

# 薄带双辊连铸水口电磁制动的实验模拟\*

李启胜 邓康 雷作胜 李伟轩 任忠鸣  
(上海大学上海市钢铁冶金新技术开发应用重点实验室, 上海 200072)

**摘要** 为控制薄带双辊连铸结晶器内金属液面的波动, 提出了水口电磁制动 (N-EMBr) 设想. 通过在水口区域施加稳恒磁场与直流电流, 减缓水口金属液对双辊熔池的冲击文中对熔池液面的波动情况进行了实验模拟; 观测了有无电磁制动及不同水口浸入深度等条件下熔池液面的波动情况, 并测量了水口金属液冲击力的相对变化. 结果显示, 随输入电流增大, 水口出量减小, 双辊结晶器内液面波动幅度和频率降低, 熔池液面趋于平稳. 这表明水口电磁制动可望有效抑制熔池液面波动, 为解决薄带双辊连铸结晶器内金属液的布流和流动控制问题, 提供一种可选择的方法.

**关键词** 双辊连铸, 水口电磁制动, 液位波动, 实验模拟

中图分类号 TG249.7, TG111.4 文献标识码 A 文章编号 0412-1961(2006)07-0751-06

## EXPERIMENTAL SIMULATION OF N-EMBr ON STRIP CASTING WITH TWIN ROLL

LI Qisheng, DENG Kang, LEI Zuosheng, LI Weixuan, REN Zhongming

Shanghai Enhanced Laboratory of Ferro-Metallurgy, Shanghai University, Shanghai 200072

Correspondent: DENG Kang, professor, Tel: (021)56331102, E-mail: dengk2000@163.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50174037)

Manuscript received 2005-10-21, in revised form 2006-02-23

**ABSTRACT** A model for simulating suppression of level fluctuation in mold of twin-roll strip caster with nozzle electromagnetic brake (N-EMBr), *i.e.*, imposed a stationary magnetic field and direct current in nozzle, was established. The momentum of metal liquid in nozzle and level fluctuation in twin-roll pool were measured under different conditions, including the immersing depth of nozzle, current and magnetic field. The experiment results showed that the momentum of liquid metal, amplitude and frequency of fluctuation all were decreased with current increasing. It was found that the N-EMBr technique for fluctuation suppression is effective to twin-roll strip casting mold.

**KEY WORDS** continuous casting with twin rolls, nozzle electromagnetic braking (N-MEBr), level fluctuation of molten metal, experimental simulation.

### 符号说明

$B$  磁感应强度, T  
 $d$  水口浸入金属液的深度, m  
 $f$  波动频率, Hz  
 $F$  电磁力,  $N/m^3$   
 $h$  磁场作用区竖直高度, m  
 $H$  磁场强度, A/m  
 $I$  输入电流, A  
 $J$  电流密度,  $A/m^2$   
 $J_x$  水口宽度方向感生电流密度,  $A/m^2$

$J'_x$  水口宽度方向外加电流密度,  $A/m^2$   
 $Q$  水口金属液冲击强度, Pa  
 $n$  测试统计数  
 $p$  压力, Pa  
 $s$  波动瞬时值的标准差, m  
 $u$  水口金属液流速, m/s  
 $U$  电阻应变仪输出电压, V  
 $\lambda$  波差, m  
 $\sigma$  电导率,  $(\Omega \cdot m)^{-1}$   
 $\mu$  磁导率,  $N/A^2$

\* 国家自然科学基金资助项目 50174037

收到初稿日期: 2005-10-21, 收到修改稿日期: 2006-02-23

作者简介: 李启胜, 男, 1974 年, 硕士生

结晶器内金属液的合理布流和流动控制是薄带双辊连铸中的关键问题之一, 直接影响熔池内的传质、传热和结晶过程. 在薄带双辊连铸中, 结晶器熔池浅, 铸轧速度快, 使金属液在结晶器内停留时间短, 不利于金属液内的夹杂充分上浮 (去除) 和温度均匀分布, 而浇注中布流的

不合理,易导致表面裂纹、条纹、夹杂和边裂等缺陷<sup>[1,2]</sup>.同时,在电磁侧封等实验中,金属液面波动过大会对侧封效果及其稳定性有致命影响.王晓东<sup>[3]</sup>在进行薄带双辊连铸电磁侧封模拟实验中曾观察到水口注流对双辊结晶器液面的影响,尤其在辊端区域产生液流液位(高度)波动,使侧封电磁力场难以稳定抵消金属静压力分布,液态金属以溢流的形式突破辊端侧封,导致实验失败.合理的布流应该确保结晶器熔池内流场的稳定,抑制湍流的发展,表现为熔池液面波动减小.文献[4]报道,薄带双辊连铸工艺一般要求熔池液面波动不能超过2—4 mm.

为实现结晶器内金属液的合理布流,国内外冶金工作者做了大量的研究工作.研究的重点是薄带双辊连铸“V”形结晶器内流场、温度场等与各铸造参数的关系.通过选择不同的湍流模型,利用数值计算,确定不同注嘴形状与尺寸、辊缝距和金属液的过热度等对结晶器内金属液的传质、传热、传力和凝固行为的影响<sup>[5-8]</sup>.另外Bouchard等人<sup>[9]</sup>通过水模型实验,研究了水口形状、尺寸及类型等对双辊熔池内流场和液面波动的影响,并根据模型制出了实验性水口.文献[10]又通过水力学模型研究连铸工艺、水口结构及其尺寸对双辊熔池布流和液面波动的影响,为水口的合理设计提供参数.

水口构造和位置等参数的优化,可以使结晶器内金属液的布流趋向合理,但该项工作目前仍面临诸多问题,主要问题是适用性不强,难以根据客户需要作相应的变化.而另一方面,虽然在板坯连铸中,结晶器内液流的电磁制动技术可改善结晶器内金属流态,抑制湍流,形成活塞流,通过在线参数调整,适用于各种板坯连铸生产,但由于制

动设备自身结构的限制,双辊连铸的“V”形结晶器无法安装而被放弃.

为此,本工作提出在薄带双辊连铸中,钢包浇管(即扁平水口区域)施加电磁制动的设想,即在水口区域利用电磁制动进行金属液流的平稳浇铸,使结晶器熔池稳定和分布均匀,在此基础上,本工作并通过实验考察了不同磁场、电流和水口浸入深度条件下的薄带双辊连铸“V”形结晶器内液面的波动情况,测量了电磁制动下水口金属液冲击力的相对变化,旨在弄清水口电磁制动对熔池液位波动的影响规律,为进一步优化薄带双辊连铸结晶器内的流场,建立合理布流,提供一种新的思路.

## 1 实验装置、原理及研究方法

### 1.1 实验装置

实验装置如图1所示,主体双辊铸机结晶器模拟装置用有机玻璃制成,包括两个1/4圆弧辊面,其辊径为300 mm,辊宽160 mm,辊缝宽2 mm,水口截面尺寸为100 mm×8 mm.实验中,以金属Hg模拟钢液,用磁力泵驱动金Hg进行动态循环.中间包上开有泄流槽,以保持浇铸时金属压头和水口内的流速稳定.

水口的制动区域由四块形状为80 mm×60 mm×10 mm的方形烧结Nd-Fe-B永磁体围成,磁体呈N极与S极两两相对平行放置,如图1所示.永磁体的磁感矫顽力在 $(7-9.31) \times 10^5$  A/m,磁感矫顽力角度 $0^\circ-90^\circ$ .

根据Maxwell电磁感应定律和Ohm定律可知,任何流过电磁场的导电流体,在其内部都会产生感生电动势,如果其自身形成封闭环路,就可以在水口宽度方向产生感

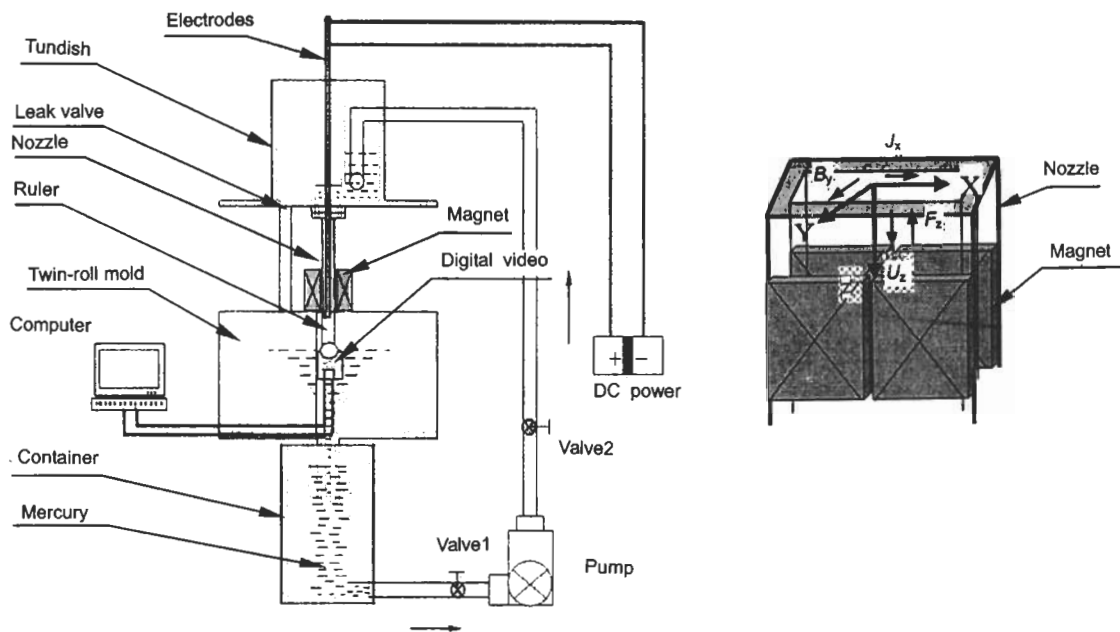


图1 模拟实验装置和水口电磁制动原理示意图

Fig.1 Model experiment apparatus (left) and nozzle electromagnetic brake (N-EMBr) principle (right)

生电流  $J_x$ .

$$J_x = \sigma \cdot \mu \cdot u_z \cdot H_y = \sigma \cdot u_z \cdot B_y \quad (1)$$

沿水口宽度方向总电流密度  $J$  及水口高度方向电磁力  $F_z$  分别为

$$J = J'_x + J_x \quad (2)$$

$$F_z = -(J'_x \cdot B_y + \sigma \cdot u_z \cdot B_y^2) \quad (3)$$

水口的电磁制动就像一个缓冲器,使水口出来的金属液的动量减小,从而减缓了结晶器内熔池的液面波动.

利用 Tesla 计(量程 250 mT, 误差范围 1—5 mT)可对磁体所包围的水口制动区域内中面的磁感应强度进行测量. 本文调节平行磁体之间间距为 20 mm, 并在水口中面按竖直和水平方向划分  $8 \times 12$  个网格, 网格间距 10 mm, 所测得的磁感应强度分布如图 2 所示. 由此图可见, 水口制动区中面的磁感应强度呈“拱”形分布, 最大值为 200 mT. 在同侧并排放置的两块永磁体的 5 mm 缝隙处, 磁感应强度出现凹谷, 但其“宽度”不大, 并且“谷底”的磁感应强度也在 120 mT 以上, 因此本文磁体所构成的磁场分布符合电磁制动的设想.

其它设备还包括直流电源, 数字摄像仪, 悬臂梁动态电阻应变仪(误差范围 3%), 计算机数据记录采集系统和标尺等.

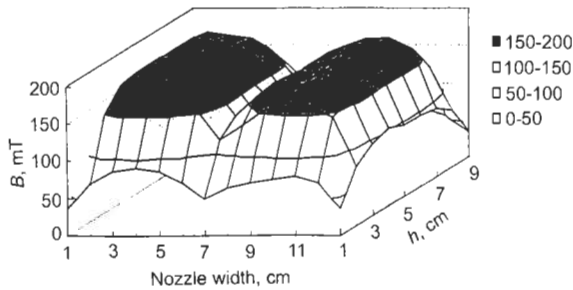


图 2 沿水口中面(磁体覆盖区域)的磁通密度分布

Fig.2 Distribution of magnetic flux density in middle plane ( $y=0$ ) of the nozzle in Fig.1b

### 1.2 实验方法

本文的目的是探索薄带双辊连铸工艺中, 水口电磁制动对熔池液面波动的抑制作用, 因此可忽略铸辊转动对金属液面波动的影响. 实验采用纯度为 99.99% 的金属汞模拟钢液. 实验时, Hg 预先置于模拟装置底部的容器中, 开启磁力泵驱动 Hg 通过顶部的中间包, 经水口注入双辊结晶器(熔池), 最后回流到底部的容器内. 实验过程中维持 Hg 的稳定循环, 并通过调节阀门, 将流量控制为 25 L/min(以本文模拟装置规模, 铸速相当于 78 m/min).

本实验涉及电磁场作用下流体运动的一些动力学特性, 与之相关的物理参数包括 Reynolds 数  $Re$ , Froude 数  $Fr$  和磁作用参数  $N$ . 经计算, 本实验中,  $Re=1.44 \times 10^5$ ,  $Fr=0.87$ ,  $N=0.15$ .

本文工作中, 分别进行了单独施加制动磁场和同时施加磁场与直流电流的制动模拟实验, 并且在有、无磁场以及不同直流电流耦合作用的情况下, 对水口金属液出流的冲击强度  $Q$  进行了测量. 测量方法如图 3, 在水口的出口安置一悬臂薄金属片(相当于一悬臂梁), 水口出流冲击到金属片的悬臂端时, 悬臂梁产生变形, 用动态电阻应变仪可检测出该变形, 于是通过材料力学计算或实验标定获得水口出流的冲击强度<sup>[11]</sup>. 在实验条件一定时, 水口出流冲击强度与水口的电磁制动方式、位置、强度直接相关, 因此判定和评价水口出流对结晶器内液面和波动的影响. 实验前先利用固定载荷对悬臂梁变形的电阻应变仪输出电压进行标定, 结果见图 4. 经拟合回归, 得出电阻应变仪输出电压  $U$  (mV) 与标定载荷  $Q$  (kPa) 关系式为

$$Q = 1.63U + 1.36 \quad (4)$$

首先针对水口浸入液面深度  $d$  分别为 1, 5, 20 和 25 mm, 在无电磁制动的条件下实测了液位的波动情况; 再将水口浸入深度固定为 20 mm, 进行了多种电流强度

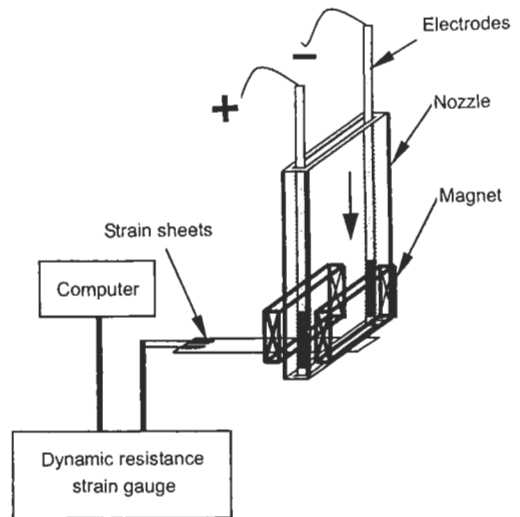


图 3 水口金属液冲击强度的测量

Fig.3 Schematic of measuring impact strength of liquid metal

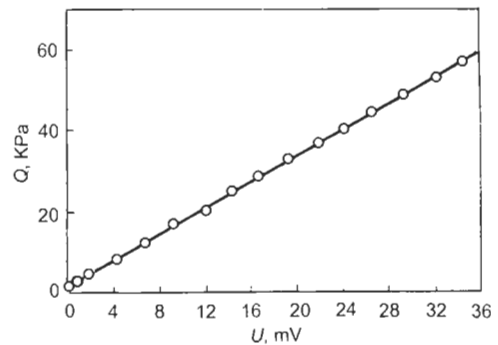


图 4 载荷与输出电压关系标定曲线

Fig.4 Standardizing curve of load (impact strength)  $Q$  and output voltage  $U$  in Fig.3

和磁场位置组合条件下, 经过电磁制动的 Hg 注流对结晶器液面波动的影响实验 (上述实验每组重复三次). 在实验中, 当系统达到稳定状态后, 通过数字摄像机拍下双辊熔池液面波动的视频画面 (25 帧 / 秒), 并用计算机记录液面波动视频, 每次实验的记录时间为 40 s. 数据处理采用图像分析软件将每一帧图像中测量点液面波动对应的刻度读出, 得到液面波动的 1000 个瞬间的波动值, 再利用每次实验的液面波动瞬时值的标准方差  $s$  来计算和定义金属液面波动的波差  $\lambda$ <sup>[12]</sup>

$$\lambda = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

其中,  $x_i$  为波高的瞬时值,  $\bar{x}$  为波高平均值,  $n$  为统计次数. 根据统计学原理, 上式反映了某种工况下各瞬时波动值对其平均值 (期望) 的偏离程度. 若各瞬时值取值比较集中, 则波差  $\lambda$  较小, 说明波动的起伏较小, 液面就更平稳; 反之, 则液面波动就更剧烈.

在薄带双辊铸造中, 金属液从水口流出, 冲击结晶器熔池内的金属液, 产生巨大的扰动, 在碰到铸辊和侧封板之后, 金属液一部分沿铸造方向向下流动, 另一部分向上回流至液面, 因回流量大小不一, 在上层金属液内就产生各种的波, 甚至漩涡. 因此, 结晶器熔池液面的波动可间接反映结晶器内的布流是否合理.

## 2 实验结果与分析讨论

### 2.1 水口出流的冲击强度

图 5 为在水口区域有、无电磁场以及不同制动电流情况下, 水口处金属液流的冲击强度  $Q$  的相对变化情况. 在施加制动磁场和电流后, 动态电阻应变仪输出电压变小, 这说明悬臂梁的变形减小, 即其所受到的冲击强度变小. 根据前述标定结果, 可以计算出不同制动电流情况下注流的冲击强度. 由图 5a 可见, 在水口安装如图 2 所示强度分布的制动磁体后, 水口出流的冲击强度与无磁场时相比, 由 17.5 kPa 降为 15.1 kPa, 下降幅度为 13.7%. 另外, 本工作在磁场制动的基础上, 还进行了输入直流电流以减轻注流冲击强度的实验. 结果表明, 在输入电流后, 水口出流的冲击强度再次降低, 在输入电流达到 200 A 时, 水口出流的冲击强度降到 12.4 kPa (图 5b), 其与无输入电流时相比, 下降幅度为 17.9%; 而与无电磁制动时相比, 则下降幅度在 29%, 产生了明显的效果. 同时, 通过实验数据分析, 水口出流的冲击强度  $Q$  (kPa) 与输入制动电流  $I$  (A) 之间满足如下线性关系:

$$Q = -0.014I + 15.20 \quad (6)$$

即, 水口出流对结晶器熔池的冲击强度与输入的制动电流成反比.

本实验中电极与金属液接触面积为  $65 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ , 据此计算, 图 5 中输入电流的电流密度分别在  $58 \sim 385 \text{ kA/m}^2$ . 忽略水口金属液流速改变对感生电流的影响, 根据式 (2), 计算出磁场在金属液内所感生的电流密度  $J_z = 93.6 \text{ kA/m}^2$ . 另外, 从式 (3) 可知, 当体系达到稳定状态, 即水口金属液流速  $u_x$  恒定时, 该式为线性方程, 电磁力随制动电流的增大而呈线性增大. 因此, 金属液流出水口出口的冲击强度将呈线性减小.

### 2.2 水口浸入深度对熔池液面波动的影响

图 6 为无电磁制动时, 水口浸入深度分别为 1, 5, 20 和 25 mm 条件下所实测的熔池液面波动状况. 如图所示, 熔池液面波动随水口浸入深度的增加而减小, 并且在水口插入深度超过 20 mm 后, 波动降低明显, 说明此时结晶器液面的金属液上升回流减少, 这与薄板坯 CSP 连

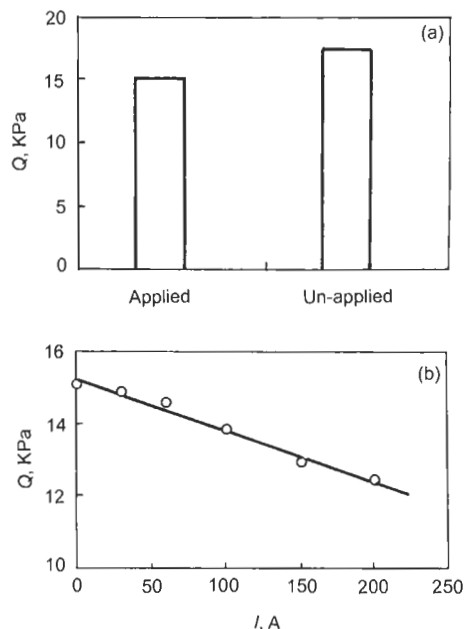


图 5 施加磁场对冲击强度的影响及冲击强度与输入电流的关系

Fig.5 Impact strengths,  $Q$ , of liquid metal without and with magnetic field (a) and curve of  $Q$  vs input current,  $I$  (b)

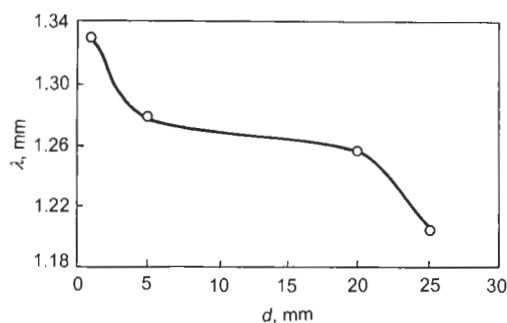


图 6 水口浸入熔池深度对波动的影响

Fig.6 Variety of liquid surface fluctuation  $\lambda$ , with nozzle immersing depth,  $d$ , in pool

铸的规律一致。

由式 (7) 粘性不可压缩流体稳态流动的机械能守恒方程<sup>[13]</sup> (Bernoulli 方程) 可知, 在连铸中金属注流的动能主要决定于其流速和水口的浸入深度。随着水口浸入深度增加, 水口流出的金属液主要部分流向了熔池的底部, 而向上回流的金属液会减少很多; 另一方面, 向上回流的金属液必须克服重力和粘性摩擦力做更多的功, 才可能到达液面, 因此其越往上流动则动能越小, 所引起的熔池液面波动也就越小, 导致液面趋于平稳。

$$\frac{\Delta u^2}{2} + g \cdot \Delta z + \frac{\Delta p}{\rho} + h_f = 0 \quad (7)$$

式中,  $\frac{\Delta u^2}{2}$  为动能,  $g \cdot \Delta z$  为位能,  $\frac{\Delta p}{\rho}$  为压力能,  $h_f$  为摩擦能耗。

### 2.3 磁场和电流对熔池液面波动的影响

本节讨论薄带双辊连铸模拟实验中, 单独采用磁场制动, 以及磁场耦合输入电流进行电磁制动条件下, 结晶器液面的波动, 及其与电磁制动参数的关系。

首先, 进行了相同注流流速下, 水口有、无磁场作用下的液位波动实验, 在图 2 所示强度和分布的制动磁场条件下, 实验结果如图 7 所示。该实验中, 金属液流通过磁场区域切割磁力线产生感生电流和制动电磁力。结果显示, 在单独施加磁场后, 液位波动变小, 波动波差平均减小了 18%。这反映出熔池内的注流冲击强度降低, 金属液的流态得到改善。实验中, 由于水银密度是钢水的近 2 倍, 因此波动的绝对值不是很大, 这与水模拟的实验结果不同。同时, 在电磁力的作用下, 水银从水口出来的流速降低, 在实验中观察到熔池液面位置会有下降, 而由前面水口浸入深度对波动的影响实验可知, 熔池液面的下降必然会增加液面波动的趋势。因此, 制动电流及制动电磁力应在流速和铸速之间取得一个平衡的临界值。在实际生产中, 可根据水口电磁制动模拟实验的结果, 适当加大水口的横截面, 以消除因电磁制动而产生的结晶器熔池液面下降问题。

其次, 为提高在水口电磁制动的效果, 本工作在矩形

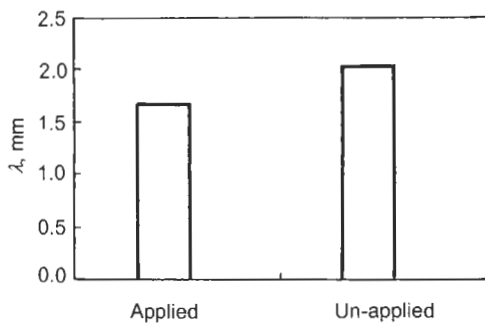


图 7 水口有、无磁场时波差  $\lambda$  的变化

Fig.7 Fluctuation  $\lambda$  variety with or without magnetic field

水口的两个窄面又装上电极, 通以定向的直流电流, 使金属注流直接受到与其流动方向相反的电磁力作用。实验证明, 当通以 200 A 电流时, 与无电磁制动情况比较, 液面波差降低 52%; 而与仅有磁场作用的制动方式相比, 液面波差降低 42%。这表明在水口电磁制动中, 向水口出流输入定向的外加电流可以获得更大的制动效果和可控的调节手段。图 8 给出本实验所得的液面波差与外加电流的关系。如图所示, 随输入电流增大, 液面波差呈线性降低。通过拟合可得出液面波差  $\lambda$  (mm) 与输入电流  $I$  (A) 的关系

$$\lambda = -0.0042I + 1.7897 \quad (8)$$

综合图 8 与图 5b 结果, 水口出流的冲击强度和结晶器液面的波差线均随水口输入的制动电流成线性下降关系, 这再次证实了本文控制水口注液冲击而降低结晶器熔池液面波动, 改善流态及分布的设想。

对波动曲线进行快速 Fourier 变换后, 发现对于低频率的驻波<sup>[12]</sup>, 其波动频率  $f$  随水口输入电流增大而降低 (见图 9)。这表明在浇铸速度相对较快的薄带双辊连铸中, 水口电磁制动能够抑制结晶器内驻波的发展, 从而减少钢带纵裂纹, 这与文献 [14] 的结论相符。

另一方面, 在实验中可观察到随外加电流增大, 制动效果增强到一定程度后, 结晶器内熔池液面有所下降。这

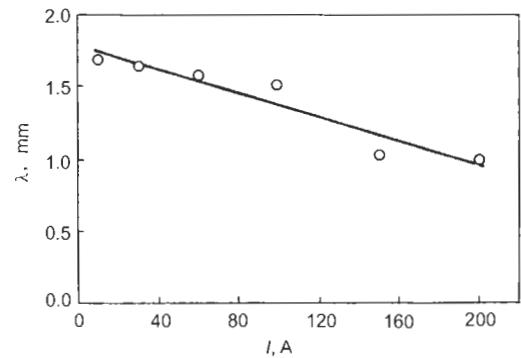


图 8 外加电流对波动的作用效果

Fig.8 Fluctuation  $\lambda$  variety with input current  $I$

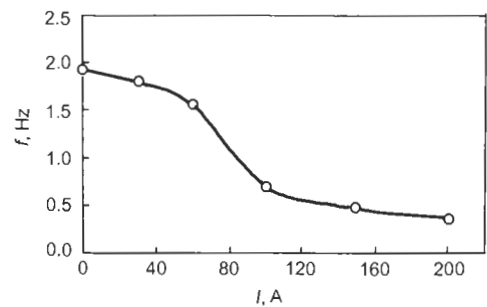


图 9 驻波频率与电流的关系

Fig.9 Stationary wave frequency  $f$  variety with input current  $I$

是水口出流减少而结晶器出流（相当于拉速）不变的结果。液面下降的结果与图 6 实验中水口浸入深度减小的影响相似，出流冲击强度增加而电磁制动效果减弱。因此在实际生产和工艺应用中，要稳定结晶器熔池深度和流态、液面波动，须综合考虑磁场、电流、水口尺寸与结构、连铸工艺的耦合和优化，这些工作尚在进行中。

#### 2.4 制动磁场位置对制动效果的影响

将制动磁场安置在距离水口出口 20 mm 处（位置 1）和 75 mm 处（位置 2）的液面波动波差  $\lambda$  实测结果如图 10 所示。由图可见，在上述两个位置下，不输入或分别输入 100 和 200 A 电流，液面波动的波差不仅随电流的增加而减小，且在相同电流下，磁场至水口出口的距离越近，则液面波动的波差越小。如图所示，在输入电流 100 和 200 A 情况下，磁场位置 1 相比位置 2 的作用结果，是熔池中液面波动的波差降低 20%。当磁场区域距离水口较远时，金属液在离开磁场区域后有较长的重力加速区，在壁面阻力的作用下，注流流态会重新趋于紊乱，从而部分抵消了磁场的制动效果。因此在生产应用中，水口制动磁场的位置应在满足工艺和操作的前提下，尽量靠近熔池液面。

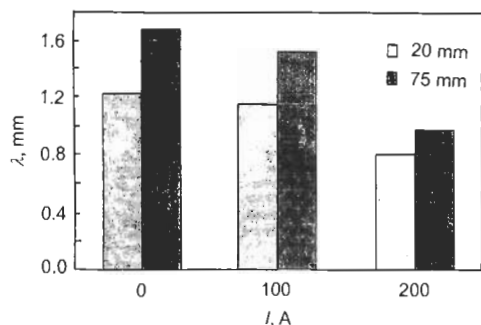


图 10 制动磁场安装在距离水口出口不同位置时不同输入电流对应的液面波动

Fig.10 Fluctuation  $\lambda$  varieties with current,  $I$ , for different setting locations of brake region to nozzle outlet

### 3 结论

在薄带双辊连铸中，水口施加电磁制动可有效地降低双辊结晶器内注流冲击所导致的紊流和液面波动，有利于形成稳定的拉坯环境、条件和工艺。在电磁侧封中，尤其有利于保持液面稳定，减少因液面波动和液位不稳所导致的溢流等现象，增强电磁侧封实验和工艺的可靠性。

在水口安置制动磁场可使金属出流的冲击强度降低 13.7%，而再输入制动电流耦合作用，则可使水口金属出流的冲击强度降低达 29%，同时该冲击强度与输入电流成线性关系。

与无电磁制动时相比，单独采用磁场进行水口注流制动，可降低液面波差 18%；再输入耦合的制动电流（最大 200 A）后，液面波差下降幅度达到 52%；波差与输入电流成线性关系，这证实了抑制水口注液冲击、控制结晶器熔池液面波动、改善其流态及分布的设想具有可行性。

水口电磁制动的磁场作用区域距离水口出口越近，制动的效果越好，应在满足工艺和操作的条件下，使水口制动磁场的位置尽量靠近熔池液面。

水口制动过强时，结晶器内液位将会有所下降，使出流冲击强度增加而部分抵消电磁制动的效果，因此在生产应用中，须综合考虑制动磁场、电流、水口尺寸与结构、连铸工艺等的耦合、匹配和优化，这需要进行更进一步的工作。

#### 参考文献

- [1] Li B Q. *JOM*, 1995; 47(5): 29
- [2] Zapuskalov N. *ISIJ Int*, 2003, 43: 1115
- [3] Wang X D. *Master's Degree Thesis*, Shanghai University, Shanghai, 2004  
(王晓东, 上海大学硕士学位论文, 上海, 2004)
- [4] Guthrie R I L, Isac M. *Steel Res*, 1999; 70: 343
- [5] Kim D S, Kim W S, Kuznetsov A V. *Numerical Heat Transfer*, 2002; 41A: 1
- [6] Seyedein S H, Hasan M. *Numer Heat Transfer*, 1997; 30A: 221
- [7] Jin Z M, Hao Y C, Xu G. *Acta Metall Sin*, 2000; 36: 391  
(金珠梅, 赫翼成, 徐广. 金属学报, 2000; 36: 391)
- [8] Miao Y C, Di H S, Zhang X M, Bao P W, Wang G D, Liu X H. *Res Iron Steel*, 2000; (2): 32  
(苗雨川, 邸洪双, 张晓明, 鲍培玮, 王国栋, 刘相华. 钢铁研究, 2000; (2): 32)
- [9] Bouchard D, Busque F. *82nd steelmaking conference: 1999 Proceedings*, 1999: 427
- [10] Wen G H, Zhu M M, He J F, Li G, Han Z W, Ding P D. *Acta Metal Sin*, 2000; 36: 1001  
(文光华, 祝明妹, 何俊范, 李刚, 韩志伟, 丁培道. 金属学报, 2000; 36: 1001)
- [11] Chen F, Duan Z L, Wang W A. *Experiments of Material Mechanics*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1999: 345  
(陈锋, 段自力, 王文安. 材料力学实验. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999: 133)
- [12] Hu H, Zhao H M, Zhang J M, Wang X H, Wang W J. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2005; 26 (1): 10  
(胡皓, 赵和明, 张炯明, 王新华, 王万军. 钢铁钒钛. 2005; 26(1): 10)
- [13] Huang W X, Chen W M. *Engineering Hydrodynamics*. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 65  
(黄卫星, 陈文梅. 工程流体力学. 北京: 化学工业出版社, 2001: 65)
- [14] Kollberq S G, Hackl H R, Hamley P J. *Iron Steel Eng*, 1996; 73 (7): 24