

新技术·新设备

# 舞钢板坯连铸机二冷区电磁搅拌器的参数及其性能\*

中国科学院力学研究所 毛 斌 王世郁 童立荣  
岳阳起重电磁铁厂 刘保其 李爱武 李玉梅

**摘要** 阐述了舞钢板坯连铸机二冷区选用双边行波磁场搅拌器的原理, 给出采用解析法导出的该类型电磁搅拌器中心电磁推力的表达式以及二冷区用电磁搅拌器的电磁参数和冷却系统参数的计算结果。冷态性能测试结果表明, 舞钢板坯连铸机二冷区用电磁搅拌器的研制非常成功。

**叙词** 板坯连铸机 二冷区 电磁搅拌器 参数 性能

**Abstract** This paper expounds briefly the principle of selecting the double-side constant wave electromagnetic stirrer for the secondary zone of continuous caster used in Wuyang Iron & Steel Factory. It is presented that a formula of central electromagnetic driving force from the stirrer is developed by means of analytic method and that the electromagnetic and cooling system functions of the stirrer is evaluated. That the electromagnetic stirrer developed is highly appreciated by Wuyang Iron & Steel Factory is credited with the good results of examining it on off-line condition.

**Descriptors** CCM, secondary colling zone, strand electromagnetic stirrer, parameters, properties

## 1 前言

随着连铸技术的不断进步, 尤其是连铸技术在钢铁工业中的不断推广和普及, 优质和高产的矛盾日渐暴露。为解决这一矛盾, 满足高速生产优质铸坯的需要, 同时为使热送和热装成为可能, 采取了一系列相关的新技术, 电磁搅拌技术就是其中之一。

电磁搅拌技术经过20多年来的不断发展已日趋成熟, 其冶金效果也为人们所熟知<sup>[1]</sup>。电磁搅拌的独特优点是<sup>[2]</sup>: (1) 借助电磁感应将能量无接触地转换成钢水的动能, 从而极大地强化了液相穴中钢水的对流运动, 并且影响钢水的传热和传质, 达到控制钢水凝固过程的目的; (2) 可以在液相穴的任何位置处使用电磁搅拌装置, 从而获得所

需要的相应冶金效果。

由于板坯的宽厚比较大, 目前板坯连铸电磁搅拌器大多数采用行波磁场搅拌器。常用的连铸电磁搅拌器主要有三种类型<sup>[2]</sup>, 即双边行波磁场型、单边行波磁场型和辊式行波磁场型。它们各具特点但又存在某些不足, 因此必需根据板坯连铸机自身的特点, 谨慎选择合适的电磁搅拌器类型。

由于电磁搅拌技术的上述特点及其良好的冶金效果, 世界各国连铸界都重视采用电磁搅拌技术。据不完全统计, 目前世界上有四分之一的板坯, 特别是大板坯和特殊钢板坯连铸都采用了电磁搅拌技术。

由于种种缘故, 我国板坯连铸电磁搅拌技术的采用仍然非常有限, 仅仅局限于几大钢厂, 并且主要是引进国外成套设备。宝钢、武钢和鞍钢等大钢厂分别引进了上述三种类型的电磁搅拌装置, 运用于薄板钢、硅钢和船板用钢等的连铸生产, 并且都取得了明显的效果, 达到提高铸坯质量的目的。鉴此, 舞钢立项进行300mm × 1900mm

\* “八五”攻关项目 (85-311-02-07)

第一作者: 毛斌, 男, 63岁, 教授级高级工程师, 中国科学院力学研究所 (100080)

板坯连铸二冷区电磁搅拌装置的开发研究, 经过岳阳电磁铁厂和中国科学院力学所等有关单位二年多的艰苦攻关, 独立研制成国内第一套板坯连铸二冷区电磁搅拌装置, 大大加快了我国板坯连铸电磁搅拌装置国产化的进程。

## 2 电磁搅拌器类型的选择

电磁搅拌的目的在于改善铸坯质量, 其效果与连铸工艺条件和电磁搅拌器的性能等密切相关, 因此舞钢板坯连铸电磁搅拌器类型的选择既要结合舞钢板坯连铸的工艺特点, 又要考虑电磁搅拌器的技术特点。

舞钢板坯连铸的工艺特点是: 坯厚、拉速慢和液芯小; 其钢种大多是特殊钢, 成分复杂; 其产品大多是厚板, 压缩比小, 因而对铸坯质量特别是芯部质量要求高。

由于板坯连铸宽厚比大, 铸机又采用密排辊配置, 而电磁搅拌又要求电磁搅拌器尽可能靠近铸坯, 以提高其搅拌强度, 减少搅拌所需的功率。

基于上述特点, 经过对各种类型电磁搅拌器的分析比较, 采用双边行波磁场搅拌器是比较合适的, 见图1。该搅拌器的特点是: 两片搅拌器分别安装在铸坯的内外弧侧, 为了尽可能提高电磁搅拌力, 减少所需功率, 每片搅拌器的工作面尽可能靠近铸坯。与此同时, 在搅拌器的顶部上下方各安装一对小径辊, 以减少铸坯因鼓肚变形影响铸坯质量。

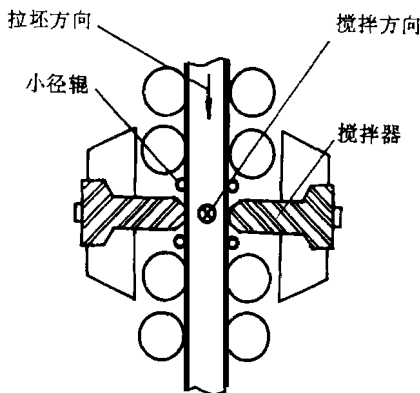


图1 双边行波磁场搅拌装置

## 3 双边行波磁场搅拌器设计参数的计算

电磁搅拌器的作用原理与普通异步电机相类

似, 电磁搅拌器的感应器类似电机的定子, 而钢水则相当于电机的转子, 但两者仍存在重大的差别:

(1) 电机转子中的感应电流只能沿导体流动, 经两侧短路环闭合, 而钢水则是一个连续导体, 感应电流可以在其中自行闭合。

(2) 电磁搅拌器的气隙要比电机的大得多, 其中又有相当大厚度的铸坯和壳体, 导致磁场沿气隙急剧衰减。

(3) 感应器的铁芯是断开的, 即磁场是开路的。

由此导致电磁搅拌器的物理图案远比电机的要复杂得多, 因而在设计理论、设计方法和参数选择上与电机也有很大的不同, 其难度也要大得多。

电磁搅拌器设计参数的计算主要涉及感应器的电磁参数及其冷却系统参数的计算。

### 3.1 电磁参数的计算

为了强化液相穴中钢水的对流运动, 需要电磁搅拌器提供足够大的电磁力。为了计算和检测方便起见, 以中心电磁推力作为参数计算的主要依据。

#### (1) 给定的主要参数

铸坯断面: 300mm × 1900mm

安装气隙: 350mm (两片搅拌器工作面间的距离)

电源频率: 4~ 10Hz

中心电磁推力: 4462 N/m<sup>2</sup>

(2) 感应器的电磁参数。中心电磁推力的计算方法是多种多样的, 如基于场论的解析法和转移矩阵法及数值分析法等等<sup>[3~7]</sup>。借助这些方法可以进行计算和相互校核。由上所述, 电磁搅拌的物理图案是比较复杂的, 其影响因素也是很多的。为了比较直观地显示各种因素对电磁力的影响, 此处采用解析法导出中心电磁推力的解析表达式。

中心电磁推力表达式:

$$f_{\omega} = \frac{1}{2} \sigma (v_s - v) B_0^2 K_s K_t K_p \quad (\text{N/m}^3)$$

式中  $\sigma$ ——钢水导电率

$v_s = 2\tau f$ ——行波磁场速度

$\tau$ ——极距

$f$ ——电源频率

- $v$  ——钢水流速
- $B_o$  ——感应器表面磁感应强度幅值
- $K_s$  ——二次效应系数, 它是与磁相互作用参数  $\epsilon = \frac{\mu_0 (v_s - v)}{\alpha}$ 、波数  $\alpha = \frac{\pi}{T}$ 、气隙  $g$  和铸坯厚度  $b$  等有关的复杂函数,  $\mu_0$  为真空导磁率。
- $K_t$  ——横向效应系数, 它是与波数  $\alpha$  铸坯宽度  $c$  和铁芯宽度  $t$  等有关的函数
- $K_p$  ——纵向效应系数, 它是由于磁路断开引起电磁力减小的修正系数

中心电磁推力表达式:

$$H_{eo} = \frac{f_{co} L}{y} \quad (\text{N} / \text{m}^2)$$

由上述表达式可以看出, 中心电磁推力表达式与众多因素有关, 其中影响较大的有气隙、铸坯厚度和行波速度等等, 由此可见其计算难度的确不小。

基于上述中心电磁推力的计算公式, 可以得到电磁搅拌器(感应器)的电磁参数为:

- 电源频率  $f = 10\text{Hz}$
- 额定电压  $V = 207\text{V}$
- 额定电流  $I = 700 \times 2\text{A}$
- 视在功率  $S = 502\text{KVA}$

### 3.2 电磁搅拌器冷却系统参数的计算

电磁搅拌器能否稳定可靠地运行, 其冷却系统是一大关键, 电磁搅拌器冷却系统涉及壳体、绕

组和铁芯等各个部件的结构, 运用传热计算的方法, 分别作了冷却计算, 所得结果列于表1。

表1

部件名称	冷却水流量/L /m in	温升/
壳体	150	2.66
绕组	60	17.82
铁芯	30	5.06

## 4 性能测试的主要结果

由于在连铸条件下无法测量电磁搅拌器的各项性能, 为此进行了冷态性能测试, 测试目的为:

- (1) 检测电磁搅拌器的各项性能。
- (2) 检测额定电流强度下中心电磁推力是否达到设计指标。
- (3) 为今后电磁搅拌工艺参数的选择提供实测依据。

在整个测试过程中, 对多项性能进行了较为详尽的测试, 其中包括绝缘电阻、直流电阻、各种条件下的伏安特性、磁感应强度幅值及其空间分布、电磁推力及其空间分布和视在功率等参数, 获得近700个数据。经过综合分析, 比较全面地反映出国产化电磁搅拌装置的性能。

为简明起见, 此处只引录其中主要的测试结果。

### 4.1 电磁参数的计算值与实测值比较

主要电磁参数的计算值与实测值列于表2。

表 2

	安装气隙 /mm	频 率 /Hz	电 压 /V	电流强度 /A	视在功率 /KVA	中心电磁推力 /N /m <sup>2</sup>
计算值	350	10	207	700 × 2	502	4462
实测值	350	10	216	696 × 2	520	4743

由表2可知, 该电磁搅拌器的电流强度已基本达到额定值, 中心电磁推力实测值超过了设计指标, 约大6.3%, 而视在功率只比计算值大3.6%。可见, 计算值与实测值吻合得较好。

### 4.2 伏安特性

在  $f = 10\text{Hz}$  的条件下, 电磁搅拌器的伏安特性如图2所示。图中的电压和电流都是两个搅拌器各三相的6个实测值的算术平均值(下同)。由图可见, 在一定频率下, 伏安特性曲线是一条直线, 与理论规律相一致。

### 4.3 平均磁感应强度幅值的空间分布

平均磁感应强度幅值的空间分布是在空载情况下进行的, 即双边搅拌器中间无任何金属材料。

在  $f = 10\text{Hz}$  和不同电流强度下, 平均磁感应强度幅值随气隙的变化如图3所示。此处  $B_{m\delta}$  是沿电磁搅拌器长度方向25个测点的算术平均值(图3)。由于搅拌装置的感应器极距大, 且宽度小, 因此磁感应强度随气隙的增大而急剧衰减。这充分反映了电磁搅拌器性能的一个显著特点。

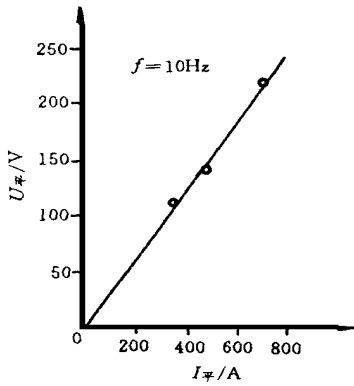


图2 有载时的伏安特性

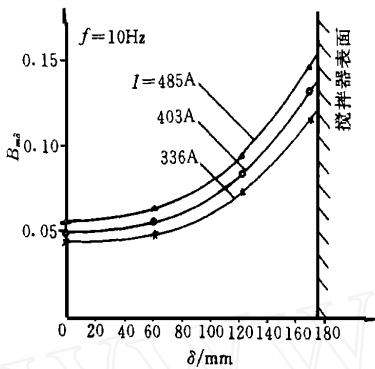


图3 在不同电流强度下平均磁感应强度幅值的空间分布

#### 4.4 中心电磁推力与电流强度的关系

中心电磁推力是本项目的一个重要的考核指标,也是电磁搅拌器性能的一个重要技术指标,它是影响电磁搅拌冶金效果的首要因素。然而在连铸过程中无法测定铸坯液芯中的电磁推力,为此采用冷态模拟测量法。其基本思路是:利用高导电率的黄铜板模拟铸坯。根据理论分析中等效导电率的概念,可建立黄铜板与铸坯之间的转换关系。根据计算,对应于热坯厚度310mm的无限宽(拉坯方向)的铸坯,可用30.3mm厚、200mm宽(拉坯方向)的H68黄铜板来模拟,故近似地取15块2mm×200mm×1500mm的黄铜板,每块黄铜板代表20.67mm的热坯厚度。将15块黄铜板按一定间距悬挂在双边搅拌器气隙中间的铸坯厚度范围内,然后用应变式拉力传感器测出不同电流强度下中间一块黄铜板的拉力值,其读数为kgf值,按 $1\text{kgf}/\text{m}^2 = 9.807\text{N}/\text{m}^2$ 。

在 $f = 10\text{Hz}$ 的条件下,中心电磁推力随电流强度变化的实测值如图4所示。由图可见,电流强

度强烈影响中心电磁推力的大小。所有测量值都落在同一条曲线上,这表明测试结果是正常可靠的。

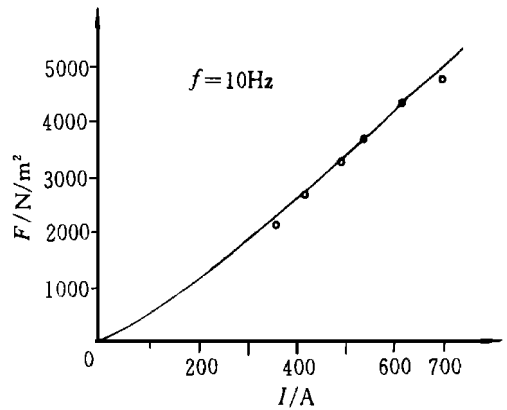


图4 中心电磁推力与电流强度的关系

#### 4.5 绕组冷却水温升

由于性能测试是在冷态条件下进行的,无法完全模拟连铸的实际工况,也由于制造厂电源容量的限制,因此只测试了绕组冷却水的温升。

在经过2个多小时较小电流强度的通电试验后,将电流强度提高到额定值 $696\text{A} \times 2\text{A}$ 时,测得绕组进出口的水温差为 $5^\circ\text{C}$ ,远低于计算值。

### 5 在线电磁搅拌工艺试验的初步结果

1996年2至3月间,电磁搅拌成套装置在舞钢1900mm板坯连铸机上安装并联机调试成功,遂于1996年4至5月间进行了热负荷试车和功能考核,运行情况良好。

热试钢种为A36和SM490B。通过对搅拌和未搅拌两种工况的板坯取样的硫印对比,结果表明两种样品的质量迥然不同:未搅拌的铸坯内部质量为B1.0级,而经过电磁搅拌的铸坯内部质量上升到C0.5级,偏析现象明显改观。功能考核期间,设备运行平稳、可靠,能满足工艺要求。

### 6 结论

将一系列冷态性能测试结果进行综合分析,可以得到如下结论:

- (1) 基于舞钢连铸工艺条件和电磁搅拌器的技术特点,采用双边行波磁场搅拌器是合适的。
- (2) 电磁搅拌器电磁参数的计算值与实测值吻合得较好,表明设计参数的计算基本上是成功

的。

(3) 一些电磁性能参数的测试结果或与理论规律相吻合, 或变化规律比较正常, 这说明测试结果合理、可靠的。

(4) 在线电磁搅拌工艺试验的初步结果表明: 其效果是良好的。

上述结论表明, 舞钢板坯二冷区电磁搅拌器的研制是完全成功的。

### 参 考 文 献

1 曹广畴 倪满森 姚榴枋等. 连续铸钢电磁搅拌译文

(修改稿日期: 1999-07-30)

(上接第3页)

### 参 考 文 献

1 张志文. 叶片锻造. 西安: 西安交通大学出版社, 1987.

2 王乐安. 航空工业中的锻压技术及其发展. 锻压技术, 1994 (1): 57~ 61

3 杨振恒. 陈镜清. 锻造工艺学. 西安: 西北工业大学出版社, 1986.

4 Aksenov L B, Chitkata N R, Johnson W. Pressure and deformation in the plane strain pressing of circular section bar to form turbine blades. Int. J. Meth. Sci., 1975, 17: 681~ 691

5 Akgeman N. Altan T. Application of CAD/CAM in forging turbine and compressor blades. Eng. Power Trans. ASME, 1976, 4: 290~ 296

6 Shahaf M, Bercovier M, Guez D. Interactive Simulation of a Forging Process for Blades. Num. Meth. Ind. Form. Proc., Swansea UK: Pineridge Press., 1982, 343~ 349

7 Iles D G. Forgings for aircraft engines. Metal Forming, 1970 (10): 285~ 290

8 佐藤安彦, 山本和人, 木原茂文. パーティクル流れモデルによる鍛造シミュレーションを用いた鍛造金型設計. 塑性と加工1996, 37 (425): 659~ 662

9 朱谨. 叶片精锻工艺及模具设计 CAD 的过程. 西北工业大学硕士学位论文. 1985.

10 吕丽萍. 有限元法及其在锻压工程中的应用. 西安: 西北工业大学出版社, 1989.

11 Rebelo N, Rydstad H, Schroder G. Simulation of material flow in closed-die forging by model techniques and rigid-plastic FEM. Num. Meth. Ind. Form.

集, 1989.

2 毛斌. 板坯连铸电磁搅拌. 曹广畴主编“现代板坯连铸”冶金工业出版社, 1994.

3 王世郁 毛斌等. 中国科学院力学研究所研究报告, 1994.

4 Boldea et al. Proc. IEE 1974, 123 (1): 89~ 92

5 R. T. H. A Iden et al. Proc. IEE 1974, 121 (11): 1393~ 1398.

6 荣升 毛斌. 连铸, 1997 (1)

7 成田隆ウ. 神钢电机, 1982, 27 (3): 13~ 19

Proc. Swansea. UK: Pineridge Press. 1982, 237~ 246

12 Dung N L, Mahrenholtz O. Progress in the analysis of unsteady metal-forming Processes using the FEM. Num. Meth. Ind. Form. Proc., Swansea UK: Pineridge Press, 1982, 187~ 196

13 Kang B S, Kim N S, Kobayashi S. Computer aided preform design in forging of an airfoil section blade. Int. J. Mach. Tools Manufact, 1990, 30 (1): 43 ~ 52

14 Soltsni B, Mattiasson K, Samuelsson A. Implicit and dynamic explicit solutions of blade forging using the finite element method. J Mater. Process. Technol., 1994, 45: 69~ 74

15 Argyris J H, Doltsinis J S, Luginland J. Three-dimensional thermomechanical analysis of metal forming processes. Proc. Int. Workshop Simulation of Metal Forming Processes by the Finite Element Method. (SMOP-D), Stuttgart, 1985, 125-160

16 Yang D Y, Lee N K, and Yoon J H. A Three-Dimensional Isothermal Turbine Blade Forging by the Rigid-viscoplastic Finite-element Method. Journal of Material Engineering and Performance. 1993, 2: 119 ~ 124

17 Morita A, Hattori S, Tani K, etc. Near Net Shape Forging of Titanium Alloy Turbine Blade. ISIJ International. 1991, 31 (8): 827~ 833

18 朱谨 张志文. 叶片锻造过程的模拟计算. 锻压技术, 1991 (1): 2~ 21

19 鹿守理. 相似理论在塑性加工中的应用. 北京: 冶金工业出版社, 1995.

(收稿日期: 1999-07-06)