

## 350 mm × 470 mm 大方坯结晶器电磁搅拌参数优化

苏春阳 潘明旭 周开明 王 品 刘高利 费三林 饶金元  
(湖北新冶钢有限公司炼钢事业部, 黄石 435001)

**摘要** 对 350 mm × 470 mm 大方坯结晶器电磁搅拌的空载磁场进行了在线测量, 获得了结晶器内磁感应强度分布规律。根据磁场测量结果计算了凝固前沿的电磁力及钢水流动速度, 并分析了电磁搅拌参数对钢水流动速度的影响, 确定了搅拌电流和频率的范围。由 42CrMo 钢现场实验的结果得出, 当结晶器电磁搅拌电流为 150 A, 频率为 2.5 Hz 时, 铸坯横断面的最大碳含量的偏差为 ±0.01%, 带状偏析基本消除, 铸坯内部质量明显改进。

**关键词** 大方坯 结晶器 电磁搅拌 带状偏析

## Optimization on Parameters of Mold Electromagnetic Stirring for 350 mm × 470 mm Bloom Casting

Su Chunyang, Pan Mingxu, Zhou Kaiming, Wang Pin, Liu Gaoli, Fei Sanlin and Rao Jinyuan  
(Steelmaking Department, Hubei Xinyegang Co Ltd, Huangshi 435001)

**Abstract** The in-line measurement on no-load magnetic field of mold electromagnetic stirrer for 350 mm × 470 mm bloom casting has been carried out to get distribution rule of magnetic induction in mold. Based on magnetic field measured results the electromagnetic force at solidifying front and liquid rotational velocity are calculated and the effect of electromagnetic stirring parameters on liquid rotational velocity is analyzed to define the range of stirring current and frequency. The results of commercial casting of steel 42CrMo show that as mold stirring current is 150 A with frequency 2.5 Hz, the maximum deviation of carbon content at cross section of bloom is ±0.01%, the macro-segregation band of bloom is basically eliminated and the internal quality of bloom improves obviously.

**Material Index** Bloom, Mold, Electromagnetic Stirring, Band Segregation

结晶器电磁搅拌可以改善钢水流动状态、适当提高弯月面温度, 改善化渣状态; 均匀坯壳厚度; 抑制柱状晶生长扩大等轴晶区, 进而提高铸坯表面质量(表面及皮下裂纹、夹渣、皮下夹杂和针孔等)和内部质量(内部裂纹、偏析和中心疏松等)<sup>[1]</sup>。本文对湖北新冶钢有限公司 350 mm × 470 mm 大方坯结晶器电磁搅拌的磁场进行了在线测试, 通过现场实验数据分析得到了最佳的结晶器电磁搅拌参数。

### 1 结晶器内磁场分布的测量与结果分析

湖北新冶钢有限公司 350 mm × 470 mm 大方坯连铸机采用 Danieli 进口的外置式结晶器电磁搅拌器。该搅拌器型号为 KLE1225-320; 尺寸: 外径 Φ 1 225 mm、内径 Φ 880 mm、高 560 mm; 电气特性: 最大允许电流为 550 A。结晶器的安装位置如图 1(a) 所示。用长探头的 HT201 型特斯拉计, 在线测量空载时沿拉坯方向在不同的电流及频率下的磁感应强度, 具体测量位置如图 1(b) 所示。

#### 1.1 电流对磁感应强度的影响

从图 2 可以看出, 结晶器内磁感应强度总体呈现“正态分布”规律, 搅拌器中心处磁感应强度最

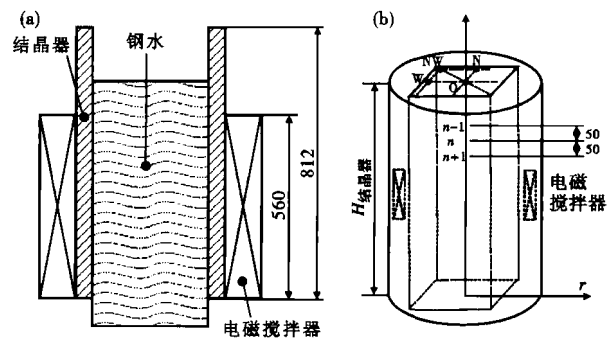


图 1 结晶器电磁搅拌安装(a)和结晶器内磁场测量点(b)示意图

Fig. 1 Schematics of mold electromagnetic stirrer installation (a) and measuring point for magnetic field in mold (b)

大, 向两侧逐渐减小, 磁场中心位于距离结晶器上口约 550 mm 的位置。结晶器内弯月面以下 150 mm 处磁感应强度均约为 10 mT, 该磁感应强度对于改善弯月面附近流动状态十分有利, 同时又不至于引起弯月面较大的波动。

由图 3 可知, 中心磁感应强度的大小随电流增加而增加, 所测电流范围内, 中心最大磁感应强度的大小与电流近似成正比关系。中心磁感应强度能达

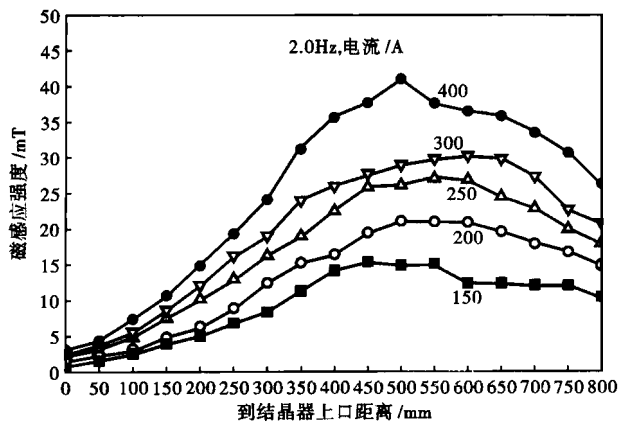


图 2 150 ~ 400 A 电流下结晶器内磁感应强度分布曲线  
Fig. 2 Distribution curves of magnetic induction in mold with current 150 ~ 400 A

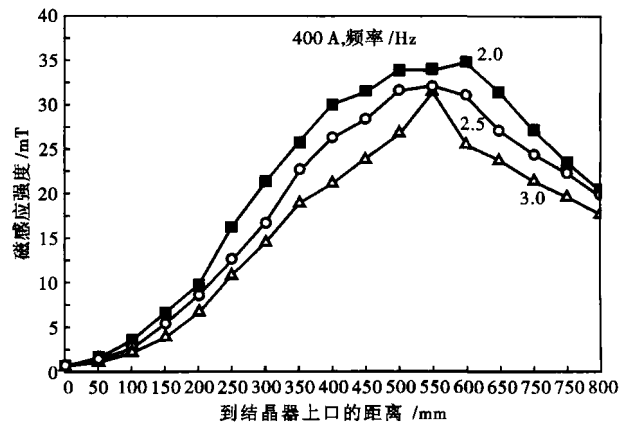


图 4 2.0 ~ 3.0 Hz 频率下结晶器中心磁感应强度分布, 电流 400 A  
Fig. 4 Distribution of magnetic induction at mold center with 2.0 ~ 3.0 Hz frequency, current 400 A

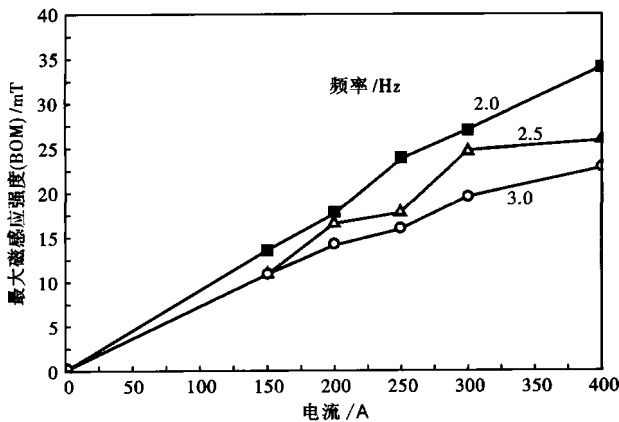


图 3 电流与频率对结晶器中心最大磁感应强度(BOM)的影响  
Fig. 3 Effect of current and frequency on maximum magnetic induction at mold center

到 35 mT, 实际应用和理论研究者认为<sup>[2]</sup>: 中心最大磁感应强度大于 30 mT 时结晶器电磁搅拌开始有搅拌效果。

### 1.2 频率对磁感应强度的影响

由图 4 可知, 中心磁感应强度的大小随频率的增加而减小, 这是由于频率越高, 磁场穿透铜板的能力就越弱, 衰减加快。

由测试结果分析可得:

(1) 当电流及频率一定时, 结晶器内磁感应强度沿拉坯方向分布基本呈现正态分布规律, 无异常波动, 说明变频电源未出现高次谐波叠加于基波波形的现象发生, 表明其变频电源质量较好。

(2) 在不同电流下, 结晶器中心磁感应强度随电流趋于线性变化, 磁感应强度随电流变化具有较宽的线性区。因此, 结晶器电磁搅拌的电流调整范围可以确定在 400 A 以内。

(3) 该结晶器电磁搅拌器性能良好, 在一定参数条件下能够形成较为合理的磁感应强度分布, 发挥较好的冶金效果, 同时也说明该搅拌器的安装位置较为合理, 并且仍存在优化的余地。

## 2 结晶器电磁搅拌参数优化

根据现场测量结果, 本文对不同条件下的搅拌电磁力和钢水流动速度进行计算<sup>[2]</sup>:

$$\bar{F}_\theta(r) = \frac{|B_r|^2 R_m s^{2p-1} S_p (R_m s^2/4)}{2\mu\mu_0 r_i p S_p (R_m/4)} \quad (1)$$

其中:  $R_m = 2\pi f \sigma \mu \mu_0 r_i^2$

$$S_p(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^{2k}}{(p+k)!(p+2k)!k!}, k \text{ 为整数};$$

$$s = r/r_i$$

式中:  $B_r$ - 所求点处的磁感应强度/T;  $r_i$ - 铸坯的半径/mm;  $r$ - 所求点处的半径/mm;  $\mu$ - 非导磁材料的导磁率/( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $\mu_0$ - 自由真空导磁率/( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $f$ - 搅拌器的频率/Hz;  $\sigma$ - 液态金属导电率/( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ) (钢的  $\sigma = 0.714 \times 10^6 \text{ S/m}$ );  $p$ - 搅拌器的极对数。

当  $p = 1$  时, 可以简化为:

$$\bar{F}_\theta = \pi f \sigma |B_r|^2 r \quad (2)$$

钢水流动速度的计算

$$\nu_{\theta\max} = 0.043 \sqrt{\bar{F}_\theta r_s} \quad (3)$$

式中:  $\bar{F}_\theta$ - 凝固前沿的磁场力;  $r_s$ - 凝固前沿的液芯半径。

$p = 1$  时, 将式(2)代入式(3), 得最大速度计算经验公式为:

$$\nu_{\theta\max} = 0.043 |B_r| r_s \sqrt{\pi f \sigma} \quad (4)$$

对于 350 mm × 470 mm 的铸坯,凝固前沿液芯半径等于铸坯窄边的 1/2 再减去坯壳厚度。结晶器内坯壳厚度约为 10 mm,则凝固前沿液芯半径为 165 mm。本文根据磁场测量的条件和结果,依据式(2)和(4)计算了不同电流及频率下凝固前的沿钢水流动速度,如图 5 所示。

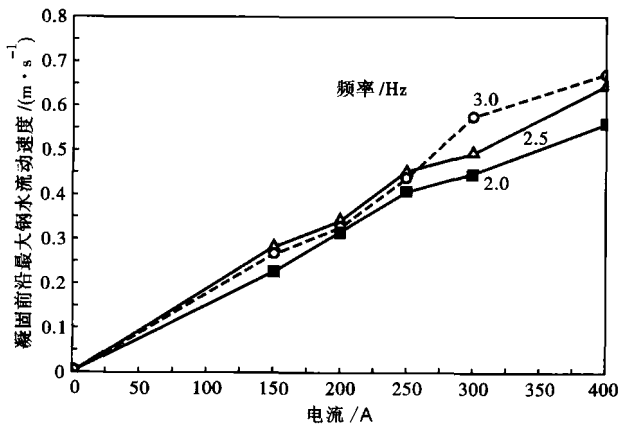


图 5 电磁搅拌的电流和频率对最大钢水流动速度的影响  
Fig. 5 Effect of electromagnetic stirring current and frequency on maximum liquid rotational velocity at solidifying front

由图 5 可知,凝固前沿最大钢水流动速度与电流大小正相关,川崎制钢提出对于中碳钢,其流动速度分别达到 0.15 ~ 0.20 m/s 时,铸坯内可能获得较高比率等轴晶。因此通过磁场测试及计算得出,结晶器电磁搅拌的电流应在 150 ~ 250 A 进行调整,频率对凝固前沿最大钢水流动速度影响较小。

### 3 现场试验

通过以上理论分析,在频率为 2.5 Hz 条件下,对 350 mm × 470 mm 大方坯,在中碳钢 42CrMo 上使用不同的结晶器电磁搅拌参数进行工业试验。350 mm × 470 mm 大方坯的连铸中间包容量为 26 t, 42CrMo 钢的主要化学成分如表 1 所示。

浇铸过程中钢水温度波动在 1 525 ~ 1 513 °C。浇铸结束后,在此浇次第 2 炉第 2 支连铸坯的头部截取长约 300 mm 的试样,横向剖开,截取低倍试样。沿铸坯横向中心线方向,从端部开始,用 Φ5

表 1 42CrMo 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel 42CrMo / %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.38 ~ 0.45	0.17 ~ 0.37	0.60 ~ 0.70	≤ 0.015	≤ 0.010	≤ 0.20	≤ 0.30	0.90 ~ 1.10	0.15 ~ 0.25

mm 钻头,每隔 10 mm 钻取 8 mm 深的孔,共计 19 个,用红外碳硫分析仪进行分析。

结晶器电磁搅拌参数为 200 A/2.5 Hz 时,连铸坯上的带状偏析严重,沿凝固方向,先是产生负偏析,紧接着为正偏析。而 150 A/2.5 Hz 情况较好(图 6)。凝固前沿的钢水流动速度是导致带状偏析产生的重要原因<sup>[3]</sup>。而凝固前沿钢水流动速度与电流大小正相关,因此得出最佳的结晶器电磁搅拌参数为 150 A/2.5 Hz。

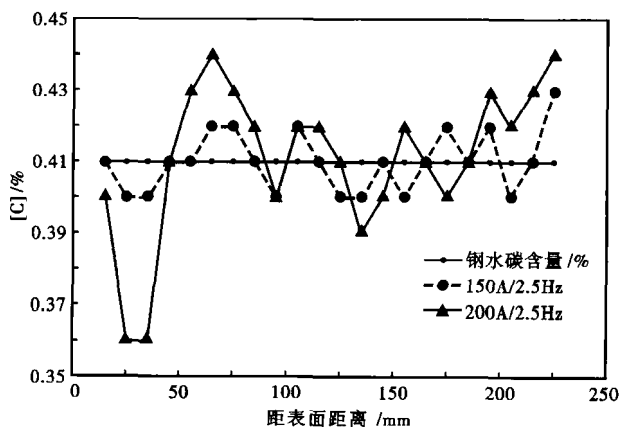


图 6 搅拌电流对铸坯横断面碳含量的影响  
Fig. 6 Effect of stirring current on carbon content in steel at cross section of bloom

### 4 结论

(1) 350 mm × 470 mm 结晶器电磁搅拌变频电源质量较好,搅拌器磁场特性良好,安装位置合理;结晶器电磁搅拌的电流调整范围在 400 A 以内。结晶器电磁搅拌最佳的电流范围在 150 ~ 250 A。

(2) 工业试验结果表明,当结晶器电磁搅拌参数为电流 150 A,频率 2.5 Hz 时,铸坯的带状偏析基本消除,铸坯内部质量得到明显改善。

### 参考文献

- 1 毛 斌,李 进. 特钢连铸电磁搅拌技术实践中的一些问题. 2004 年全国炼钢、轧钢生产技术会议文集,北京,2004
- 2 Spitzer K H. Application of Rotating Magnetic Fields in Czochralski Crystal Growth. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 1999, 38: 57
- 3 贾光霖,庞维成. 电磁冶金原理与工艺. 沈阳: 东北大学出版社, 2003

作者简介见 28 页

收稿日期: 2012-02-03

## 2.2 引流砂的烘烤

引流砂从生产到使用这个过程的周期很长且炼钢厂处在南方,气候潮湿,这些因素使得引流砂中常含有一定量的水分,带水分的引流砂受高温作用,产生的水蒸气和  $\text{SiO}_2$  反应生成类似硅胶的物质,容易将引流砂黏结在一起,导致钢水静压力不能压破烧结层而引流。针对这种情况,炼钢厂购买了烘烤箱,使用前对引流砂进行一定时间的烘烤。

## 2.3 钢包翻渣和钢包水口清扫

炼钢厂 2<sup>#</sup>连铸机由于生产原因,钢包浇完到翻渣时间间隔一直很长,自从把钢包浇完到翻渣时间间隔作为一项考核指标之后,就较好解决了钢包浇完到翻渣由于时间间隔长使残钢残渣堵住水口的问题。

在填引流砂之前,必须要对这些残钢残渣进行清扫。一直以来,操作人员都只是从钢包正面对残钢残渣进行清扫,由于水口有一定的锥度以及水口附近侵蚀非常严重,因此这种清扫很难完全清除水口内部或附近的残钢残渣,造成钢包立起之后,这些残钢残渣向水口回流。针对这种情况,要求操作工人先从钢包正面对残钢残渣进行清扫,之后再从钢包反面对水口进行清扫,此措施解决了残钢残渣回流现象。

## 2.4 投包方式

炼钢厂原引流砂投入方式为人工袋装投入钢包水口,此方法操作简单、速度快、无需任何设备,但是采用此投包方式无法在水口及周围进行定量加砂,

很难形成凸起的馒头状;并且引流砂的包装袋遇到高温迅速融化,把引流砂黏结在一起,降低了引流砂的流动性。通过采用加砂漏斗,实现了在水口及周围定量加砂的目的,保证了引流砂加入后能形成凸起的馒头状,引流砂成馒头状增加了钢水与烧结层的接触面积,也相当于增加了钢水对烧结层的压力。

## 2.5 出钢注流

炼钢厂有 2 台电弧炉(7<sup>#</sup>炉、8<sup>#</sup>炉),对 2 台电弧炉的自开率对比分析发现:炼钢厂共 4 个横班在运转,每个横班都是 8<sup>#</sup>炉的自开率高于 7<sup>#</sup>炉。通过数据分析及现场调研得出:出现此种现象的原因在于 7<sup>#</sup>炉出钢注流直径比 8<sup>#</sup>炉大,出钢注流直径越大对引流砂的冲击越大。为了减小出钢注流对引流砂的冲击,特设计了一个保护罩,此保护罩的使用改善了 7<sup>#</sup>电弧炉自开率比 8<sup>#</sup>电弧炉自开率低的现象。

## 2.6 温度控制

从以下几个方面控制钢水温度:(1)控制钢水过热度;(2)使用钢包包盖、提高钢包温度和中间包温度、减少钢水非冶炼时间来减少钢水过程温降;(3)加强钢水过程温度管理制度,减少人为操作不当造成钢水温度过高。

## 3 应用效果

自 2011 年 7 月对钢包自开率开展研究工作以来,随着各项整改措施的逐步落实,自开率和原来相比有大幅度的提升,对比情况见表 7。

表 7 工艺改进前后钢包自开率的统计结果  
Table 7 Statistic results of free-opening rate before and after process improvement

工艺	引流砂型号	[Mn]/%	平均停留时间/min	出钢温度/℃	平台温度/℃	钢包中钢水/t	统计数/炉	钢包自开率/%
试验前	A	0.5~1.6	180	1 630~1 670	1 500~1 580	69~71	1 911	88.4
试验后	A 或 D	0.5~1.6	160	1 630~1 670	1 500~1 580	69~71	1 563	97.3

注:钢包均为红包或非连用红包。

## 4 结语

引流砂的材质、钢包状况、钢水温度、钢中的 Mn 含量、水口清理、出钢注流、投包方式及生产节奏是影响钢包自开率的重要因素。自 2011 年 7 月开展自开率攻关并随着各项措施的逐步落实,自开率由原来的 88.4% 提升为 97.3%,为生产的顺行和提高铸坯质量创造了良好的条件。

### 参考文献

- Lee T F, Ko Y C. Softening and Melting Behavior of Feldspar for Application in Packing Sands for Sliding Gate System for Steel Ladles.

Merican Ceramic Society Bulletin, 1982, 61(7): 737

- 郑仁和,黄元梅,刘献平,等.攀钢钢包自动开浇技术研究.钢铁钒钛,2000,21(1):50
- 邱文冬,金从进.提高连铸钢包自动开浇率的研究.耐火材料,2003,37(1):19
- 米源.影响钢包自动开浇率的因素分析及措施.武钢技术,2005,45(2):17
- 李运平.提高钢包自动开浇率的试验.耐火材料,2007,41(3):233

苏春阳(1973-),男,工程师,部长,1995年湖南冶金工业大学毕业,洁净钢冶炼研究。

收稿日期:2012-01-10