

交变磁场-压力协同场对真空差压铸造 ZL114A 合金枝晶生长及致密度的影响

李 勇¹ 严青松¹ 芦 刚¹ 陈燕飞² 陈义斯¹ 朱伟明¹ 刘 栋¹

(1.南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室;2.江西洪都国际机电有限责任公司)

摘 要 为强化复杂薄壁铝合金凝固末期补缩,获得高致密 ZL114A 铝合金铸件,在真空差压铸造机上构建磁场发生装置。系统研究了磁感应强度和分级加压压差对不同轴径 ZL114A 试样枝晶形态、取向、二次枝晶间距(SDAS)、致密度的影响,揭示了交变磁场-压力协同场下合金的凝固行为,建立了交变磁场-压力协同场下熔体对流挤渗方程。结果表明,协同场下的熔体质点受洛伦兹力和压力影响持续运动,并伴随初生枝晶碎断、浮游、二次生长及变形,故凝固组织趋于等轴化,粗大树枝晶转变为细小蔷薇晶。此外,XRD 图谱显示主晶面(111)衍射峰强度随磁感应强度增加而增加,证实交变磁场促进低阶晶面枝晶择优生长。强磁场下金属原子运动剧烈,引起熔体过热影响凝固进而导致组织粗化。因此,随着磁感应强度增加,合金 SDAS(二次枝晶臂间距)先减小后增大,致密度先增大后减小,理想磁场强度为 24 mT,此时提高分级加压压差有利于枝晶细化和凝固补缩。

关键词 真空差压铸造;铝合金;交变磁场;压力场

中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Alternating Magnetic Field and Pressure Co-field on Dendrite Growth and Density in Vacuum Differential Pressure Casting ZL114A Alloy

Li Yong¹, Yan Qingsong¹, Lu Gang¹, Chen Yanfei², Chen Yisi¹, Zhu Weiming¹, Liu Dong¹

(1.National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University; 2.Jiangxi Hongdu International Mechanical & Electrical Co., Ltd.)

Abstract: In order to strengthen the feeding of complex thin-wall aluminum alloy at the end of solidification and obtain high-density ZL114A aluminum alloy castings, a magnetic field generator was constructed on a vacuum differential pressure casting machine. The effects of magnetic field intensity and graded pressure difference on dendrite morphology, orientation, secondary dendrite spacing(SDAS) and density of ZL114A samples with different axial diameters were systematically analyzed. The solidification behavior of the alloy under alternating magnetic field-pressure cooperative field was revealed, and the convection-extrusion infiltration equation of melt under alternating magnetic field-pressure cooperative field was established. The results indicate that under the cooperative field, melt particles continue to move under the influence of Lorentz force and pressure, accompanied with primary dendrite fragmentation, plankton, secondary growth and deformation, so that the solidification structure tends to be equiaxialized and the coarse dendrite turns into fine rose-crystal. In addition, the XRD pattern shows that the diffraction peak intensity of main crystal plane(111) is increased with the increase of magnetic field intensity, which confirms that alternating magnetic field can promote the preferential growth of dendrites on low-order crystal plane. Under the strong magnetic field, the metal atoms move violently, which causes the melt to overheat and affect solidification, leading to microstructure coarsening. Therefore, with the increase of magnetic field strength, the SDAS of alloy is decreased firstly and then increased, and the induced density is increased firstly and then decreased. The optimal treatment strength is 24 mT, where the increase of the fractional pressure difference is beneficial to dendrite refinement and solidification feeding.

Key Words: Vacuum Counter Pressure Casting, Aluminum Alloy, Alternating Magnetic Field, Pressure Field

收稿日期:2022-08-29;**修改稿收到日期:**2022-10-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51861027);南昌航空大学博士启动基金资助项目(EA202203058)
第一作者简介:李勇,男,1998 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:2322916656@qq.com
通信作者:严青松,男,1973 年出生,教授,南昌(330063),E-mail: yanqs1973@nchu.edu.cn
引用格式:李勇,严青松,芦刚,等. 交变磁场-压力协同场对真空差压铸造 ZL114A 合金枝晶生长及致密度的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(6):808-814.
LI Y, YAN Q S, LU G, et al. Effects of alternating magnetic field and pressure Co-field on dendrite growth and density in vacuum differential pressure casting ZL114A alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):808-814.

近年来,国防军工技术的发展对零部件轻量化、薄壁化需求日益迫切^[1]。Al-Si 系合金因其铸造性能优异、比强度高、耐蚀性好等特点^[2-3],广泛应用于航空航天零部件、船舶重工、汽车制造等行业。ZL114A 合金流动性好,铸造性能优良,但是在常规铸造工艺条件下会出现凝固组织粗大、元素偏析等现象,同时粗大的组织阻碍了熔体进一步的凝固补缩,产生大量的缩松、缩孔,严重影响铝合金铸件的性能^[4-5]。

真空差压铸造基于低压充型、高压结晶的工艺原理,具有良好的充型和凝固补缩能力,是生产高品质复杂薄壁铸件的有效方法^[6]。气体压差建立熔体运动驱动力,驱动金属液在晶间的流动,促进凝固补缩效率,同时能够引起部分枝晶塑性弯曲变形甚至折断,跟随金属液流动,形成新的二次晶核质点,从而获得细化的晶粒组织^[7-8]。为了进一步提高真空差压铸造反重力成形大型复杂薄壁铸件的能力,余欢等^[9]提出真空差压铸造分级加压技术,可以在铝合金铸件成形凝固过程的中后期为金属液在晶间的流动补缩提供更为强劲的挤滤渗流作用,迫使铸件在更高的压力下凝固,枝晶在压力下显微塑性变形效果更显著,晶间补缩通道越畅通,金属液在晶间的补缩速度加快,补缩效果进一步增强。然而,受限于压力容器和铸型承压能力以及高压情况下的压力稳态控制,对于形状极度复杂、壁厚严重不均的构件,采用真空差压铸造工艺也难以成形晶粒细小、组织致密的高品质铝合金铸件。外加电磁场所产生的强制对流会改变熔体部分的流动场、温度场、浓度场、压力场以及金属液的冷却曲线,改变铝合金熔体凝固行为,有利于细化晶粒,改善合金的组织结构^[10-16]。因此,为了改善铝合金的凝固组织,常采用外加电磁场的手段。ZOU J 等^[17]将交变磁场应用到 Cu-14Fe 合金的凝固过程中,发现采用适当的交变磁场操作温度可以有效细化晶粒尺寸,减少铸锭内的气孔缺陷。LI C 等^[18]发现在纯高

静电磁场和低交流电流同时作用于铝凝固过程中时,静电梯度磁场的应用可以改变细化晶粒的分布。HAGHAVE R 等^[19]采用静态磁场和脉冲磁场处理 7075 合金,增强熔体对流,导致熔体中产生更大的洛伦兹力,合金晶粒细化程度显著提高。SU X 等^[20]将静磁场应用于 7075 合金双辊连铸过程中,增加了熔体对流过程中溶质的混合能力,从而抑制熔体的运动,降低了熔体的过冷度,有效提高了形核速率,细化了晶粒组织。然而,对于交变磁场-分级加压协同场下 ZL114A 合金枝晶形貌及致密化研究报道较少。

本研究基于真空差压铸造分级加压反重力成形技术,构建磁场发生装置结合电磁冶金技术优化 ZL114A 铝合金成形工艺。为获得枝晶组织更加致密、均匀细小的铸件,系统研究了交变磁场磁感应强度、分级加压压差对 ZL114A 合金阶梯轴铸件二次枝晶间距(SDAS)和致密度的影响,揭示了交变磁场-压力协同场下 ZL114A 合金的凝固行为,为协同物理场下的真空差压铸造技术成形复杂优质铝合金铸件提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 ZL114A 铝合金,其化学成分见表 1。

表 1 ZL114A 合金的主要化学成分

Tab.1 The main chemical composition of ZL114A alloy %							
w_B							
Si	Mg	Ti	Be	Fe	Zn	Cu	Al
6.5~7.5	0.4~0.7	0.04~0.2	0.04~0.07	<0.2	<0.1	<0.01	余量

图 1 为自行设计的 VCPC-I 型智能控制真空差压反重力铸造设备,并在真空差压铸造中隔板上安装交变电磁发生装置,磁场作用原理示意图见图 1b。试验时将铸型安装在中隔板上,铸型浇口紧对着升液管,同时在铸型的外侧安装了圆形环绕电磁线圈,电磁线圈匝数为 300,控制装置为 TDGC2J 交流变压器。试验过程

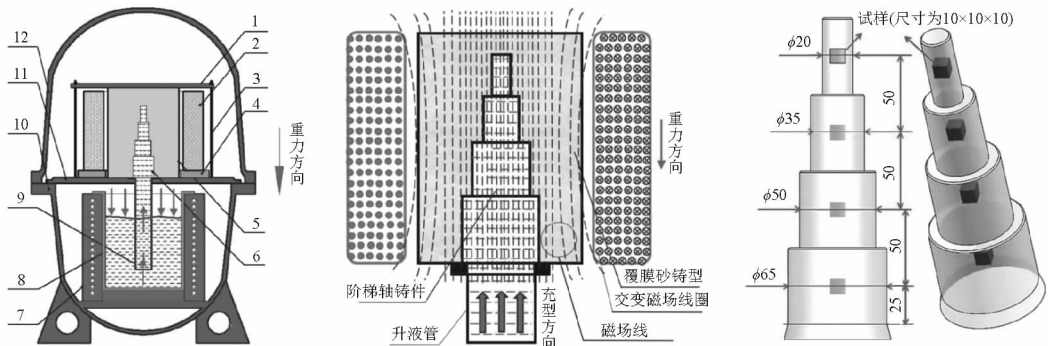


图 1 VCPC-I 型真空差压铸造设备示意图、协同原理及取样位置

Fig.1 Schematic diagram of VCPC-I vacuum differential pressure casting equipment and synergistic mechanism as well as sampling position

1.压板 2.电磁线圈 3.长螺栓 4.隔热垫块 5.铸型 6.铸件 7.电阻炉 8.坩埚 9.升液管 10.下压力罐体 11.中隔板 12.上压力罐体

中,完成铸型安装以及上下罐体锁紧后,抽真空、开启交变电磁场、升液、充型、一级加压、一级保压、二级加压、二级保压、关闭交变电磁场、卸压和开罐。交变磁场-压力协同场下真空差压分级加压铸造理想工艺曲线见图 2,磁场处理作用于整个充型凝固过程。

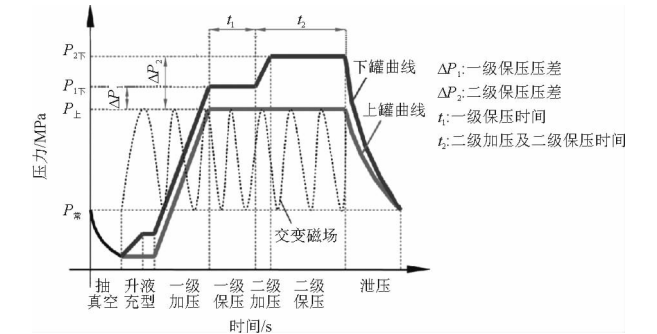


图 2 真空差压分级加压铸造理想工艺曲线
Fig.2 Ideal process curves of vacuum counter pressure graded pressure casting

铸型采用砂型,材质为覆膜砂,浇注温度为 720 ℃。试验时设置 6 种不同的磁感应强度,分别为 0、8、16、24、32 和 40 mT,先在分级加压压差为 135 kPa 时制备不同磁感应强度下的合金试样,真空差压铸造工艺参数见表 2。设置 5 种不同的分级加压压差,分别为 60、85、110、135 和 160 kPa,在理想磁感应强度下确定最佳分级加压压差,工艺参数见表 3。

表 2 不同磁感应强度试验工艺参数

Tab.2 Experimental process parameters of different magnetic intensities						
分级加 压压差/ kPa	交变磁感 应强度/ mT	一级加压 凝固压 力/kPa	一级加 压时间/ s	二级加压 凝固压 力/kPa	分级加 压时间/ s	充型 压差/ kPa
135	0					
	8					
	16	250	15	350	225	35
	24					
	32					
	40					

表 3 不同分级加压压差试验工艺参数

Tab.3 Experimental process parameters of different graded pressure difference						
交变磁 感强度/ mT	分级加 压压差/ kPa	一级加压 凝固压 力/kPa	一级加 压时间/ s	二级加压 凝固压 力/kPa	分级加 压时间/ s	充型 压差/ kPa
24	60			275		
	85			300		
	110	250	15	325	225	35
	135			350		
	160			375		

阶梯轴铸件各个轴段试样的截取见图 1c,并测量二次枝晶间距的大小,观察枝晶形貌,分别将轴径为 φ20、φ35、φ50 和 φ65 mm 部位中心切割试样,采用

XQ-2B 型金相镶嵌机镶嵌,然后使用砂纸、抛光液对试样进行粗磨、精磨、抛光处理,最后再将抛光好的试样进行腐蚀处理,腐蚀液采用质量分数为 0.5% 的 HF 溶液,腐蚀时间为 15 s 左右。利用 FL700 型金相显微镜对腐蚀后的试样进行组织观察,并采用截线法测量 ZL11A 合金的二次枝晶间距。致密度测试采用阿基米德排水法。采用 ICP-MS 对试样进行成分测试,结果见表 4。

表 4 ZL114A 合金实测化学成分

Tab.4 Measured chemical composition of ZL114A alloy %							
w _B							
Si	Mg	Ti	Be	Fe	Zn	Cu	Al
6.95	0.55	0.12	—	0.17	—	—	余量

2 试验结果分析

2.1 交变磁场-压力协同场下 ZL114A 枝晶形貌及取向

图 3 为分级加压压差为 135 kPa 时不同磁感应强度下 ZL114A 合金金相组织。从图 3a 可以看出,不施加交变磁场时,合金组织呈典型真空差压铸造 Al-Si 合金形貌,枝晶在压力下发生一定塑性变形,但树枝晶生

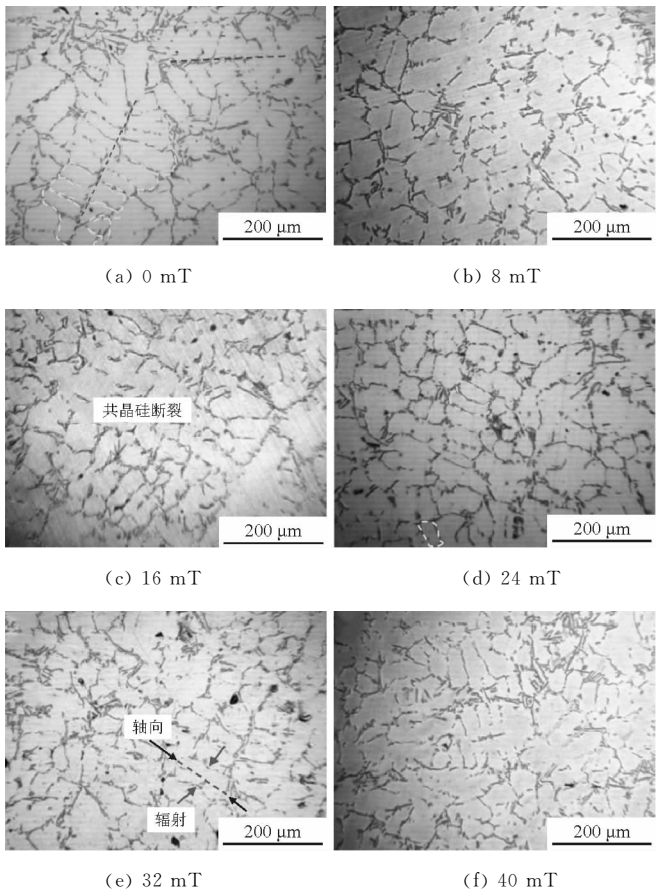


图 3 交变磁场-压力协同场下不同磁感应强度 ZL114A 合金金相组织

Fig.3 Metallographic structure of ZL114A alloy treated by different magnetic intensities under alternating magnetic-pressure synergistic field

长充分,一次枝晶尺寸较大,枝晶臂粗大。从图 3b~图 3f 可知,磁场作用下枝晶形貌显著改变,随着磁感应强度增加,基体组织细化甚至出现等轴晶。磁感应强度为 8 mT 时,合金中 Si 相分布散乱,未见整齐排列的枝晶组织。研究表明,熔体受到磁场作用时,金属原子在洛伦兹力下持续运动,引起熔体局部起伏,并在整体上出现对流传质。剧烈的熔体运动,抑制了枝晶过度生长。因此,在磁感应强度达 24 mT 时,合金二次枝晶显著细化,等轴晶数量增加,见图 3d。然而,磁场内熔体原子的运动会引起磁场能量不断以热能形式耗散,进而导致金属液过热影响铸件凝固。由图 3f 可见,高磁感应强度下,ZL114A 基体内树枝晶轴向长度较小,但出现明显粗化倾向。

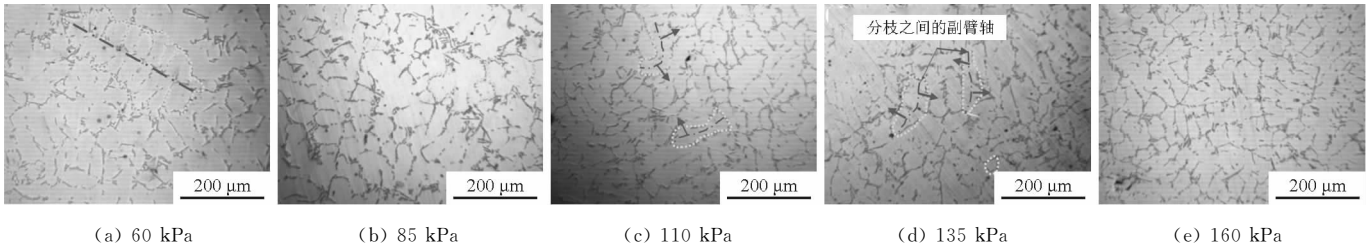


图 4 交变磁场-压力协同场下不同分级加压压差下 ZL114A 合金枝晶形貌

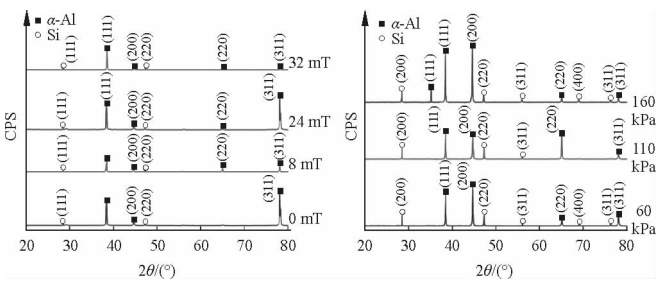
Fig.4 Dendrite growth morphologies of ZL114A alloy under different graded pressure difference under alternating magnetic-pressure synergistic field

较均匀的等轴晶。

图 5 为协同场下 ZL114A 合金 X 射线衍射图谱。从图 5a 中可以看出,施加交变磁场后,ZL114A 合金 X 射线衍射峰的强弱发生了显著变化。与未施加交变磁场处理时的合金 X 射线衍射图谱相比,当磁感应强度为 8 mT 时, α -Al 的主要生长方向发生了变化,最强峰与次强峰的衍射强度发生了交换,原本主要的(311)生长方向被抑制,(111)晶面方向成为施加交变磁场后的主要生长取向;而当磁感应强度达到 24 mT 时,主晶面(111)衍射峰强度随磁感应强度增加而增加,由此可见交变磁场促进低阶晶面枝晶择优生长,最终在高磁场强度下出现蔷薇状枝晶形貌。钟华^[21]在研究强静磁场对 α -Al 枝晶生长过程调控机理的研究中发现,强静磁场改变了 Al-4.5Cu 合金定向凝固过程中 α -Al 柱状枝晶的形貌。施加磁场后,择优枝晶淘汰非择优枝晶的过程减缓,在强磁场下,非择优枝晶可淘汰择优枝晶。类似地,从图 5b 可以看出,ZL114A 合金 X 射线衍射峰的强弱发生了显著的变化。 α -Al 相的主要生长晶面有(111)、(200)以及(220),分级加压压差对 α -Al 相的主要生长晶面影响较小,对于 α -Al 相生长晶面(220),当压差为 110 kPa 时, α -Al 相在保持原有主要生长晶面(111)与(200)的同时,出现(220)择优生长晶面。随着分级加压压差增加到 160 kPa,共晶 Si 组织在(331)晶

图 4 是磁感应强度为 24 mT,不同分级加压压差下 ZL114A 合金的显微组织。可以看出,随着分级加压压差增加,ZL114A 合金基体中粗大的树枝晶细化明显。首先,初生的 α -Al 相由最初的粗大的长棒状发达树枝晶,转变为细长的树枝晶以及部分蔷薇状晶粒;随着分级加压压差增大,铝合金凝固组织中发达、粗大的 α -Al 树枝晶逐渐减少且部分二次枝晶臂在其轴线垂直方向上发生了一定程度的显微塑性形变,见图 4c 和图 4d。当分级加压压差增大至 135 kPa 时, α -Al 树枝晶大幅度地转变为细小的等轴晶,见图 4d。随着分级加压压差进一步增大至 160 kPa,ZL114A 铝合金试样的凝固组织内部粗大的、发达的长棒状二次树枝晶组织显著减少甚至消失,铝合金凝固组织大幅度球化,形成分布比

面的生长取向被抑制,而在(111)晶面和(220)晶面具有一定的择优生长趋势。



(a) 不同磁感应强度 (b) 不同分级加压压差

图 5 协同场下 ZL114A 合金 X 射线衍射图谱

Fig.5 X-ray diffraction pattern of ZL114A alloy under synergistic field

2.2 对 ZL114A 合金的二次枝晶间距的影响

分级加压压差为 135 kPa 时不同磁感应强度对 ZL114A 合金 SDAS 的影响见图 6。可见随着磁感应强度变化,合金 SDAS 有一定变化。从纵向来看,复合场下,轴径为 $\phi 20$ mm 试样的 SDAS 最小,并随着磁感应强度增加,其 SDAS 略微增大;当磁感应强度从 0 增加到 24 mT,轴径 $\phi 35$ mm 合金试样的 SDAS 逐步从 32.2 μ m 降低至 28.3 μ m,然后随着磁感应强度进一步增强,合金试样的 SDAS 又开始逐渐增大;而轴径为 $\phi 50$ mm 试样 SDAS 变化趋势和 $\phi 35$ mm 轴径试样基本一致,

在磁感应强度为 24 mT 时,合金 SDAS 达到最小,为 32.3 μm ;对于轴径为 $\phi 65\text{ mm}$ 试样,其 SDAS 随着磁感应强度的增加先减小后增大再减小,SDAS 在 24 mT 时最小,为 38.3 μm 。

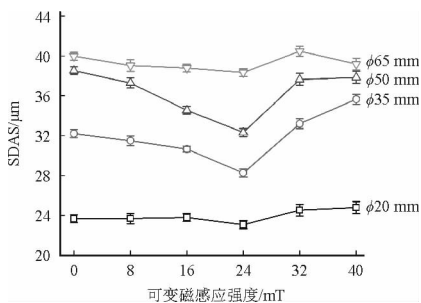


图 6 磁感应强度对 ZL114A 合金试样二次枝晶间距的影响
Fig.6 Effect of magnetic field intensity on secondary dendrite spacing of ZL114A alloy

磁感应强度为 24 mT 时不同分级加压压差对 ZL114A 合金 SDAS 的影响见图 7。总体而言,随着分级加压压差增大,ZL114A 合金的 SDAS 逐渐减小。对于轴径为 $\phi 20\text{ mm}$ 的试样,SDAS 先增大而后又逐步减小,其 SDAS 从分级加压压差为 85 kPa 时的 45.3 μm 细化到 160 kPa 时的 22.9 μm ,减小了 22.5 μm 。对于轴径为 $\phi 35\text{ mm}$ 的试样,其 SDAS 随着压差的增大呈线性递减趋势,其 SDAS 从 60 kPa 时 61.1 μm 细化到 160 kPa 时 25.5 μm ,细化效果显著。对于轴径为 $\phi 50\text{ mm}$ 和 $\phi 65\text{ mm}$ 试样,SDAS 的变化基本保持同步,分级加压压差小于 110 kPa 时,试样的枝晶间距先减小而后变大,当分级加压压差超过 110 kPa 之后,ZL114A 合金试样的 SDAS 明显减小,在分级加压压差为 135 kPa 时 $\phi 65\text{ mm}$ 的试样 SDAS 最小,为 38.3 μm 。由此可见,尽管已经施加磁场,凝固压差对于 ZL114A 合金的 SDAS 影响相较于磁场更为显著。

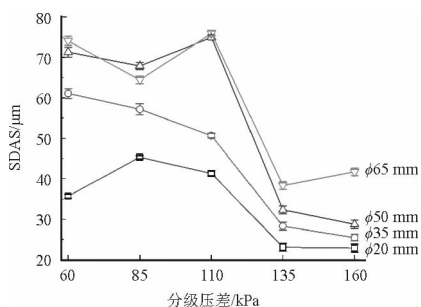


图 7 分级加压压差对 ZL114A 合金试样二次枝晶间距的影响

Fig.7 Effect of graded pressure difference on secondary dendrite arm spacing of ZL114A alloy

2.3 对 ZL114A 合金致密度的影响

Si 的引入使 Al-Si 系合金具有优异的流动性,从而

获得良好的充型能力,但是铝合金熔体在冷却过程中依然存在液态收缩、凝固收缩、固态收缩,这可能导致铝合金铸件在成形过程中出现缩松、缩孔、气孔等铸造缺陷,极大地影响合金铸件的性能。图 8 为交变磁场-分级加压协同场对 ZL114A 合金试样致密度的影响。

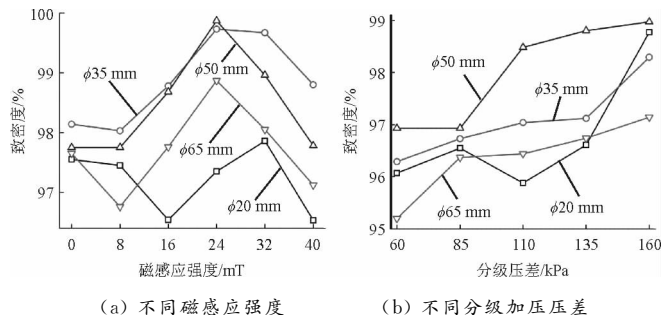


图 8 协同场下 ZL114A 合金致密度
Fig.8 Densities of ZL114A alloy under synergistic field

从图 8a 可以看出,整体在分级加压压差为 135 kPa 的压力场中,交变磁感应强度对真空差压铸造 ZL114A 合金试样的致密度影响较为显著。随着复合场下交变磁感应强度的增大,ZL114A 合金的致密度先增大后减小,当交变磁感应强度达到 24 mT 时 $\phi 50\text{ mm}$ 合金试样的致密度达到 99.87%,相对于未施加交变磁场时 97.75%,致密度提高了 2.18%。从图 8b 可以发现,在交变电磁场复合条件下,随着分级加压压差增大,真空差压铸造 ZL114A 合金试样的致密度呈现正相关。当分级加压压力场中压力差达到 160 kPa 时, $\phi 50\text{ mm}$ 铝合金试样致密度达到 98.97%。

3 交变磁场-压力协同场下 ZL114A 合金凝固补缩行为

3.1 交变磁场-压力协同场对 ZL114A 合金作用机制

通过对交变磁场-压力协同场下 ZL114A 合金二次枝晶间距、形貌、生长取向和致密度的分析,认为在交变磁场-压力协同场的作用下,铝合金熔体会同时受到磁场作用及凝固压力的作用。交变磁场与压力协同场下真空差压反重力成形树枝晶碎化模型见图 9。在压力场作用下,溶体质点受力无序运动,导致近浇口处出现枝晶间溶质元素富集,进而产生枝晶臂从根部溶断。此外,协同场下 ZL114A 合金在凝固过程中还受到交变磁场作用,以工频 50 Hz 的交替变化磁场,在熔体内部产生交替变化的洛伦兹力。磁感应强度增大促使凝固过程中铝合金熔体枝晶间液相对流^[22]程度加强。交变磁场所引起的晶间液相强迫对流,在一定程度上冲刷扰动或卷动枝晶,协同枝晶根部溶质富集作用,促使枝晶从固相基体壁上逐渐脱落,形成破碎“浮游碎晶”。在磁场产生的液相对流作用下,“浮游碎晶”弥散于整个熔体

中,一部分附着于型壁继续长大,一部分“浮游碎晶”发生局部重溶,尺寸减小,在真空差压分级加压压差作用下,液态熔体液流裹挟着“浮游碎晶”一同经过“晶间通道”,对铸件整体和局部形成有力补缩流,使得铸件组织致密坚实。

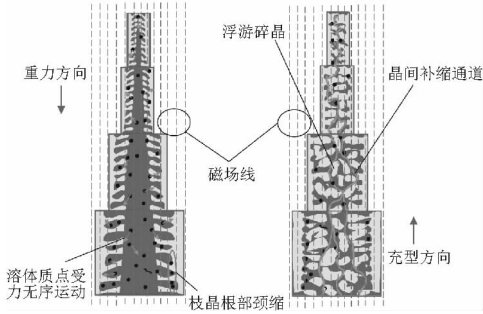


图9 交变磁场与压力协同场下真空差压反重力成形
树枝晶碎化模型

Fig.9 Dendrite fragmentation model formed by vacuum differential pressure antigravity under alternating magnetic field and pressure co-field

3.2 交变磁场-压力协同场下 ZL114A 合金挤渗模型

在交变磁场-分级加压协同场作用下,铝合金熔体会同时受到磁场作用及分级加压凝固压力的作用,在真空差压的挤渗效应与交变磁场的强制对流的融合作用下,会产生对流挤渗效应。压力使金属液通过凝固枝晶间的狭窄通道向补缩区流动的驱动作用,称为挤滤渗流作用^[1]。挤滤渗流能力可按下式计算:

$$\Delta G = \frac{k \left(P_x + \frac{2\sigma}{r} - P_s - P_g \right)}{\mu_1 \Delta L} F \cdot \Delta \tau \quad (1)$$

式中, ΔG 为挤滤渗流的金属容量, m^3 ; P_x 为 x 部位的静压力, Pa ; P_s 为金属液作用于挤滤渗流面上的静压力, Pa ; P_g 为挤滤渗流层中枝晶间析出气体的压力, Pa ; μ_1 为金属液的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ΔL 为挤滤渗流深度, m ; F 为挤滤渗流体积, m^3 ; $\Delta \tau$ 为挤滤渗流时间, s ; k 为渗透系数, m^2 。

在交变磁场-压力协同场作用下,凝固枝晶部位的压力是真空差压产生的凝固压力与磁场对流产生的压力之和,即:

$$P_x = P_{x1} + P_{x2} \quad (2)$$

式中, P_{x1} 为真空差压产生的 x 部位凝固压力, Pa ; P_{x2} 为磁场对流产生的 x 部位压力, Pa 。

根据流体力学原理,液态金属在枝晶间流动过程中都会存在沿程的压力损失,真空差压铸造在不同晶间处液态金属的沿程压力损失 ΣP 为:

$$\Sigma P = P_K - P_{x1} = \frac{8v\mu_1 X}{\delta^2} \quad (3)$$

$$P_{x1} = P_K - \frac{8v\mu_1 X}{\delta^2} \quad (4)$$

式中, P_K 为凝固保压压力, Pa ; δ 为补缩通道厚度, m ; v 为液态金属流动速度, m/s 。

液态金属流动速度 v 可表示为:

$$v = \frac{\beta}{1 - \beta} v_{\text{凝}} \quad (5)$$

式中, β 为凝固收缩系数; $v_{\text{凝}}$ 为凝固速度, m/s 。

将式(4)代入式(3)中得:

$$P_{x1} = P_K - \frac{8\beta\mu_1 X}{(1 - \beta)\delta^2} v_{\text{凝}} \quad (6)$$

根据电磁流体力学原理,交变磁场与熔体相互作用产生电磁力,使熔体产生振动效应。当对熔体施加交变磁场 B 时,熔体中会产生感应电流。磁感应电流与磁场的耦合作用产生电磁力(洛伦兹力),作用于液态金属的凝固补缩。通过 Maxwell 方程组、欧姆方程、Lorentz 方程、电磁场强度公式^[23-24],进行矢量计算,只用磁感应强度表示电磁力为:

$$F = J \cdot B = (B \cdot \nabla) B / H - \nabla B^2 / 2\mu_2 \quad (7)$$

$$F = F_t + F_r \quad (8)$$

式中,电磁力 F 可分为切向分量 F_t 和径向分量 F_r ^[25], $F_t = (B \cdot \nabla) B / \mu_2$; $F_r = -\nabla B^2 / 2\mu_2$; 其中 B 为磁感应强度, T ; H 为磁场强度, A/m ; J 为电流密度, A/m^2 ; ∇ 为电位移矢量; μ_2 为磁导率, H/m 。

受电磁力作用,径向分量对熔体产生压力可表示为^[25]:

$$P_r = P_{x2} = \frac{1}{\mu_2 \delta} B^2 e^{\frac{2z}{\delta}} \quad (9)$$

式中, P_{x2} 为磁场对流产生的 x 部分压力, Pa ; z 为合金熔体系数,将式(6)和式(9)代入(2)中得:

$$P_x = P_{x1} + P_{x2} = P_K - \frac{8\beta\mu_1 X}{(1 - \beta)\delta^2} v_{\text{凝}} + \frac{1}{\mu_2 \delta} B^2 e^{\frac{2z}{\delta}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(1)中可得交变磁场-压力协同场作用下的对流挤渗效应为:

$$\nabla G = \frac{K \left[P_K - \frac{8\beta\mu_1 X}{(1 - \beta)\delta^2} v_{\text{凝}} + \frac{1}{\mu_2 \delta} B^2 e^{\frac{2z}{\delta}} + \frac{2\sigma}{r} - P_s - P_g \right]}{\mu_1 \Delta L} \cdot F \cdot \Delta \tau \quad (11)$$

4 结 论

(1) 协同场下, 随着磁感应强度的增加, 粗大的树枝晶转变为等轴晶, 合金的二次枝晶臂间距先减小后增大, 致密度先增大后减小。在磁感应强度为 24 mT 时, 合金晶粒细化显著, 等轴晶数量增加, 同时, 合金的二次枝晶臂间距最小, 致密度为 99.87%。

(2) 协同场下, 随着分级加压压差增大, 合金中粗大的树枝晶细化明显, 二次枝晶臂间距减小, 致密度增加。在分级加压压差为 160 kPa 时, 树枝晶基本上转变为细小的等轴晶, 致密度为 98.97%。同时, 当分级加压压差为 135 kPa 时, 合金的二次枝晶臂间距最小。

(3) 通过分析协同场下 ZL114 合金的凝固行为, 建立了协同场下铝合金熔体挤渗模型方程。

参 考 文 献

- [1] 严青松. 智能控制的薄壁铝合金铸件真空差压铸造工艺与理论[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [2] VIJEESH V, PRABHU K N. Review of microstructure evolution in hypereutectic Al-Si alloys and its effect on wear properties[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2014, 67(1): 1-18.
- [3] BAREKAR N S, DAS S, YANG X, et al. The impact of melt conditioning on microstructure, texture and ductility of twin roll cast aluminium alloy strips[J]. Materials Science & Engineering, 2016, A650: 365-373.
- [4] 吴瑞涵. 铝合金在汽车工业中的应用现状及展望[J]. 中国金属通报, 2018(11): 3-5.
- [5] 刘凤财, 荣天爱, 汤雪卫, 等. ZL114A 合金卫星接收器面罩铸件的研制[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(4): 366-370.
- [6] 吴蒙, 严青松, 徐志峰, 等. 真空差压铸造技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2010, 39(15): 59-62, 67.
- [7] 严青松, 余欢, 魏伯康, 等. 真空差压铸造工艺的凝固补缩特性与模型[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(6): 1 051-1 057.
- [8] YAN Q S, YU H, XU Z F, et al. Effect of holding pressure on the microstructure of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 501(2): 352-357.
- [9] 余欢, 俞子荣, 魏伯康, 等. 真空差压铸造分级变压和充型凝固工艺: 中国, CN101658915[P]. 2012-07-11.
- [10] 胡世平, 陈乐平, 周全, 等. 物理场对金属凝固组织影响的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 717-720.
- [11] SHAO Z, LE Q, ZHANG Z, et al. A new method of semi-continuous casting of AZ80 Mg alloy billets by a combination of electromagnetic and ultrasonic fields[J]. Materials & Design, 2011, 32 (8-9): 4 216-4 224.
- [12] GRIFFITHS W D, MCCARTNEY D G. The effect of electromagnetic stirring during solidification on the structure of Al-Si alloys [J]. Materials Science & Engineering, 1996, A216(1-2): 47-60.
- [13] RADJAI A, MIWA K, NISHIO T. An investigation of the effects caused by electromagnetic vibrations in a hypereutectic Al-Si alloy melt[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1998, A29(5): 1 477-1 484.

- [14] ZHANG Y H, RÄBIGER D, ECKERT S. Solidification of pure aluminium affected by a pulsed electrical field and electromagnetic stirring[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(4): 2 153-2 159.
- [15] 刘政, 张嘉艺, 余昭福, 等. 电磁场作用下铝合金熔体流动的混沌特征的仿真与分析[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3 026-3 032.
- [16] 冯艳飞, 王军, 麻永林. 矩形波磁场对 7A04 铝合金凝固组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(12): 1 378-1 380.
- [17] ZOU J, LU D P, LIU K M, et al. Influences of alternating magnetic field on the growth behavior and distribution of the primary phase in Cu-14Fe alloys during the solidification process[J]. Metals, 2018, 8(8): 571-578.
- [18] LI C, HU S, REN Z, et al. Effect of the simultaneous application of a high static magnetic field and a low alternating current on grain structure and grain boundary of pure aluminum[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(12): 2 431-2 438.
- [19] HAGHAVE R, KAPRANOS P. Grain refinement of AA7075 alloy under combined magnetic fields[J]. Materials Letters, 2015, 151: 38-40.
- [20] SU X, XU G, JIANG J. Structural and mechanical properties of 7075 alloy strips fabricated by roll-casting in a static magnetic field [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2014, 21(7): 696-701.
- [21] 钟华. 强静磁场对 α -Al 枝晶生长过程调控机理的研究[D]. 上海: 上海大学, 2017.
- [22] ANANIEV S, NIKRITYUK P, ECKERT K. Dendrite fragmentation by catastrophic elastic remelting[J]. Acta Materialia, 2009, 57 (3): 657-665.
- [23] FANG C F, ZHANG X G, JI S H, et al. Research on AZ61 magnesium alloy by electromagnetic stirring and force field analysis[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007(1): 170-173.
- [24] 张军, 傅恒志, 谢发勤, 等. 金属熔体的电磁成形与凝固[J]. 材料研究学报, 1997(6): 612-622.
- [25] BIN W, YANG Y S, ZHOU J X, et al. Microstructure refinement of AZ91D alloy solidified with pulsed magnetic field[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(3): 536-540.

(编辑: 张正贺)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |