

冷坩埚电磁连铸弯月面形状的数值模拟*

曾德鸿 毛斌 鄂学全
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 电磁连铸中弯月面与磁场耦合作用, 磁场约束弯月面成一定的形状. 基于磁流体力学理论, 导出以感应电流为未知量的冷坩埚电磁连铸的弯月面与磁场耦合的数学模型, 并采用等参变换使连续曲面近似弯月面. 在与实验结果对照的基础上, 计算了感应器电流强度、磁场频率、感应器位置以及冷坩埚的分片数等对弯月面形状的影响及变化趋势.

关键词 磁流体力学, 冷坩埚电磁连铸, 弯月面形状, 等参变换, 数值模拟

中图法分类号 TB115, TF777

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)02-0162-05

NUMERICAL SIMULATION OF MENISCUS SHAPE IN COLD CRUCIBLE CONTINUOUS CASTING

ZENG Dehong, MAO Bin, E Xuequan

Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Correspondent: MAO Bin, professor, Tel: (010)62545533-3002, Fax: (010)62561284

Manuscript received 1999-11-13

ABSTRACT Meniscus is shaped by EM field in electromagnetic continuous casting. Starting from the basic theories of magnetohydrodynamics, this paper presents theoretical and numerical model for calculation of meniscus shape in cold crucible continuous casting system. Employing isoparameter transformation makes the continuous curved surface approximate to meniscus. On the basis of comparison with experiment, the effects of some parameters, such as coil current, frequency, coil position and slit number, on the meniscus shape are calculated.

KEY WORDS magnetohydrodynamics, cold crucible continuous casting, meniscus shape, isoparametric transformation, numerical simulation

连续铸钢过程中, 因结晶器振动引起熔融保护渣动压的变化, 导致初始凝固处钢水静压、动压和表面张力的失衡, 使铸坯表面产生波纹状的振痕. 表面振痕是一个宏观缺陷, 影响铸坯的表面质量. 以往运用机械方法, 如提高结晶器振动频率、减小振幅、减小保护渣粘度等, 虽可以减小表面振痕的深度, 但未能从根本上解决铸坯表面振痕问题. 由磁流体力学理论可知, 利用交变电磁场的电磁压力, 实现弯月面与结晶器内壁之间的“软接触”, 是一种新颖的方法. 在电磁压力作用下, 弯月面略微内缩, 使弯月面所受保护渣动压作用减小, 同时保护渣通道扩大, 拉坯阻力相应减小. 相对于传统连铸而言, 弯月面所受机械压力作用小一些, 所以称之为“软接触”. 这种“软接触”与传统连铸技术的结合称电磁连铸. 其中, 最有应用前景的是高频电磁场“软接触”方

案, 通常又称作冷坩埚电磁连铸 (cold crucible continuous casting), 或 4C process.

实验研究表明, 冷坩埚电磁连铸可以改善铸坯的表面性状^[1,2]. 在电磁压力作用下弯月面成一定形状, 弯月面的形状主要取决于电磁压力与钢水的静压之间的平衡; 同时, 电磁压力的分布又受弯月形状的影响. 定量分析电磁场与弯月面的耦合作用, 对于模拟实验和工程设计以及工艺参数的选择都有参考意义.

Lavers 等^[3]用二维模型讨论电磁连铸系统的电磁压力分布特点. Sakane, Li, Cook 等^[4-7]对 Al 合金电磁连铸自由面与交变电磁场的耦合作用做过比较详细的研究. Cook^[6]采用带圆角的方台体表面来近似方坯 Al 合金电磁连铸的弯月面, 整个弯月面形状的调节控制简化成对其纵剖面上二维折线的调节. 本文将该方法推广到冷坩埚电磁连铸弯月面的近似, 并作了改进, 采用等参变换使其能用连续曲面近似弯月面. 用文献中的一个模拟实验结果来检验本计算方法, 在此基础上计算了感应器电流强度、电源频率、感应器位置、冷坩埚分片数等因素对弯月面形状的影响. 从总体

* 国家自然科学基金资助项目 19572069

收稿日期: 1999-11-13

作者简介: 曾德鸿, 男, 1972 年生, 博士

上把握了弯月面与磁场的耦合作用的特点, 揭示了影响弯月面形状的主要因素及变化趋势, 为下一步的模拟实验和工程设计以及工艺参数的选择提供了一个比较简便的数值模拟方法.

1 基本方程及无量纲参数

基于磁流体力学理论, 导出冷坩埚电磁连铸弯月面与磁场耦合的数学模型, 图 1 是简化模型的示意图, 图中 CD 表示感应器所在位置的距. 感应器中通有频率和强度已知的交变电流, 激发交变的磁场, 诱导产生分布于坩埚和熔体内的感应电流. 该感应电流与当地磁场相互作用, 在熔体内产生 Lorentz 力. 作用在熔体上的 Lorentz 力可以分解为有旋分量和无旋分量, 有旋分量诱导熔体的旋转流动, 无旋分量产生磁压. 量级分析结果显示, 有旋分量相对无旋分量的量级为 δ/L , δ 是穿透深度, L 是特征长度, 一般取铸坯半厚度, 频率比较高时 $\delta/L \ll 1$. 因此本文只考虑 Lorentz 力的无旋分量, 即磁压.

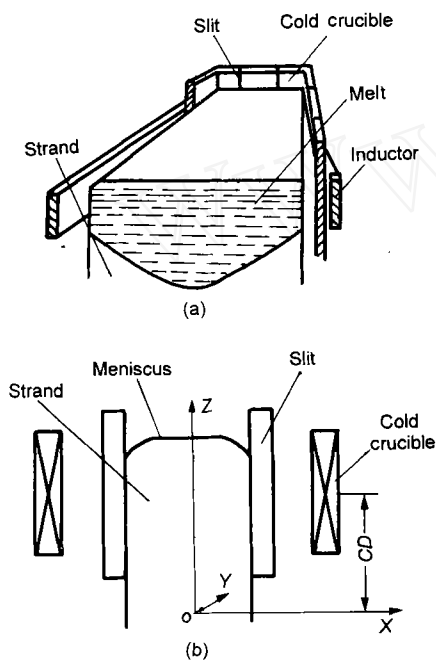


图 1 4C 过程和坐标系

Fig.1 Cold crucible continuous casting process (a) and corresponding coordinate system (b)

以感应电流为未知量, 建立积分方程, 通过求解感应电流来求得电磁场. 设特征长度为 L , 特征电流密度为 J_0 , \vec{r} 为坐标点 (x, y, z) 的矢径, R 为弯月面曲率半径, \vec{B} 为磁感应强度, P_m 为磁压力, $B_0 = \frac{\mu L J_0}{8\pi}$, $P_0 = \frac{\mu L^2 J_0^2}{64\pi}$, $\vec{r}^* = \vec{r}/L$, $R^* = R/L$, $Z^* = Z/L$, $\vec{B}^* = \vec{B}/B_0$, $P_m^* = P_m/P_0$; 渗透深度定义为 $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$, 其中, μ 为磁导率, σ 为导电率, ω 为角频率. 则描述本问题的无量纲方程组为

$$J^*(\vec{r}^*) = -iK_\delta \iiint \frac{\vec{J}^*(\vec{r}'^*)}{|\vec{r}^* - \vec{r}'^*|} dv \quad (1)$$

$$\vec{B}^*(\vec{r}^*) = \iiint \frac{\vec{J}^*(\vec{r}'^*) \times (\vec{r}^* - \vec{r}'^*)}{|\vec{r}^* - \vec{r}'^*|^3} dv \quad (2)$$

$$P_m^* = B^{*2} \quad (3)$$

$$P_m^* + K_\gamma \left(\frac{1}{R_1^*} + \frac{1}{R_2^*} \right) + K_s (Z_0^* - Z^*) - K(Z_0^* - Z^*) = 0 \quad (4)$$

式 (1) 中 i 为虚数单位. 式 (3) 表示一个周期内的平均磁压, 式 (4) 表示忽略熔体旋转流动的沿弯月面的平衡方程. 4 个无量纲参数分别为

$$K_\gamma = \frac{64\pi\gamma}{\mu J_0^2 L^3} \quad (5)$$

$$K_s = \frac{64\pi\rho_s g}{\mu J_0^2 L} \quad (6)$$

$$K = \frac{64\pi\rho g}{\mu J_0^2 L} \quad (7)$$

$$K_\delta = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{L}{\delta} \right)^2 \quad (8)$$

式中, ρ 为熔体的密度, ρ_s 为熔融保护渣的密度, g 为重力加速度, γ 为表面张力系数, 无量纲参数 K_γ, K_s, K 分别反映表面张力, 熔融保护渣静压和熔体静压与电磁压力的相对大小. K_δ 反映特征长度与穿透深度的相对大小.

关于电磁场计算, 简要地讲, 就是将感应电流分布的区域离散成互不相交、互不重叠的一系列闭合的电流管, 其 xoz 截面的示意图如图 2b 所示, 每一个小单元表示一个电流管的横截面, 该单元上近似认为电流密度均匀分布. 计算所考虑的熔体区域的上边界 $Z_u(x)$ 就是这里关心的弯月面与 XoZ 平面的交线, 下边界 Z_l 选在离上边界 3—4 倍特征长度远的地方; 右边界 X_u 是熔体与坩埚相接触的部分, 左边界 X_l 距右边界 4—5 倍穿透深度. 设熔体上划分电流管为 $M \times N$ 个, 坩埚上 $M_c \times N_c$ 个, 感应器 $M_s \times N_s$ 个, 方程 (1) 离散成如下代数方程

$$I_{kj} = -\frac{iK_\delta}{l_{kj}} \left[\sum \Omega_{klpq} I_{pq} + \sum \Omega_{kurt} I_{rt} + \sum \Omega_{kusw} I_{0,sw} \right] \quad (9)$$

式中, $1 \leq p \leq M$, $1 \leq q \leq N$; $1 \leq r \leq M_c$, $1 \leq t \leq N_c$; $1 \leq s \leq M_s$, $1 \leq w \leq N_s$; $1 \leq k \leq M$, $1 \leq j \leq N$; $M+1 \leq k \leq M+M_c$, $N+1 \leq j \leq N+N_c$; l 和 u 代表边界值的下标.

$$\Omega_{kj pq} = \int \int \frac{S_{kj}(\vec{r})}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \vec{r}_p \vec{r}'_q \cdot d\vec{l} \cdot d\vec{l}' \quad (10)$$

其中 I_{kj} 表示某一电流管上未知电流强度; $I_{0,sw}$ 是感应器上已知的电流强度. l_{kj} 表示闭合电流管中轴线的弧长,

$S_{kj}(\vec{r})$ 为电流管的横截面积, \vec{r}_p, \vec{r}_q 分别表示任意两条电流线的切向单位矢量.

进行计算时, 先假定一个初始的弯月面形状, 划分 XoZ 截面上熔体部分的电流管横截面网格 (见图 2b), 同时划分出冷坩埚上电流管分布; 求解方程 (9), 进而由式 (2)~(4) 来计算电磁压力分布, 考查沿弯月面各项压力的平衡. 引入参数 ε , 令

$$\varepsilon^2 = \sum_k \{P_{m,k}^* - [K_\gamma (\frac{1}{R_{1,k}^*} + \frac{1}{R_{2,k}^*}) + K_s(Z_0^* - Z_k^*) - K(Z_0^* - Z_k^*)]\}^2 \quad (11)$$

式中 $k = 1, 2, 3, \dots$, 表示沿弯月面求和. 如果 ε 值较大, 则依据压力差值, 适当在各点调整弯月面形状, 重新划分网格计算, 直至 ε 的值很小或前后两步的 ε 值之差为很小. 此时弯月面形状便是耦合作用最终的弯月面形状. 为简化计算, 我们假设弯月面与不同水平高度的水平面的交线都是同轴相似的方形环, 调节弯月面与坐标面 XoZ 平面的交线 $Z_u(x)$ 也就调节了整个弯月面的形状.

2 等参变换及网格加密

熔体部分的网格划分有不同的方式, 一般地要考虑到趋肤效应, 弯月面和外边界附近的网格应密一些, 熔体内部和离弯月面远的地方稀疏一些. Cook^[6] 的离散方法如图 2a 所示, 采用直接在物理坐标系内划分, 对初始弯月面一次划分好以后不再重新划分, 弯月面的调整靠水平向内或向外移动已划分好的方形网格来实现, 最后得到台阶状的折线近似弯月面. 采用等参正变换

$$\xi = \frac{X - X_1}{X_k - X_1} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{Z - Z_1}{Z_k - Z_1} \quad (13)$$

及变换

$$\xi = 1 - \frac{e^{k_1 \alpha} - 1}{e^{k_1} - 1} \quad (14)$$

$$\eta = 1 - \frac{e^{k_2 \beta} - 1}{e^{k_2} - 1} \quad (15)$$

把物理平面 XoZ 的区域映射成 α, β 平面上的规则区域, 该区域上的等分划分, 映射回物理平面得到一个网格划分, 如图 2b 所示. 弯月面调整, 也就是改变函数 $Z_u(x)$, 对应又得到新的网格, 不会出现台阶状的折线. 参数 k_1, k_2 分别控制向弯月面和向侧面加密的程度.

3 计算结果及讨论

3.1 与模拟实验结果的对照

为了验证计算方法的可靠性, 选择 Morishitz 的实验结果^[1] 来对照. 计算参数是参照该实验的参数设定的, 熔体为锡, 铸坯尺为 120 mm×120 mm, 坩埚厚度为 10 mm; 坩

埚分片数为 20 片; 坩埚槽宽为 2 mm; 线圈匝数为 5 匝; 线圈电流频率为 8000 Hz; 线圈电流强度为 1000 A; 线圈位置为其中心与弯月面顶部齐平. 图 3 是计算结果与实验值的比较. 圆圈是在冷坩埚铜片前测得的弯月面, 黑三角代表冷坩埚槽前的弯月面形状. 实验结果显示, 弯月面形状在冷坩埚槽前和铜片前略有不同, 这是由冷坩埚的分片结构使电磁压力分布不均所致. 由于只考虑电磁压力的平均作用, 对弯月面作了平均的近似, 没有考虑弯月面更细致的结构, 所以计算结果反映不出这一点差别, 但总体上还是比较接近于实测结果. 弯月面上部计算结果与实验值相差较小, 低于 5%; 弯月面下部特别是接近冷坩埚壁处, 偏差较大, 但最大也只有 10% 左右. 这可能与计算中忽略熔体内流动和网络不够

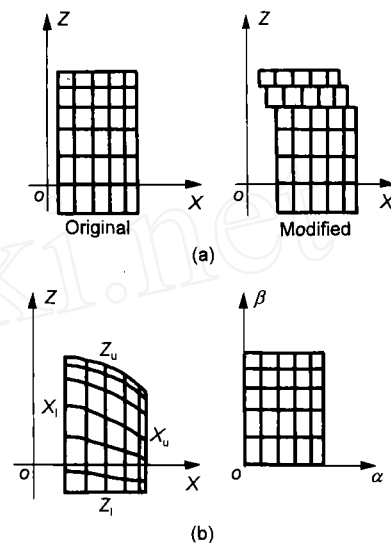


图 2 弯月面模拟方法的比较

Fig.2 Comparison of simulated meniscus methods, each small unit representing the section of a current tube (a) Cook method (b) the present method

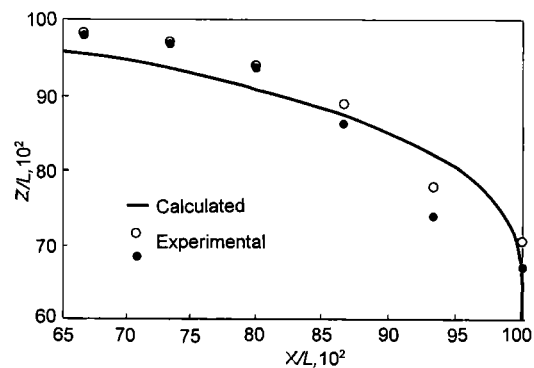


图 3 计算的弯月面形状与实验结果的比较

Fig.3 Comparison between the calculated and experimental shape of meniscus (circle and triangle representing the values measured at the front of Cu plate and groove respectively)

密有关.

3.2 一些因素对弯月面影响的计算结果

在与实验结果对比验证的基础上, 计算了钢的冷坩埚电磁连铸的弯月面形状. 下面所用的计算参数是: 熔体为钢水; 铸坯尺寸为 150 mm×150 mm; 坩埚厚度为 10 mm; 坩埚分片数为 16 和 20; 坩埚槽宽为 2 mm; 线圈匝数为 5; 线圈电流强度为 600—1200 A; 线圈电流频率为 10 和 100 kHz; 线圈位置可调.

3.2.1 电流强度对弯月面形状的影响 图 4 给出了弯月面形状随感应器电流强度的变化. 电流强度比较小时, 弯月面形状基本不受影响, 但弯月面与坩埚之间的机械压力有所减弱; 随着电流强度的增加, 弯月面上部逐渐产生弯曲并脱离冷坩埚内壁.

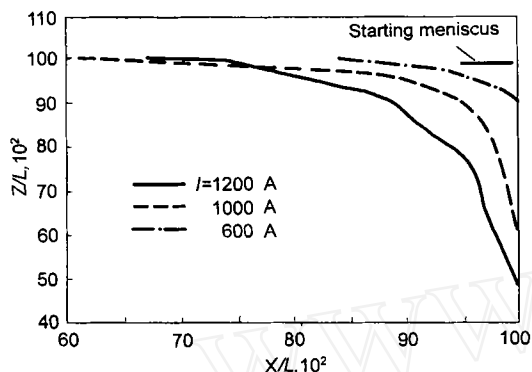


图 4 弯月面形状与电流强度的关系
Fig.4 Meniscus shape vs inductor current intensity

详细考查弯月面附近的电磁压力分布, 可以看到电磁压力在弯月面附近比较集中, 沿竖直方向变化剧烈. 这容易使弯月面产生过多的弯曲, 不利于铸坯表面质量的改善. 为避免弯月面过度弯曲, 磁场强度不宜太高.

实验表明, 冷坩埚电磁连铸弯月面形状是非常复杂, 有表面凹陷和隆起等结构 [1]. 用简单的连续曲面来近似弯月面, 可以在总体上给出弯月面形状. 从本研究问题的目的来看, 这样的计算结果是可以接受的. 如果需要考虑弯月面的精细结构, 可以用复杂一些的曲面来近似弯月面. 这无疑会增加计算量, 而得到的却可能是在工程意义上讲没有差别的结果, 显然是不可取的.

3.2.2 电流频率对弯月面形状的影响 图 5 是 10 kHz 和 100 kHz 时弯月面形状. 实线和虚线分别代表 100 kHz 和 10 kHz 的情况. 频率越高, 渗透厚度越小, 磁约束效应越强, 使弯月面在侧面上向内弯曲越大.

3.2.3 弯月面形状与感应器位置的关系 图 6 是不同感应器位置时对应的弯月面形状. 由于电磁压力在弯月面附近分布比较集中, 梯度较大, 感应器的位置变化导致弯月面形状相应的变化. 图中给出的是三个感应器位置对应的弯月面形状, CD 是感应器中心的 Z 坐标位置, 感应器电流

强度为 900 A. 感应器中心靠近弯月面顶部时能约束的熔体高度较大. 同样地, 针对具体的情况, 可以通过计算一系列的感应器位置对应的弯月面形状, 从中选取合适的的感应器位置参数.

3.2.4 坩埚分片数对弯月面形状的影响 图 7 是坩埚分片数为 20 和 16 时的弯月面形状. 分片多的坩埚对磁场屏蔽少一些, 此时弯月面在电磁压力作用下向内收缩较多. 增加分片数可以增强电磁场的作用, 但分片过多的坩埚加工更困难.

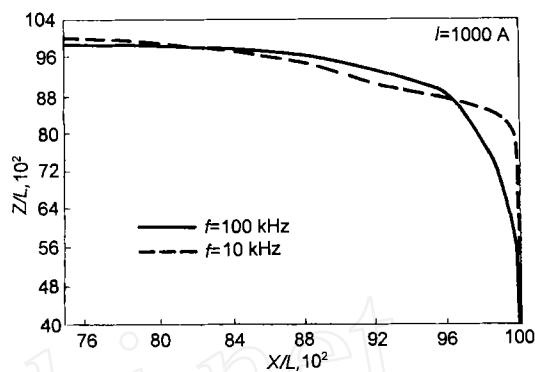


图 5 弯月面形状与电流频率的关系
Fig.5 Meniscus shape vs current frequency

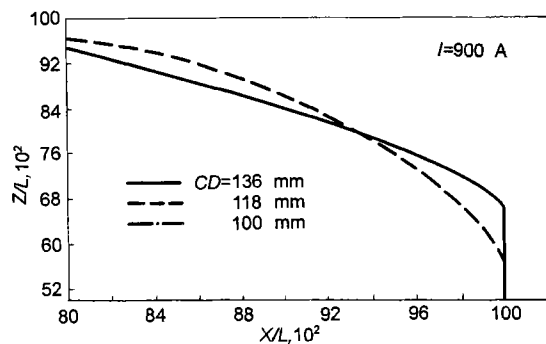


图 6 弯月面形状与感应器位置的关系
Fig.6 Meniscus shape vs inductor position

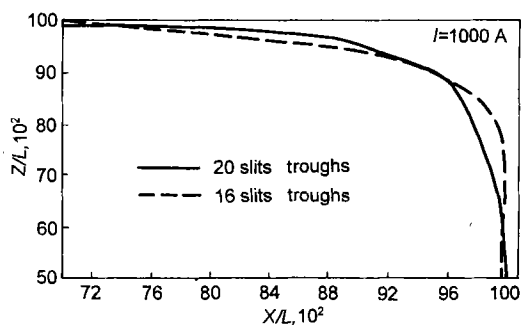


图 7 弯月面形状与分片数的关系
Fig.7 Meniscus shape vs slit number

4 结论

(1) 以感应电流为未知量, 导出冷坩埚电磁连铸弯月面与磁场耦合的数学模型; 发展了弯月面的模拟方法, 采用等参变换使其能用连续曲面近似弯月面; 计算程序可模拟多工况下弯月面与磁场的耦合作用, 计算能在 PC 机上执行, 并且耗时不多. 计算结果与实验案例符合较好, 表明本文的数学模型和数值方法是可行的.

(2) 定量考查了感应器电流强度、电源频率、感应器位置和坩埚分片数等对弯月面形状的影响. 结果表明, 它们都对弯月面形状产生不同程度的影响. 然而, 较大范围地调节电源频率, 过多地对冷坩埚分片, 实施的技术难度大, 比较

切实可行的是, 调节感应器的位置和电流强度来控制弯月面的形状.

参考文献

- [1] Morishita M, Nakata H, Ayata K, Koyama S, Hosokawa Y, Fukumoto H. In: Szekely J ed, *Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy*, TMS, Warrendale, PA, 1991: 267
- [2] Nakata H, Kokita M, Morisita M, Ayata K. In: Asai S ed, *International Symposium on EPM*, Nagoya, ISIJ, 1994: 166
- [3] Lavers J D. *IEEE Trans Ind Appl*, 1986; 1A-22(4): 586
- [4] Sakan J, Li B Q, Evans J W. *Metall Trans*, 1988; B19: 397
- [5] Li B Q. *IEEE Trans Magn*, 1989; 25(6): 4443
- [6] Cook D P, Evans J W. *Metall Mater Trans*, 1995; B26: 1263
- [7] Li B Q, Evans J W. *IEEE Trans Magn*, 1989; 25: 4449

www.cnki.net