

等流速下新型脉冲磁场对纯铝凝固组织的影响

李刚¹, 孙亚威¹, 赵振¹, 姚博怀¹, 翟启杰², 龚永勇^{1, 2}

(1. 上海大学理学院, 上海 200444; 2. 上海大学先进凝固技术中心, 上海 200444)

摘要: 以工业纯铝为研究对象, 采用凝固试验、数值模拟和理论分析相结合的方法, 研究了等流速条件下新型脉冲磁场作用下电流强度与周期组合对纯铝凝固组织的影响。结果表明: 新型脉冲磁场能明显细化纯铝凝固组织, 并且流速相同情况下纯铝凝固组织细化效果并不相同。在无隔离网条件下, 通过数值模拟分析发现电磁力密度方向主要指向熔体内部, 并且熔体主要受电磁力峰值作用使液面发生振荡从而产生大量晶核。在有隔离网条件下, 通过动力学分析认为晶核受时均电磁力作用下晶核穿过边界层进入熔体促使晶粒增殖是晶粒细化的主要原因。

关键词: 新型脉冲磁场; 工业纯铝; 等流速; 晶粒细化

为了提高金属材料性能, 通过外加脉冲电流^[1-3]、脉冲电磁场^[4-6]等物理手段解决金属凝固过程中形成的晶粒粗大、组织不均匀、宏观偏析等问题。脉冲磁场因其非接触条件下可有效地改善金属的凝固组织及力学性能而受到材料工作者的广泛关注。翟启杰等人基于脉冲电流能促进固液界面和熔体液面附近形核并形成“结晶雨”, 提出了细化整个铸坯的凝固组织机制^[7-8]。龚永勇等^[9]采用隔离网试验发现晶核主要来源于型壁, 并且在电磁力、重力、粘滞力等作用下漂移进入熔体促进晶粒细化, 从而提出了脉冲磁致振荡技术 (pulsed magneto-oscillation, 简称: PMO)^[9-11]。程书敏等^[12-13]研究了等功率条件下电磁参数对纯铝凝固组织的影响, 提出了在纯铝凝固过程中存在边界层, 其流速几乎为零, 在此区域的晶核主要受电磁阿基米德力和粘滞力的作用跨过边界层进入熔体, 并且研究发现在特定高径比下熔体流速存在极值。Duan等^[14]人为获得较细的镁合金晶粒, 采用新型存在相位差的组合脉冲磁场进行试验发现交叉式组合脉冲磁场作用下熔体的流速最大, 晶粒细化效果较好。Edry^[15]通过数值模拟研究电流强度与脉冲频率引起电磁力变化对纯铝凝固组织的影响, 结果表明, 电流强度增加引起的晶粒尺寸变化大于脉冲频率增加引起的晶粒尺寸变化。

Hua、R.Haghighyeghi等人^[16-17]用复合脉冲磁场研究脉冲频率对Sn-Pb合金与AA7075合金凝固组织的影响, 发现随着频率的变化凝固组织细化效果存在最佳值, 分析认为组合脉冲磁场使金属熔体发生了共振促使枝晶折断形成等轴晶是晶粒细化的主要原因。钟等^[18]对脉冲磁场波形对不同尺寸的铸锭处理研究发现不同尺寸的铸锭对应的最佳细化效果不同, 分析认为不同尺寸铸锭的液面固有频率不同, 当铸锭的液面固有频率与脉冲磁场波形的基频或高次谐波频率对应时, 使熔体液面发生共振产生结晶雨效应从而细化工业纯铝凝固组织。XU^[19]为了研究电磁参数与流速之间的内在关系, 在电流强度以及周期不变的情况下, 仅通过改变电磁场的脉宽影响铝硅合金的凝固组织, 发现熔体的流速随脉宽呈现先增大后减小的规律。当熔体流速最大时对应的凝固组织细化效果最好, 从而认为流速是促使晶粒细化的主要原因。

目前关于流速对金属凝固组织中晶粒细化的影响, 材料工作者并没有形成统一的认识。因此作者采用数值模拟与试验验证相结合的方法研究等流速下新型脉冲磁场的电磁参数对纯铝凝固组织的影响。

作者简介:

李刚(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为脉冲电磁场与金属凝固组织细化。E-mail: LiGang1995@shu.edu.cn

通讯作者:

龚永勇, 男, 博士, 研究员。E-mail: gyy@shu.edu.cn

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

11-1389-08

基金项目:

国家自然科学基金项目(52071194); 国家重点研发计划资助项目(2020YEB2008401)。

收稿日期:

2022-02-15 收到初稿,

2022-03-09 收到修订稿。

1 熔体流场数值模拟

以前采用的常规脉冲磁场其特点是一个周期内只有一个脉冲波并且可变参数较少，而新型脉冲磁场的波形示意图如图1所示，其波形最大的特点在于一个周期中存在多个脉冲波并且可以调节脉冲波时间间隔、脉宽、电流强度、周期等电磁参数。为了确保在不同电流强度与周期的新型脉冲磁场作用下纯铝熔体平均流速接近相等，采用COMSOL Multiphysics有限元软件中的二维轴对称模型如图2所示，如图3为数值模拟的熔体尺寸以及电磁力和流速分析位置示意图。对不同电流强度与周期组合下的纯铝熔体的流场分布进行数值模拟，所取物理性能参数如表1^[20]所示。数值模拟以Maxwell方程组作为流场有限元分析的依据和出发点，其微分方程如下所示：

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times B = -\frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_0 \quad (4)$$

式中： E 为电场强度矢量， B 为磁通密度矢量， D 为电位移矢量， J 为电流密度矢量， ρ_0 为电荷密度。

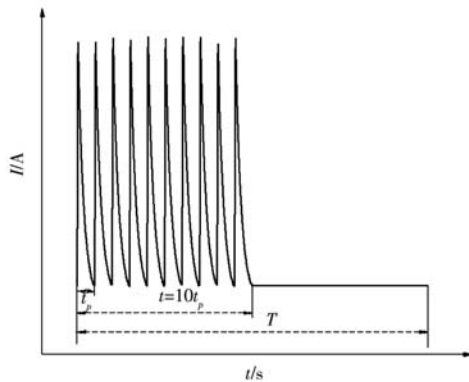


图1 新型脉冲磁场波形示意图

Fig. 1 Waveform diagram of new pulsed magnetic field

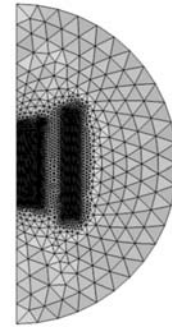


图2 二维轴对称网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two-dimensional axisymmetric grid

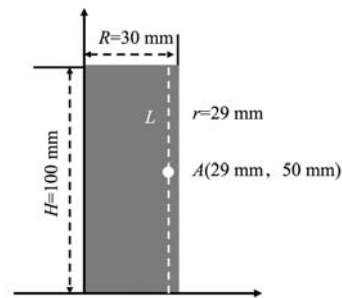


图3 熔体分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of melt analysis

当施加脉冲磁场时，在熔体内产生感应电流 J 与感应磁场 B 之间的相互作用，形成的电磁力密度 f 满足下式：

$$f = J \times B \quad (5)$$

在流场分析中，金属液体是一种不可压缩的牛顿流体，因此熔体运动可以采用质量守恒连续性方程和N-S方程进行表述：

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (6)$$

$$\rho_1 \left\{ \frac{\partial B}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V \right\} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + F_V \quad (7)$$

式中： ρ_1 为液态熔体密度； V 为熔体流速； p 为压强； μ 为熔体粘滞系数； F_V 为体积力。

在数值模拟过程中，对模型进行如下简化：①熔

表1 工业纯铝的物性参数

Table 1 Physical property parameters of industrial pure aluminum

熔体密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	熔体液态 温度 T/K	液相金属 电导率 $\sigma_l / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	固相金属 电导率 $\sigma_s / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	动力粘度 系数 $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1})$	空气相对 磁导率	空气相对 电导率
2 375	933.5	4.13×10^6	9.09×10^6	1.51×10^{-3}	1	1

体的体积不可压缩；②熔体的电导率和磁导率不随温度变化而变化；③熔体液面不发生振荡；④忽略线圈匝数之间空隙。

在建模过程中网格尺寸和模拟时间都会影响数值模拟的准确性，由此采用新型脉冲磁场的电磁参数（电流强度 $I=2\ 500k_i$ A、单个脉冲脉宽 $t_p=10$ ms、脉冲

周期 $T=1k_i$ s）对模型收敛性条件进行求解。不同网格划分以及模拟时间对如图3中截线处流速稳定性的影响进行分析得到了图4，熔体流速的正值代表熔体向 $+z$ 方向流动，而负值代表熔体向 $-z$ 方向流动。由图4a可知，随着网格尺寸的变化导致熔体流速也发生改变，当网格划分到熔体半径的1/25时，流速值趋于稳定。由图4b可

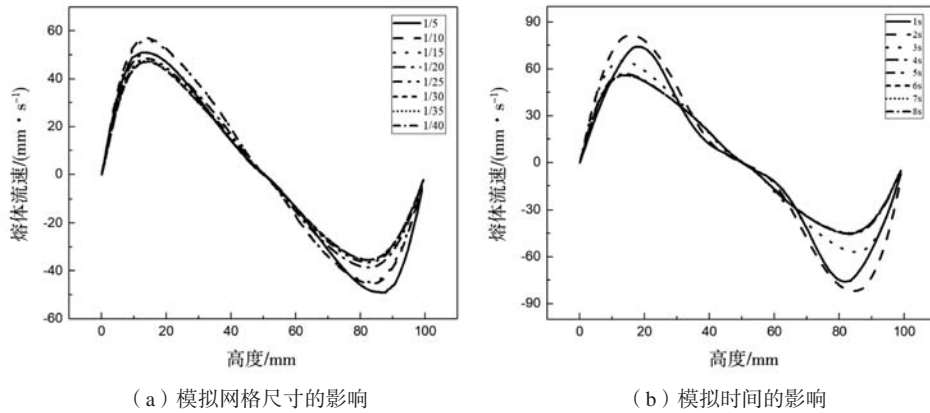


图4 熔体流速稳定性

Fig. 4 Stability of melt flow rate

知，当模拟时间到达4 s也就是参数周期的4倍时，熔体流速值趋于稳定。当网格尺寸熔体半径的1/25并且模拟时间大于参数周期的4倍可以认为此模型模拟的熔体流速结果准确，基于此模型对不同电流峰值与周期参数组合进行数值模拟。

如图3所示为熔体尺寸以及进行分析所取的特征点。通过对熔体流速求平均值，并且保证脉宽以及平均流速大小不变情况下，通过不断调节电流强度与周期得到了熔体流速平均值数值模拟结果如图5所示，熔体中流场以双环流规律分布，上环流流向沿顺时针方向流动，下环流流向沿逆时针方向流动。基于以上数值模拟得到了平均流速相等条件下电流峰值与周期参数的五种组合（ k_i 、 k_i 为试验系数）。

2 试验材料与过程

本工作采用工业纯铝（纯度为99.7%）作为试验材料并且以数值模拟得到的电流强度与脉宽组合参数为凝固试验处理参数。在电阻炉中加热至780 °C后至完全熔化并保温30 min，浇注到喷有氮化硼、预热温度为

700 °C不锈钢坩埚（ $\Phi 60\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ）中，浇注完毕后，预先调整如图5所示计算得到的组合参数，并打开脉冲电源处理直至凝固结束。将冷却后的样品沿轴向对称剖开，用实验砂纸打磨至400目。采用成分配比为 $\text{HCl} : \text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{H}_2\text{O} = 12 : 6 : 1 : 1$ 的腐蚀液对试样进行腐蚀，然后观察其宏观组织。由于液面易产生大量的晶核，为了研究无液面晶核条件下的凝固试验结果，还进行了相同电磁参数的隔离网（液态金属能够自由穿过，而晶粒无法穿过）试验，将隔离网置于不锈钢坩埚上面并固定一起预热700 °C，然后将液态金属浇入放置有隔离网的不锈钢坩埚中，依然采用如图5的新型脉冲磁场参数以及相同的操作流程对纯铝进行处理，最后观察其宏观组织。

3 试验结果

工业纯铝在等流速下经不同电流强度与周期组合参数处理后获得的宏观组织如图6、图7所示，由图6a、图7a可知，未施加新型脉冲磁场时，凝固组织由大量粗大柱状晶和底部少量粗大等轴晶组成。施加新型

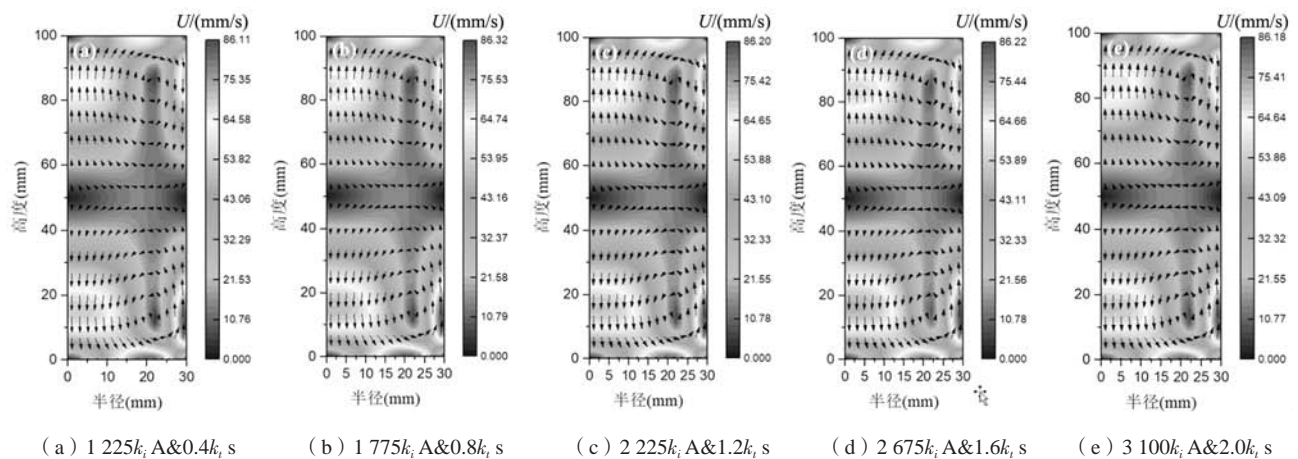
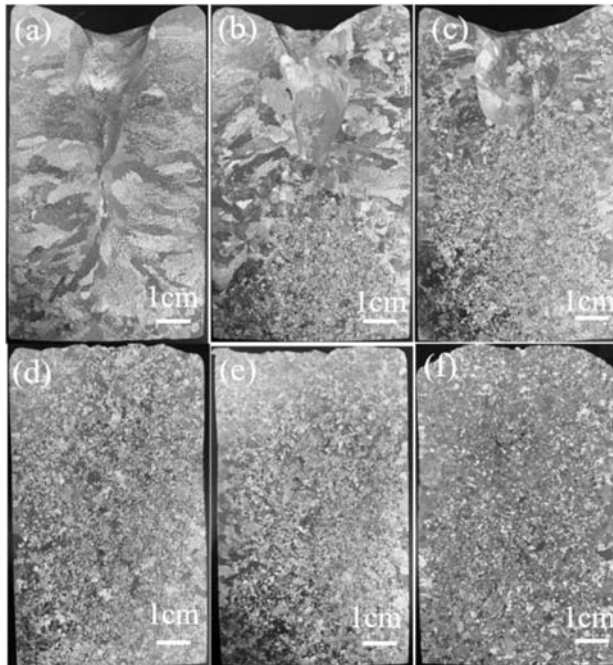


图5 熔体内流场分布

Fig. 5 Flow field distribution in melt

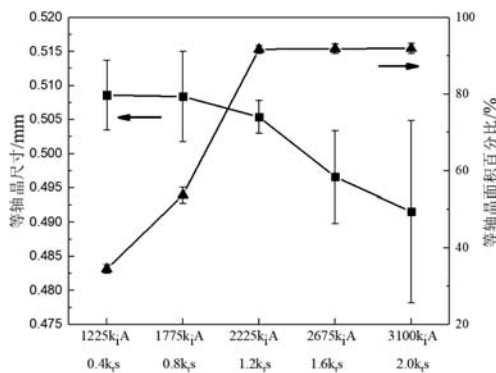


(a) 对比样; (b) $1\ 225k_i\ A\&0.4k_i\ s$; (c) $1\ 775k_i\ A\&0.8k_i\ s$;
(d) $2\ 225k_i\ A\&1.2k_i\ s$; (e) $2\ 675k_i\ A\&1.6k_i\ s$; (f) $3\ 100k_i\ A\&2.0k_i\ s$

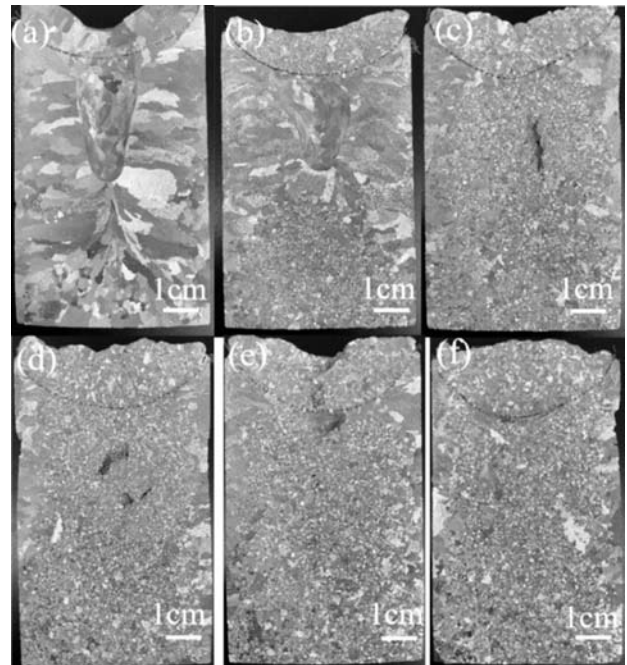
图6 无隔离网试样的纵截面宏观组织

Fig. 6 Macro structure of longitudinal section of sample without isolation net

脉冲磁场时,凝固组织内产生大量细小的等轴晶。对等轴晶尺寸及面积比统计结果如图8a所示,在不加隔离网条件下,在参数达到 $2\ 225k_i\ A\&1.2k_i\ s$ 时等轴晶面积百分比趋于稳定,约为91%。等轴晶尺寸随电流峰值增加而逐渐减小,当参数为 $3\ 100k_i\ A\&2.0k_i\ s$ 时等轴晶尺寸最小 $0.49\ mm$ 。如图8b所示,在加隔离网条件下,



(a) 无隔离网

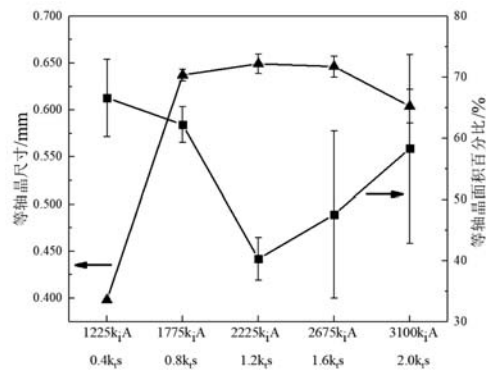


(a) 对比样; (b) $1\ 225k_i\ A\&0.4k_i\ s$; (c) $1\ 775k_i\ A\&0.8k_i\ s$;
(d) $2\ 225k_i\ A\&1.2k_i\ s$; (e) $2\ 675k_i\ A\&1.6k_i\ s$; (f) $3\ 100k_i\ A\&2.0k_i\ s$

图7 有隔离网试样的纵截面宏观组织

Fig. 7 Macro structure of longitudinal section of sample with isolation net

等轴晶面积百分比呈现先增加后减小的规律,并且在 $2\ 225k_i\ A\&1.2k_i\ s$ 时等轴晶面积百分比达到最大值约72%并且等轴晶尺寸最小约 $0.44\ mm$ 。由此可见在是否加隔离网条件下,纯铝凝固组织的最佳细化效果所对应的参数组合并不相同。



(b) 有隔离网

图8 等轴晶尺寸和面积百分比统计

Fig. 8 Statistics of equiaxed crystal size and area percentage

4 讨论与分析

为了分析新型脉冲磁场作用下熔体内电磁力随时间的变化规律,选择了特征点A位置(图3所示)进行电磁力分析,图9为在A点位置径向电磁力随时间变化

关系图,图中电磁力小于零表示电磁力密度指向 $-r$ 方向,电磁力大于零表示指向 $+r$ 方向。由图可知, $-r$ 方向的电磁力远大于 $+r$ 的电磁力,并且在一个周期内电磁力重复作用多次。进一步对A点的电磁力密度进行分析如

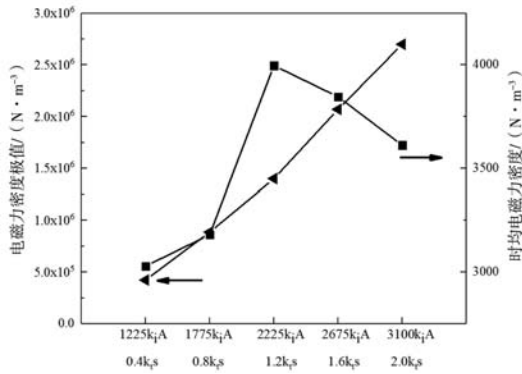


图9 在A点不同参数下的电磁力密度极值与时均电磁力密度
Fig. 9 Extreme value of electromagnetic force density and time average electromagnetic force density under different parameters of point A

图10a-e所示, 由于流速相等, 因此当周期增大时, 电磁力极值逐渐增大, 当电磁力密度到达一定值时, 熔体将被推离型壁表面。在间隙期磁压力数值快速减小为零, 熔体在重力的作用下被推回铸型壁面, 当下一个放电周期来临时, 又重复上述过程, 这样就形成了熔体的往复振荡^[5]。电磁力密度越大, 液面振荡效果越明显, 促使熔体在液面大量形核, 晶核在电磁力、重力和流动的相互作用下漂移至熔体中心和底部, 最终形成结晶雨现象^[18, 21]。由于加隔离网后液面的晶核无法到达熔体中心和底部, 由此从图9、10可知, 电磁力密度作用的间隙期越来越大, 导致晶粒细化效果并不与电磁力密度极值呈现对应关系, 因此对一个周期内电磁力密度求平均值从而得到了时均电磁力密度。随

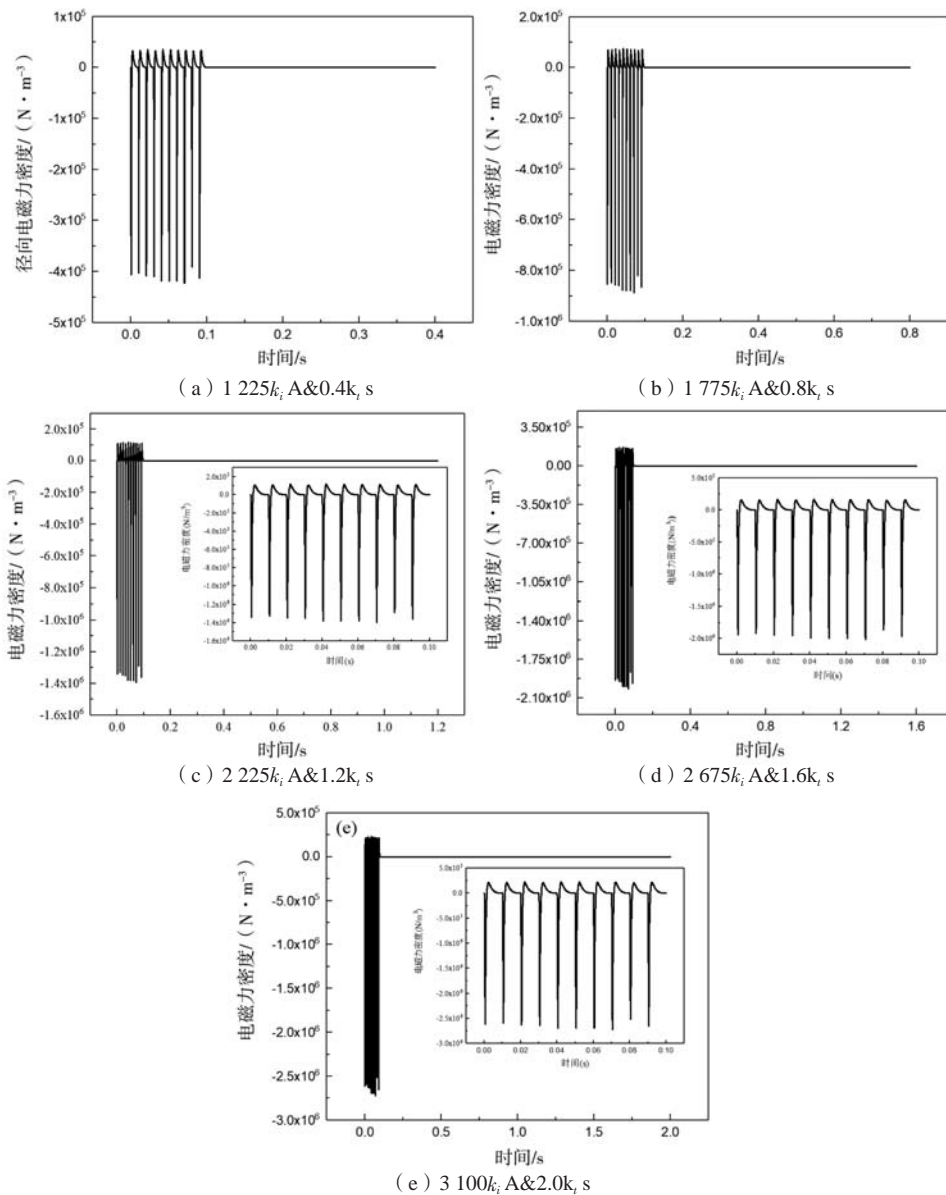


图10 不同参数组合下在A点的电磁力随时间变化关系

Fig. 10 Variation of electromagnetic force at point A with time under different parameter combinations

着电流峰值增大时均电磁力密度呈现先增大后减小的规律,并且在2 225*k_i* A&1.2*k_s* s时的时均电磁力密度达到最大值 $3.997 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ 。

由于液面产生的晶核无法通过隔离网进入熔体,基于李、龚等^[9, 22]人的观点认为晶核主要来自于固液界面前沿即主要来源于型壁。众所周知,晶粒的运动对凝固组织均质化有显著影响,熔体的流动是由整个熔体内的电磁场与感应电流相互作用产生的电磁力引起的,然而在凝固前沿存在一个边界层其中熔体的流速几乎为零。当只考虑晶核的径向运动时,晶核在边界层内晶核受到径向方向的电磁力和粘滞力的作用而运动,因此简化如下^[9, 14]: ①将晶核视为球体; ②不考虑晶核的熔化、团聚、生长; ③主要考虑晶核径向运动; ④晶核主要来源于型壁处。球形晶核受到的电磁力密度^[12]:

$$f_n = (J \times B) \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_l} - 1 \right) \quad (9)$$

球形晶核受到的电磁力:

$$F = \frac{4}{3} \pi r^3 f_n \quad (10)$$

球形晶核受到的粘滞力:

$$F_v = 6\pi\eta r v \quad (11)$$

式中: η 为熔体的粘滞系数; r 为晶核的半径; v 为晶核的径向速度; σ_l 为液相的电导率; σ_s 为固相的电导率。

由于电磁力呈现周期性变化,因此将周期*T*内的时均电磁力表示为:

$$\bar{F} = \frac{\int_{t_1}^t F dt}{T} = \frac{4}{3} \pi r^3 \bar{f}_n \quad (12)$$

球形晶核电磁力以及粘滞力共同作用下满足动量定理:

$$m \frac{dv}{dt} = \bar{F} - 6\pi\eta r v \quad (13)$$

式中: $m = \frac{4}{3} \rho \pi r^3$; ρ 为晶核的密度; t 为电磁力作用的时间,结合公式(9)、(10)、(12)、(13)得到晶核平均速度公式:

$$v = \frac{2r^2 \bar{f}_n}{9\eta} \left(1 - e^{-\frac{9\eta}{2r^2\rho} t} \right) \quad (14)$$

由于晶粒尺寸较小,在电磁力作用下晶粒速度迅速达到最大值,因此对公式(14)进行简化:

$$\bar{v}_{\max} = \frac{2r^2 \bar{f}_n}{9\eta} \quad (15)$$

平均位移可表示为:

$$\bar{x} = \bar{v}_{\max} \cdot t \quad (16)$$

根据公式(15)、(16)可知,晶核的运动速度随着作用时间的增加迅速趋于稳定值,当晶核受到的电磁力不变时大尺寸的晶核获得较大的速度更加容易

跨越边界层进入熔体内部。如图11所示为尺寸50 μm 的晶核在新型脉冲磁场作用下的平均最大速度,在参数为1 225*k_i* A&0.4*k_s* s、1 775*k_i* A&0.8*k_s* s、2 225*k_i* A&1.2*k_s* s、2 675*k_i* A&1.6*k_s* s、3 100*k_i* A&2.0*k_s* s时晶核的平均最大速度分别约为1.11 mm/s、1.17 mm/s、1.47 mm/s、1.41 mm/s、1.32 mm/s。进一步对晶核运动进行分析,如图12为不同参数下50 μm 晶核在2 s内的运动位移关系,在参数为1 225*k_i* A&0.4*k_s* s、1 775*k_i* A&0.8*k_s* s、2 225*k_i* A&1.2*k_s* s、2 675*k_i* A&1.6*k_s* s、3 100*k_i* A&2.0*k_s* s时晶核的位移分别为2.22 mm、2.34 mm、2.94 mm、2.83 mm、2.65 mm。因此参数2 225*k_i* A&1.2*k_s* s作用下的晶核更容易跨越边界层进入熔体内促进晶核增殖。当晶核进入熔体后由于流动引起最大粘滞力密度由公式(11)算得为 $16\ 408 \text{ N/m}^3$,约为最大平均电磁力密度 $3\ 997 \text{ N/m}^3$ 的4倍左右,因此晶核在熔体内主要受粘滞力而跟随熔体运动。

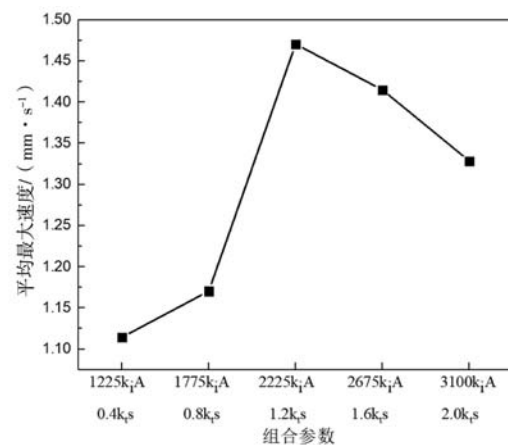


图11 50 μm 晶核运动速度与组合参数关系

Fig. 11 Relationship between combination parameters and moving velocity of 50 μm size grain

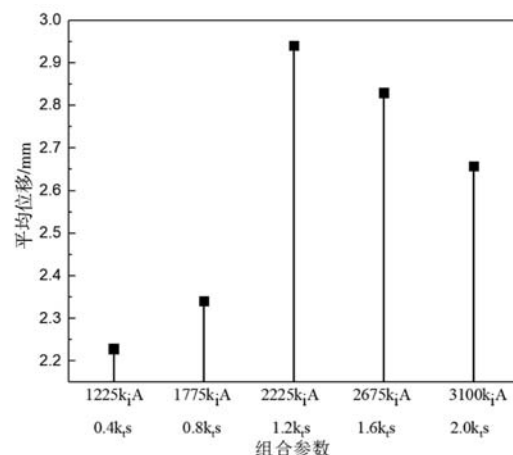


图12 50 μm 晶核在2 s内的运动位移

Fig. 12 Displacements of 50 μm size grains in 2s

5 结论

(1) 当熔体流速相等以及脉宽不变时, 改变新型脉冲磁场的电流强度与周期组合参数对纯铝晶粒尺寸大小影响并不相同, 并且在有无隔离网时, 最小纯铝晶粒尺寸对应的参数也不相同, 分别为 $2.225k_i \text{ A}$ 和 $1.2k_i \text{ s}$ 和 $3.100k_i \text{ A}$ 和 $2.0k_i \text{ s}$ 。

(2) 无隔离网条件下, 感应磁场与感应电流相互

作用产生的电磁力作用于熔体内部, 使熔体液面发生周期性振荡, 电磁力随着电流强度的增大而增大, 较大的电磁力促进结晶雨效应而使大量的等轴晶来源于熔体液面。

(3) 加隔离网条件下, 大量的等轴晶主要来源于熔体型壁处, 并且在电磁力的作用下晶核跨越低流速边界层进入熔体促使晶粒增殖。

参考文献:

- [1] LIAO X, ZHAO Q, LUO J, et al. Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum [J]. *Acta Materialia*, 2007, 55 (9): 3103-3109.
- [2] GAO M, HE G, YANG F, et al. Effect of electric current pulse on tensile strength and elongation of casting ZA27 alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 337: 110-114.
- [3] XU Z, WANG X, LIANG D, et al. Electric current pulse induced grain refinement in pure aluminium [J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 31 (13): 1595-1600.
- [4] 华骏山, 张永杰, 王恩刚, 等. 脉冲磁场下电磁力特性研究: 凝固实验 [J]. *东北大学学报*, 2011, 32 (2): 258-261.
- [5] 华骏山, 张永杰, 王恩刚, 等. 脉冲磁场下电磁力特性研究: 理论分析 [J]. *东北大学学报*, 2011, 32 (1): 72-75.
- [6] ZHANG K, LI Y, YANG Y. Influence of the low voltage pulsed magnetic field on the columnar-to-equiaxed transition during directional solidification of superalloy K4169 [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 48: 9-17.
- [7] YIN Z X, GONG Y Y, LI B, et al. Refining of pure aluminum cast structure by surface pulsed magneto-oscillation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212 (12): 2629-2634.
- [8] ZHAO J, YU J H, HAN K, et al. Improving the solidified structure by optimization of coil configuration in pulsed magneto-oscillation [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2018, 31 (12): 1334-1344.
- [9] GONG Y Y, LUO J, JING J X, et al. Structure refinement of pure aluminum by pulse magneto-oscillation [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 497 (1-2): 147-152.
- [10] EDRY I, ERUKHIMOVITCH A, SHOIHET A, et al. Effect of impurity levels on the structure of solidified aluminum under pulse magneto-oscillation (PMO) [J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48 (24): 8438-8442.
- [11] PEI N, GONG Y Y, LI R X, et al. Mechanism of pulse magneto-oscillation grain refinement on pure Al [J]. *China Foundry*, 2014, 8 (1): 47-50.
- [12] GONG Y Y, CHENG S M, ZHONG Y Y, et al. Influence of electromagnetic parameters on solidification structure of pure Al in the case of identical power [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2018, 25 (8): 854-861.
- [13] CHENG S M, ZHONG Y, XU Z, et al. Effect of flow on solidification structure of pure aluminium under pulse magneto-oscillation [J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 34 (10): 1212-1217.
- [14] DUAN W, YIN S, LIU W, et al. Numerical and experimental studies on solidification of AZ80 magnesium alloy under out-of-phase pulsed magnetic field [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, 9 (1): 166-182.
- [15] EDRY I, SHOIHET A, HAYUN S. On the effects of electric current intensity and pulse frequency on the solidified structure of pure aluminum subjected to pulse magneto-oscillation treatment [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 288: 1-8.
- [16] HUA J, ZHAO Y, WU C. Grain refinement of Sn-Pb alloy under a novel combined pulsed magnetic field during solidification [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211 (3): 463-466.
- [17] HAGHAYEGHI R, KAPRANOS P. Grain refinement of AA7075 alloy under combined magnetic fields [J]. *Materials Letters*, 2015, 151: 38-40.
- [18] 钟玉义, 白亚鸣, 李刚, 等. 脉冲磁致振荡波形对纯铝凝固组织的影响 [J]. *上海金属*, 2021, 43 (4): 92-97.
- [19] XU Y Y, ZHAO J, YE C Y, et al. Distributions of electromagnetic fields and forced flow and their relevance to the grain refinement in Al-Si alloy under the application of pulsed magneto-oscillation [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 10.1007/s40195-021-01242-0.
- [20] JIE J C, YUE S P, LIU J, et al. Revealing the mechanisms for the nucleation and formation of equiaxed grains in commercial purity aluminum by fluid-solid coupling induced by a pulsed magnetic field [J]. *Acta Materialia*, 2021, 208: 1-17.
- [21] LI B, YIN Z X, GONG Y Y, et al. Effect of temperature field on solidification structure of pure Al under pulse magneto-oscillation [J]. *China Foundry*, 2011, 8: 172-176.
- [22] 李祺欣, 俞基浩, 梁冬, 等. 脉冲磁致振荡细化工业纯铝机制研究 [J]. *上海金属*, 2015, 37 (4): 48-51.

Effect of New Pulsed Magnetic Field on Solidification Structure of Pure Aluminum at Constant Flow Rate

LI Gang¹, SUN Ya-wei¹, ZHAO Zhen¹, YAO Bo-huai¹, ZHAI Qi-jie², GONG Yong-yong^{1,2}

(1. School of science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Advanced Solidification Technology Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract:

Taking industrial pure aluminum as the research object, the effects of the combination of current intensity and cycle on the solidification structure of pure aluminum under the action of a new pulsed magnetic field at constant flow rate were studied by means of solidification experiment, numerical simulation and theoretical analysis. The results show that the new pulsed magnetic field can obviously refine the solidified structure of pure aluminum, and the refining effect of solidified structure of pure aluminum is different under the same flow rate. Under the condition of no isolation net, through numerical simulation analysis, it is found that the direction of electromagnetic force density mainly points to the interior of the melt, and the liquid level oscillates due to the peak value of electromagnetic force, resulting in a large number of nuclei. Under the condition of isolation net, through dynamic analysis, it is considered that the grain is mainly affected by time averaged electromagnetic force, and the grain entering the melt through the boundary layer to promote grain proliferation is the main reason for grain refinement.

Key words: new pulsed magnetic field; industrial pure aluminum; constant flow rate; grain refinement
