2017年4月 April 2017

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2017.04.023



# 局部高频磁场作用下金属液面变形和波动行为

李 阳<sup>1,2</sup>, 邓安元<sup>1,2</sup>, 张赛娟<sup>1,2</sup>, 尹传奇<sup>1,2</sup>, 王恩刚<sup>1,2</sup>

东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110004;
 东北大学 冶金学院, 沈阳 110004)

**摘 要**:提出一种约束控制金属鼓包变形的新方法,研究线圈结构参数和电参数对电磁力分布规律的影响以及局 部高频交变磁场作用下金属液面的变形和波动规律。结果表明:线圈结构参数决定电磁力的分布方式及分布范围, 合理设计线圈结构可得到理想的电磁力分布规律;电参数对金属液内部电磁力的大小均有影响,但电流强度起主 导作用;在局部交变磁场作用下,静止的金属液面会发生变形,液面的形状与电磁力的分布形式相同。交变磁场 自身会引起液面波动,波动较弱,电流强度达到1400 A,最大波动幅度在±0.8 mm 以内;高频磁场作用于金属液 面鼓包变形处时,液面波动和鼓包高度明显减弱,液面趋于平缓稳定。

关键词: Ga-In-Sn 合金; 液面波动; 高频磁场; 液面变形; 磁压力

文章编号: 1004-0609(2017)-04-0850-09 中图分类号: TF777 文献标志码: A

在连铸生产中,钢包和结晶器内液面轻微波动有 利于提高相间传质以及渣层对气泡和夹杂物的吸附, 但由于钢包吹氩搅拌<sup>[1]</sup>氩气泡的上浮、结晶器内上返 流的冲击<sup>[2]</sup>,造成金属液面鼓包变形,加剧液面不稳 定性,导致卷渣、钢液二次氧化和铸坯表面裂纹等缺 陷,降低产品质量。故控制金属液面的稳定性对提高 产品质量有重要意义。

磁场作为一种无接触的控制手段,在控制金属液 面的稳定性也有广泛的应用,例如:电磁制动<sup>[3]</sup>、水 口旋流<sup>[4]</sup>等。这些方法均是通过改变金属流股的流动 状态、减弱流股对自由液面的冲击以提高金属液面的 稳定性,且均应用于连铸结晶器内,具有局限性。在 高频磁场中,由于集肤效应电磁力主要集中于金属液 表面,起约束成型的作用,其也可成为约束控制金属 液面的变形和波动行为的途径之一。较多学者对高频 磁场作用下金属液滴和液面的变形及波动行为进行了 基础研究。例如:CONRATH 等<sup>[5]</sup>实验研究了金属液 滴在高频磁场作用下的变形,并提出计算液滴静态变 形的数学模型;MOHRING 等<sup>[6]</sup>定性地研究了磁场频 率为 20 kHz 条件下金属液滴的稳定性,表明当线圈电 流达到某一临界值时,金属液滴即由稳定状态变为不 稳定状态;金百刚等<sup>[7]</sup>、张林涛等<sup>[8]</sup>、那贤昭等<sup>[9]</sup>研究 了电磁软接触过程中弯月面的变形规律;邓安元 等<sup>[10-11]</sup>实验研究了交变磁场和复合磁场作用下金属 液面的变形和波动行为,施加交变磁场可引起金属液 面发生弧形变形和波动,而静磁场可显著抑制交变磁 场作用下液柱的不稳定运动和液面波动;SUDA等<sup>[12]</sup> 实验研究了机械振动产生的金属液表面驻波在高频磁 场作用下的衰减行为,并指出提高磁场强度和频率可 以加快驻波的衰减。

目前的研究多以熔池或金属液柱完全处于交变磁 场中的情况为主<sup>[13-14]</sup>,而对于熔池中金属液局部处于 交变磁场中的变形规律和波动行为研究较少,且缺乏 基本数据。因此,本文作者着重研究了线圈结构参数 和电参数对电磁力分布的影响规律以及静止液面在局 部交变磁场作用下的变形和波动行为,根据其规律提 出了一种具有普适性约束控制金属液面鼓包变形的新 思路,并对其可行性进行了实验验证,为进一步地深 入研究和应用提供依据。

### 1 实验原理

交变磁场的基本理论是 Maxwell 方程组,引入矢

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474065, 51574083); 辽宁省博士科研启动基金项目(20141008); 高等学校学科创新引智计划项目 (B07015); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(L1509003)

收稿日期: 2016-01-25; 修订日期: 2016-06-07

通信作者: 邓安元,教授,博士; 电话: 024-83681716; E-mail: dengay@epm.neu.edu.cn

第27卷第4期

量磁位和标量电位,在磁场作用下,金属液内部的感 应电流密度可表示为

$$\boldsymbol{J} = -j\omega\sigma(\boldsymbol{A} + \nabla\varphi) \tag{1}$$

式中: j 为虚数单位,  $j^2 = -1$ ;  $\omega$  为角频率, rad/s; A 为矢量磁位, T/m;  $\varphi$  为标量单位, V。

感应电流和磁场相互作用产生电磁力:

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B} = \frac{(\boldsymbol{B} \bullet \nabla)\boldsymbol{B}}{\mu} - \frac{\nabla \boldsymbol{B}^2}{2\mu}$$
(2)

式中: **J** 为感应电流密度, A/m<sup>2</sup>; σ 为金属液电导率, S/m; **B** 为外加磁场的磁感应强度, T; μ 为磁导率, H/m。电磁力方程分为两部分,式(2)中的第一项的旋 度不为零, 对金属液起到搅拌作用; 第二项旋度为零, 对金属液起约束成型的作用,也称为磁压力。

屏蔽参数 R<sub>w</sub>可以表示为

$$R_{\omega} = 2(L/\delta)^2 \tag{3}$$

式中: L 为熔池特征尺寸, m;  $\delta$  为集肤深度, 可表示为

$$\delta = \left(\mu\sigma\pi f\right)^{-\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中: f为磁场频率, Hz.

屏蔽参数可视为熔池的特征尺寸 L 与集肤深度之 比,频率越高,  $R_{\omega}$  值越大,电磁力对金属液的作用越 趋近于金属液表面的。在高频磁场中,磁感应强度、 感应电流和电磁力主要集中于金属液集肤层内, GILLON 等<sup>[15]</sup>指出,当 $R_{\omega}$ 大于 200 时,电磁力以约束 成型的作用为主,即磁压力起主要作用。

对静止金属液表面进行受力分析,金属液表面受 到的金属液静压、表面张力和磁压力以及大气压强的 作用,由受力平衡可知:

$$\rho gh = p_{\rm s} + \frac{B^2}{2\mu} + p_0 \tag{5}$$

式中:  $\rho$ 为金属液密度; g 为重力加速度;  $p_s$ 为表面 张力;  $p_0$ 为大气压强。表面张力和大气压强可视为常 数,则磁压力越大,金属液的变形越明显。则在液面 施加适当强度的磁场能达到减弱液面变形和波动的目 的。

## 2 实验方法

实验采用激光位移传感器测量金属液面的波动行 为,用高速摄像机记录金属液面的变形。采用 Ga-20%In-12%Sn 低熔点合金<sup>[16]</sup>作为金属液,其密度、 电导率和熔点分别为 6360 kg/m<sup>3</sup>、3.2×10<sup>6</sup> S/m 和 -19℃。实验装置如图 1 所示。线圈与高频电源连接, 通以单相高频谐波电流。主要设计了两种线圈,即平 行直线圈(见图 1(a)), 匝数为 8 匝, 间距为 2.5 mm; 盘型线圈(见图 1(b))匝数为 6 匝, 间距为 2.5 mm。研 究了线圈结构形式对金属液面变形和波动的影响规 律, 同时研究了电流强度、线圈与金属液面间距对液 面变形和波动的影响。



图1 实验装置示意图



鉴于本研究中所提出的液面控制技术主要针对冶 金熔池内的液面行为,在实验研究的同时采用数值模 拟的方法研究了钢液内部磁场和电磁力的分布规律。 采用磁场-流场双向耦合<sup>[17]</sup>的方法研究局部交变磁场 作用下静止液面变形规律,磁场分析采用 ANSYS 谐 波分析;流场分析采用 CFX 中 VOF 两相流模型,湍 流模型采用 Launder 等提出的 *k-e* 模型<sup>[18]</sup>。模拟过程 中各物质的物性参数见表 1。

为测试和验证磁场对液面鼓包变形的影响,设计 了图 2 所示装置来测试局部磁场作用下液面鼓包变形 行为,磁场线圈采用平行直线圈,电磁泵作为驱动装 置,用激光位移传感器检测等距点 *A*-*F* 的波动和变形 行为,其中 *A*-*D* 4 点位于线圈作用范围之内,*E*和*F* 位于线圈作用范围之外。

表1 数值模拟计算中的物性参数	
Table 1         Physical property for numerical simulation	
Physical property	Value
Density of liquid steel/(kg·m <sup>-3</sup> )	7020
Viscosity of liquid steel/(Pa·s)	0.0062
Density of air/(kg·m <sup>-3</sup> )	1.2
Coefficient of surface tension/ $(N \cdot m^{-1})$	1.5
Electric conductivity of copper/ $(10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$	60
Electric conductivity of steel/ $(10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$	0.714
Relative permeability of air, copper and steel	1



图 2 鼓包变形实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram for dome-type deformation

# 3 结果与讨论

### 3.1 线圈结构对磁场和电磁力分布的影响

图 3 和图 4 所示分别为平行直线圈和盘型线圈作



图 3 线圈结构对钢液内磁场分布的影响

**Fig. 3** Distribution of magnetic field under parallel straight coils(a) and disk-shaped coils(b)



图 4 线圈结构对钢液内电磁力分布的影响

Fig. 4 Distribution of magnetic force under parallel straight coils(a) and disk-shaped coils(b)

用下金属液内部的磁场和电磁力分布。由于磁场的集 肤效应,磁场和电磁力主要分布在钢液表面一定厚度 之内,沿y方向磁感应强度和电磁力迅速衰减。从图 3 磁场分布图可知,平行直线圈覆盖区域下方,磁场 较大且呈水平分布,而在左右两端磁场较小且存在 y 方向的分量。盘型线圈磁场分布与之相反,中心圆孔 区域磁场主要以竖直分布为主,而周围区域磁场呈水 平分布。从图4电磁力分布规律可知,平行直线圈作 用下电磁力呈现出中间大而两侧小的分布,而盘型线 圈电磁力呈现出中间小、两侧大的马鞍形分布。可见, 线圈结构决定着磁场和电磁力的分布形式,通过改变 线圈结构可以得到合适的磁场和电磁力分布形式。

### 3.2 电参数和结构参数对电磁力分布的影响

以平行直线圈作为对象,研究了电流强度、线圈 与液面间距、线圈匝数以及频率对电磁力分布规律的 影响,由于集肤效应,取钢液表面 *x* 方向的电磁力分 布。*d* 表示线圈与液面作用间距,*n* 表示线圈匝数,*I* 表示电流强度以及*f* 表示电流频率。

图 5(a)所示为 n=8, d=5 mm, f=10 kHz 时不同电流强度下电磁力的变化规律,可见,电流强度为 500 A 时,电磁力的峰值为 7×10<sup>4</sup> N/m<sup>3</sup>,电流强度为 2000 A 时,电磁力峰值达到 63×10<sup>4</sup> N/m<sup>3</sup>,增大 8 倍,但分布规律无明显变化,故电流强度对电磁力大小有较大影响。图 5(b)所示为 I=1000 A, f=10 kHz, n=8 时,线圈与钢液不同间距条件下电磁力分布,间距为 10 mm 时电磁力峰值约为 40 mm 时的 4 倍,间距增加电磁力的峰值明显减小,但对电磁力的分布规律影响不





图 5 电流强度、间距和匝数对钢液表面的电磁力的影响 Fig. 5 Distribution of magnetic force under parallel straight coils for different current intensities(a), different distances between coils and liquid surface(b) and different numbers of coils(c)

大。图 5(c)所示为 *I*=1000 A, *d*=10 mm, *f*=10 kHz 时 不同线圈匝数条件下电磁力分布。由图 5(c)可知, 匝 数为 8 匝时电磁力约为匝数为 4 匝时的 1.5 倍, 匝数 对电磁力的大小影响较小, 但匝数增加使电磁力作用 区域扩大, 故线圈匝数也是影响电磁力分布范围及大 小的因素之一。

由于集肤效应,电流频率的大小主要影响电磁力 的穿透深度,图 6 所示为 d=10 mm, l=1000 A, n=8 时不同频率条件下 x 方向和 y 方向的电磁力分布。由 图 6(a)可知,增加电流频率,电磁力的分布规律无明 显变化,电磁力明显增大,频率由 15 kHz 增加至 100 kHz,电磁力增大约 1.2 倍。这是由于频率增大,钢液 表面感应电流增大,感应电流与磁场相互作用产生的 电磁力增大。由图 6(b)可知,由于集肤效应,电磁力 主要集中在钢液表面,频率增加,电磁力的穿透深度 明显减小。



图 6 频率对钢液表面电磁力的影响

**Fig. 6** Effect of frequency on magnetic force along *x* direction and *y* direction

模拟结果表明,电流强度、线圈与液面间距、匝 数和频率对电磁力大小均有影响,但电流强度起主导 作用,增强线圈电流强度可以显著增强钢液表面的电 磁力。相同电流强度条件下,线圈与液面间距越小, 电磁力越大,实际应用过程中选择适当的间距可以减 少电能的消耗。线圈结构决定了磁场和电磁力的分布 形式,线圈匝数对电磁力的作用范围影响较为明显, 可通过调节线圈的匝数达到理想的控制范围。频率决 定着电磁力的渗透深度,频率越大,渗透深度越小。

### 3.3 交变磁场作用下金属液面变形及其不稳定性

以图1所示实验装置研究了两种结构线圈作用下 静止金属液面的变形行为和波动规律,金属液面的形 状如图 7 所示。从图 7 可见,在电磁力的作用下,金 属液面发生了明显的变形,由于两种线圈作用下金属 液面电磁力的分布规律不同,金属液面的变形也不尽 相同。如图 7(a)所示,平行直线圈作用下,金属液面 中心区域,液面降低,四周液面抬高,形成明显凹面。 如图 7(b)所示,盘型线圈作用下,金属液面中心区域 形成明显鼓包,中心外侧区域液面降低形成环形凹面。 对比图3两种线圈电磁力的分布规律可知,金属液面 的形状与电磁力分布有关,电磁力较大区域,金属液 面受到电磁力的反推作用较大,变形明显。由于电磁 力作用,金属液内部静压增大,未受电磁力作用区域 和受电磁力作用较小区域液面抬高。采用磁场-流场 双向耦合的方法对自由液面在两种线圈作用下的变形 进行了模拟分析,其结果与实验观测到的液面形状高 度吻合(见图 8)。

实验测试了熔池自由表面基于线圈中心点、1/2 长度处和线圈外侧位置的波动行为。如图 9(a)所示, 在平行线圈作用下,金属液面一直处于波动状态,1/2 长度处波动程度大于线圈中心处,这可能是由于在交

变磁场中,电磁力的约束成型作用抑制金属液面的波 动,同时,起搅拌作用的电磁力不断扰动,液面波动 的剧烈程度取决于二者的相对大小,在线圈中心位置 处电磁力的约束项相对大于 1/2 长度处,表现出来的 波动较弱。线圈外侧点,由于磁感应强度减弱,电磁 力的约束作用和搅拌作用都较小,波动也相对较弱。 通过研究盘型线圈作用下液面波动行为,也具有同样 的规律(见图 9(b))。从图 9 中可知,在平行线圈和盘 型线圈作用下,电磁力引起自由表面波动的振幅分别 在±0.8 mm 和±1.2 mm 以内。在钢包和结晶器内,适 当的波动有利于表面渣层对夹杂物和气泡的吸附,但 若波动过于剧烈,则会引起表面卷渣,降低铸坯质量。 生产上通常将结晶器内的液面波动控制在±3 mm 以 内<sup>[19]</sup>,可见由交变磁场自身引起的自由液面波动小于 这一范围。根据金属液面在交变磁场中表现出来的特 性,可以控制连铸过程中结晶器和钢包内钢液的鼓包 变形,即在鼓包变形处施加交变磁场,利用钢液表面 电磁力的反推作用抑制金属液面的鼓包变形高度。同 时交变磁场自身引起的微弱波动可以将金属液面的较 大波动约束在较小的范围内,减弱钢液表面的波动, 提高铸坏质量。

图 10 所示为施加平行直线圈所产生的磁场时,不同电流强度下液面形状变化和中心点的波动图。从图 10(a)可知,电流强度增加,电磁力增大,电磁力的反 推作用加强,金属液面的凹坑加深,这与电磁力随电

Volume fraction of



图 7 金属液面的变形

Fig. 7 Shape of free-surface for parallel straight coils (1100 A and 9.2 kHz) (a) and disk-shaped coils (1150 A and 14.3 kHz) (b)



图 8 两种结构线圈产生磁场下的液面形状

Fig. 8 Numerical simulation results of free surface for parallel straight coils (a) and disk-shaped coils (b)



图9 金属液液面不同位置处的波动行为

**Fig. 9** Fluctuations of melt surface at center of coils, half position of radius and out of coils under parallel straight coils (a) and disk-shaped coils (b)



图 10 电流强度对液面变形和波动行为的影响

Fig. 10 Effect of current intensity on deformation of free-surface(a) and fluctuations(b)

流的变化规律吻合。由于金属液内部静压增大,线圈 外液位升高。图 10(b)所示为中心点在不同电流条件下 测得的波动图,线圈电流强度增加,中心点的波动加 剧,振幅增加。在电流强度达到 1400 A 时,振幅保持 在±0.8 mm 以内。可见,随着电流强度提高,磁场强 度增大,磁场自身引起液面的不稳定性加剧,这可能 是由于电磁力对金属液面的约束作用和搅拌作用同时 增大,而搅拌作用增加程度相对较大从而使金属液面 的波动加剧。

图 11 所示为金属液面与线圈间距分别为 1.5 和 2.5 cm 时中心点处液面波动图。由图 11 可见,间距增大,中心点的波动程度加剧,这可能是由于电磁力的

约束力和搅拌力同时减小,约束力的减小幅度大于搅 拌力,导致液面的波动程度加剧。在之前电流强度对 液面波动行为的研究中发现电流强度增加,电磁力随 之增大,金属液面波动加剧。而线圈与液面间距增大, 电磁力减小,液面波动也呈现加剧的趋势。电磁力自 身引起液面波动的机理还有待进一步研究。

#### 3.4 交变磁场作用下鼓包流动液面的变形及不稳定性

图 12(a)所示为在图 2 装置中磁场作用下点 C 波动 图,如图所示,在无磁场作用时,上升流股冲击熔池 表面发生鼓包变形,引起液面波动。施加磁场后,随 着线圈电流强度增加,点 C 波动情况逐渐减弱。电流 强度为 500 A 时,点 C 的波动情况变化不明显,而电流强度达到 800 A 时波动剧烈程度明显减弱。这表明可能存在一临界值,当金属液表面磁场强度或电磁力



图 11 线圈与液面间距对电磁力和液面波动行为的影响 Fig. 11 Effect of distance between coils and free-surface on fluctuations



图 12 磁场作用下液面的波动及变形

**Fig. 12** *C* point fluctuations(a) and free-surface deformation(b) under magnetic fields

大小达到某一强度时,才表现出较明显的抑制作用。 图 12(b)所示为自由液面的变化情况,从图 12 中可知, 由于电磁力的反推作用,使得线圈作用下的点 A-D 的 高度明显降低,鼓包现象减弱。金属液内部静压增强, 线圈外的点 E、F 的位置有所上升,液面整体趋于平 缓。可见本文作者提出的利用交变磁场约束控制金属 液面的鼓包变形、减弱自由液面波动的方法是可行的。

## 4 结论

 1) 线圈结构参数决定了电磁力的分布方式及分 布范围,合理地设计线圈形式可以得到理想的磁场和 电磁力分布;电参数对金属液内部电磁力的大小均有 影响,但电流强度起主导作用,不同的电流强度都应 有一个适当作用距离与之匹配。

2) 在交变磁场作用下,静止金属液面会产生变形,液面形状与电磁力的分布形式相同。此外,由于电磁力的扰动,金属液面一直处于波动状态,但其振幅较小。

3) 在金属液面鼓包变形处施加交变磁场,液面鼓包高度降低,非鼓包处液面上升,液面趋于平缓。电流强度增加,液面波动减弱。

### REFERENCES

- VALENTIN P, BRUCH C, KYRYLENKO Y, KOCHNER H, DANNERT C. Influence of the stirring gas in a 170-t ladle on mixing phenomena-formation and on-line control of open-eye at an industrial LD steel plant[J]. Steel Res Int, 2010, 80(8): 552–558.
- [2] 雷 洪, 许海虹, 朱苗勇, 干 勇, 刘 新, 倪满森. 高速连 铸结晶器内卷渣机理及其控制研究[J]. 钢铁, 1999, 34(8): 20-23.

LEI Hong, XU Hai-hong, GAN Yong, LIU Xin, NI Man-sen. Mechanism and control of slag entrapment in high casting mould[J]. Iron & Steel, 1999; 34(8): 20–23.

[3] 陈芝会, 王恩刚, 张兴武, 赫冀成. 静磁场对吹氩结晶器内弯 月面行为的影响[J]. 金属学报, 2007, 43(4): 422-426.
CHEN Zhi-hui, WANG En-gang, ZHANG Xing-wu, HE Ji-cheng. Effects of static magnetic field on the behavior of meniscus in a mold under argon gas injection[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2007, 43(4): 422-426.

[4] LI De-wei, SU Zhi-jian, MARUKAWA K, HE Ji-cheng. Suppression of effect of uneven velocity in submerged entry nozzle in round billet continuous casting process using electromagnetic swirling flow[J]. J Iron Steel Res Int, 2012(S2): 905–908.

- [5] CONRATH M, KARCHER C. Shaping of sessile liquid metal drops using high-frequency magnetic fields[J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2005, 24(2): 149–165.
- [6] MOHRING J U, KARCHER C, SCHULZE D. Stability of liquid metal interface affected by a high-frequency magnetic field[J]. Magnetohydrodynamics, 2005, 74(2): 267–276.
- [7] 金百刚, 王 强, 刘 燕, 崔大伟, 吴成涛, 王恩刚, 赫冀成.
  软接触电磁连铸结晶器内磁场分布与弯月面行为[J]. 中国有 色金属学报, 2006, 16(11): 1931-1938.
  JIN Bai-gang, WANG Qiang, LIU Yan, CUI Da-wei, WU Cheng-tao, WANG En-gang, HE Ji-cheng. Magnetic field distribution and molten metal meniscus behavior in soft contact electromagnetic continuous casting mold[J]. The Chinese
- Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(11): 1931-1938.
   [8] 张林涛,邓安元,张兴武,王恩刚,赫冀成.矩形电磁软接触
- 连铸结晶器内弯月面行为[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(8): 1405–1410.

ZHANG Lin-tao, DENG An-yuan, ZHANG Xing-wu, WANG En-gang, HE Ji-cheng. Behavior of meniscus in soft-contact electromagnetic continuous casting (EMCC) rectangular mold[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(8): 1405–1410.

- [9] 那贤昭,张兴中,仇圣桃,干 勇. 软接触磁连铸技术分析[J]. 金属学报,2002,38(1):105-108.
  NA Xian-zhao, ZHANG Xing-Zhong, QIU Sheng-tao, GAN Yong. Analysis of soft contact electromagnetic continuous casting technology[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2002, 38(1): 104-108.
- [10] 邓安元,徐永义,王恩刚,张兴武,赫冀成.交变磁场作用下 金属液面的变形和波动行为[J].中国有色金属学报,2010, 20(4):736-742.

DENG An-yuan, XU Yong-yi, WANG En-gang, ZHANG Xing-wu, HE Ji-cheng. Deformation and fluctuation behavior of meniscus with alternating magnetic field in mold[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(4): 736–742.

[11] 邓安元,王恩刚,徐永义,张兴武,赫冀成.复合磁场作用下金属液面行为的实验研究[J].金属学报,2010,46(8):
 1018-1024.
 DENG An-yuan, WANG En-gang, XU Yong-yi, ZHANG

Xing-wu, HE Ji-cheng. Experimental research on melting surface behavior in mold under compound magnetic field[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2010, 46(8): 1018–1024.

- [12] SUDA M, IWAI K, ASAI S. Free surface behavior of a liquid metal under the imposition of a high frequency magnetic field[J]. ISIJ International, 2005, 45(7): 979–983.
- [13] KARCHER C, KOCOUREK V, SCHULZE D. Experimental investigations of electromagnetic instabilities of free surfaces in a liquid metal drop[C]// International Scientific Colloquium Modeling for Electromagnetic Processing. Hannover: University of Latvia, 2003: 24–26.
- [14] FAUTRELLE Y, PERRIER D, ETAY J, Free surface controlled by magnetic fields[J]. ISIJ International, 2003, 43(6): 801–806.
- [15] GILLON P, RIVAT P. Process and device for controlling the continuous-casting thickness of a thin strip of electrically conductive material: US, Patent 5184666[P]. 1993–02–09.
- [16] TIMMEL K, ECKERT S, GERBETH G. Experimental investigation of the flow in a continuous-casting mold under the influence of a transverse, direct current magnetic field[J]. Metall Mater Trans B, 2011, 42(1): 68–80.
- [17] SPITANS S, JAKOVICS A, BAAKE E, NACKE B. Numerical modeling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field: Part 1. Implement and verification of model[J]. Metall Mater Trans B, 2013, 44(3): 593–605.
- [18] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269–289.
- [19] 陈芝会,王恩刚,张兴武,赫冀成. 静磁场控制板坯连铸结晶器液面波动[J]. 钢铁研究学报,2008,20(2):21-25. CHEN Zhi-hui, WANG En-gang, ZHANG Xing-wu, HE Ji-cheng. Experiment of level fluctuation in slab continuous casing mold controlled by static magnetic field[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 20(2): 21-25.

# Metal liquid surface deformation and fluctuation behavior under high-frequency local magnetic field

LI Yang<sup>1, 2</sup>, DENG An-yuan<sup>1, 2</sup>, ZHANG Sai-juan<sup>1, 2</sup>, YIN Chuan-qi<sup>1, 2</sup>, WANG En-gang<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials,

Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. College of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** A novel method controlling free surface fluctuation and deformation was presented. The effect of structural and electrical parameters of coils on the distribution regular of electromagnetic force (EMF) was investigated. The behavior of free surface fluctuation and deformation under high-frequency local magnetic field was also observed. The results show that structural parameters of coils determine the distribution form and action region of EMF. The desired EMF distribution may be obtained by rationally designing coil structural parameters. Although the magnitude of EMF is impacted by electrical parameters, current intensity plays a leading role. When the magnetic field imposing on stationary free surface, a deformation depending on the distribution of EMF forms. Besides, the free surface keeps fluctuating with small amplitude due to alternating electromagnetic force. The largest amplitude keeps within  $\pm 0.8$  mm even if the current intensity reaches 1400 A. When free surface with bulge deformation is subjected to a high-frequency magnetic field, the fluctuation due to that liquid flow and the height of bulge have a decreasing tendency and the free surface tends to smooth and steady.

**Key words:** Ga-In-Sn alloy; free surface fluctuation; high-frequency magnetic field; free-surface deformation; magnetic pressure

Foundation item: Projects(51474065, 51574083) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(20141008) supported by the Doctoral Scientific Research Foundation of Liaoning Province of China; Project(B07015) supported by the Program of Introducing Talents of Discipline to Universities, China; Project(L1509003) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China

Received date: 2016-01-25; Accepted date: 2016-06-07

Corresponding author: DENG An-yuan; Tel: +86-24-83681716; E-mail: dengay@epm.neu.edu.cn

(编辑 王 超)