

# 首钢小方坯连铸 M-EMS 的生产应用

金茹 李本海 许晓东

(首钢技术研究院)

**摘要** 本文阐述了对结晶器电磁搅拌 (M-EMS) 最佳运行工作参数的调控, 通过测试结晶器铜管中不同频率下的扭矩值确定最佳频率; 通过控制保护浇注时弯月面附近的磁感应强度来确定工作电流。结合首钢小方坯连铸结晶器电磁搅拌技术的生产应用情况, 阐述了 M-EMS 对铸坯质量的作用机理, 分析了铸坯表面质量与内部质量的提高。

**关键词** M-EMS 参数 质量

## THE PRODUCTION APPLICATION OF M-EMS ON THE SLAB CONTINUOUS CASTING IN SHOUGANG

Jin Ru Li Benhai Xu Xiaodong

(Shougang Research Institute of Technology)

**ABSTRACT** The rules of controlling the best running parameters of Mould Electromagnetic (M-EMS) have been expounded. The best running frequency has been decided through testing the torque in the copper mould under different frequency. The running currents have been established by controlling the magnetic induction intensity nearby the meniscus when protection casting. The mechanism of M-EMS effecting on the strand quality has been expounded. According to the M-EMS practice of Shougang, it has analyzed the improvement of strand surface and inner quality.

**KEY WORDS** M-EMS, parameter, quality

### 1 引言

电磁搅拌技术是随着连铸技术的发展而发展起来的一项用于提高铸坯质量的工艺措施。国外在 20 世纪五六十年代开始提出并试用, 于七八十年代日趋成熟。国内在 80 年代初引进连铸技术后, 电磁搅拌的应用也日益普遍, 其中结晶器电磁搅拌 (M-EMS) 能使铸坯从表面到心部的质量都得到改善, 是目前使用最广的搅拌工艺, 也是连铸电磁搅拌中最成熟的一项技术。目前, M-EMS 已经成为浇注优质钢种不可缺少的技术装备之一。如何有效地发挥 M-EMS 的作用是实际生产中经常面临的一个问题, 国内外对此进行了大量的研究试验, 并取得了成效。

随着首钢对品种钢开发力度的不断加大及市场对钢质量的要求不断升高, 首钢三炼钢的 3 座小方坯连铸机已经全面配备了 M-EMS 技术, 本文通过

试验及生产实践, 对 M-EMS 的工作参数调控、改善方坯的质量效果分别作了介绍。

### 2 调控 M-EMS 工作参数的一般规律

当搅拌器的安装位置确定后, 合理地确定工作参数是提高搅拌效果的重要前提。M-EMS 运行条件的调控可以归结为两个参数: 搅拌频率和搅拌电流。

#### 2.1 搅拌频率

在连铸电磁搅拌的搅拌性能中, 扭矩是最具有综合性的参数, 对磁场的控制通常是通过调节电流与频率, 从而改变磁场的扭矩。

在试验中测定了电磁搅拌器中无结晶器铜管时不同电流、频率下的扭矩值, 其值随着电流、频率的增加而增加。然而具有高导电性的结晶器铜管能有效地对磁场进行屏蔽, 从而减少了穿入钢液的磁



通量, 如果增加频率, 磁场穿入深度就会减少, 钢液的集肤效应就会显著。因此, 为了获得较强的搅拌力, 应综合考虑感应效应和集肤效应二者的影响。前者偏向较高的频率, 后者偏向较低频率, 也就是说存在一最佳频率。

最佳频率主要取决于一些几何参数, 如线圈尺寸、连铸坯尺寸、电导率、线圈与熔池间的各种材料的厚度等。理论分析表明, 钢水导电率和流速对最大电磁力的量值有影响, 而对最佳频率的影响则不大。试验(图1)表明, 扭矩随频率的变化不是单调的, 而是有个幅值, 相应地有个最佳频率。

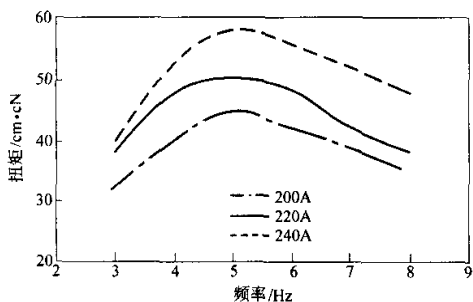


图1 结晶器铜管内扭矩随电流、频率的变化  
Fig.1 Changes of torque in the mould along with the changing current and frequency

从图1可以看出, 扭矩在5Hz时达到了最大值, 其后, 随着频率的增加, 扭矩随之下降。对于生产中的结晶器电磁搅拌, 其综合多种影响因素后的最佳频率是5Hz。

### 2.2 搅拌电流

对于给定的一台结晶器电磁搅拌器, 它在连铸机的安装位置确定后, 对于保护浇注, 要控制好其弯月面附近的磁感应强度。 $B_m$  为搅拌器轴向中心的最大磁感应强度,  $B$  为弯月面附近的磁感应强度,  $L/D$  是搅拌器的高与内腔尺寸比。对不同的  $L/D$ , 存在一个合适的  $B/B_m$ , 二者的关系见图2。

试验采用的搅拌器的  $L/D = 460/490 \approx 0.94$ , 安装位置采用上位, 搅拌器中心距离弯月面的距离是260mm。在试验中, 分别测定了5Hz时不同电流强度的轴向分布, 当电流为220A时, 其  $B/B_m = 0.32$ , 弯月面附近的磁感应强度只有搅拌器中心的1/3。在生产试验中采用了220A的电流作调控试验, 通过对比220A上下的电流强度的搅拌效果, 发现, 220A的搅拌效果大于210A, 电流大于

220A的搅拌效果与220A时相当, 此时结晶器弯月面有轻微的波动, 没有发生卷渣等现象, 说明搅拌强度适当, 而且此时铸坯的表面质量良好。因为电磁搅拌要用最小的功率实现最佳的搅拌强度, 因此可以在生产中采用220A的电流。

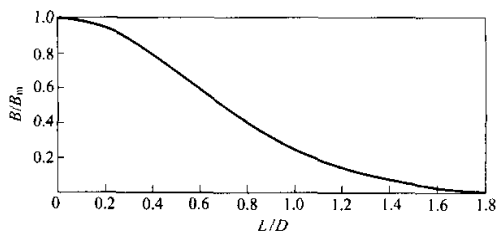


图2 弯月面附近磁感应强度的控制  
Fig.2 Control of magnetic induction intensity nearby the meniscus

## 3 M-EMS 对铸坯质量的影响

### 3.1 M-EMS 对铸坯表面质量的影响

在各种电磁搅拌中, 只有M-EMS才能控制铸坯的表面质量, 在M-EMS的作用下, 结晶器中的钢液旋转运动对表面质量产生了3个效果:

- (1) 冲刷凝固前沿, 防止非金属夹杂和气泡在最初凝固的皮下聚集。
- (2) 非金属夹杂物和气泡可通过离心作用向铸坯中心聚集, 使其易于上浮到弯月面而从皮下去除。
- (3) 净化弯月面, 因为在离皮下很远的弯月面低凹区的底部存在有上浮的夹杂物。

在结晶器以下, 由于惯性作用, 钢液的旋转可以继续保持, 钢液对液-固界面的冲刷作用可保持到结晶器以下1~2m处。经过搅拌, 铸坯表面含有较少的夹杂物, 可以减少夹杂物带的存在半径, 增加离表面的深度。

在连铸生产中, 对H08A、1006、08LS等低碳钢种进行了电磁搅拌试验, 对比了有无电磁搅拌时铸坯的表面质量, 同时对对比了不同电流强度时的表面质量。

从试验的结果看, 有电磁搅拌时铸坯的表面质量明显优于无电磁搅拌的铸坯表面质量。随着电流强度的增加, 铸坯表面质量的各项指标也随着改善。如H08A, 其190A时铸坯皮下气泡0级的只有31.25%, 最大级别为4级, 大于1.0级的有20%, 而220A时铸坯皮下气泡0级的占78%, 最大级别为2.5级, 大于1.0级的只有4%。对1006

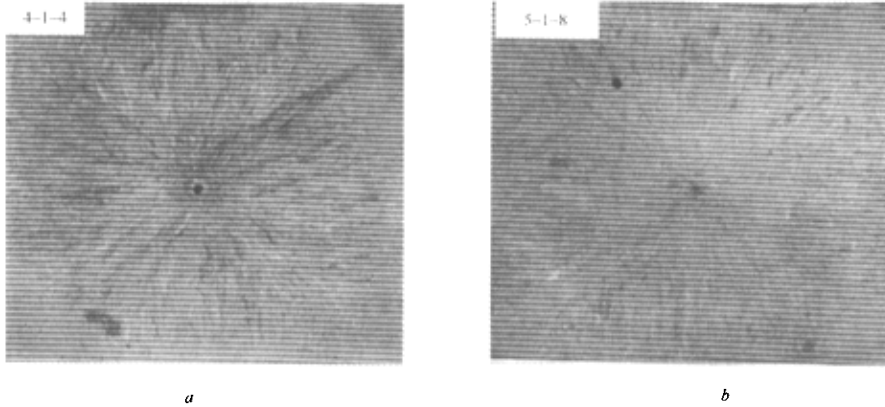


图3 有无 M-EMS 时铸坯等轴晶的对比

Fig.3 Contrast of strand equiaxial crystal with M-EMS or without M-EMS

a—无 M-EMS; b—有 M-EMS

软线钢, 其非金属夹杂在 190A、220A 时的最小级别为 0.5 级, 其中 190A 时 0.5 级的只有 51.43%, 而 220A 时 0.5 级的占到 90%。

试验充分说明了结晶器电磁搅拌可以有效地改善铸坯的表面质量, 使用 M-EMS 电磁搅拌后, 线材表面缺陷减少, 表面小裂纹基本杜绝。在所有需要承受机械疲劳的场合, 提高产品的表面质量对提高产品的疲劳耐性都有很重要的作用, 防止了由于表面缺陷引起的裂纹随时间的扩展。

### 3.2 M-EMS 对凝固组织的影响

#### 3.2.1 M-EMS 对增加铸坯等轴晶的作用

电磁搅拌加速了钢液和凝固前沿的热交换, 液芯内剩余的过热能很快消除。一些被打断的碎小的树枝晶被大量的液体混合, 如果过热度是正的, 它们就会吸热而熔化掉, 反之, 它们就作为等轴晶核在钢液中存在, 随着进一步冷却而生长, 在重力作用下充满铸坯的液相穴, 直到铸坯柱状晶在内部不再生长, 并且在铸坯内部以等轴晶结构凝固。图 3 是有无 M-EMS 作用时铸坯等轴晶的生成情况。在 M-EMS 的作用下, 铸坯较无 M-EMS 时产生了较大的等轴晶区。

M-EMS 搅拌器的安装位置对铸坯内部凝固质量也是很重要的。通常, 钢水在结晶器上部的冷却速度最快, 这是由于与结晶器铜壁接触最好, 此处的凝固壳薄。在结晶器的下部冷却速度下降, 在结晶器下的铸流区则进一步下降。因此, 如果搅拌器位于结晶器的上部, 冷却效果是最好的, 如果搅拌器位于结晶器的下部, 冷却效果下降。因此, M-

EMS 靠近弯月面的内部质量比结晶器下部的效果好<sup>[1]</sup>。

#### 3.2.2 钢中含碳量对铸坯等轴晶区大小的影响

如前所述, 虽然 M-EMS 可以促使等轴晶区的形成, 但并不是所有的钢种都能获得较宽的等轴晶区。钢中碳含量的高低对等轴晶区的大小也有影响, 其关系见图 4<sup>[2]</sup>。

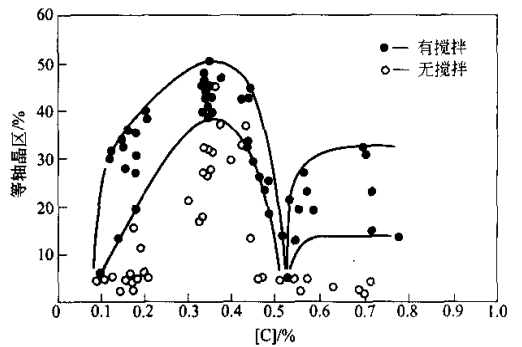


图4 等轴晶区与 M-EMS 的关系

Fig.4 Connection between the equiaxial crystal and M-EMS

从图 4 中可以看出, 碳含量小于 0.1% 和碳含量在 0.52% 的钢种, M-EMS 对等轴晶率的增加影响不明显, 碳在 0.2% ~ 0.4% 的钢种的等轴晶率随着含碳量增加而扩大, 达到一个峰值后随含碳量增高而逐渐减少。

在生产中, 检测了不同含碳量钢种的等轴晶区大小, 其结果见表 1。



表 1 的结果基本符合图 4 的关系, H08 钢的含碳量最低, 其等轴晶率最小, 77B 钢的含碳量最高, 但其等轴晶率并不是最大的。因此, 在结晶器电磁搅拌的应用中, 不能盲目地追求很高的等轴晶率。

表 1 不同含碳量钢种的等轴晶  
Tab.1 The equiaxial crystal of different  
carbon content steel grade

钢种	H08	Q195	Q235	28MnSiB	65Mn	77B
等轴晶/%	7.2	40.5	43	43.8	42.7	20.3

### 3.2.3 钢水过热度对等轴晶区的影响

在实际的电磁搅拌过程中, 受钢水过热度的影响, 具体钢种的等轴晶率会有一些的波动。图 5 是矩形坯浇注 45 号钢时在不同的过热度条件下铸坯等轴晶比例的变化趋势。

从图 5 中可以看出, 在不同的浇注温度下, 铸坯等轴晶率随着钢水浇注过热度的升高而降低, 过热度小于 36℃ 时, 等轴晶率随过热度的升高而下降的速度比较快, 过热度大于 36℃ 时这种下降的趋势比较缓慢。

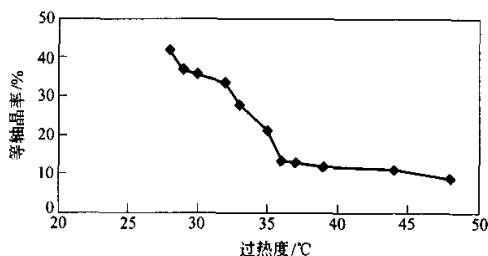


图 5 过热度对等轴晶率的影响

Fig.5 Influence of overheat on the equiaxial crystal

在连铸中, 虽然结晶器电磁搅拌对铸坯内部等轴晶的生成有一定的作用, 但要得到较大的等轴晶区, 还必须控制好钢水的过热度, 在温度制度上为等轴晶的生成创造条件。

### 3.3 M-EMS 对中心偏析的影响

在连铸生产中, 中心线偏析往往制约着连铸产品的质量。碳和其他合金元素往往会沿中心线富集, 宏观偏析会呈“V”形分布, 它们在铸坯的纵剖硫印图上表现为黑色线条, 在高碳钢中, 这些线条出现在连铸坯的轴线上, 沿轴线产生严重的正偏析。而在轴线周围的环形区域, 合金元素含量很低。对轴线附近的样品的分析表明, 局部碳浓度沿轴线高度发散。

电磁搅拌是克服偏析的有效手段。在中碳钢和低合金钢中, 主要问题是减少合金浓度沿轴线的发散, 因为中心成分很接近钢的成分, 而且中心等轴晶组织与浓度沿轴线的低发散性有着相关性。因此, 可以利用 M-EMS 来有效地减少这种偏析。

但是, M-EMS 对中心偏析的改善作用并不是万能的。当碳浓度很高时, 等轴晶组织能减少碳浓度沿轴线分布的发散性, 但沿轴线的平均碳浓度比钢中平均碳浓度高很多。迄今为止, 对于铸坯断面小于 160mm×160mm, 含碳为 0.8% 的铸坯内部的轴向偏析尚不能消除, 甚至在低的过热度条件和 M-EMS 作用下仍不见效<sup>[3]</sup>。

在首钢 82B 的生产中, 尽管在铸坯中心能获得等轴晶凝固组织, 但仍有偏析问题, 其正常的碳浓度为 0.77%~0.81%, 测得的中心碳浓度为 0.83%~0.92%, 平均中心偏析率为 1.18%。因此, 要消除高碳钢的中心偏析, 仅有 M-EMS 是不够的, 为了控制高碳钢的中心线偏析, 需要在铸坯的最后结晶区再进行搅拌, 即凝固末端电磁搅拌 (F-EMS)。F-EMS 可以将轴线上的偏析金属与周围低浓度金属充分搅拌以消除糊状区形成的中心线偏析。

## 4 结论

- (1) 有效地调控结晶器电磁搅拌的运行参数, 可以充分发挥 M-EMS 改善铸坯质量的功能。
- (2) 结晶器电磁搅拌能够提高铸坯的表面质量, 适用于对表面质量要求高的钢种。
- (3) 结晶器电磁搅拌能够增加铸坯中心的等轴晶组织, 但等轴晶区的大小随钢中含碳量、钢水过热度的不同而有变化。
- (4) 结晶器电磁搅拌能够减少或消除铸坯的中心偏析缺陷, 但对高碳钢来讲, M-EMS 不能完全解决中心偏析问题, 需要与 F-EMS 技术配合使用。

## 参考文献

- 1 S. Kumstreich, M. C. Nove, D. Yves. 小方坯和大方坯电磁搅拌 (EMS) 技术现状和指南. 第二届全国连铸电磁搅拌技术研讨会论文集, 1998, 53
- 2 李峰. 用结晶器电磁搅拌改善方坯质量. 第二届全国连铸电磁搅拌技术研讨会论文集, 1998, 24
- 3 Dr. J. J. Moore. 连铸坯中心偏析的评述. 电磁搅拌译文集, 1988, 67