

文章编号:1000-582X(2007)09-0056-04

末端电磁搅拌工业应用参数的优化试验分析

林国强^{1,2}, 谢植¹, 于小方², 李俊¹, 孔凡杰², 贾光霖¹

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳110004;

2. 南京钢铁集团公司电炉厂, 江苏南京210035)

摘要:针对末端电磁搅拌器现场应用存在的实际问题,对工业用末端电磁搅拌器内的磁感应强度分布,用CT-3型特斯拉计在线进行了全面测试。通过对测试结果的理论分析优化确定了现场应用的末端电磁搅拌器的电磁参数为:电流500 A,频率13 Hz,连续搅拌方式,使搅拌器中心磁感应强度达到119.1 mT,电磁力达到574.2 N/m³,固液界面处钢水最大流速达到0.163 m/s。在77B钢和GCr15-1轴承钢连铸生产中取得了显著改善铸坯中心缩松与偏析的良好冶金效果。

关键词:连铸;电磁搅拌;磁感应强度;电磁参数;优化

中图分类号:TF 777

文献标志码:A

在合金钢连铸工艺过程中,中心偏析与中心缩松是影响连铸坯质量的主要缺陷,同时也会影响到轧材的质量。特别对于中高碳合金钢,减轻或消除中心偏析与中心缩松是连铸工艺必须解决的难题。末端电磁搅拌技术是改善合金钢连铸坯中心偏析与中心缩松行之有效的工艺方法之一^[1-3]。末端电磁搅拌的工业应用需要解决两个重要的工艺问题,一是末端电磁搅拌器的安装位置,二是确定末端电磁搅拌器的电磁参数及搅拌方式,笔者采用了理论计算与工业测试相结合的方法优化确定末端电磁搅拌的电磁参数,通过工业应用的检验取得了比较好的冶金效果。

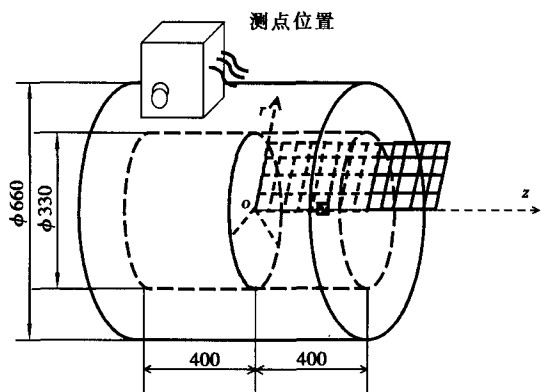


图1 测试点位置示意图

1 测试方法与测试结果

如图1所示,在现场安置待用的末端电磁搅拌器内二分之一对称空间,用坐标架确定要测的不同径向、轴向的位置,用特制的长探头特斯拉计对其内部磁感应强度分布进行了全面的测试。其中 $r=0, z=0$,即搅拌器的中心点,在一定频率条件下,测试了不同电流强度的磁感应强度,并计算了 $r=25\text{ mm}$ 、即有效搅拌区的电磁力 F_{em} 和凝固界面前沿液体金属最大流速 v_{max} ,结果如表1-6所示。

表1 $f=9\text{ Hz}$ 时不同电流强度对搅拌器中心点磁感应强度、电磁力及固液界面处钢水最大流速的影响

I/A	B/mT	$F_{em}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	$v_{max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
50	12.7	4.52	0.004
100	24.5	16.82	0.008
200	50.0	70.61	0.008
300	76.0	161.87	0.086
400	102.3	293.28	0.120
500	123.9	430.21	0.140
550	137.2	527.53	0.160

收稿日期:2007-05-08

作者简介:林国强(1966-),男,南京钢铁集团公司高级工程师,东北大学博士研究生,主要从事钢质量及品种开发研究, (Tel)025-57074628; (E-mail)l_gq2000@hotmail.com。

表2 $f=11\text{ Hz}$ 时电流强度对搅拌器中心点磁感应强度、电磁力及固液界面处钢水最大流速的影响

I/A	B/mT	$F_{em}/(N \cdot m^{-3})$	$v_{max}/(m \cdot s^{-1})$
50	11.6	4.61	0.015
100	23.4	18.76	0.029
200	48.0	78.92	0.060
300	72.4	179.54	0.091
400	97.3	324.28	0.122
500	119.6	489.95	0.151
550	131.3	590.50	0.165

表3 $f=13\text{ Hz}$ 时电流强度对搅拌器中心点磁感应强度、电磁力及固液界面处钢水最大流速的影响

I/A	B/mT	$F_{em}/(N \cdot m^{-3})$	$v_{max}/(m \cdot s^{-1})$
50	11.6	5.45	0.016
100	23.7	22.74	0.032
200	47.9	92.88	0.066
300	72.8	214.54	0.100
400	97.2	382.45	0.133
500	119.1	574.20	0.163
550	131.6	701.05	0.180

表4 $f=15\text{ Hz}$ 时电流强度对搅拌器中心点磁感应强度、电磁力及固液界面处钢水最大流速的影响

I/A	B/mT	$F_{em}/(N \cdot m^{-3})$	$v_{max}/(m \cdot s^{-1})$
50	11.5	6.18	0.017
100	23.4	25.58	0.034
200	47.2	104.06	0.069
300	71.3	237.45	0.105
400	95.4	425.09	0.140
500	118.9	660.31	0.175

表5 $f=17\text{ Hz}$ 时电流强度对搅拌器中心点磁感应强度、电磁力及固液界面处钢水最大流速的影响

I/A	B/mT	$F_{em}/(N \cdot m^{-3})$	$v_{max}/(m \cdot s^{-1})$
50	11.4	6.88	0.018
100	23.1	28.25	0.036
200	46.8	115.94	0.073
300	70.5	263.10	0.110
400	94.4	471.72	0.148
500	106.0	594.78	0.166

表6 $f=20\text{ Hz}$ 时电流强度对搅拌器中心点磁感应强度、电磁力及固液界面处钢水最大流速的影响

I/A	B/mT	$F_{em}/(N \cdot m^{-3})$	$v_{max}/(m \cdot s^{-1})$
50	11.5	8.24	0.020
100	23.3	33.81	0.040
200	47.3	139.33	0.080
300	70.9	313.05	0.120
400	90.9	514.58	0.154

2 电磁参数测试结果与分析

2.1 电磁搅拌器中心磁感应强度分布特点

测试的结果如图2所示,末端电磁搅拌器中心点磁感应强度分布具有明显的特点:磁感应强度与电流强度成正比,与频率成反比。从不同电流,不同频率所测得的中心磁感应强度分布曲线比较可见,当选择电流强度高于500 A时,只有在频率低于12 Hz时才能获得略高于130 mT的磁感应强度,而频率高于13 Hz时,由于末端电磁搅拌器设备的限制,不能达到高于500 A的匹配电流。在末端电磁搅拌器最大允许电流600 A的范围内,欲获得较高磁感应强度,电流应该选择500 A、频率为13 Hz。

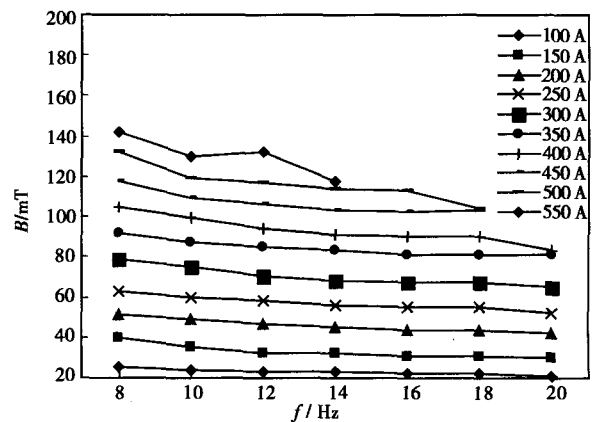


图2 不同电流、不同频率磁感应强度分布曲线

2.2 电磁力的计算

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

式中: $R_m = 2\pi f \sigma \mu \mu_0 r_i^2$; (μ 磁雷诺数)

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

k 为整数; $S = r/r_i$; r_i 为铸坯的半径,在方坯中可以认为是铸坯边长的1/2; r 为所求点处的半径; μ 为材料的相对导磁率; μ_0 为自由真空导磁率; f 为搅拌器的供电频率; σ 为液态金属导电率; p 为搅拌器的极对数。

当 $p = 1$ 时,可以简化为:

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

当 $p = 2$ 时,可以简化为:

$$\bar{F}_\theta = \frac{1}{2} \pi f \sigma |B_r|^2 \frac{r_o^3}{r_i^2} \quad (3)$$

针对 150 mm × 150 mm、150 mm × 220 mm 的铸坯,凝固末端的液芯半径为 25 mm, $r_i = 0.075$ m。电磁力与电流强度成抛物线性递增关系,随频率增加而增加,但随频率变化不明显,如图 3 所示。当搅拌器的电流强度选择 500 A、频率为 13 Hz 时,计算电磁力达到 574.2 N/m³,已达到末端电磁搅拌器中心点电磁力的有效值^[4,6]。而且与更低频率条件下计算得到的末端电磁搅拌器中心点电磁力相近。

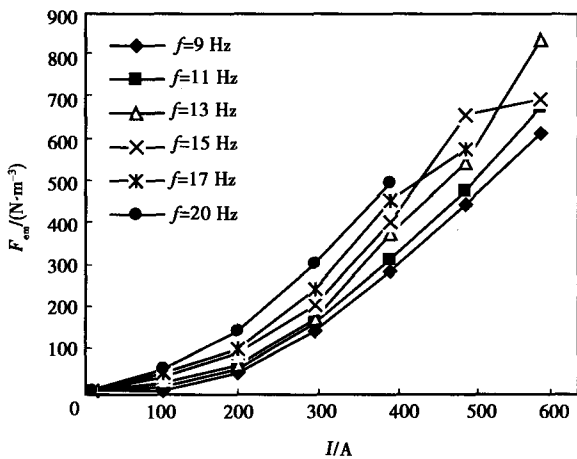


图3 电流强度与电磁力的关系

2.3 最大流速的计算

$$v_{max} = 0.043 \sqrt{F_\theta r_s} \quad (4)$$

式中: \bar{F}_θ 为凝固前沿的电磁力; r_s 为凝固前沿的液芯半径。

如图 4 所示,在电磁力作用下固液界面处钢水的最大流速随着电流强度、频率的增加而增加。当搅拌器的电流选择为 500 A、频率为 13 Hz 时,计算固液界面处钢水的最大流速为 0.163 m/s,而且比更低频率条件下计算得到的末端电磁搅拌最大流速值高。

3 生产应用结果分析

总结上述测量与理论计算的结果,该末端电磁搅拌器最佳的电磁参数应选择为:电磁搅拌器供电电流 500 A、频率为 13 Hz,电磁搅拌器的搅拌方式为连续搅拌。将上述确定的电磁参数应用于工业实验,在主要钢种 GCr15、77B 都取得了较好的冶金效果,如图 5 - 8 所示。从低倍图对比可以明显看出在此种工艺条件下,GCr15、77B 钢无末端电磁搅拌铸坯试样中心缩松很严重,在纵断面上连续出现,中心缩松的程度在 4 级

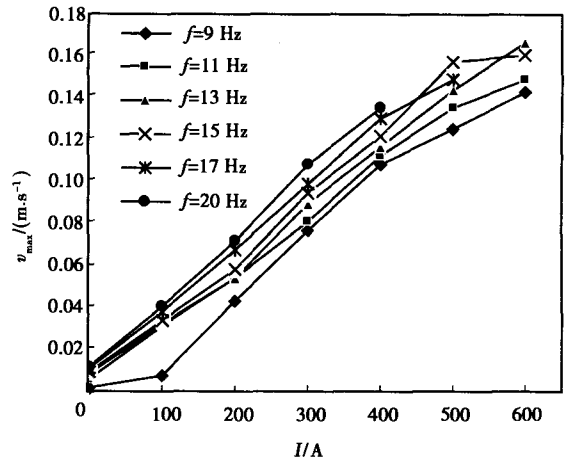


图4 电流强度与最大流速的关系

以上。经过末端电磁搅拌的试样中心部位的缩松基本消除,中心缩松程度按照等级评定图来划分下降到 0 ~ 1 级之间,铸坯内部质量得到显著提高。

而且,对于实际应用的末端电磁搅拌器的磁感应强度测试结果作为技术资料存档,为每台末端电磁搅拌器正常使用、事故判断、维护检修及结构与性能的改进提供可靠的资料。

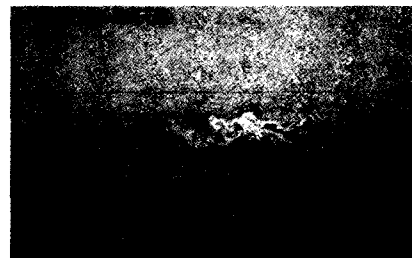


图5 GCr15 钢无电磁搅拌条件下铸坯试样纵向低倍图

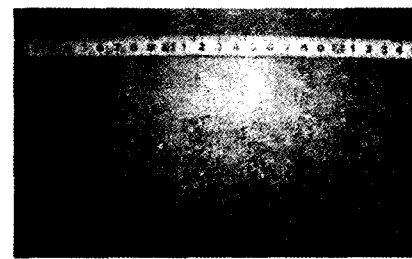


图6 GCr15 钢有电磁搅拌条件下铸坯试样纵向低倍图



图7 77B 钢无电磁搅拌条件下铸坯试样纵向低倍图

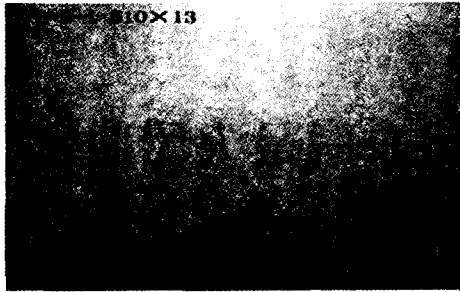


图8 77B钢有电磁搅拌条件下铸坯试样纵向低倍图

4 结论

1) 经过测量和理论计算,该末端电磁搅拌器最佳电磁参数得到确定:供电电流 500 A,频率 13 Hz,连续搅拌;

2) 上述参数应用于工业生产,在 77B 钢和 GCr15-1 轴承钢连铸取得了较好的冶金效果;

3) 该磁感应强度测试结果可作为正常使用、故障

判断、维护检修及性能改进的依据。

参考文献:

- [1] BRIMACOMBE J K. The challenge of quality in continuous casting processes[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1999, 30B(8):553-566.
- [2] KAJITANI T, DREZET J M, RAPPAZ M. Numerical simulation of deformation-induced segregation in continuous casting of steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32A(6):1479-1490.
- [3] LIMOGES J, BEITELMAN L. Continuous casting of high carbon and alloy steel billets with in-mold dual-coil electromagnetic stirring system[J]. Iron and Steel Maker, 1997, 11(24):49-57.
- [4] 曹建刚,王权. 包钢大方坯电磁搅拌器磁场特性测试分析[J]. 包头钢铁学院学报, 2001, 20(4):306-308.
- [5] 韩至成. 电磁冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2001.
- [6] 贾光霖,庞维成. 电磁冶金原理与工艺[M]. 沈阳:东北大学出版社, 2003.

Industry Experiment on Parameter Optimizing of Final Electromagnetic Stirring

LIN Guo-qiang^{1,2}, XIE Zhi¹, YU Xiao-fang², LI Jun¹, KONG Fan-jie², JIA Guang-lin¹

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Electron Steelmaking Plant of Nanjing Iron and Steel Co Ltd, Nanjing 210035, China)

Abstract: The comprehensive test of internal magnetic flux density in an industrial FEMS (final electromagnetic stirring) has been carried out in accordance with the actual applied problems of the FEMS. The electromagnetic parameters have been determined through the theoretical analysis optimization of FEMS: 500 A and 13 Hz in continuous stirring, when the center magnetic flux density of stirrer satisfies 119.1 mT, magnetic site force reaches 574.2 N/m³, the max flow rate at the boundary of solid and fluid is 0.163 m/s. The test results show that the center segregation and porosity had been improved by applying FEMS on the caster.

Key words: continuous casting; electromagnetic stirring; magnetic flux density; electromagnetic parameter; optimize

(编辑 李胜春)