

电磁搅拌下电流突变对磁场及半固态 A356 铝合金组织的影响

洪 鑫 刘 政 张课微 唐景洪
(江西理工大学机电工程学院)

摘 要 基于 ANSYS 17.0 软件研究了搅拌电流突变行为以及不同的电磁频率下电流突变对磁感应强度、洛伦兹力和半固态铝合金熔体初生相的影响。结果表明,相同的突变电流下,洛伦兹力和磁感应强度随着电磁频率的增大先增大后减小,在 25 Hz 时达到最大值;相同的电磁频率下,洛伦兹力和磁感应强度随着搅拌电流突变幅值的增大而增大,在 2 A 突变至 6 A 时达到最大值。当电磁频率为 25 Hz 和突变电流从 2 A 到 6 A 的情况下,初生相的形状因子和平均等积圆直径分别为 0.71、118 μm ,达到最佳。

关键词 电磁搅拌;数值模拟;A356 铝合金;半固态组织

中图分类号 TG249.2⁺6;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Current Mutation on Electromagnetic Field and Solidified Microstructure in Semi-solid A356 Aluminum Alloy under Electromagnetic Stirring

Hong Xin, Liu Zheng, Zhang Kewei, Tang Jinghong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology)

Abstract: Based on numerical simulation methods, a two-dimensional electromagnetic field finite element model of aluminum alloy melt was established, and the effects of current mutation and different electromagnetic frequency on the magnetic induction intensity, electromagnetic force and primary phase of semi-solid aluminum alloy melt were investigated. The results reveal that under the same current mutation, the electromagnetic force and magnetic induction intensity are firstly increased and then decreased with the increase of the electromagnetic stirring frequency, reaching the maximum value at 25 Hz. Under the same electromagnetic frequency, the electromagnetic force and magnetic induction intensity are increased with the increase of the amplitude of current mutation, and the maximum value appears when current mutates from 2 A to 6 A. In the case of the optimal stirring frequency (25 Hz) and the mutation current (2~6 A), the shape factor and average equal-area circle diameter of the primary phase are 0.71 and 118 μm , respectively.

Key Words: Electromagnetic Stirring, Numerical Simulation, A356 Aluminum Alloy, Semi-solid Microstructure

收稿日期:2021-03-11;**修改稿收到日期:**2021-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51361012,51864020);江西省自然科学基金资助项目(2014bab206012)

第一作者简介:洪鑫,男,1996 年出生,硕士研究生,江西赣州(341000),E-mail:2953685045@qq.com

通信作者:刘政,男,1958 年出生,教授,江西赣州(341000),E-mail:liukk66@163.com

引用格式:洪鑫,刘政,张课微,等. 电磁搅拌下电流突变对磁场及半固态 A356 铝合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 393-1 399.
HONG X, LIU Z, ZHANG K W, et al. Effects of current mutation on electromagnetic field and solidified microstructure in semi-solid A356 aluminum alloy under electromagnetic stirring[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 393-1 399.

[20] SPINELLI J E, CHEUNG N, GOULART P R, et al. Design of mechanical properties of Al-alloys chillcastings based on the metal/mold interfacial heat transfer coefficient[J]. International Journal of Thermal Science, 2012, 51: 145-154.

[21] ZHU W, HAN Z, LIU B C. Thermomechanical modeling of solidification process of squeeze casting II: Numerical simulation and experimental validation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45 (3): 363-368.

[22] LIN J H, ZHAO H D, HUANG J M. Spatial interfacial heat transfer and surface characteristics during gravity casting of A356 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(1): 43-50.

[23] HAMASAIID A, DARGUSCH M S, DAVIDSON C J, et al. Effect of mold coating materials and thickness on heat transfer in permanent mold casting of aluminum alloys[J]. Metallurgical and materials Transactions, 2007, A38(6): 1 303-1 316.

[24] RICHARD O, JOHNP K. Experimental investigation of heat transfer characteristics and performance of smooth and wicking surfaces in spray cooling for high heat flux applications[J]. Results in Engineering, 2020(6): 100 119-100 125.

[25] SARMARDIAN A, DUNNE J F, LONG C A, et al. Heat flux correlation models for spray evaporative cooling of vibrating surfaces in the nucleate boiling region[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 160: 120 159.

[26] MASCARENHAS N, MUDAWARI. Analytical and computational methodology for modeling spray quenching of solid alloy cylinders[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(25): 5 871-5 883.

(编辑:张正贺)

半固态加工技术是通过半固态金属成形参数进行控制来改善合金铸锭的凝固组织的合金制备方法。康永林等^[1]发现半固态加工技术能使钢制件成形过程中的元素偏析得到抑制。BRAMANN H 等^[2]对 X210CrW12 冷加工钢进行了触变成形研究,发现半固态加工技术能使高熔点合金获得优良的力学性能。而电磁搅拌^[3,4]是半固态金属加工中常用的技术手段,在金属凝固过程中施加电磁场,会显著影响熔体的流动行为^[5]。在电磁场作用下的半固态铝合金熔体^[6]由于固、液相共存,呈现出一定的粘性以及流变特性。

电磁参数(如频率、电流等)会对磁场强度、电磁力产生影响,继而影响电磁搅拌效果,最终影响半固态合金浆料的品质^[7]。在以往的电磁搅拌实践中,研究者尝试过分级电磁搅拌^[7],利用连续搅拌过程中电磁频率的突然改变实现半固态合金熔体中电磁场强度、洛伦兹力发生变化,有利于改善熔体品质。此外,在电磁搅拌参数中,电流强度和电磁频率都可明显地影响合金熔体中所受到的电磁力,其中电流强度对调控电磁力大小的作用要强于电磁频率^[8]。故对处于固液共存、高粘性状态时的铝合金熔体进行搅拌电流突变时,熔体中现存枝晶是否产生了二次破碎效果,且由于洛伦兹力发生突变而使熔体产生的流动变化对铝合金凝固成形组织形貌的影响还未见相关报道。因此,本课题通过数值模拟和试验相结合的方法分析搅拌参数(电流)突变下对半固态 A356 铝合金浆料中电磁场分布的影响,研究了电磁搅拌时最佳的电流突变数值及其对半固态合金浆料的影响,为制备具有更高性能的合金提供参考。

1 数值模拟

1.1 电磁场物理模型

利用 ANSYS 17.0 软件对电磁搅拌器的电磁场进行仿真与计算,电磁场模型的分析基础为麦克斯韦方程组,通过对麦克斯韦方程组的计算,确定问题中的相关参数及所求得的最佳电流强度突变数值。

试验设备为 DJMRG-230 型电磁搅拌器,主要由外壳、铁芯和线圈组成,电磁搅拌器的工作原理与三相两极异步电机^[9]基本相同。因此参照三相异步电机的定子模型来构建电磁搅拌器模型^[10~13]。其中搅拌器尺寸:外径为 $\phi 560$ mm,内径为 $\phi 288$ mm,高度为 400 mm;主要的技术参数:额定功率为 98 kW,额定电流为 150 A,频率为 1~30 Hz,极数为 2,定子外径和内径分别为 $\phi 260$ 、 $\phi 170$ mm,接线线圈匝数为 28。探究搅拌电流突变对电磁场的影响及其分析时,研究对象是盛放于圆柱形不锈钢坩埚内的半固态铝合金浆料,故对铝合

金熔体建立简化模型,见图 1,铝合金熔体半径为 30 mm,高为 100 mm。

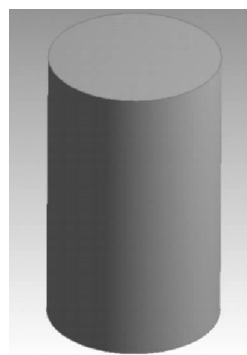


图 1 铝合金熔体结构示意图

Fig.1 Structural diagram of aluminum alloy melt

1.2 模型假设

对施加于铝合金熔体的电磁场进行模拟时,做如下假设^[14,15]:铝合金熔体视为不可压缩的牛顿流体,忽略不锈钢铸型的厚度;合金熔体的边界不与不锈钢铸型发生反应,即不考虑边界位移;不计温度对电磁搅拌装置内部材料磁导率、电阻率的影响;假设电磁搅拌前熔体内各部分的粘度值相同;忽略电磁搅拌器内冷却水、空气间隙的磁导率对磁场带来的影响。

1.3 材料物理参数的确定

模型材料的物理属性为^[16~19]:电线圈、空气气隙和半固态铝合金的相对磁导率均为 1,定子铁芯的相对磁导率为 3 000,通电线圈和半固态铝合金的电阻率分别为 1.7×10^{-8} 和 $2.1 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 。

1.4 模型及网格划分

通过 ANSYS17.0 软件建立铝合金熔体的简化二维模型后,对其进行网格划分,见图 2。首先建立相关模型,然后对模型的主要物理参数进行添加,接着对铝合金熔体模型进行网格划分。由于分析对象为铝合金熔体,同时忽略不锈钢铸型的壁厚,故确定铝合金熔体的外表面为边界条件,其次将相关搅拌参数输入进行加载并对其求解,再次收集相关求解得到的数据并对其进行分析。

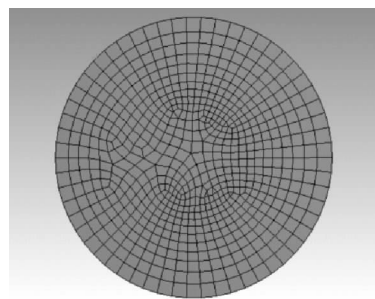


图 2 铝合金熔体的网格划分图

Fig.2 Mesh diagram of aluminum alloy melt

1.5 电流强度参数突变的搅拌过程

使用的电压值为 380 V, 电磁频率分别为 5、10、15、20、25、30、35 Hz, 电流分别为 2、3、4、5、6 A。在电磁搅拌时电流数值突变过程为: 在不同的电磁频率下, 依次按照电流为 2 A 时搅拌 5 s, 随后分别突变至 3、4、5 和 6 A 后搅拌 10 s。以此考察不同电磁频率下, 不同电流突变幅度(数值)对半固态合金熔体中磁感应强度和电磁力的影响, 进而对质量及凝固组织产生的变化。

2 模拟结果与分析

2.1 搅拌电流强度参数突变对磁感应强度的影响

图 3 为不同频率以及不同电流突变幅值下半固态铝合金整体在电磁搅拌 15 s 内的磁感应强度。可以看出, 当电磁频率为 5 Hz 时, 在电流强度为 2 A 搅拌 5 s 后, 分别再从 2 A 突变至 3、4、5、6 A 搅拌 10 s 的平均磁感应强度分别为 0.432 7、0.551 6、0.670 4、0.789 1 T。对比可知, 4 种电流突变的磁感应强度总体较小, 但仍呈现出随着电流突变幅度的增大而增大的趋势。从 5 Hz 到 20 Hz, 随着搅拌的电磁频率的增大, 4 种电流突变的磁感应强度几乎呈现线性增大的现象。与此同时, 4 种情况之间的增涨幅度也不尽相同。随着电流值增涨的幅度由 1 A 突变为 4 A, 涨幅越来越明显。当电磁频率为 20 Hz 时, 电流从 2 A 分别突变至 3、4、5、6 A 时的磁感应强度分别为 1.708 0、2.183 1、2.658 2、3.133 4 T, 此时 4 种情况下相互之间的磁感应强度之差已远大于 5 Hz 的时候。当电磁频率从 20 Hz 增大到 25 Hz 时, 4 种情况下磁感应强度的涨幅相较于 5 Hz 至 20 Hz 时稍有减缓, 4 种电流数值突变情况下的磁感应强度增加了 0.2 T 左右。当电磁频率为 25 Hz 时, 磁感应强度达到最大值, 电流从 2 A 突变至 3、4、5、6 A 的平均磁感应强度分别为 1.882 5、2.392 9、2.903 3、3.413 6 T。与频率为 20 Hz 相比, 在 25 Hz 下各电流突变数值对磁感应强度的影响分别增加了 10.2%、9.6%、9.2% 和

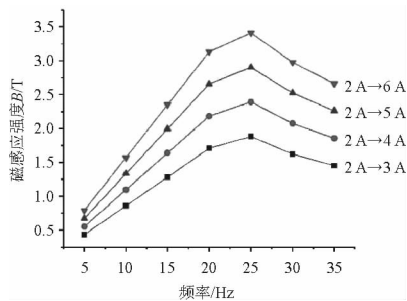


图 3 不同频率下磁感应强度的变化

Fig.3 Variation of magnetic induction intensity under different electromagnetic frequencies

8.9%。这表明随着频率增高, 电流突变幅值的增大对磁感应强度的影响逐渐减小。

随着频率继续增大, 磁感应强度开始呈现下降的趋势, 当电磁频率为 35 Hz 时, 磁感应强度下降明显, 当电流从 2 A 突变至 3、4、5、6 A 的磁感应强度分别为 1.453 0、1.856 8、2.260 7、2.664 6 T, 其中 25 Hz 至 30 Hz 区间的下降趋势较 30 Hz 至 35 Hz 区间较缓一些。与电磁频率为 25 Hz 相比, 35 Hz 各电流突变数值对磁感应强度的影响分别下降了 22.8%、22.4%、22.1% 和 21.9%。这表明当电磁频率超一定数值后, 尽管各电流突变数值使得磁感应强度下降程度几乎相近, 但是磁感应强度下降的幅度比较明显。同时, 电流突变达到 4 A 时相较于突变至 3 A 时(突变幅值只有 1 A 的情况下), 下降趋势较快。不论电磁搅拌频率为哪个数值, 在同一频率下, 磁感应强度都随着电流突变幅值的增大而增大。随着频率从 5 Hz 增大到 25 Hz, 4 种电流突变情况下, 相互之间磁感应强度的差别越来越大。当电磁频率大于 25 Hz, 4 种突变情况下的磁感应强度开始下降的同时, 相互之间的磁感应强度差也逐渐减小。

2.2 搅拌电流数值突变对电磁力的影响

图 4 为不同频率以及不同电流突变幅值下铝合金半固态整体在电磁搅拌 15 s 内受到的洛伦兹力平均值。可以看出, 当频率为 5 Hz 时, 电流从 2 A 突变至 3、4、5 和 6 A 的洛伦兹力分别为 0.133 9、0.234 3、0.364 4、0.524 2 N, 4 种搅拌电流突变的情况下的洛伦兹力随着电流突变值的增大有略微增加。随着电磁频率的增加, 4 种电流突变情况下的洛伦兹力也增大。在 5~20 Hz 频率区间内, 4 种情况下的 A356 半固态铝合金熔体所受的洛伦兹力呈现出非线性的快速增长趋势, 且洛伦兹力随频率的增加涨幅越来越大。当电磁搅拌频率为 20 Hz 时, 电流强度从 2 A 突变至 3、4、5、6 A 的洛伦兹力分别为 2.261 6、3.907 5、6.027、8.620 3 N; 当频率从 20 Hz 增至 25 Hz, 铝合金熔体所受到的洛伦兹力继续增大, 当电磁搅拌频率为 25 Hz 时, 洛伦兹力达到最大值, 电流从 2 A 突变至 3、4、5 和 6 A 的洛伦兹力分别为 2.382 8、4.043 2、6.183 0、8.802 1 N; 与频率为 20 Hz 下相比, 25 Hz 时各电流突变数值对洛伦兹力的影响分别增加了 5.4%、3.5%、2.6% 和 2.1%。这表明随着频率增大, 电流突变幅值的增大对洛伦兹力的影响逐渐减小。相较于从 5 Hz 增加到 20 Hz, 洛伦兹力增加的趋势变缓; 当搅拌的电磁频率继续增大, 熔体受到的洛伦兹力出现下降的趋势。由图 4 可见, 当频率为 35 Hz 时, 洛伦兹力明显下降, 电流从 2 A 分别突变至 3、4、5 和 6 A 的洛伦兹力分别为 1.623 5、2.811 1、4.340 9、6.212 9 N。其中, 在 25~30 Hz 区间内较 30~

35 Hz 区间内下降较缓。与频率为 25 Hz 相比,35 Hz 各电流突变数值对洛伦兹力的影响分别下降了 31.9%、30.5%、29.8% 和 29.4%。这与电流突变使得磁感应强度下降类似。与此同时,电流突变幅值为 4 A 时与突变幅值只有 1 A 时的情况相比,洛伦兹力下降幅度更快。同一频率下,随着电流突变幅值的增大,熔体受到的洛伦兹力也在逐渐增大;频率从 5 Hz 增大到 25 Hz 时,不同电流突变之间的洛伦兹力差越来越大。频率从 25 Hz 到 35 Hz,熔体所受洛伦兹力下降,且 4 种电流突变情况之间的洛伦兹力差逐渐减小。

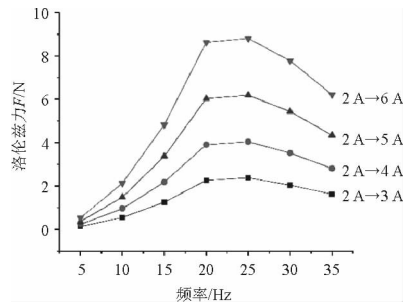


图 4 不同频率下洛伦兹力的变化

Fig.4 Variation of electromagnetic force under different electromagnetic frequencies

3 试验过程

利用 Magix(PW2424)X 荧光光谱分析得到亚共晶铝硅合金 A356 的成分,见表 1。利用 DTA(differential thermal analysis)差热分析法来确定 A356 铝合金的固液两相区的温度范围为 576.1~615.6 ℃。

表 1 A356 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of A356 aluminum alloy %									
w _B									
Si	Mg	Fe	S	Cu	Mn	Zn	Ti	Zr	Al
7.140	0.330	0.135	0.011	0.002	0.012	0.021	0.021	0.004	余量

将切好的块状 A356 铝合金放入预热的 360 ℃ 石墨坩埚中,将 SG2-6-10 型电阻炉的温度设定为 750 ℃;待铝锭完全熔化后,加入适量覆盖剂(50% 的 NaCl+50% 的 KCl),5 min 后清除杂质,然后静置 10 min;将坩埚从熔炼炉中取出,添加 0.2%~0.7% 的六氯乙烷(99.5% C₂Cl₆)精炼,分 2 到 3 次压入铝熔液内,每次精炼后要除渣,精炼时间为 12 min 左右。将炉体温度降至 650 ℃,浇注到预热至 360 ℃ 的不锈钢铸型(φ60 mm×110 mm)中;将铸型放入 M-EMS DJMRG-230 电磁搅拌器中,设置电磁频率分别为 5、10、15、20、25、30、35 Hz,电流分别为 2、3、4、5、6 A。在电磁频率为 5 Hz 时,用 2 A 电流先搅拌 5 s,随后电流突变至 3 A 搅拌 10 s。依此分别突变至 4、5、6 A(搅拌方式同前)。同时,将电磁频率升至 10、15、20、25、30、35 Hz。搅拌

结束后在 590 ℃ 保温 10 min 后水淬,最后脱模进行下一步。

对不同搅拌参数下的铸锭在距离底部 10 mm 截取圆形铝片,从铝片上切取过圆心的 10 mm×10 mm×10 mm 作为金相试样。试样经过不同目数砂纸配合金金刚石研磨膏由粗到细的抛光后,先蘸取酒精擦拭干净,再用体积分数为 0.5% 的 HF 水溶液进行腐蚀,20 s 后用清水洗净,再次用酒精擦拭,吹干后在 ZEISSAxiokop 型显微镜下观察金相组织。使用软件 Image-Pro-Plus、Excel 和 Origin8.5 对凝固组织中初生相的平均等积圆直径 D 和平均形状因子 F 进行测量计算,并依据 D 和 F 的数值对组织形貌进行判断与描述。平均等积圆直径和形状因子计算如下:

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

$$F = 4\pi A/P^2 \quad (2)$$

式中, A 为初生相的平均面积; P 为凝固组织中初生相的平均周长。

4 试验结果与分析

电流从 2 A 突变至 6 A 后,不同频率下半固态 A356 铝合金的初生相形貌,见图 5。可以看出,频率为 5 Hz 时,由于熔体受到的洛伦兹力为 0.524 2 N,产生的搅拌效应很弱,对枝晶破碎的效果不明显,故而枝晶粗大且呈现混合现象,此时有极个别位置开始形成棒状的枝晶。通过式(1)和式(2),计算得 D 为 155 μm, F 为 0.47;频率升至 10 Hz 时,此时熔体受到的洛伦兹力增至 2.131 2 N,相较于 5 Hz 时有所提高,电磁搅拌下对枝晶的破碎效应开始初显,混合的枝晶开始分离,枝晶中开始形成较为规整的晶体,但此时蔷薇状的枝晶仍占大多数,计算得 D 为 147 μm, F 为 0.54;频率为 15 Hz 时,洛伦兹力进一步增大至 4.827 5 N,此时的晶粒粗大,多数呈现出长条树枝状,晶粒的圆整度很低,晶粒混合情况较为严重,计算得 D 为 140 μm, F 为 0.60;频率升至 20 Hz,洛伦兹力提高至 8.620 3 N,较大树枝状的晶枝逐渐消失,呈长条状和棒状。洛伦兹力的增加使得枝晶得到破碎和剪切,此时初生相粗大的树枝状晶粒已消失,其中析出个别圆整度较好的晶粒,圆整度有所提高,此时 D 为 127 μm, F 为 0.67;频率为 25 Hz 时,洛伦兹力达到 8.802 1 N 的极大值,在此洛伦兹力作用下,使得浆料内部的流动速度增大,致使晶粒之间的摩擦与碰撞作用进一步增强。同时浆料在较大的流速下有利于将低温区域的熔体卷入高温区域,促进熔体温度的均匀化,使晶体的选择性生长得到抑制,促进晶粒的各向同性长大。在此过程中,较长的晶体卷入高温区域会由于熔断机制而从枝晶的根部发生溶断,有利于抑制

粗大枝晶的生长^[20]。在浆料内部发生流动过程中还可促进铝合金浆料之间的传质。长条状的晶粒减少,圆整

度较好的晶粒个数继续增加^[21,22],此时的 D 为 $118\ \mu\text{m}$, F 为 0.71 。

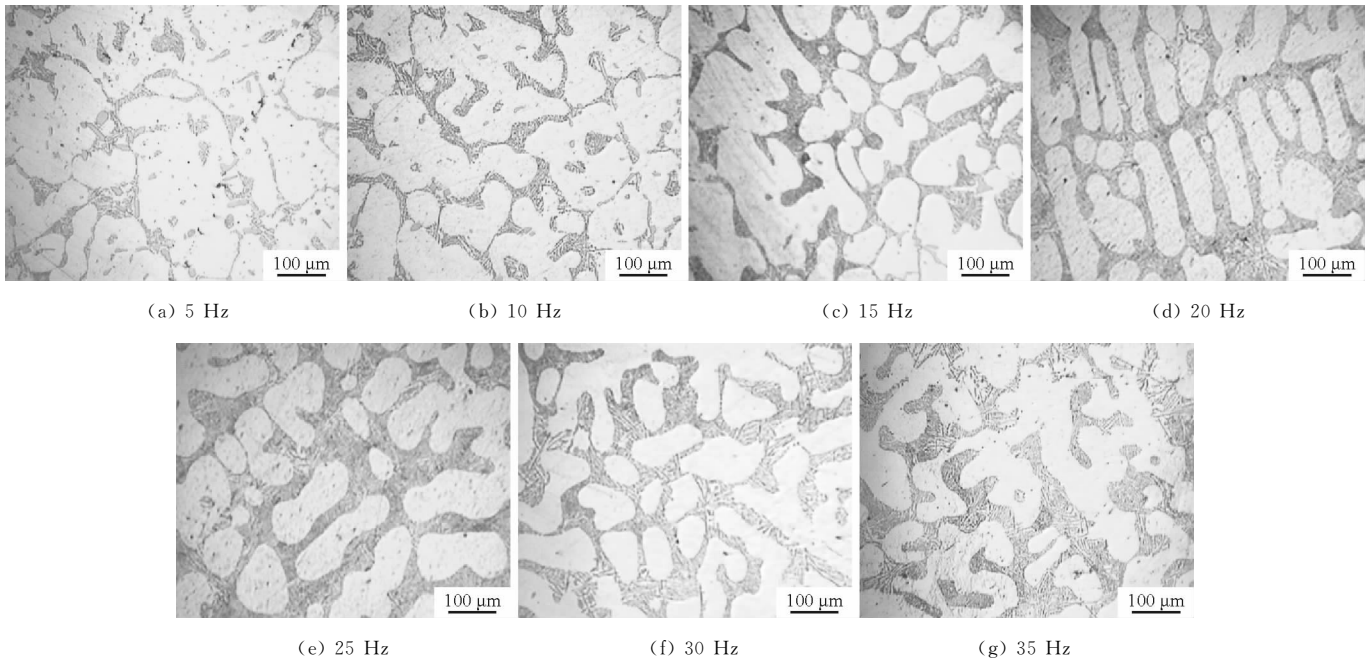


图 5 电流 2 A 突变至 6 A 时,不同电磁频率下半固态 A356 铝合金初生相形貌

Fig.5 Primary phase morphology of A356 aluminum alloy under different electromagnetic frequencies in the range of 2 A to 6 A

当频率达到 30 Hz 时,随着频率的增加,交变电流在铝合金熔体中所产生的电磁场所产生的趋肤效应越来越明显,这时铝合金熔体所受到的产生搅拌作用的洛伦兹力越来越集中于熔体与结晶器内壁的交界处。此时由于铝合金熔体与结晶器内壁之间存在粘性,根据先前的研究表明,常态中,趋肤效应作用下熔体 $0.85R$ (R 为半径)^[23,24] 处的流速较大,而频率的增大会使得趋肤效应更显著化,更加靠近熔体的表面,从而使得熔体受到与不锈钢坩埚内壁之间的内摩擦力增大。随之,熔体在洛伦兹力和内摩擦力的共同作用下,所受的实际洛伦兹力会有所减小。同时,高频率下铝熔体出现的趋肤效应,使得熔体产生感应电势。感应电势使得铝熔体产生感应磁场与电磁搅拌器产生的磁场部分抵消,致使熔体的磁感应强度减弱。加之,采用的电磁搅拌器对高频电流产生的磁场有一定的屏蔽效应,从而使得穿过电

磁搅拌器内壁到达熔体的磁感应强度有所降低^[25,26]。洛伦兹力和磁感应强度有所下降,合金流中晶粒之间的碰撞效应减弱,初生相的相貌出现恶化。初生相形貌中晶粒间部分融合在一起,开始出现树枝状的晶枝,树枝状的枝晶逐渐形成,圆整度较好的晶粒较之前有所减少,晶粒总体的圆整度下降,此时 D 增大到 $130\ \mu\text{m}$, F 减小到 0.64 。当频率为 35 Hz 时,初生相形状圆整的晶体完全消失,取而代之的是蔷薇状的枝晶,此时计算得 D 为 $144\ \mu\text{m}$, F 为 0.56 。因此,最佳的电磁搅拌参数:电磁频率为 25 Hz,电流突变值为 2 A→6 A。

图 6 为 25 Hz 的频率下,不同电流突变值时的初生相形貌。可以看出,在 2 A→3 A 的情况下,洛伦兹力只有 $2.3828\ \text{N}$,在熔体中产生的枝晶破碎以及传热传质效果微弱,初生相中几乎都为蔷薇状,而且呈现出枝晶与枝晶混合的现象,此时 D 为 $150\ \mu\text{m}$, F 为 0.51 ;随

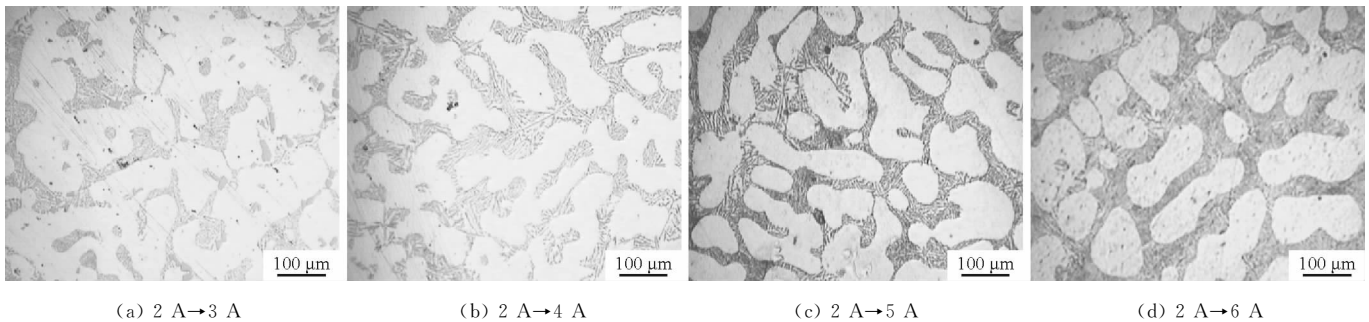


图 6 25 Hz 不同电流突变幅值下半固态 A356 铝合金初生相形貌

Fig.6 Primary phase morphology of A356 aluminum alloy under different amplitude of current mutation at 25 Hz

着搅拌电流由 2 A 突变至 4 A 时,此时枝晶之间开始分离,蔷薇状枝晶逐渐消失,初生相中出现个别形状较为规整的棒状枝晶,此时 D 为 $143\ \mu\text{m}$, F 为 0.58;当电流突变幅值继续增大,由 2 A 突变至 5 A 时,铝合金熔体受到的洛伦兹力进一步增大至 6.183 N,初生相中蔷薇状的枝晶基本消失,主要为棒状、长条状的枝晶。此时开始出现较为圆整的类球状晶体,同时初生相的 D 为 $128\ \mu\text{m}$, F 为 0.66。电流由 2 A 突变至 6 A,由于经过前段长达 5 s,电流为 2 A 的搅拌下,熔体已处于低流速的混沌^[27~30]状态,随着搅拌电流的突变,熔体中的电磁力与磁感应强度也随之发生突变,实现了二次搅拌,即对熔体中的晶体产生了二次破碎效应。加之相较于前 4 种情况,熔体在 15 s 内受到的洛伦兹力平均值提高到 8.802 1 N,电磁搅拌过程中所产生的传热与传质^[31],以及对枝晶的破碎效应都达到最佳,故此时的初生相中长条状和棒状的枝晶减少,类球状和球状晶体增加,此时的组织形貌达到最佳,其中 D 为 $118\ \mu\text{m}$,形状因子为 0.71。

在同一电磁频率下,当电流突变为 2 A→6 A 时,相比于其他突变情况,洛伦兹力和磁感应强度最佳;当电流突变幅值相同的情况下,如电流为 2 A→6 A 时,频率为 25 Hz 下,相比于其他频率,洛伦兹力与磁感应强度最佳。因此,电磁频率为 25 Hz,突变电流为 2 A→6 A 下,半固态铝合金熔体受到的洛伦兹力相比于其他情况下更大,使得熔体快速流动。熔体中的晶粒由于不断碰撞和剪切的作用,不断向圆整度更好的趋势演变,而熔体流动所带来的传质与传热效果,能促进熔体内温度分布的均匀化,进一步促进晶体的各向同性生长。同时使较长的枝晶产生熔断,抑制部分已经生成的枝晶产生选择性生长,故能得到初生相形貌较好且分布较为均匀的铝合金组织。

5 结 论

(1)通过对电磁场的数值模拟分析,获得了不同电磁频率、不同电流值突变情况下磁感应强度和电磁力的变化情况。在同一突变电流,电磁频率从 5 Hz 升至 35 Hz 的过程中,磁感应强度随着电磁频率的增大先增大后减小,当电磁频率为 25 Hz 时,磁感应强度达到最大值;在同一电磁频率下,电流突变从 2 A→3 A 升至 2 A→6 A 的过程中,磁感应强度随着电流突变幅值的增大而增大,在电流从 2 A 突变至 6 A 的情况中,磁感应强度值达到最大。

(2)仿真结果显示,电磁力随着电磁频率的增加呈现先增大较快,而后增加幅度较小的趋势;当电磁频率大于 25 Hz 以后,电磁力呈现下降的趋势;电磁力总体

上呈现随着电流突变幅值的增大而增大。

(3)在 4 种搅拌电流突变的情况下,熔体受到的电磁力和磁感应强度都随着电磁频率的增大在 5~20 Hz 区间上呈现先上升较快,后在 20~25 Hz 区间上增幅减缓,电磁频率在 25 Hz 后出现下降的现象;在模拟的 7 种电磁频率下,电流值从 2 A 突变至 6 A 时,电磁力和磁感应强度相比于其他 3 种搅拌电流突变的情况数值最大。

(4)同一电磁搅拌频率下,随着搅拌电流突变幅值的增大,洛伦兹力不断增大,熔体流动速度也随之上升。当电流由 2 A 突变至 6 A 时,熔体受到的平均洛伦兹力为 4 种电流突变情况下最大,对枝晶的破碎以及内部传热传质的效果最好;在同一电流突变幅值下,随着搅拌频率增大,洛伦兹力先增大后减小。当频率为 25 Hz 时,熔体受到的平均洛伦兹力最大,枝晶破碎以及内部传热传质的效果最好。所以,当电流为 2 A 突变至 6 A,频率为 25 Hz 时,初生相形貌在电磁搅拌下的细化效果最好。此时初生相的平均等积圆直径为 $118\ \mu\text{m}$,形状因子约为 0.71。故而洛伦兹力和磁感应强度最佳的搅拌突变数值:电流值 2 A 突变至 6 A,电磁频率为 25 Hz。

参 考 文 献

- [1] 康永林,宋仁伯,杨柳青,等.金属材料半固态凝固及成形技术进展[J].中国材料进展,2010(7):27-33.
- [2] BRAMANN H, FEHLBIER M, SAHM P R, et al. Casting of a cold work steel alloy in semi-solid state[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156: 1 357-1 364.
- [3] LIM S C, YOON E P. The effect of electromagnetic stirring on the microstructure of Al-7Si alloy[J]. Journal of Materials Science Letters, 1997, 16(2): 104-109.
- [4] 刘永峰,毛卫民,汤国兴,等.半固态 A356 铝合金流变浆料的制备技术研究[J].特种铸造及有色合金,2007,27(3):185-187.
- [5] 黄军,张亚竹,武文斐,等.半固态成形用电磁搅拌器内部磁场的三维表征研究[J].特种铸造及有色合金,2017,37(11):1 205-1 207.
- [6] 肖冠菲,姜巨福,王迎,等.高熔点合金半固态加工技术研究进展[J].塑性工程学报,2019,26(2):62-68.
- [7] 刘政,周翔宇.分级电磁搅拌对半固态 Al-Cu 合金凝固组织的影响[J].中国有色金属学报,2015,25(1):49-57.
- [8] 赵军超,刘政,李泽文,等.电磁搅拌参数对椭圆坩锅中半固态铝合金熔体流动与凝固组织的影响[J].中国有色金属学报,2020,30(7):1 523-1 534.
- [9] 刘政,刘小梅,朱涛,等.低频电磁搅拌对半固态铝合金中稀土分布的影响[J].金属学报,2015,51(3):272-280.
- [10] MAUNU K, PETRI S, JAAKKO L. Numerical and experimental modelling of gas flow and heat transfer in the air gap of an electric machine[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 13(3): 264-278.
- [11] HAO L L, WU J Y, SUN Y G. Simplified mathematical model of

inter-turn short circuit of field windings in hydro-generators and its application[J]. Science China, 2013, 56(4): 898-909.

[12] 陈志平, 刘政, 陈涛. 电磁搅拌和数值模拟在半固态铝合金浆料制备中应用的研究现状[J]. 铸造, 2017, 66(7): 702-706.

[13] MARQUEZ I, BOLBORICI V. A dynamic model of the piezoelectric traveling wave rotary ultrasonic motor stator with the finite volume method[J]. Ultrasonics, 2017, 77: 69-78.

[14] 李泽文, 刘政, 赵军超, 等. 电磁搅拌下半固态 A356 铝合金凝固时电磁场-流场数值模拟与实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(6): 1 297-1 306.

[15] 刘政, 张嘉艺, 余昭福. 电磁场作用下铝合金熔体流动的混动特性的仿真与分析[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3 026-3 032.

[16] 杨依珉, 赵君文, 巫国强, 等. 半固态流变压铸铝合金件疲劳性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 83-87.

[17] 余聪, 陈乐平, 周全. 稀土元素对铝合金组织与性能影响的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 241-246.

[18] 孙虎, 钟鲁宁, 傅小明, 等. 熔体混合处理对 A356 铝合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(4): 453-455.

[19] 陶文疏, 赵升吨, 林文捷. A356 铝合金半固态浆料电磁搅拌法制备过程的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 50-57.

[20] FERGUSON J B, TABANDEH-KHORSHID M, MANTAS J C, et al. Predicting the effect of pouring temperature on the crystallite density, remelting, and crystal growth kinetics in the solidification of aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2014, B45(4): 1 407-1 417.

[21] 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.

[22] 陈志平, 刘政, 陈涛. 坩埚半径对电磁搅拌制备半固态 A356 浆料电磁场分布的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(9): 961-965.

[23] 陈志平, 刘政, 陈涛. 电磁搅拌半固态铝合金磁场感应强度的优化[J]. 铸造, 2017, 66(12): 1 287-1 293.

[24] NAKATA H, INOUE T, MORI H, et al. Improvement of billet surface quality by ultrahigh frequency electromagnetic casting[J]. IsIJ International, 2002, 42(3): 264-272.

[25] 王宏明, 刘强, 李桂荣, 等. 磁场频率对软接触结晶器内磁感应强度分布的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(1): 20-22.

[26] 刘政, 张嘉艺, 罗浩林, 等. 混沌对流下的半固态 A356 铝合金初生相形貌演变研究[J]. 金属学报, 2016, 52(2): 177-183.

[27] WEIJS J H, BARTOLO D. Mixing by unstirring: hyperuniform dispersion of interacting particles upon chaotic advection[J]. Physical Review Letters, 2017, 119(4): 048 002.

[28] MUKIIBI D, BADIN G, SEERRA N, et al. Three dimensional chaotic advection by mixed layer baroclinic instabilities[J]. Journal of Physical Oceanography, 2016, 46(5): 1 509-1 529.

[29] MOURA D, ALESSANDRO P S. Strange eigenmodes and chaotic advection in open fluid flows[J]. Epl., 2014, 106(3): 34 002.

[30] CERBELLI S, GIONA M, GORODETSKYI O, et al. Singular eigenvalue limit of advection-diffusion operators and properties of the strange eigenfunctions in globally chaotic flows[J]. European Physical Journal Special Topics, 2017, 226(10): 1-16.

[31] WANG X D, FAUTRELLE Y, MOREAU R, et al. Flow, heat and mass transfers during solidification under traveling/rotating magnetic field[J]. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2015, 6(4): 367-373.

(编辑:刘晨辉)

国际铝协发布 2050 年全球铝工业降碳目标

近日,国际铝业协会(IAI)在苏格兰格拉斯通第 26 届联合国气候变化大会召开前发布了一系列新的全球铝工业脱碳进程数据清单报告,并提出了 2050 年全球铝工业温室气体减排的阶段性目标及其细化分解目标。

报告指出,到 2050 年,全球铝工业二氧化碳排放总量与 2018 年相比需要减少 77%,其中,氧化铝和电解铝生产所产生的二氧化碳将显著减少。报告预测,铝冶炼应减少近 90%的碳排放量,具体数值是从 8.23 亿吨降至 9 000 万吨。2018 年,在铝冶炼环节中与电力相关的排放量为 6.7 亿吨,根据减排路径,到 2050 年这一数据需要降至 800 万吨。在氧化铝方面,报告预测,该行业的温室气体排放量应从 2018 年的 1.71 亿吨下降到 2050 年的 9 000 万吨,减少近一半。

与此同时,报告预计,随着经济增长、城市化进程和基础设施建设的增加,全球铝产品需求量将增长约 81%,这也意味着铝工业将承担更大的减排压力。IAI 情景与预测总监 Marlen Bertram 指出,为实现减少碳排放的目标,铝工业必须在技术上进行重大投资,并需要价值链所有成员作出承诺。他还表示:“作为地球上回收性最好的材料之一,铝的回收量可能会增加约 183%左右。总的来说,根据我们的计算结果,与 2050 年相比,目前,铝行业所有提高回收率和资源效率的举措可以实现减少 20%的二氧化碳排放的目标。我们相信,铝工业在减少其生产过程中的温室气体排放以及增加回收利用的各种行动和倡议,将使其在应对气候变化方面取得良好的效果并成能为矿业领域降碳的最佳实践者。”

今年 3 月,IAI 发布了《2050 年全球铝行业温室气体减排路径》报告,报告确定了未来 30 年减排的 3 条路径,即电力脱碳、减少直接排放、提高回收利用和资源效率。

(摘自中国有色网)