# 末端电磁搅拌对Φ390 mm铸坯内部质量的影响研究[*1]

张怀军,韩春鹏,钱静秋

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 文章主要介绍了凝固末端电磁搅拌技术在包钢圆坯连铸机上的应用情况。结果表明,当铸坯断面为Φ390 mm,钢种为中碳钢,最优末端电磁搅拌参数为450 A/8 Hz,采用优化的末端电磁搅拌参数降低了铸坯的中心碳偏析指数,增加了铸坯的等轴晶率,从而提高了连铸坯的内部质量。

**关键词:** 末端电磁搅拌; 碳偏析指数; 等轴晶率

**中图分类号:** TF777 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2018)02-0001-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.02.001

# Study on the Effect of F-EMS on Φ390 mm Casting Billet Internal Quality

*ZHANG Huai-jun, HAN Chun-peng, QIAN Jing-qiu*

(*Technical Center of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp., Baotou* 014010, *Inner Mongolia, China*)

**Abstract:** In the paper, it is mainly introduced the application of solidification terminal electromagnetic stirring technology in round billet caster at Baotou Steel. The results show that when the billet section is Φ390 mm and the steel type is medium carbon steel, the optimal F-EMS parameter is 450 A/8 Hz. The central carbon segregation index of the billet is reduced through the optimized F-EMS parameter, and the equiaxial crystal ratio of the billet is increased, by which the internal quality of continuous casting billet is improved.

**Key words:** F-EMS; carbon segregation index; equiaxial crystal ratio

随着连铸钢种向高品质钢种的转移,对铸坯的内部质量特别是对铸坯的凝固组织细化及均质化要求不断提高,原有的结晶器电磁搅拌的不足逐渐显现[1,2],单一的结晶器电磁搅拌效果已经不能满足新钢种对铸坯质量的要求,从而体现出结晶器+凝固末端组合式电磁搅拌的重要性[3-5]。

包钢1#方圆坯连铸机通过设备改造增加了大断面圆坯Φ390 mm,同时在原有结晶器电磁搅拌的基础上增加凝固末端电磁搅拌装置。对比分析1#方圆坯连铸机采用结晶器电磁搅拌和采用结晶器电磁搅拌+末端电磁搅拌对铸坯内部质量的影响情况,优化末端电磁搅拌参数,从而改善铸坯的致密度,提高中心等轴晶比率,达到提高铸坯内部质量的目的。

## 1 连铸机的主要技术参数

包钢1#连铸机为5机5流弧形连铸机,先后通过技术改造,增加了结晶器电磁搅拌和末端电磁搅拌装置,表1为1#方圆坯铸机主要工艺参数,表2为结晶器电磁搅拌的主要技术参数,表3为末端电磁搅拌参数。1#圆坯连铸机生产的主要品种有碳素结

* 收稿日期:2017-09-20

作者简介:张怀军(1968-),男,河北蛟河人,硕士,正高级工程师,现从事炼钢工艺研究工作。

构钢、低合金结构钢、石油套管等。

表1 1#方圆坯铸机主要工艺参数

| 项目 | 参数 |
|---|---|
| 中间包容量 | 30 t |
| 结晶器长度 | 710 mm |
| 结晶器振频 | 30～300 次/min |
| 结晶器振幅 | ±4.5 mm |
| 流间距/mm | 1 650 |
| 铸坯规格/mm | Φ270、Φ300、Φ350、Φ390、Φ430、280×380、280×325 |
| 拉速/(m·min$^{-1}$) | 0.4～1.6 |

表2 结晶器电磁搅拌的主要技术参数

| 项目 | 参数 |
|---|---|
| 线圈类型 | 外置式内水冷线圈 |
| 电流 | 600 A |
| 频率 | 1～15 Hz |
| 中心磁感应强度 | 600×10$^{-4}$ T |
| 冷却水压力 | 0.5～0.7 MPa |
| 外形尺寸 | Φ830 mm×1 270 mm×650 mm |

表3 末端电磁搅拌的主要技术参数

| 项目 | 参数 |
|---|---|
| 磁场形态 | 旋转磁场 |
| 冷却方式 | 线圈采用独立循环纯净水进行冷却 |
| 电流 | 600 A |
| 频率 | 3～12 Hz |
| 单台冷却水流量 | 30 m$^3$/h |
| 外形尺寸 | Φ1 060 mm×660 mm×880 mm |
| 中心磁感应强度 | ≥600 GS |
| 有效搅拌长度 | 520 mm |

## 2 研究方法

通过了解目前1#方圆坯连铸机结晶器电磁搅拌和末端电磁搅拌参数及现在的应用情况，制定试验方案，具体情况见表4，一是研究采用结晶器电磁搅拌和采用结晶器电磁搅拌+末端电磁搅拌对铸坯质量的影响，二是研究凝固末端电磁搅拌参数对铸坯质量的影响，分析不同电磁搅拌工艺参数对碳偏析、中心等轴晶率、铸坯质量等的影响，确定最佳的末端电磁搅拌参数。

表4 Φ390 mm断面试验方案

| 铸坯断面/mm | 钢种 | 结晶器电搅参数 | | 末端电搅参数 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 频率/Hz | 电流/A | 频率/Hz | 电流/A |
| Φ390 | 中碳钢 | 1.8 | 300 | | |
| Φ390 | 中碳钢 | 1.8 | 300 | 8 | 420 |
| Φ390 | 中碳钢 | 1.8 | 300 | 8 | 450 |
| Φ390 | 中碳钢 | 1.8 | 300 | 8 | 480 |

根据试验方案进行现场试验，取样检验铸坯试样的低倍组织、碳偏析。取铸坯横断面试样，做硫印及热酸检验，检验铸坯的中心疏松、缩孔、裂纹等缺陷等级及测量铸坯的枝晶结构；用6 mm的钻头，沿铸坯中心线间隔一定的距离连续在铸坯的横断面上钻取试样，分析碳的含量，用偏析指数代表横向试样的宏观偏析程度。

## 3 铸坯质量的对比分析

### 3.1 采用结晶器电磁搅拌时铸坯的质量情况

采用结晶器电磁搅拌生产Φ390 mm圆坯时，分析铸坯的硫印检验结果，具体情况见表5。Φ390 mm圆坯中心裂纹2级率最高占到17.39%，中心裂纹3级最高占8.70%，中间裂纹、皮下裂纹0－1级率均为100%，中间裂纹2级占2.17%，夹杂物2级占6.52%。

表5 采用结晶器电磁搅拌时Φ390 mm圆坯硫印检验统计结果

| | 中心裂纹 | | | 中间裂纹 | | 皮下裂纹 | 夹杂物 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0、1级 | 2级 | 3级 | 0、1级 | 2级 | 0、1级 | 0、1级 | 2级 |
| 炉数 | 34.00 | 4.00 | 8.00 | 45.00 | 1.00 | 46 | 43.00 | 3.00 |
| 比率/% | 73.91 | 17.39 | 8.70 | 97.83 | 2.17 | 100 | 93.48 | 6.52 |

图 1 为采用结晶器电磁搅拌时铸坯碳偏析指数情况。由图可知，Φ390 mm铸坯碳偏析指数最大为 1.26。

### 3.2　采用结晶器电磁搅拌 + 末端电磁搅拌时铸坯的质量情况

采用结晶器电磁搅拌 + 末端电磁搅拌生产 Φ390 mm 圆坯时，分析铸坯的硫印检验结果，具体情况见表 6。共统计 Φ390 mm 圆坯 157 炉，其中夹杂物 2 级比率为 7.01%，中心裂纹、中间裂纹、皮下裂纹的 0/1 级比率为 100%。

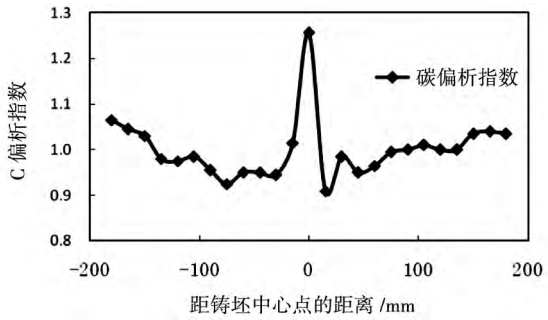



图 1　采用结晶器电磁搅拌时铸坯碳偏析指数情况

图 2 为采用结晶器电磁搅拌 + 末端电磁搅拌时铸坯碳偏析指数情况。由图可知，Φ390 mm 铸坯碳偏析指数最大为 1.16。

表 6　采用结晶器电磁搅拌时 Φ390 mm 圆坯硫印检验统计结果

| | 中心裂纹 | 中间裂纹 | 皮下裂纹 | 夹杂物 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0、1 级 | 0、1 级 | 0、1 级 | 0、1 级 | 2 级 |
| 炉数 | 157 | 157 | 157 | 146.00 | 11.00 |
| 比率/% | 100 | 100 | 100 | 93.48 | 6.52 |

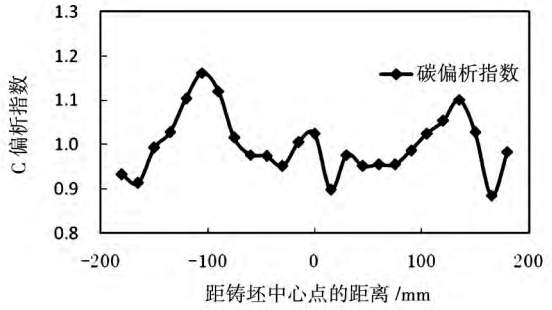



图 2　采用结晶器电磁搅拌 + 末端电磁搅拌时铸坯碳偏析指数情况

## 4　末端电磁搅拌参数的优化研究

### 4.1　生产工艺参数

根据试验方案在 1# 连铸机进行电磁搅拌试验，试验钢种为中碳钢，铸坯断面为 Φ390 mm，具体生产工艺参数见表 7。

表 7　Φ390 mm 圆坯中碳钢不同末端电磁搅拌参数的生产工艺参数

| 试验炉 | 流号 | 结晶器电搅参数 | | 末端电磁搅拌参数 | | 拉速 /(m·min$^{-1}$) | 过热度/℃ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 频率/ Hz | 电流/A | 频率/ Hz | 电流/A | | |
| 第一炉 | 2 | 1.8 | 300 | 8 | 420 | 0.45 | 26 |
| 第一炉 | 3 | 1.8 | 300 | 8 | 450 | 0.45 | 26 |
| 第一炉 | 4 | 1.8 | 300 | 8 | 480 | 0.45 | 26 |
| 第二炉 | 1 | 1.8 | 300 | 8 | 420 | 0.45 | 24 |
| 第二炉 | 3 | 1.8 | 300 | 8 | 450 | 0.45 | 24 |
| 第二炉 | 4 | 1.8 | 300 | 8 | 480 | 0.45 | 24 |

### 4.2　热酸结果分析

每种方案取硫印样，煮热酸分析不同末端电磁搅拌对铸坯内部质量的影响。表 8 为 Φ390 mm 断面中碳钢不同末端电磁搅拌参数的硫印和枝晶结构测量结果。由表可知，凝固末端参数 420 A/8 Hz 其铸坯中心等轴晶区的长度相对较短，柱状晶较发达，450 A/8 Hz 较 420 A/8 Hz 等轴晶区的长度相对较长，柱状晶区的晶粒细，480 A/8 Hz 铸坯枝晶结构与 450 A/8 Hz 的相当，480 A/8 Hz 的中心疏松区比 450 A/8 Hz 稍大，但在中心疏松区的正常范围之内；同时随着电流的增加等轴晶率增加了 9.61%，铸坯细小等轴晶区长度为 8 ~ 9 mm，不随末端电磁搅拌参数的变化而变化，所以柱状晶区面积减小；不同的末端电磁搅拌电流对铸坯的硫印结果基本没有影响，都为 0、1 级。

表8 Φ390 mm断面中碳钢不同末端电磁搅拌参数的硫印和枝晶结构结果

| 试验炉 | 流号 | 中心裂纹 | 中间裂纹 | 皮下裂纹 | 夹杂物 | 等轴晶区长度/mm | 中心等轴晶率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 第一炉 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 185/200 | 49.36 |
| 第一炉 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 200/220 | 53.85 |
| 第一炉 | 4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 225/230 | 58.33 |
| 第二炉 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 175/195 | 47.44 |
| 第二炉 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 195/200 | 50.64 |
| 第二炉 | 4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 220/230 | 57.69 |

### 4.3 碳偏析分析

取样分析不同末端电磁搅拌参数对铸坯横断面碳偏析指数的影响，从内弧到外弧依次钻样取点，分析碳含量变化情况，表9为中碳钢中心碳偏析结果，图3为末端电磁搅拌的频率为8 Hz，电流分别为420 A、450 A、480 A时碳偏析指数情况。

表9 Φ390 mm断面中碳钢不同末端电磁搅拌参数的中心碳偏析结果

| 试验炉 | 流号 | 末端电磁搅拌参数 | | 中心碳偏析指数 | 最大碳偏析指数 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 频率/Hz | 电流/A | | |
| 第一炉 | 2 | 8 | 420 | 0.96 | 1.17 |
| 第一炉 | 3 | 8 | 450 | 0.95 | 1.09 |
| 第一炉 | 4 | 8 | 480 | 0.95 | 1.14 |
| 第二炉 | 1 | 8 | 420 | 1.10 | 1.16 |
| 第二炉 | 3 | 8 | 450 | 0.99 | 1.10 |
| 第二炉 | 4 | 8 | 480 | 0.91 | 1.15 |

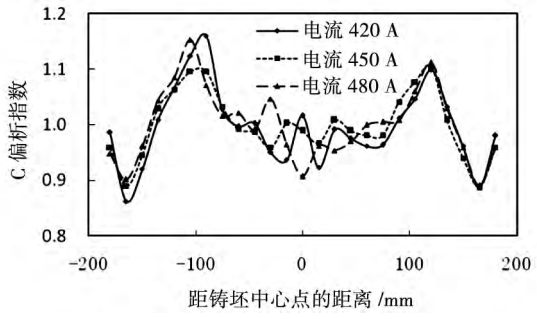



图3 不同末端电磁搅拌参数碳偏析指数情况

由图和表可知，采用不同末端电磁搅拌参数时，在铸坯内外弧的1/4处的碳偏析指数最高，且内弧1/4处碳偏析指数较外弧1/4处碳偏析指数高，在铸坯的边部和中心区域存在负偏析；不同末端电磁搅拌电流时的中心碳偏析指数约为1.0左右；当末端电磁搅拌频率为8 Hz，电流为420 A和480 A时，铸坯最大碳偏析指数约为1.15，电流为450 A时，铸坯最大碳偏析指数1.10，同时铸坯整体碳偏析指数波动较小，所以末端电磁搅拌电流为450 A时碳偏析指数较好。

## 5 结论

(1) 采用末端电磁搅拌后铸坯内部质量明显提高，硫印中心裂纹、中间裂纹、皮下裂纹的0/1级比率大幅提升，最高碳偏析指数由1.26降至1.16。

(2) 通过对不同末端电磁搅拌对铸坯内部质量的分析，当铸坯断面为Φ390 mm时，中碳钢最优末端电磁搅拌参数450 A/8 Hz。

(3) 通过优化末端电磁搅拌参数可以增加铸坯中心的等轴晶比率，降低铸坯的中心碳偏析指数，采用优化参数可使铸坯中心等轴晶率达到50%以上，铸坯碳偏析指数小于1.10。

## 参 考 文 献

[1] 吴存有，周月明，候晓光，电磁搅拌技术的发展[J]. 世界钢铁，2010，(2)：36－41.

[2] 李春龙，姜茂发，王宝峰. 组合电磁搅拌对连铸大方坯内部质量的影响[J]. 东北大学学报，2003，24(7)：34－37.

[3] 王金辉. 末端电磁搅拌磁场的数值模拟及应用[D]. 沈阳：东北大学，2005.

[4] 冯军，陈伟庆，王晓峰，等. 凝固末端电磁搅拌对高碳钢内部质量的影响[J]. 钢铁，2006，41(11)：26－28.

[5] 岳铁军，张宝全，首钢3号铸机凝固末端电磁搅拌技术应用研究[J]. 连铸，2011，(4)：8－13.