulse frequencies on grain size of 7050 alloy

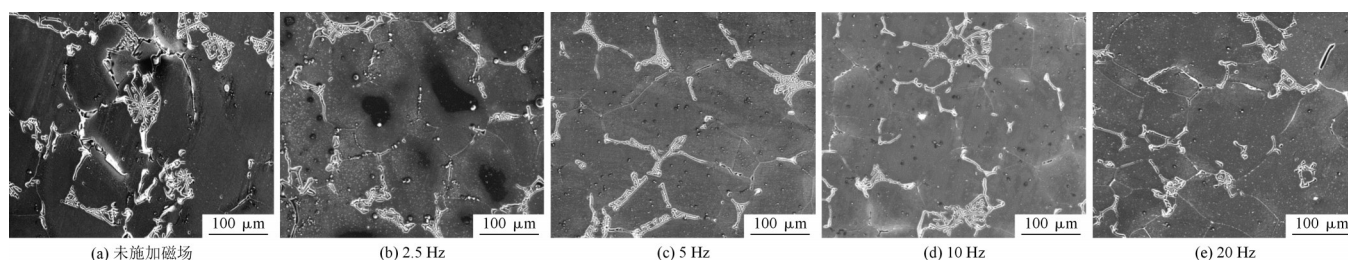


图6 脉冲频率对7050合金中第二相形貌的影响

Fig.6 Effects of pulse frequencies on the second phase in 7050 alloy

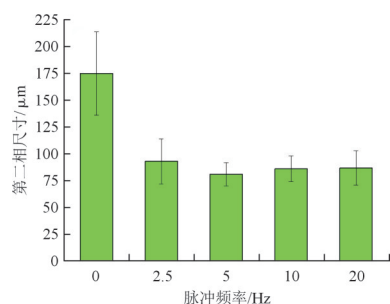


图7 脉冲频率对第二相尺寸的影响

Fig.7 Effects of pulse frequencies on the size of second phase

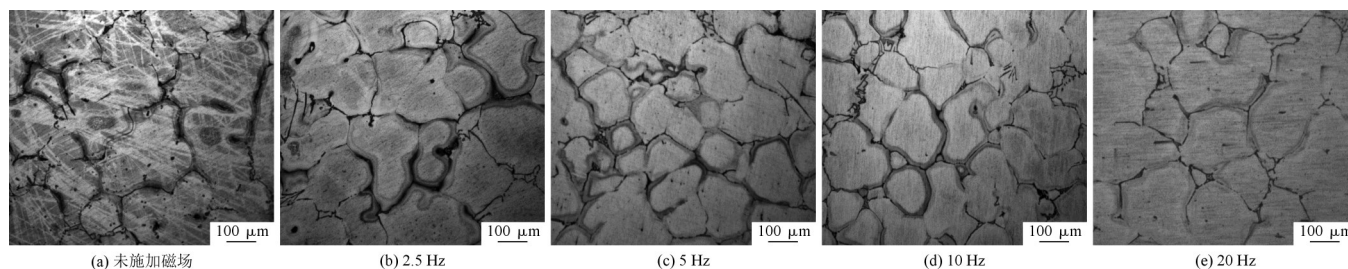


图8 脉冲频率对7050合金微观组织的影响

Fig.8 Effects of pulse frequencies on microstructure of 7050 alloy

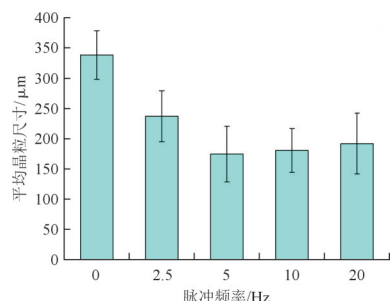


图9 脉冲频率对7050合金晶粒尺寸的影响

Fig.9 Effects of pulse frequencies on grain size of 7050 alloy

象(见图6a),且尺寸大;施加不同频率脉冲磁场后,由于磁场作用,晶粒尺寸变小,且分布更为均匀,晶界增多,晶界上的第二相平均尺寸减小了50%左右,且分布更为均匀。

图8是脉冲电压为300 V,模具温度为600 ℃、浇注温度为760 ℃条件下不同频率脉冲磁场对7050铝合金微观组织的影响,合金晶粒尺寸见图9。可以看出,因为温度梯度减小,铝合金的凝固速率变小,未施加脉冲磁场的7050铝合金晶粒变得更为粗大且不均匀,平均晶粒

尺寸达到338 μm(见图8a和图9),且部分晶粒同样为树枝晶形貌。脉冲磁场处理后晶粒明显得到细化,随着脉冲频率升高,晶粒尺寸呈先减小再增大趋势。当脉冲频率为5 Hz时,细化效果最为明显,晶粒细小且均匀,平均晶粒尺寸为175 μm,呈等轴晶形貌。未施加脉冲磁场时7050铝合金铸态凝固组织平均晶粒尺寸为338 μm,而脉冲频率为2.5、5、10和20 Hz条件下7050铝合金的铸态凝固组织平均晶粒尺寸分别为237、175、181和183 μm。当脉冲频率为5 Hz时,7050铝合

金的铸态凝固组织细化效果最显著,平均晶粒尺寸减小了48%,细化效果与模具温度为300 ℃、浇注温度为730 ℃条件下基本一致,但相同磁场条件下晶粒尺寸均更大,所以选择温度梯度更大的模具温度为300 ℃、浇注温度为730 ℃凝固工艺作为后续验证试验的凝固工艺条件。

2.2 脉冲电压对凝固组织的影响

通过试验可知,模具温度为300 ℃、浇注温度为730 ℃,脉冲频率为5 Hz时,7050铝合金凝固组织细化

效果最显著。因此,开展了模具温度为 300 ℃、浇注温度为 730 ℃,脉冲频率为 5 Hz 时,脉冲电压对合金凝固组织的影响的分析。

图 10 为不同脉冲电压下 7050 铝合金宏观组织照

片。结果显示,未施加脉冲磁场时,7050 合金铸锭内部和边缘组织不均匀(见图 10a),而施加不同脉冲电压的脉冲磁场后,铸锭内部和边缘的组织明显更均匀,且晶粒更细小(见图 10b~图 10d)。

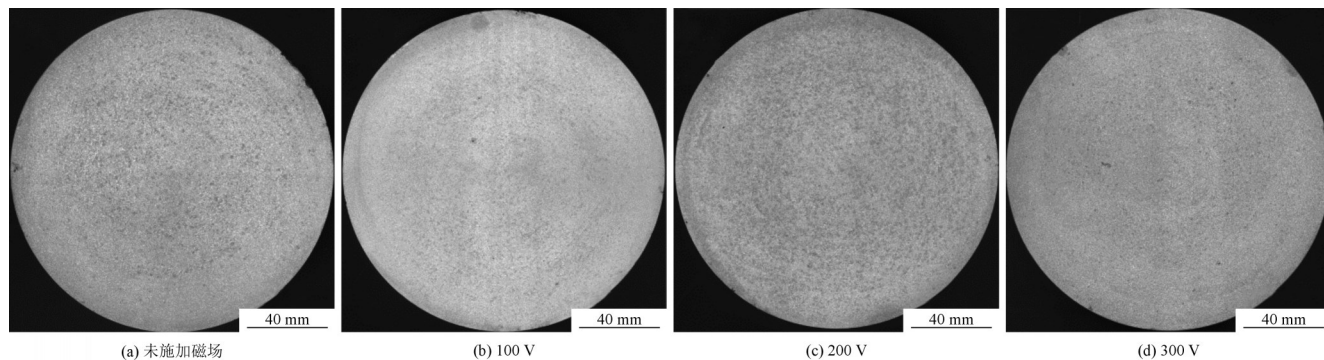


图 10 脉冲电压对 7050 合金宏观组织的影响

Fig.10 Effects of pulse voltage on macrostructure of 7050 alloy

图 11 为不同电压脉冲磁场作用下获得的 7050 铝合金铸态显微组织。图 12 为平均晶粒尺寸统计结果。可以看出,未施加脉冲磁场时,7050 合金凝固组织晶粒粗大且不均匀,平均晶粒尺寸为 240 μm ,

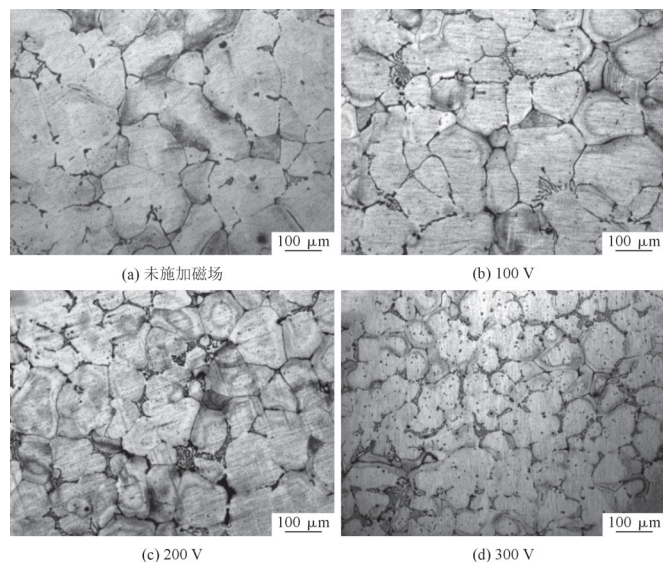


图 11 脉冲电压对 7075 合金微观组织的影响

Fig.11 Effects of pulse voltages on microstructure of 7050 alloy

部分晶粒为树枝晶形貌。不同脉冲电压下 7050 铝合金的铸态凝固组织晶粒明显得到细化,并随着脉冲电压的升高而减小,当脉冲电压为 300 V 时,细化效果最为明显,晶粒细小且均匀,平均晶粒尺寸为 106 μm ,相较于未施加磁场减小了 56%,且均为等轴晶形貌。

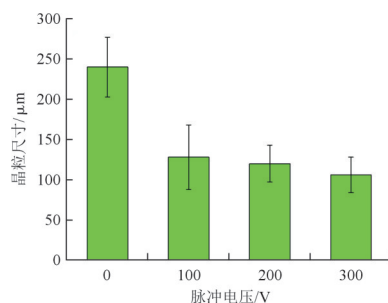


图 12 脉冲电压对 7050 合金晶粒尺寸的影响

Fig.12 Effects of pulse voltage on grain size of 7050 alloy

图 13 为不同脉冲电压下 7050 铝合金中第二相的分布。由图 13a 可知,7050 铝合金中第二相主要分布在晶界上,由于脉冲磁场细化晶粒的作用,晶粒尺寸变小且

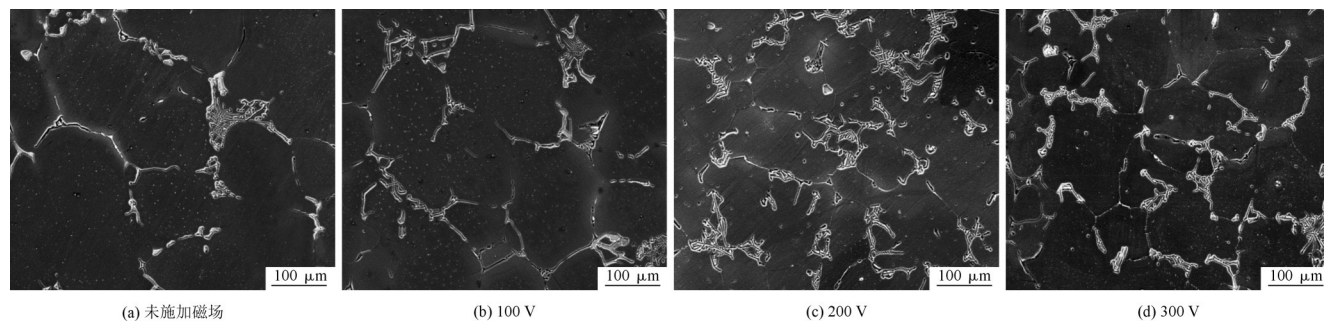


图 13 脉冲电压对 7050 合金中第二相的影响

Fig.13 Effects of pulse voltages on the second phase in 7050 alloy

分布更为均匀(见图13b~图13d),晶界增多,晶界上的第二相尺寸变小且分布更为均匀。图14为合金中第二相尺寸(晶界分布第二相长度)统计结果,可见施加不同电压脉冲磁场后,第二相平均尺寸均减小50%左右,显著细化。

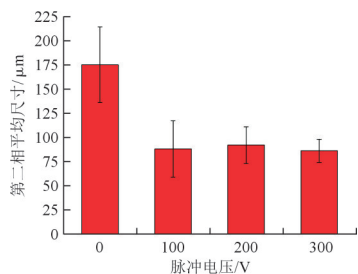


图14 脉冲电压对7050合金中第二相尺寸的影响

Fig.14 Effects of pulse voltages on the size of second phase in 7050 alloy

2.3 优化工艺条件下7050合金凝固组织

图15为优化工艺条件下7050合金凝固组织与未施加脉冲磁场试样组织对比。可以看出,在优化脉冲磁场工艺参数下获得的7050合金凝固组织中,晶粒细化显著,且均为等轴晶组织。而未施加脉冲磁场的7050合金试样组织不均匀,晶粒更粗大。7050铝合金

的铸态凝固组织细化效果最显著,平均晶粒尺寸减小了56%。

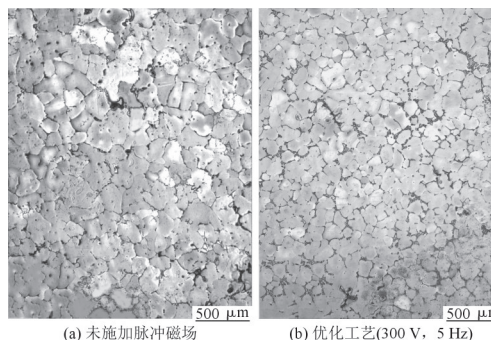


图15 优化工艺和未施加脉冲磁场条件下获得的7050合金的凝固组织

Fig.15 Solidified microstructure of 7050 alloy under optimal process and before pulsed magnetic field

图16为优化工艺和未施加脉冲磁场条件下7050合金凝固组织中缩松气孔分布及统计结果。可以看出,由于试验过程中采用高纯氩气除气,由于时间选择较短,除气不够充分,所以两种条件下都存在缩松和气孔缺陷,但施加脉冲磁场优化工艺参数后,缩松和气孔明显减少和变小。统计结果显示,缩松和气孔平均含量由3.29%减小到1.44%,减少了56.3%。

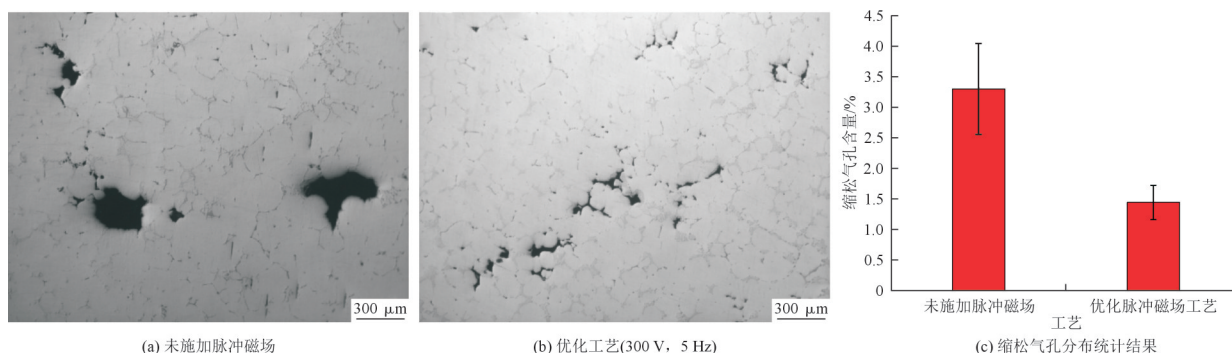


图16 优化工艺和未施加脉冲磁场条件下获得的7050合金凝固组织中缩松气孔分布及统计结果

Fig.16 Distribution and statistics of shrinkages in solidified structure of 7050 alloy under optimal process and before pulsed magnetic field

2.4 分析讨论

由经典形核理论可知^[31],当熔体中形成晶核时,系统的自由能发生了变化,一部分是由于液固相体积自由能差 ΔG_v ,其是形核的热力学驱动力;另一部分是由于形成新的固液界面所需的界面自由能 ΔG_i 。因此,熔体形核所需的能量可表示为:

$$\Delta G = \Delta G_v + \Delta G_i = \Delta G_m V + \sigma_{LS} A \quad (1)$$

式中, ΔG_m 为固、液单位体积的吉布斯自由能差; V 为晶核体积; σ_{LS} 为固-液界面张力; A 为晶核表面积。

所以,形成球形晶核的最大形核功可表示为:

$$\Delta G^* = \frac{16}{3} \pi \left(\frac{\sigma_{LS}^2}{\Delta G_m} \right) = \frac{1}{3} \Delta G_i \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,生成球形临界晶核所需表面能量的2/3可以由固-液相之间体积自由能差供给,剩余1/3所需能量需要其他能量来补充。因此,在铝合金凝固过程中施加瞬时强峰低压脉冲磁场,相当于在熔体凝固过程中注入了新的能量——磁能,能够为临界晶核的形成提供一定的能量。因此,在铝合金凝固过程中施加瞬时强峰低压脉冲磁场能够有效提高合金的形核速率,这是晶粒细化的必要条件。

另外,在凝固过程中施加脉冲磁场后,熔体中会产生脉冲涡电流 I_e ,脉冲涡电流 I_e 和外加脉冲磁场交互作用会产生电磁力。励磁线圈中脉冲电流处于上升沿阶段时,电磁力方向为由熔体心部指向坩埚内壁;当脉冲

电流处于下降沿阶段时,熔体中的电磁力则指向熔体心部。这种周期性电磁力的作用使熔体周期性地产生箍缩效应,而由于坩埚底部对合金熔体的反作用,使向底部运动的合金熔体折回而向上运动,从而使熔体产生沿垂直方向的强制对流,坩埚内壁形成的晶核加快脱落并快速向坩埚中心部位熔体中扩散,使坩埚中心部位熔体中形成了大量的晶核,从而提高了形核率^[32]。

瞬时强峰低压脉冲磁场除对形核阶段有影响外,对枝晶生长也将产生影响。根据经典电磁场理论,在脉冲磁场作用下,熔体中会产生焦耳热效应,在枝晶生长过程中大量的焦耳热将集中在枝晶尖端,枝晶尖端细小,焦耳热很容易使得细小的枝晶尖端熔化,导致枝晶尖端的曲率半径增加。依据界面稳定理论可知,枝晶尖端半径的平方与枝晶生长的速度成反比关系,因此,在凝固过程中施加低压脉冲磁场,熔体中的焦耳热会导致枝晶尖端的曲率半径增加,枝晶生长速度降低,从而抑制枝晶生长,球化枝晶^[33-35]。

图 5 和图 9 表明,随脉冲频率增加,试样凝固组织呈现先减小后增加的趋势,而由图 12 可见,随着脉冲电压增加,铝合金凝固组织的细化效果愈加显著。根据有关研究^[23,36-37]可知,随着脉冲频率增加,励磁线圈在铝合金熔体区域产生的磁场强度不变,由此产生的电磁力大小也不会发生变化。但随着脉冲频率增加,熔体中产生感生电流和电磁力的频率也随之增加,因此,瞬时强峰脉冲磁场产生的焦耳热和熔体流动会随着频率的增加而增加或增强。与未施加脉冲磁场的试样相比较,随着脉冲频率增加,电磁力的频率增大引发了较剧烈的熔体震动及对流,更多的晶核从石墨型壁上脱落并均匀分散到熔体中。另外,随着脉冲频率增加,焦耳热及熔体流动的增加或增强能够在一定程度上延迟型壁凝壳的形成,为晶核的游离提供了更多的时间。由于熔体中存在大量的晶核,最终在凝固试样中产生了更为细小的等轴晶组织。但当脉冲频率过高时,虽然脉冲磁场对促进型壁异质晶核的游离仍然是有利的,但同时,也可能导致脉冲磁场引起的焦耳热过大。过高脉冲频率条件下,过于强烈的焦耳热以及焦耳热的集肤效应使得脱落的晶核有可能在型壁附近的熔体中发生溶解,因而不利于晶核的存活,最终无法有效增加熔体中的晶核数目。因此,过高的频率会弱化脉冲磁场的细化作用。

另外,随着脉冲电压增加,励磁线圈在铝合金熔体区域产生的磁场强度增加,由此产生的电磁力、熔体流动和焦耳热增强或增大。因此,随着脉冲电压增加,石

墨铸型壁上异质晶核的游离被强化,最终产生了更为细小的等轴晶组织。

3 结 论

(1)模具温度为 300℃、浇注温度为 730℃和模具温度为 600℃、浇注温度为 760℃条件下,施加不同频率脉冲磁场,7050 铝合金的晶粒均得到显著细化,而且随着脉冲频率升高,晶粒尺寸呈先减小再增大趋势;当脉冲频率为 5 Hz 时,7050 铝合金凝固组织细化效果最显著,前者平均晶粒尺寸减小了 56%,后者平均晶粒尺寸减小了 48%。

(2)7050 铝合金脉冲磁场细晶铸造优化工艺条件:模具温度为 300℃,浇注温度为 730℃,脉冲电压为 300 V,脉冲频率为 5 Hz。

(3)优化工艺条件下 7050 铝合金铸态凝固组织细化效果显著,平均晶粒尺寸为 106 μm,相比未施加脉冲磁场的试样,平均晶粒尺寸减小了 56%;凝固组织中缩松和气孔明显变少,缩松和气孔平均含量由 3.29% 减小到 1.44%,减小了 56.3%。

参 考 文 献

- [1] GUAN R G, TIE D. A review on grain refinement of aluminum alloys: Progresses, challenges and prospects[J]. Acta Metallurgica Sinica (Engl. Lett.), 2017, 30(5): 409-432.
- [2] 吴俊子,姜佳鑫,贾锦玉,等. 铝及铝合金晶粒细化剂的研究进展[J]. 稀土信息, 2016, 393(12): 32-35.
- [3] LIU G Y, REN Y S, MA W H, et al. Development process and future trends of chemical refining agents' influence on grain refinement in aluminum alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 242-257.
- [4] ZHU C, ZHAO Z H, ZHU Q F, et al. Hot-top direct chill casting assisted by a twin-cooling field: Improving the ingot quality of a large-size 2024 Al alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 112: 114-122.
- [5] ZHU C, ZHAO Z H, ZHU Q F, et al. Structures and macrosegregation of a 2024 aluminum alloy fabricated by direct chill casting with double cooling field[J]. China Foundry, 2022, 19(1): 1-8.
- [6] LIANG G F, ALI Y, YOU G Q, et al. Effect of cooling rate on grain refinement of cast aluminium alloys[J]. Materialia, 2018, 3: 113-121.
- [7] ZARE M A, TAGHIABADI R, GHONCHEH M H. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of AA5056 Al-Mg alloy[J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 16: 1 533-1 543.
- [8] 周子为,周涛,朱博翔,等. 不同冷速下 7050 铝合金的晶粒细化研究[J]. 热处理技术与装备, 2024, 45(1): 1-4.
- [9] 李丹丹,樊勇,刘强,等. 晶粒细化剂对 7050 铝合金铸锭晶粒组织的影响[J]. 铝加工, 2024(1): 19-21.
- [10] 晁代义,黄同城,赫微,等. Al-Ti-B 细化剂对半连续铸造 7050 铝合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1 256-1 259.

- [11] 文东辉, 杨孟刚, 张虎, 等. AlTiC 晶粒细化剂对 6063 铝合金铸态组织性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2007(2): 14-16.
- [12] 柳延辉, 刘相法, 李廷斌, 等. Al-Ti-C 中间合金对 Mg-Al 合金的晶粒细化作用[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 622-625.
- [13] 王正军, 司乃潮. Al-Ti-B-RE 中间合金第二相的形态及分布对工业纯铝细化效果的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(6): 1 494-1 498.
- [14] WANG X J, XU C, MUHAMMAD A, et al. Effects of Al-Ti-B-RE grain refiner on microstructure and mechanical properties of Al-7.0Si-0.55Mg alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 2 244-2 250.
- [15] NAKADA M, SHIOHARA Y, FLEMINGS M C. Modification of solidification structures by pulse electric discharging[J]. ISIJ International, 1990, 30(1): 27-33.
- [16] BARNAK J P, SPRECHER A F, CONRAD H. Colony (grain) size reduction in eutectic Pb-Sn castings by electropulsing [J]. Scripta Metallurgica Materialia, 1995, 32(6): 879-884.
- [17] CHOI J S, LA M, KIM D F, et al. Effect of electric current on the microstructural refinement of pure aluminum[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 818-830.
- [18] LI J, MA J H, GAO Y L, et al. Research on solidification structure refinement of pure aluminum by electric current pulse with parallel electrodes[J]. Materials Science and Engineering, 2008, A490(1): 452-460.
- [19] ZI B T, BA Q X, CUI J Z, et al. Study on axial changes of as-cast structures of Al-alloy sample treated by the novel SPMF technique [J]. Scripta Materialia, 2000, 43: 377-380.
- [20] 訾炳涛, 巴启先, 崔建忠, 等. 强脉冲电磁场对金属凝固组织影响的研究[J]. 物理学报, 2000, 49(5): 1 000-1 014.
- [21] GAO Y L, LI Q S, GONG Y Y, et al. Comparative study on structural transformation of low-melting pure Al and high-melting stainless steel under external pulsed magnetic field[J]. Material Letter, 2007, 61: 4 011-4 014.
- [22] LI Q S, SONG C J, LI H B, et al. Effect of pulsed magnetic field on microstructure of 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel[J]. Material Science and Engineering, 2007, A466: 101-105.
- [23] WANG B, YANG Y S, MA X P, et al. Simulation of electromagnetic-flow fields in Mg melt under pulsed magnetic field [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(2): 283-288.
- [24] LUO T J, JI H M, CUI J, et al. As-cast structure and tensile properties of AZ80 magnesium alloy DC cast with low-voltage pulsed magnetic field [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25: 2 165-2 171.
- [25] JI H M, LUO T J, WANG C, et al. Direct chill casting of magnesium alloy under pulsed magnetic field [J]. Materials Science and Technology, 2017, A33(1): 33-39.
- [26] FENG X H, LI Y J, LUO T J, et al. Influence of temperature conditions on grain refinement of pure Cu solidified with low-voltage pulsed magnetic field [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2017, 30: 1-5.
- [27] LI Y J, TENG Y F, YANG Y S. Refinement mechanism of low voltage pulsed magnetic field on solidification structure of silicon steel[J]. Metal and Materials International, 2014, 20: 527-530.
- [28] MA X P, LI Y J, YANG Y S. Grain refinement effect of pulsed magnetic field on as-cast superalloy K417[J]. Journal of Materials Research, 2009, 24: 2 670-2 676.
- [29] MA X P, LI Y J, YANG Y S. The origin of nuclei and the refinement mechanism for solidified superalloy IN718 under pulsed magnetic field[J]. Journal of Materials Research, 2009, 24: 3 174-3 181.
- [30] LI Y J, MA X P, YANG Y S. Grain refinement of as-cast superalloy IN718 under action of low voltage pulsed magnetic field [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(6): 1 277-1 282.
- [31] 胡汉起. 金属凝固原理(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [32] 杨院生, 付俊伟, 罗天骄, 等. 镁合金低压脉冲磁场晶粒细化[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2 639-2 649.
- [33] WANG B, YANG Y S, SUN M L. Microstructure refinement of AZ31 alloy solidified with pulsed magnetic field [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(10): 1 685-1 690.
- [34] WANG B, YANG Y S, ZHOU J X, et al. Structure refinement of pure Mg under pulsed magnetic field [J]. Materials Science and Technology, 2011, A27: 176-179.
- [35] FU J W, YANG Y S. Formation of the solidified microstructure of Mg-Al-Zn alloy under a low-voltage pulsed magnetic field [J]. Journal of Materials Research, 2011, 26: 1 688-1 695.
- [36] MA X P, YANG Y S, WANG B. Effect of pulsed magnetic field on superalloy melt[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52: 5 285-5 292.
- [37] 马晓平. 高温合金的脉冲磁场与热控制一体化细晶铸造的研究[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2010.

(编辑: 栗万仲)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵, 文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家最新研究成果)



特种铸造及有色合金杂志
(文章动态时刻关注)