



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

李泽文¹, 刘政¹, 赵军超¹, 孙梦桐²

(1. 江西理工大学 机电工程学院, 赣州 341000;

2. 江西理工大学 材料科学与工程学院, 赣州 341000)

摘要: 采用数值模拟, 建立磁场二维有限元模型和流场三维有限元模型, 研究电磁搅拌参数对磁感应强度、电磁力、半固态铝合金熔体最大流速的影响, 以及对初生相的影响。结果表明: 由于集肤效应, 熔体中电磁力由内向外逐渐增强, 磁感应强度随电磁频率的增大呈现出“中心小, 边缘大”的特征, 且在结晶器径向的 $0.80R\sim0.85R$ 处达到最大值; 在电磁搅拌频率为 25 Hz、电流为 4 A、搅拌时间为 12 s 时, 熔体流速较其他参数最大; 半固态 A356 铝合金在 650 °C 浇铸后恒温电磁搅拌, 在电磁搅拌参数为 30 Hz、4 A 时搅拌 12 s 后, 590 °C 保温 10 min 得到的初生相形貌最佳, 此时平均等积圆直径为 80.6 μm, 形状因子为 0.78。

关键词: 半固态; A356 铝合金; 电磁场; 流场; 数值模拟; 电磁搅拌

文章编号: 1004-0609(2020)-06-1297-10

中图分类号: TG146; TG244

文献标志码: A

半固态加工技术是轻合金加工领域中具潜力的一种新型加工技术^[1], 应用前景广阔。而电磁搅拌技术在半固态加工中扮演者重要的角色。电磁搅拌^[2]是一种无接触式搅拌, 相比于其他搅拌方式它最大的优点在于对合金零污染、密闭环境防止合金氧化、搅拌参数易控制等。铝合金在电磁搅拌下的凝固是一个非平衡过程, 熔体流动具有混沌性和分形性等特征^[3-5], 传统实验难以辨识和解释这些现象。而采用计算机模拟技术加上实验辅助来进一步研究半固态铝合金的凝固过程, 不仅节约资源、方便快捷, 同时还具备可行性分析、精确性、直观性等优点。目前, 已有许多研究人员运用数值模拟和实验研究相结合的方法, 并且得出了许多优异的成果^[6-11]。陶文疏等^[12]通过建立电磁场、温度场和流场三场耦合的二维数值模型, 模拟结果表明, 搅拌频率和搅拌电流增加时会使电磁场增大且分布不均匀, 从而造成浆料流速迅速增大并且分布不均匀; 得出电磁搅拌法制备 A356 铝合金浆料的最佳工艺参数为搅拌频率 28~30 Hz、搅拌电流 48~51 A。张嘉艺等^[13]基于 Fluent 软件, 分别模拟了在不同电磁搅拌频率和不同电磁搅拌时间的条件下半固态 A356 铝合金熔体在坩埚中的流动规律, 获得了微粒在受迫运动下的混沌运动轨迹, 发现熔体混沌流动规律受时间

和电磁频率的影响。陈志平等^[14]运用 ANSYS15.0 软件模拟半固态 A356 铝合金浆料在非圆柱型坩埚中受不同频率的电磁搅拌下的流体运动规律, 发现在电磁频率为 30 Hz、长短轴比例为 1.1 的椭圆柱型坩埚下其长轴和短轴上存在合适的大流速且两轴间的流速差最小, 所制备的半固态铝合金浆料更优质。半固态 A356 铝合金凝固过程又是一个动态过程^[15], 电磁搅拌产生的电磁力搅动浆料引起流场的变化影响到合金熔体中溶质扩散与分布, 继而影响合金熔体的流动^[16]。本工作运用数值模拟与实验研究结合, 通过同时控制电磁搅拌器的电流和频率, 分析半固态 A356 熔体的流动规律及一定范围内的最佳搅拌参数。

1 数值模拟

1.1 模拟理论

电磁搅拌器中旋转磁场作用于铝合金熔体上, 产生电磁力, 而电磁力的水平分力驱动熔体发生强迫对流运动达到搅拌效果^[17], 从而改善铸坯质量。电磁场分析时, 首先, 定义单元、自由度和材料属性, 再建立平面模型, 网格划分, 最后选取边界条件并施加载

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(20142bab206012)

收稿日期: 2019-06-14; 修订日期: 2019-10-26

通信作者: 刘政, 教授, 博士; 电话: 0797-8312137; E-mail: liukk66@163.com

荷; 流场分析时, 用 Solidworks 建立模型导入到 ICEM CFD 进行网格划分后选择 Walls 界面保存为 MSH 文件, 再将文件导入到 Fluent 模块, 设置材料参数, 采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 再用 MHD 源项^[18]补充 $k-\varepsilon$ 湍流方程, 模拟流体在磁场中的运动。

1.2 模拟计算

流场控制方程如下:

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + F_s \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (v \rho h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h \quad (3)$$

式中: ρ 为合金液态密度; v 为流动速率; μ 为动力黏度; λ 为热导系数; p 为压力; F_s 动量方程源项; S_h 为能量守恒方程的源项。

电磁场模型理论基础为 Maxwell 方程组

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_f \quad (6)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (7)$$

在各向同性的媒质中, 有关场量之间的本构关系、欧姆定律和电磁力计算公式分别为

$$D = \epsilon E \quad (8)$$

$$B = \mu H \quad (9)$$

$$J = \sigma E \quad (10)$$

$$F = \frac{1}{2} Re(J \times B) \quad (11)$$

式中: E 为电场强度; B 为磁通密度; H 为磁场强度; J 为电流密度; D 为电位移; σ 为电导率; ρ_f 为自由电荷体密度; ϵ 为介电常数、 μ 为磁导率; F 为电磁力时域平均值。

1.3 模型假设

1) 假设合金熔体边界不与紫铜坩埚发生反应, 即不考虑边界位移;

2) 为了简化电磁搅拌器结构, 将搅拌器内水循环、不锈钢外壳、绝缘保护层均不考虑在内, 结晶器壁厚忽略;

3) 合金浆料为不可压缩流体且应力应变呈线性相关;

4) 假设电磁搅拌前熔体各部分温度不变黏度相同;

5) 电磁搅拌器内三对极线圈简化为相同载流区;

6) 假设流场不影响电磁场, 且忽略温度对材料黏度和磁导率等参数的影响, 即模拟中 ϵ 、 μ 、 σ 为不变常数。

1.4 模型与网格划分

结合上述 Maxwell 方程及假设, 使用 ANSYS15.0 软件建立电磁搅拌器简化二维有限元模型, 图 1 所示为电磁搅拌器模型与网格划分。先建立相关模型, 然后赋予模型主要物理参数, 接着进行网格划分和确定边界条件, 并进行加载和求解, 对比后进一步修正计算结果, 最后收集相关数据。取第一类边界条件, 即初始条件为电磁搅拌器外表面磁力线平行。

流场分析时, 由于铝合金熔体盛放于结晶器内, 研究熔体流速只需建立结晶器模型, 结晶器为半径 30 mm, 高 100 mm 的圆柱形铸型, 不考虑其壁厚的三维简化模型和网格划分如图 2 所示。在 Solidworks 软件

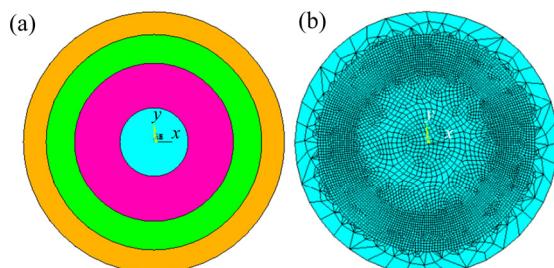


图 1 电磁搅拌器模型与网格划分

Fig. 1 Electromagnetic stirrer model(a) and mesh division(b)

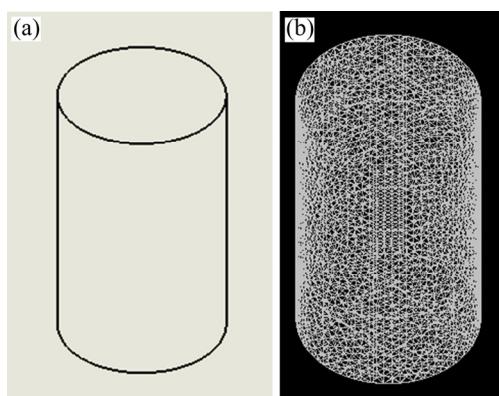


图 2 结晶器模型与网格划分

Fig. 2 Mold model(a) and mesh division(b) of crystallizer

中画一个模型三维实体, 再将模型导入 ICEM CFD 软件中进行网格划分, 划分完导入 Fluent 软件进行流场分析, 设定圆柱体所有面为 Walls 界面。

2 模拟结果

2.1 电磁搅拌参数对磁感应强度以及电磁力的影响

图 3 所示为不同电磁频率下磁感应强度沿结晶器半径方向的变化。由图 3 可知, 当励磁电流(4 A)一定时, 改变电磁频率对结晶器中磁感应强度分布有一定影响。随着电磁频率的增大, 结晶器内最大磁感应强度逐渐增强, 磁感应强度沿中心向边缘先缓慢增强后急促减弱, 呈现出“中心小, 边缘大”的磁感应强度分布特点。而且随着电磁频率的增加, 电磁搅拌强度的作用范围(即电磁搅拌强度曲线沿结晶器半径方向开始增大至最后回落至最小值的区间)也是逐渐增大的, 此外, 电磁频率越大, 电磁搅拌强度曲线开始增大的起点位置距离结晶器中心越近, 见图 3 所示。这有利于在结晶器内较大区域对铝合金熔体实施搅拌。此外, 观察还发现: 无论是在多大电磁频率搅拌下, 结晶器中出现最大电磁搅拌强度的位置大致是固定的(对于本研究的结晶器出现在径向 22.5~25 mm 之处), 并没有随着电磁频率的变化而明显变动。与先前研究的结果基本一致, 即电磁搅拌强度的最大值出现在径向的大约 $0.80R\sim0.85R$ 处^[19-20]。

图 4 所示为不同电磁频率和不同励磁电流下电磁力沿结晶器半径方向的分布情况。图 4(a)所示为励磁电流为 4 A 时电磁力沿结晶器半径方向上的分布情

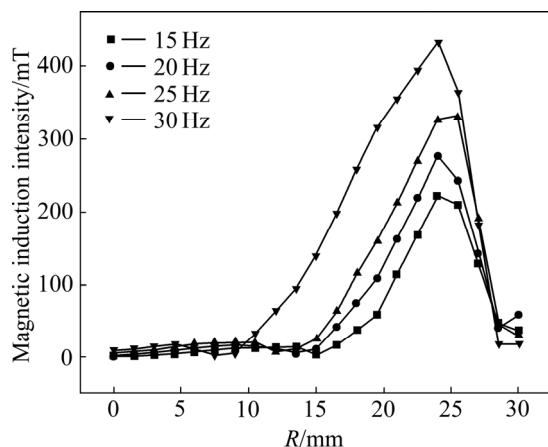


图 3 不同电磁频率下电磁搅拌强度沿结晶器半径方向的分布

Fig. 3 Electromagnetic stirring intensity distribution distance from center along mould radius at different electromagnetic frequencies

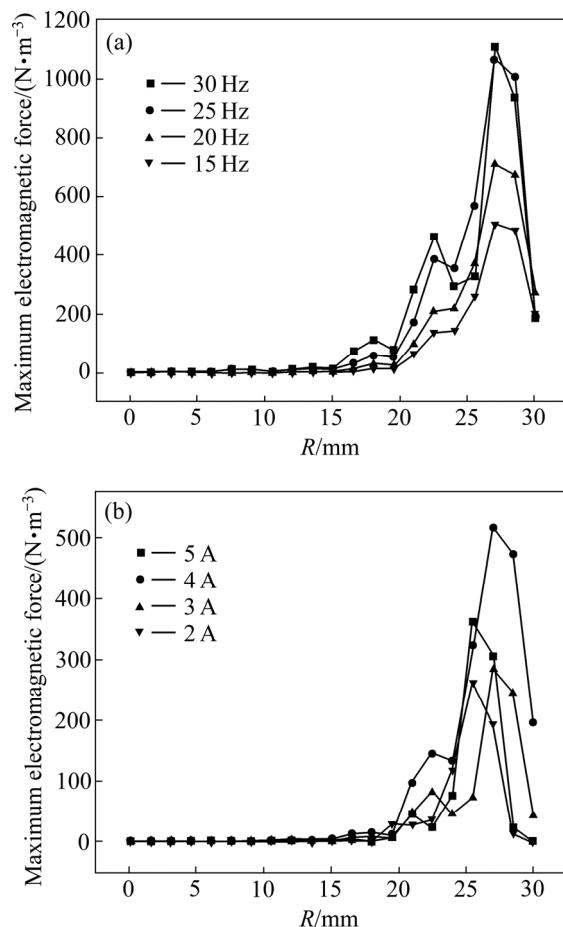


图 4 电磁力沿结晶器半径方向的分布

Fig. 4 Electromagnetic force distribution along mould radius: (a) Different electromagnetic frequencies; (b) Different exciting currents

况。由图 4(a)可知, 不论电磁频率多大, 靠近结晶器中心铝合金熔体受到的电磁力都非常小, 几乎没有, 靠近结晶器边缘, 铝合金熔体受到的电磁力较大, 呈现出先增大后减小的趋势, 电磁频率越大, 铝合金熔体受到的最大电磁力越大, 且电磁频率 30 Hz 下的最大电磁力比电磁频率 15 Hz 下的最大电磁力两倍还大(见表 1 所示)。图 4(b)所示为电磁频率为 15 Hz 时不同励磁电流下电磁力沿结晶器半径的变化。由图 4(b)可知, 励磁电流 4 A 的条件下, 铝合金熔体受到的最大电磁力最大, 不同励磁电流下都呈现相同的规律: 结晶器中心端电磁力小, 边缘电磁力大。这是由于集肤效应, 磁感应强度和电磁力沿着半径方向逐渐增大^[10, 12]。当电磁频率和励磁电流增大时, 集肤效应越明显, 电磁场也逐渐增强。

在电磁搅拌作用下, 结晶器内的熔体受电磁力产生运动, 驱动力主要集中在径向, 而轴向电磁力相对数量级较小, 所以表 1 为每个对应的电磁搅拌参数下得出的径向最大电磁力。由表 1 可知, 当电流一定时,

随着电磁频率的增大,熔体径向最大电磁力逐渐增强,如,励磁电流为3 A时,电磁频率30 Hz所产生的最大电磁力约为15 Hz下的3倍。当电磁频率一定时,改变电流得到的最大电磁力各不相同,30 Hz下,设置不同电流得到的最大电磁力相差最小。所以,在电磁频率为25~30 Hz、电流为4~5 A的条件下,最大电磁力较为均匀,且30 Hz、4 A下得到最大电磁力。

表1 不同电磁频率和不同电流下的最大电磁力

Table 1 Maximum electromagnetic force at different electromagnetic frequencies and currents

Current/ A	Maximum electromagnetic force, F_{\max} /(N·m ⁻³)			
	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz
2	349.03	400.79	554.358	1009.61
3	299.91	413.94	606.08	985.4
4	504	707.13	1064	1104.7
5	394.02	459.7	973.02	1040

2.2 电磁搅拌参数对结晶器中熔体流场的影响

将划分好网格的3D模型导入Fluent软件,在轴向(z轴)设置Gravity参数为-9.87,将上述得到的最大电磁力作为流场分析负载,得到不同电磁频率和不同电流强度下对应的切向、周向及轴向速度即(x轴、y轴、z轴)如图5所示。由图5(a)可知,在电流强度一定时,随着电磁频率的增大,结晶器中熔体在x轴上的最大速度逐渐增大,且在4 A、25 Hz时达到最大;继续增大电磁频率至30 Hz,最大流速基本不变。而在电流强度一定时,随着电磁频率的增大,结晶器中熔体在y轴上的最大速度逐渐增大,如图5(b)所示;z轴上最大速度随着电磁频率增加总体增大但增速不明显,且在30 Hz下,z向速度几乎相同,如图5(c)所示。由图5还可知,电磁频率为30 Hz时,不同电流强度下的x轴、y轴、z轴速度最为接近。x轴与y轴上电流强度为4 A时有最大速度,z轴上30 Hz时电流强度不同最大速度几乎相同。在重力与电磁力的作用下,熔体中最大流速在x轴、y轴、z轴均存在一定的差值,z轴相比于x轴、y轴差值较小;电磁频率越大,x轴、y轴的流速差值越大。而流速差能反应熔体流动剧烈程度,当电磁频率和励磁电流较小时,产生的电磁力太小,搅拌不充分;当电磁频率和励磁电流较大时,电磁力太大,搅拌剧烈,易发生湍流现象。所以,适当的电磁频率和励磁电流能产生适当的流速差,适当的流速差能有效改善半固态铝合金的形核动力学,形核动力学改变导致形核率增加,从而使得晶粒有效细化^[21]。

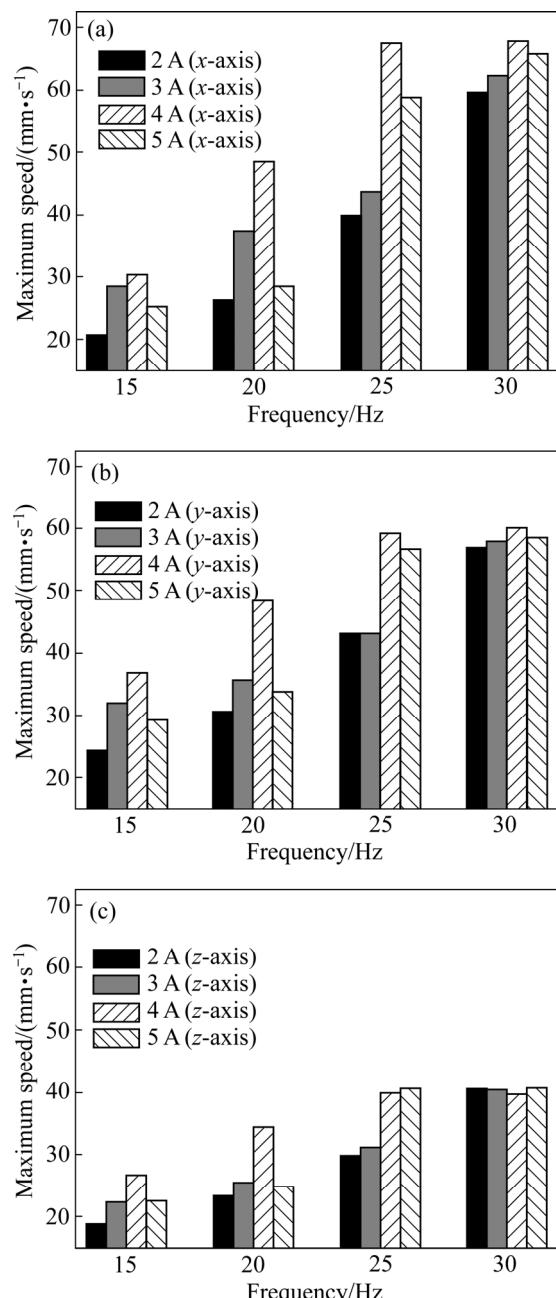


图5 不同电磁频率与励磁电流下结晶器中熔体的最大流速

Fig. 5 Maximum melt rate in mold under different electromagnetic frequency and exciting current: (a) x-axis; (b) y-axis; (c) z-axis

3 实验流程与结果分析

3.1 实验过程

实验所用M-EMS DGMRG-230型结晶区电磁搅拌器由三相两极式实心转子异步电动机组成,其中电

磁搅拌器参数为: 功率 98 kW, 额定电压 380 V, 电流 1~150 A, 频率 1~30 Hz, 极对数 3, 磁轭外径 230 mm, 内径 190 mm, 结晶器材料为紫铜, 半径 30 mm, 高 100 mm。模拟参数定义: 磁导率(定子铁芯 3000、空气和半固态铝合金浆料 1), 电阻率(通电线圈 1.7×10^{-8} W·m、半固态铝合金 2.1×10^{-7} W·m)。实验材料 A356 铝合金实际成分在 Magix(PW2424)X 下得出如表 2 所示。

表 2 实验用 A356 合金成分

Table 2 A356 alloy composition for experiments (mass fraction, %)

Si	Mg	Fe	S	Cu
7.140	0.330	0.135	0.011	0.002
Mn	Zn	Ti	Zr	Al
0.012	0.021	0.021	0.004	Bal.

将块状 A356 铝合金放置于石墨坩埚中, 石墨坩埚整体放置于预先设置温度为 720 °C 的 SG 2-6-10 型电阻炉中将合金熔化, 待接近形成熔池时加入覆盖剂(50%NaCl+50%KCl, 质量分数)20 g 左右, 10 min 后将熔池表面的残渣去除, 将电阻炉温度再升至 750 °C, 熔体静置 10 min 后加入 0.2%~0.7% 炉料质量的精炼剂(0.3%~0.5%C₂C₁₆, 质量分数), 分 2~3 次压入熔池, 每次精炼控制在 5 min 内, 总体精炼时间不超过 15 min。精炼完后再静置 10 min, 将熔池中残渣去除, 静置几分钟后将电阻炉温度降至 630 °C 后将浆料匀速缓慢的倒入到事先 350 °C 预热的紫铜铸型中, 将铸型放置于 M-EMS DGMRG-230 型结晶区电磁搅拌器中设置参数(频率: 15 Hz、20 Hz、25 Hz、30 Hz; 电流: 2 A、3 A、4 A、5 A; 时间 12 s)电磁搅拌后放入保温炉 590 °C 保温 5~10 min, 淬火脱模。

不同参数条件下得到的不同铸锭, 在每个铸锭同一水平处切取一个厚度 10 mm 的小圆柱片, 切取过中心点的一个 10 mm×10 mm×10 mm 正方体作为金相试样。试样经砂纸粗磨和金刚石研磨膏抛光后, 先用酒精擦拭, 再用 0.5%HF(体积分数)水溶液进行腐蚀, 8 s 后用清水冲洗干净, 再次用酒精擦拭后用吹风机吹干后在 ZEISS Axioskop 型显微镜进行金相组织图片拍摄。用 Image-Pro-Plus 软件对图片中显微组织初生相的平均形状因子 F 和平均等积圆直径 D 进行测量, 其公式如下:

$$D = 2(A/\pi)^{1/2} \quad (12)$$

$$F = 4\pi A/P^2 \quad (13)$$

式中: A 为凝固组织中初生相面积; P 为凝固组织中初生相周长。

3.2 实验结果

图 6 所示为同一电磁频率(30 Hz)、同一搅拌时间(12 s)、不同电流强度下半固态 A356 铝合金初生相形貌的 OM 像。由图 6(a)可知, 在电流强度为 2 A 时, A356 铝合金初生 α 相比较粗大, 且晶粒大多数呈现出树枝状, 只有个别圆整的晶粒, 经测量此时初生相的平均等积圆直径为 147.8 μm , 形状因子为 0.58。由图 6(b)可知, 在电流强度为 3 A 时, A356 铝合金初生相得到改善, 粗大的树枝状晶粒向短棒状转变, 出现一部分颗粒小较为圆整的晶粒, 此时初生相的平均等积圆直径为 116.9 μm , 形状因子为 0.65。在电流强度为 4 A 时, A356 铝合金初生相明显细化, 并达到最佳形貌, 此时树枝状和短棒状组织大部分被破碎, 同时, 形成椭球状较为细小均匀的晶粒, 如图 6(c)所示, 此时初生相的平均等积圆直径为 80.6 μm , 形状因子为 0.78。由图 6(d)可知, 当电流强度为 5 A 时, A356 铝合金初生相出现树枝状和短棒状组织, 其初生相形貌并没有比图 6(c)的更圆整。此时, 初生相的平均等积圆直径为 92.5 μm , 形状因子为 0.73。图 7 所示为同一电流强度(4 A)、同一搅拌时间(12 s)、不同电磁频率下半固态 A356 铝合金的初生相形貌。电磁频率较低时(15 Hz), 凝固组织中初生相不仅粗大, 而且呈现出树枝状, 几乎没有细小圆整晶粒, 如图 7(a)所示, 此时初生相的平均等积圆直径为 183 μm , 形状因子为 0.53。当频率为 20 Hz 时, 晶粒被破碎, 形状由粗大的树枝状转变为略微细小一点的蔷薇状, 且晶粒间分布较密集, 如图 7(b)所示, 此时初生相的平均等积圆直径为 143.2 μm , 形状因子为 0.57。图 7(c)所示为频率 25 Hz 时的初生相形貌, 蔷薇状晶粒进一步被打碎, 初生相形貌改善明显, 形成短棒状和椭球状晶粒, 此时, 初生相的平均等积圆直径为 107.6 μm , 形状因子为 0.67。如图 7(d)所示, 电磁频率为 30 Hz 时初生相形貌最佳, 出现大部分细小圆整的晶粒, 几乎没有树枝状、蔷薇状、短棒状初生相形貌, 晶粒细小均匀, 细化效果明显。此时初生相的平均等积圆直径为 80.6 μm , 形状因子为 0.78。

图 8(a)所示为 A356 铝合金在不同电流强度下初生相的平均等积圆直径和平均形状因子的变化趋势。

图 8(b)所示为 A356 铝合金在不同电磁频率下的平均

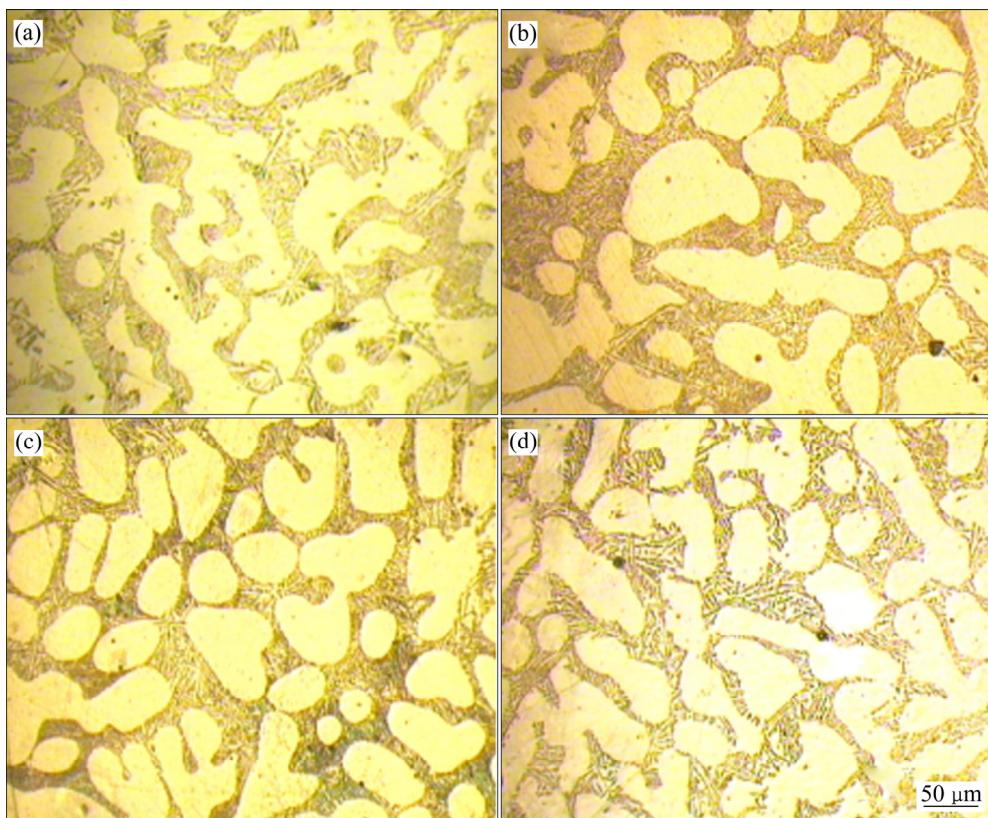


图6 不同电流强度下半固态A356铝合金初生相形貌

Fig. 6 Morphologies of primary phase in semi-solid A356 alloy under different current intensity: (a) 2 A; (b) 3 A; (c) 4 A; (d) 5 A

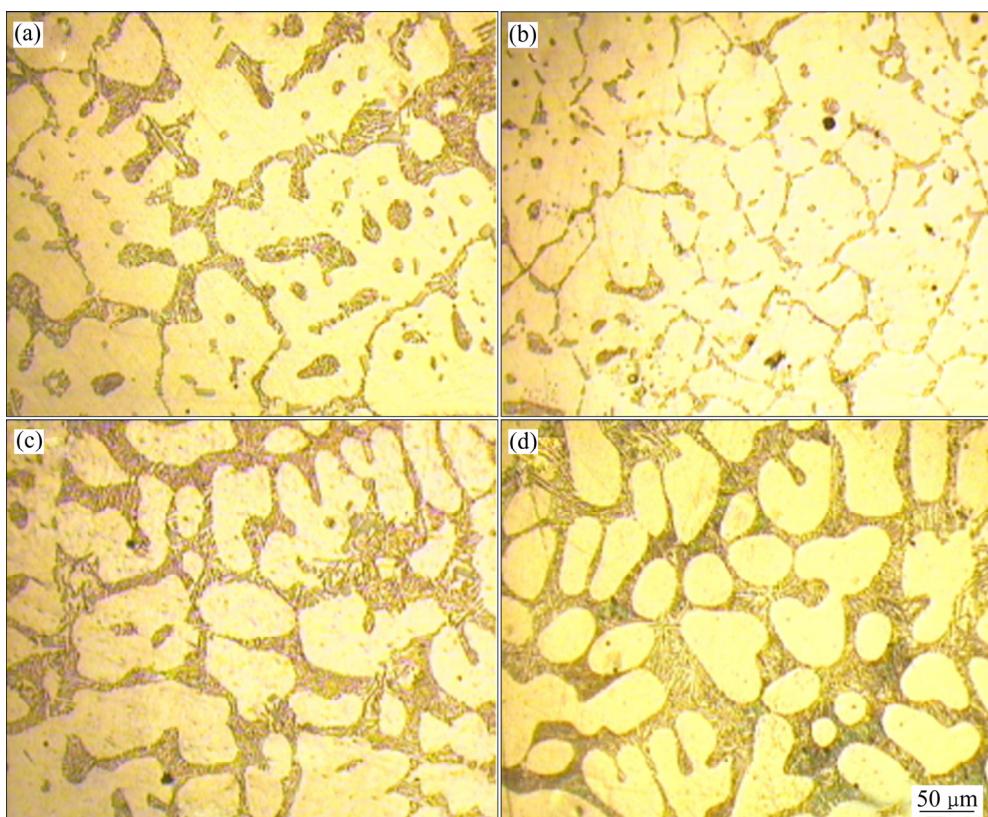


图7 不同电磁频率下半固态A356铝合金初生相形貌

Fig. 7 Morphologies of primary phase in semi-solid A356 alloy at different electromagnetic frequencies: (a) 15 Hz; (b) 20 Hz; (c) 25 Hz; (d) 30 Hz

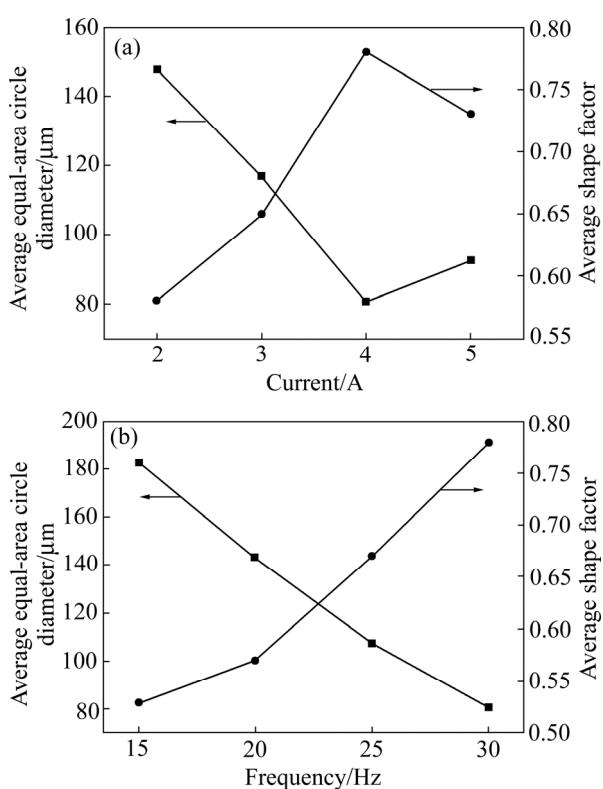


图 8 不同参数下 A356 合金初生相的平均等积圆直径和平均形状因子

Fig. 8 Average equal-area circle diameter and average shape factor of primary phase of A356 alloy under different parameters: (a) Current intensity; (b) Electromagnetic frequencies

等积圆直径和平均形状因子的变化趋势。从图 8(a)可以看出, 当电流强度为 4 A 时, 平均等积圆直径最小, 平均形状因子最大。从图 8(b)可以看出, 当电磁频率为 30 Hz 时, 平均形状因子最大, 平均等积圆直径最小。可知在电磁搅拌频率为 30 Hz, 电流强度为 4 A 时, 初生相形貌达到最佳。

4 分析与讨论

从实验与模拟结果来看, 电磁搅拌频率和电流强度是影响最大电磁力、最大流速以及 A356 铝合金初生相形貌变化的重要因素。电磁搅拌频率越大, 熔体中最大电磁力越大, x 轴、 y 轴、 z 轴总体流速越大, 但是并不是电磁频率越大电流强度越大时熔体的速度越大。在电磁搅拌参数为 4 A、25 Hz 时 x 轴、 y 轴、 z 轴总体流速最大, 电磁搅拌参数为 4 A、30 Hz 时, x

轴、 y 轴、 z 轴总体流速差最小, 由初生相形貌图可知, 流速大不一定搅拌效果最佳, 而流速相对较大且流速差较小时搅拌效果最佳^[17]。电磁搅拌过程中, 适当的工艺参数能获得较好的电磁搅拌效果^[22]。搅拌频率和搅拌电流是电磁搅拌系统中重要的工艺参数。电磁场的大小、磁场的分布与搅拌频率息息相关, 在一定频率范围内, 在相同电流 4 A, 不同频率 15 Hz、20 Hz、25 Hz、30 Hz 的情况下, 频率越小, 激发电磁力越小, 流速越小, 熔体搅拌不充分, 初生相未被破碎呈现出粗大、集中分布; 频率越大, 激发电磁力越大, 流速越大, 初生相组织充分破碎, 得到细小、圆整、分布均匀、效果较佳的初生相形貌。搅拌电流同样对电磁场强度和电磁力大小有影响, 在同一频率 30 Hz, 不同电流 2 A、3 A、4 A、5 A 的条件下, 熔体流速 4 A 时较其他条件下更大, 流速差最小, 得到的初生相更佳。而电流更大时, 流速反而变小, 初生相形貌不如 4 A 时细小、圆整。

半固态 A356 铝合金凝固时, 在适当电磁频率搅拌作用下, 结晶器的 x 轴、 y 轴和 z 轴方向上都存在熔体流动, 且熔体流速存在差异, 使得熔体中每个微粒都在电磁场内做不规则的三维运动, 并产生混沌对流^[23], 使流场内的温度和浓度均匀化。当初生相从熔体中逐渐析出时, 由于初生相与熔体的电导率有很大差异, 这就使得析出的初生相与周围熔体受到的电磁力有所不同, 加速了初生相与周围熔体的相对运动, 且随着频率的适当增加, 混沌程度越大^[23-24], 相对运动亦越大。液相的紊流流动加剧了固/液界面的温度起伏, 可使凝固区的局部温度超过固相的熔点, 使枝晶臂发生局部熔化而从界面分离。同时, 流动的熔体可以产生剪切力剪断枝晶臂, 或许会加速枝晶臂根部的溶质扩散和重熔, 还可能使枝晶根部产生剪切力, 诱发再结晶, 使熔体沿新晶界渗透使枝晶臂熔断。这些熔断的枝晶臂被流动的熔体带动产生新晶粒, 与枝晶之间的互相冲刷从而细化初生相枝晶。所以在液相流动作用下, 宏观凝固组织得到改变的根本原因就在于熔体的流动显著增加了形核率, 而熔体的混沌对流均匀了其温度场和浓度场, 保证了初生相各向生长基本趋于一致, 形成等轴晶, 具有较好的圆整度。

5 结论

1) 电磁搅拌作用下, 坩埚中半固态铝合金熔体受

到电磁力作用而产生水平和竖直方向上的流动，且各个方向上的流速大小不一，熔体产生的运动不是单一的水平旋转运动，而是方向不定的混沌流动。

2) 在实验研究范围内，半固态A356铝合金在搅拌频率30 Hz、搅拌电流4 A、搅拌时间12 s时，得到的初生相最细小、圆整，平均等积圆直径为80.6 μm，形状因子为0.78。

3) 随着电磁频率增加，电磁搅拌强度作用范围逐渐增大，磁感应强度呈现出“中心小，边缘大”的特征，且在0.8~0.85R处电磁搅拌强度最大；由于集肤效应，电磁力随半径方向逐渐增大，且电磁频率与励磁电流越大，集肤效应越明显，边缘电磁力越大。

4) 随着电磁频率和励磁电流的增大，熔体流速总体逐渐增大，在电磁搅拌参数为4 A、25 Hz时，x轴、y轴、z轴流速最大，分别为67.79 mm/s、60 mm/s和40.3 mm/s，并非流速越大得到的初生相越好，4 A、30 Hz时初生相最细小、圆整，此时最大流速分别为69.27 mm/s、58.84 mm/s和39.77 mm/s。

REFERENCES

- [1] NAFISI S, GHOMASHCHI R. Microstructural evolution of electromagnetically stirred feedstock SSM billets during reheating process[J]. Metallogr Microstruct Anal, 2013, 2: 96–106.
- [2] POOLE G M, HEYEN M, NASTAC L, EL-KADDAH N. Numerical modeling of macrosegregation in binary alloys solidifying in the presence of electromagnetic stirring[J]. Metall Mater Trans B, 2014, 45: 1834–1841.
- [3] WANG Jin-ming, ZHOU Yuan-yuan, LAN Sen, CHEN Tao, LI Jie, YAN Hong-jie, ZHOU Jie-min, TIAN Rui-jiao, TU Yan-wu, LI Wen-ke. Numerical simulation and chaotic analysis of an aluminum holding furnace[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45: 2194–2199.
- [4] LIU Zheng, LIU Xiao-mei. Research on fractal characteristics of primary phase morphology in semi-solid A356 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2009, 22: 421–428.
- [5] HU Zhao-hua, WU Guo-hua, ZHANG Peng, LIU Wen-cai, PANG Song, ZHANG Liang, DING Wen-jiang. Primary phase evolution of rheo-processed ADC12 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(1): 156–162.
- [6] CHEN Rui, XU Qing-yang, LIU Bai-cheng. Simulation of the dendrite morphology and microsegregation in solidification of Al-Cu-Mg aluminum alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2015, 28(2): 173–181.
- [7] SUKHRAM M, ARGYROPOULOS S A. Solidification and melting of aluminum onto circular cylinders under forced convection: experimental measurements and numerical modeling[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45: 1723–1738.
- [8] POOLE G M, HEYEN M, NASTAC L, EL-KADDAH N. Numerical modeling of macrosegregation in binary alloys solidifying in the presence of electromagnetic stirring[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45: 1834–1841.
- [9] 刘政, 徐丽娜, 余昭福, 陈杨政. 电磁场作用下半固态A356-La铝合金初生相形貌及分形维数的研究[J]. 金属学报, 2016, 52(6): 698–706.
LIU Zheng, XU Li-na, YU Zhao-fu, CHEN Yang-zheng. Study on the morphology and fractal dimension of semi-solid A356-La aluminum alloy under electromagnetic fields[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(6): 698–706
- [10] 朱艳丽, 赵君文, 李徽. 电磁搅拌对7A04铝合金大体积半固态浆料组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(11): 2735–2742.
ZHU Yan-li, ZHAO Jun-wen, LI Hui. Effect of electromagnetic stirring on the microstructure of large volume semi-solid slurry of 7A04 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(11): 2735–2742.
- [11] 刘政, 刘小梅, 朱涛, 湛庆春. 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(8): 272–280.
LIU Zheng, LIU Xiao-mei, ZHU Tao, CHEN Qing-chun. Effect of low frequency electromagnetic stirring on the distribution of rare earths in semi-solid aluminum alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(8): 272–280.
- [12] 陶文硫, 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.
TAO Wen-liu, ZHAO Sheng-dun, LIN Wen-jie. A356 aluminum alloy semi-solid slurry electromagnetic stirring process numerical simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 50–57.
- [13] 刘政, 张嘉艺. 混沌对流中不同稀土元素对半固态铝合金初生相形貌研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 77–85.
LIU Zheng, ZHANG Jia-yi. Study on primary morphology

- of semi-solid aluminum alloy with different rare earth elements in chaotic convection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 77–85.
- [14] 刘政, 陈志平, 陈涛. 坩埚尺寸和电磁频率对半固态A356铝合金浆料流动的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(3): 435–442.
LIU Zheng, CHEN Zhi-ping, CHEN Tao. Effect of crucible size and electromagnetic frequency on the flow of semi-solid A356 aluminum alloy slurry[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(3): 435–442.
- [15] 唐培, 梅德庆, 姚喆赫, 陈子辰. 半固态A356铝合金微凸台阵列触变成形充型过程数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3334–3341.
TANG Pei, MEI De-qing, YAO Zhe-he, CHEN Zi-chen. Semi-solid A356 aluminum alloy micro-convex table array touch forming process numerical simulation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(12): 3334–3341.
- [16] 陈兴润, 张志峰, 徐骏, 石力开. 电磁搅拌法制备半固态浆料过程电磁场、流场和温度场的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 937–945.
CHEN Xing-run, ZHANG Zhi-feng, XU Jun, SHI Li-kai. Numerical simulation of electromagnetic field, flow field and temperature field in the preparation of semi-solid slurry by electromagnetic stirring[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(5): 937–945.
- [17] 贺青云. 液态包层复杂几何构件下的MHD流动、传热和氚输运研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
HE Qing-yun. Study on MHD flow, heat transfer and tritium transport under liquid cladding complex geometric components[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [18] VERTNIK R, MRAMOR K, ŠARLER B. Solution of three-dimensional temperature and turbulent velocity field in continuously cast steel billets with electromagnetic stirring by a meshless method[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019, 104(3): 347–363.
- [19] 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.
CHEN Zhi-ping, LIU Zheng, CHEN Tao. Effect of crucible radius on electromagnetic field distribution of semi-solid A356 slurry prepared by electromagnetic stirring[J]. Special casting and colored alloys, 2017, 37(9): 961–965.
- [20] 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): 1287–1293.
CHEN Zhi-ping, LIU Zheng, CHEN Tao. Electromagnetic stirring of semi-solid aluminum alloy magnetic field induction strength optimization[J]. Foundry, 2017, 66(12): 1287–1293.
- [21] LI Ning, ZHANG Rong, ZHANG Li-min, XING Hui, YIN Peng-fei, WU Yao-yan. Study on grain refinement mechanism of hypoeutectic Al-7%Si alloy under low voltage alternating current pulse[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(2): 192–200.
- [22] FARZAM M N, AASHURI H. The effects of annular electromagnetic stirring parameters on microstructure evolution of rheocast AZ91 magnesium alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 90(4): 181–193.
- [23] 刘政, 张嘉艺, 余昭福. 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): 3026–3032.
LIU Zheng, ZHANG Jia yi, YU Zhao-fu. Simulation and analysis of chaotic characteristics of aluminum alloy melt flow under electromagnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(11): 3026–3032.
- [24] 刘政, 张嘉艺, 罗浩林, 邓可月. 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.
LIU Zheng, ZHANG Jia yi, LUO Hao-lin, DENG Ke-yue. Study on the evolution of primary pitting of the semi-solid A356 aluminum alloy under chaotic flow[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(2): 177–183.

Numerical simulation and experimental research on electromagnetic field-flow field during solidification of semi-solid A356 aluminum alloy under electromagnetic stirring

LI Ze-wen¹, LIU Zheng¹, ZHAO Jun-chao¹, SUN Meng-tong²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering,

Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Material Science and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: A two-dimensional finite element model of magnetic field and a three-dimensional finite element model of flow field were established by using numerical simulation to study the effects of electromagnetic stirring parameters on magnetic induction strength, electromagnetic force, and the maximum flow rate of semi-solid aluminum alloy melt, as well as on the primary phase. The results show that the electromagnetic force in the melt gradually increased from inside to outside due to the skin accumulation effect, and the magnetic induction intensity show the characteristics of “small center and large edge” with the increase of electromagnetic frequency, and reach the maximum value at $0.80R$ – $0.85R$ of the radial direction of the crystallizer. When the electromagnetic stirring frequency is 25 Hz, the current is 4 A, and the stirred time is 12 s, the melt flow rate is the largest compared with other parameters. The morphologies of primary phases of semi-solid A356 aluminum alloy cast at 650 °C are the best after electromagnetic stirring at 590 °C for 10 min at stirring parameters of 590 °C, 30 Hz, 4 A and 12 s. Finally, the microstructure of semi-solid A356 alloy with the average grain equal-area circle diameter of 80.6 μm and the shape factor of 0.78 is obtained.

Key words: semi-solid; A356 aluminum alloy; electromagnetic field; flow field; numerical simulation; Electromagnetic stirring

Foundation item: Projects(51361012, 51864020) supported by the National Natural Science Foundation of China;
Project(20142bab206012) supported by the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China

Received date: 2019-06-14; **Accepted date:** 2019-10-26

Corresponding author: LIU Zheng; Tel: +86-797-8312137; E-mail: liukk66@163.com

(编辑 李艳红)