

# 将电磁场引入连续铸轧的新技术探讨<sup>①</sup>

赵啸林 毛大恒 陈欠根

(中南工业大学机械工程系, 长沙 410083)

**摘 要** 在铝板带连续铸轧的铸轧区中引入电磁场, 实现了电磁连续铸轧。对电磁连续铸轧的基本原理及电磁感应器的磁势进行了分析和探讨。

**关键词** 连续铸轧 电磁场 磁势 晶粒度

## 1 前言

从1846年由英国人贝西默(Bessemer)提出连铸轧的设想以来, 直到1956年才由美国亨特(Hunter-Douglas)公司将其变为现实。到了60年代, 法国, 前苏联等国家也都生产出这种连续铸轧机。我国从60年代开始研究, 到1975年才研制成功第一台连续铸轧机, 1981年底研制出 $d\ 650\text{ mm} \times 1\ 600\text{ mm}$ 连续铸轧机。因为这种工艺的铸轧区长度只有几十毫米, 当高温的金属熔体注入铸轧区时, 由于轧辊的强烈吸热和散热作用, 熔体在铸轧区内受到剧烈的冷却, 而产生很大的温度梯度。因此, 其组织带有定向结晶的特点, 晶体成长的方向性极强, 形成发达的柱状晶, 影响后续深加工产品质量。如何控制带坯组织的晶粒大小, 获得细的等轴晶组织, 是提高连续铸轧带坯质量的关键。目前被人们认识的方法有两种: (1) 添加形核剂; (2) 产生振动促进形核。

添加形核剂, 主要是促使形成大量非自发晶核, 若质点与新相界面的结构愈相似, 它们之间的界面能就愈小, 对形核就愈有利。目前, 连铸轧工艺基本上都是采用添加形核剂的方法来细化晶粒。但是, 对于铝及铝合金的细化过程的理论却众说纷纭, 有促进形核学说, 碳化物细化学说, 包晶反应学说, 原子结构学

说, 成分过冷增核学说, 形核功学说等<sup>[1]</sup>。

振动一方面是从外部对液体输入能量, 加剧结构起伏和能量起伏。另一方面是使正在成长中的枝晶受振动冲击而破碎、剥落, 使晶核数量大量增加<sup>[2]</sup>。

采用添加形核剂不仅使成本提高, 且易产生杂质污染, 而采用振动的方法则可以避免这些问题。因此, 细化处理可以理解为: 增加外来晶核数量或改变晶体成长线速度的处理。

电磁连续铸轧类似第二种方法, 即在连续铸轧区施加特殊的交变电磁场, 使铸轧区中产生几个方向、不同频率和不同强度的电磁力, 改变铸轧区中的结晶与变形条件, 将金属的凝固-塑性流变置于电磁感应力的作用下, 以获得高质量的铸轧带坯<sup>[3]</sup>。这一机理与工艺方法的研究是有色金属塑性加工领域的首例。所研制的供电系统和电磁感应器, 已在某厂 $d\ 650\text{ mm} \times 1\ 600\text{ mm}$ 铸轧机上进行了工业试验。该装置具有晶粒细化效果好, 操作方便, 维护简单等优点, 受到厂家的重视。本文就这一装置的原理, 设计特点进行较详细的阐述。

除铸轧机本体外, 电磁铸轧装置由电源和电磁感应器两大部分组成。其原理类似一台“气隙”很大的按一定规律运动的直线电动机。在电磁感应器线圈中通入低频电流, 电磁感应器就在一定区域内产生交变的脉振磁场和交变

① 中国有色金属总公司资助项目 收稿日期: 1994-12-24; 修回日期: 1995-05-15

的行波磁场。此外在液态金属中通入直流电流，产生一个附加磁场。

## 2 电磁感应器的设计简介

将电磁感应器线圈组装在铸轧机操作侧的一定区域，使磁力线穿过铸轧区中的液态金属，电磁感应器结构如图 1 所示。在选择频率，极距和相数上都与一般电动机和直流电动机不同。变频电源的作用是将三相工频交流电变换为二相低频交流电，主回路为交-交变频方式，采用计算机控制。

## 3 磁场形成原理

电磁感应器由二相绕组构成。把二组单相绕组产生的磁势波逐点相加，就可以得到二相绕组的合成磁势。

### 3.1 单相绕组的磁势

如图 2 所示，设电磁感应器的气隙是均匀的，线圈中通过的电流为  $i$ ，线圈的匝数为  $N$ 。由于气隙磁阻远大于铁芯的磁阻，故可认为气隙的磁势降等于整个磁路的磁势降。在任一回路磁路中，作用在空气隙的磁势即为总磁势，称每极安匝数。假设磁通由上铁芯进入铸轧嘴中的方向为正方向(图 2(a))，铸轧区中分布的磁势波如图 2(b) 所示。

磁势的空间分布为一近似矩形波，其宽度约等于铁芯的宽度，幅值为  $F = Ni$ 。若线圈中电流随时间按余弦规律变化，即

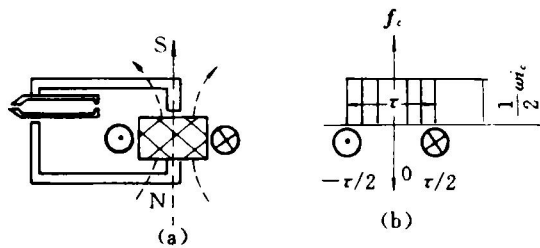


图 2 单个绕组磁势波图

$i = \sqrt{2} I \cos \omega t$  时，以线圈轴线处( $x = 0$ )作为坐标原点，则磁势为：

$$f(x, t) = \sqrt{2} N I \cos \omega t = F(x) \cos \omega t \quad (1)$$

故在  $-\pi < x < \pi$  区域，其幅值为： $F = \sqrt{2} N I$ 。

式中  $N$ —匝数， $i(I)$ —电流强度， $x$ —空间坐标， $F$ —磁势幅值。

磁势的频率与电流的频率相同，其大小随时间按余弦规律脉振，但其曲线在空间保持固定位置。以上只分析了基波磁势，其实矩形波磁势可以分解为基波和一系列具有特定幅值和周期跨距的高次空间谐波。由于高次空间谐波电流会产生不良的影响，所以在电磁感应器绕组安排上采用了正弦分布方法来削弱磁势中的谐波成分。

因电磁感应器每相绕组都是由多个线圈组成的，每个线圈的基波磁势相等，在空间相差一个  $\alpha$  电角度，根据迭加原理，则得到线圈组的基波合成磁势，它仍为一正弦波。根据空间相量关系可以求得合成磁势的幅值  $F$ ，它是一个脉振磁势。由于这个脉振磁势产生的电磁感应力作用于铝液中，对铝液起到增加结构起伏和能量起伏的作用，有利于形核和细化晶粒。此外在电磁搅拌力的作用下，加强了边界层以外的原子扩散能量，有利于消除宏观偏析。但是，由于脉振磁势产生的电磁感应力，主要为垂直方向的力，必须予以限制。这是因为过大的机械振动会使氧化膜破裂；而行波磁场对细化晶粒、避免氧化膜破裂是更有效的。

### 3.2 单相绕组的磁势行波

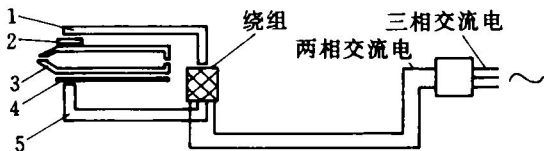


图 1 电磁感应器结构简图

1—上铁芯；2—上压板；3—供液嘴；  
4—下压板；5—下铁芯

仍取相绕组的轴线处作为空间坐标的原点, 则单相基波脉振磁势方程式为:

$$f_1(x, t) = F_1 \cos \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x \quad (2)$$

又有:

$$\begin{aligned} f_1(x, t) &= \frac{1}{2} F_1 \cos(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) + \\ &\quad \frac{1}{2} F_1 \cos(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x) = \\ &\quad f'(x, t) + f''(x, t) \end{aligned} \quad (3)$$

分析(3)式中的第一项可知:

$$\text{当 } \omega t = 0 \text{ 时, } f_1(x, t) = \frac{1}{2} F_1 \cos(-\frac{\pi}{\tau} x)$$

其波形如图3中实线所示:

$$\text{当 } \omega t = \theta \text{ 时, } f_1(x, t) = \frac{1}{2} F_1 \cos(\theta - \frac{\pi}{\tau} x)$$

其波形如图3中虚线所示。显然这虚线所示的波形是磁势行波扫过这一点所造成的余弦变化。所以, (3)式中的第一项表示一个恒幅余弦分布的正向行波。由于电磁感应器类似单边形直线电动机, 所以,  $f_1(x, t)$  沿气隙的连续推移就成为磁势行波, 由此磁势行波产生的磁场就是行波磁场。这个推移的行波磁场产生的电磁力主要起到加强横向剪切力的作用。但不容忽视的是在电磁感应器绕组和液态金属之间尚存在较大的法向磁力, 当这个力太大会导致机械振动的有害影响。

在(3)式的第一项中:

$$\text{令 } \omega t - \frac{\pi}{\tau} x = 0; \text{ 则 } x = \frac{\tau}{\pi} \omega t$$

把距离  $x$  对时间  $t$  求导, 得行波推移速度:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\tau}{\pi} \omega = 2f\tau \quad (4)$$

(4)式表明每当电流交变一次, 磁势波就向前推移一个波长的距离  $2\tau$ 。由上述分析可知, 磁势波  $f'_1$  是一个幅值不变的以相应于脉振频率的速度推移的正弦波。同理也可推出  $f''_1$  同样是一幅值不变, 以与  $f_1$  同速度但反方向推移的( $-x$  方向)正弦波。磁势行波的推移速度与晶粒尺寸大小关系极大, 由于供液嘴水平方向的尺寸远大于垂直方向的尺寸, 所以, 要求水平方向的行波推进速度和推力远大于垂直方向的电磁感应力。上述分析表明, 要保证

脉振电磁搅拌力的效果(即渗透深度), 频率则低; 而要保证横向剪切力的强度和行波往返推移的速度, 则必须提高磁势行波的频率和功率, 为了解决这一矛盾, 对所采用的方法作如下分析。

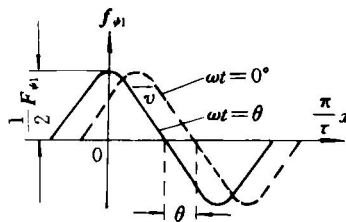


图3 单相磁势行波图

### 3.3 二相绕组的磁势

假设  $A$  相绕组的轴线与  $B$  相绕组的轴线在空间相差  $90^\circ$  电角度, 当两相绕组通入幅值相等、且在时间上不是相差  $90^\circ$  电角度的电流, 如果  $A$  相电流滞后  $B$  相电流一个  $\alpha$  电角度, 则磁势相量为:

$$F_A = F_1 \sin \omega t \quad F_B = F_2 \sin(\omega t + \alpha) \quad (5)$$

因  $F_1 \neq F_2$ , 应用对称分量法, 磁势相量等于正序和负序磁势相量之和, 则:

$$F_A = F_{A^+} + F_{A^-} \quad F_B = F_{B^+} + F_{B^-} \quad (6)$$

此时, 对称分量应满足下列关系:

$$F_{A^+} = -jF_{B^+} \quad F_{A^-} = jF_{B^-} \quad (7)$$

(7)式表示相量  $F_{A^+}$  滞后相量  $F_{B^+}$  一个  $\alpha$  角, 相量  $F_{A^-}$  超前相量  $F_{B^-}$  一个  $\alpha$  角。将式(7)代入式(6), 再将式(6)的第一式乘以  $j$  则:

$$jF_A = F_{B^+} - F_{B^-} \quad F_B = F_{B^+} + F_{B^-} \quad (8)$$

由式(8)解得  $B$  相正、负序磁势相量为:

$$\begin{aligned} F_{B^+} &= 0.5(F_B + jF_A) \\ F_{B^-} &= 0.5(F_B - jF_A) \end{aligned} \quad (9)$$

同理可得  $A$  相正、负序磁势为:

$$\begin{aligned} F_{A^+} &= 0.5(F_A - jF_B) \\ F_{A^-} &= 0.5(F_A + jF_B) \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(9)和(10)可画出两相正、负序磁势的相量关系, 见图4, 图4(a)为正序磁势系统, 图4(b)为负序磁势系统。

由图4(a)可见, 磁势  $F_{A^+}$  滞后于  $F_{B^+}$  一个

$\alpha$  角, 但两者大小相等。在图 4(b) 中, 磁势  $F_{A^-}$  超前于  $F_{B^-}$  一个  $\alpha$  角, 两者也是大小相等, 所以, 可以得出:

$$F_{B^+} = F_{A^+} = F_+ \quad F_{B^-} = F_{A^-} = F_-$$

把正、负序磁势表达为行波的形式, 则合成磁势为:

$$f(x, t) = F_+ \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) + F_- \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x) \quad (11)$$

用空间相量表示则如图 5 所示:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F_+ \cos \omega t + F_- \cos \omega t = (F_+ + F_-) \cos \omega t \\ F_y &= F_+ \sin \omega t + F_- \sin \omega t = (F_+ + F_-) \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将(12)两式平方后相加, 可得:

$$\frac{F_x^2}{(F_+ + F_-)^2} + \frac{F_y^2}{(F_+ + F_-)^2} = 1 \quad (13)$$

这是一个椭圆方程, 表明合成磁势相量  $F$  的端点的轨迹是一个椭圆, 如图 6 所示。

从图 5 中可见, 合成磁势的幅值  $F$  为:

$$F = \sqrt{F_+^2 + F_-^2 + 2F_+ F_- \cos 2\omega t} \quad (14)$$

因合成磁势  $F$  与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ , 则:

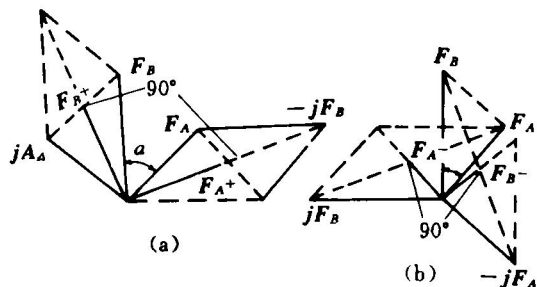


图 4 两相正、负序磁势的相量关系

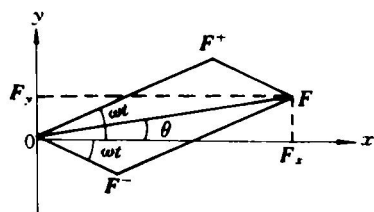


图 5 合成磁势空间相量图

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x} = \tan^{-1} \left( \frac{F_+ - F_-}{F_+ + F_-} \tan \omega t \right) \quad (15)$$

将式(15)对时间  $t$  微分求得合成磁势的角速度  $\Omega$  为:

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt} = \omega \frac{F_+^2 - F_-^2}{F^2} \quad (16)$$

由上述分析可知, 合成磁势的推移速度  $\Omega$  不是常数, 它与合成磁势幅值  $F$  的平方成反比, 在长轴附近的角速度低一些, 在短轴附近的角速度大一些, 而推移的方向则视正序和负序磁势哪一个强而定。当正序或负序磁势中任一个为零时, 则产生一个幅值不变的、以相应的频率推移的磁势。当正序和负序磁势相等时, 则是脉振磁势, 相当于单相运行。因此, 当电磁感应器通入的电流在时间上不是相差  $90^\circ$  电角度时, 合成磁势在水平方向的推移力显然比纵向方向的推移力要大些, 所以总的趋势是一个与铸轧机轴向平行的推移力。

综上所述可知: 电磁感应器使得在凝固前沿既存在有脉振磁场, 也有推动液态金属运动的行波磁场, 而行波磁场本身又是由一定强度的脉振磁势形成的, 所以行波磁场的参数就受到脉振磁场的影响。因此, 所采用的脉振电磁感应力主要由低频电流产生, 而平行于铸轧机轧辊轴线方向的电磁搅拌力的增强和剪切频率的提高由复合电磁场来实现。

## 4 试验结果

将  $1200 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  重  $5.2 \text{ kg}$  的铝板搁置在电磁感应器磁场中, 它在电磁力的推动下作带有轻微上下振动的水平运动, 交换电流的相序, 铝板的运动方向随即改变。进一

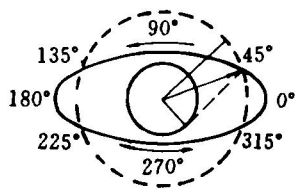


图 6 合成磁势椭圆形相量图

步观察测试表明，铝板的运动速度随电流频率的变化而变化。当电流的频率由 8 Hz 增加到 14 Hz 时，铝板的速度由 20 cm/s 变至 60 cm/s 左右。因此，电磁感应器的功能基本上达到设计要求。

目前已进行了三次电磁铸轧工业试验，第三次电磁铸轧工业试验所铸轧的 15 t 带坯已全部冷轧成 1.0 mm 的成品板，并为用户正常使用。电磁铸轧工业试验证实，在所铸轧的 L<sub>2</sub> 和 L<sub>135</sub> 合金中，未施加电磁场的铸轧板表面呈粗大的条状晶组织或柱状晶组织，晶粒度大于 5 级，有局部马蹄形裂纹出现；施加电磁场的铸轧板晶粒明显等轴细化，组织均匀，达到一级晶粒度，马蹄形裂纹消失(图 7)。

## 5 结论

(1) 在电磁感应器线圈中通入一定频率的电流，电磁感应器能在铸轧区中产生交变的脉振磁场和行波磁场，使这一区域内的液态金属受电磁应力的作用而作规则定向运动，改变结晶和变形条件，获得高质量的铸轧带坯。

(2) 所研制的电磁感应器能满足工业性试验的要求，具有操作方便，维护简单等优点。

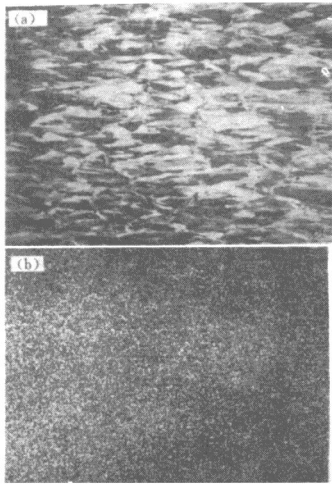


图 7 L<sub>2</sub> 铝合金表面低倍组织，×1  
(a)—空白样；(b)—电磁铸轧样

### 参考文献

- 1 马锡良. 铝带坯连续铸轧生产. 长沙：中南工业大学出版社，1992.
- 2 曹明盛. 物理冶金基础. 北京：冶金工业出版社，1983.
- 3 毛大恒，严宏志. 轻合金加工技术. 1991，19(4)：10—16.

(编辑 吴家泉)