

电磁连铸中磁约束效应的数值模拟¹⁾

曾德鸿 毛 斌 鄂学全
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 在连续铸钢中, 控制钢的初期凝固来减小波纹状的表面振痕, 对生产无表面缺陷的铸坯是极端重要的. 由磁流体力学理论可知, 利用交变磁场的磁约束效应, 实现弯月面与结晶器壁之间的“软接触”, 从而能生产无表面缺陷的铸坯. 在电磁连铸中, 确定弯月面形状是磁约束计算中的重要内容, 也是成功实现电磁连铸的关键. 以基于高频电磁场的方形冷坩埚电磁连铸(4C 过程) 作为研究对象, 导出以感应电流作为未知量的描述弯月面形状的流体和电磁等各个压力平衡的无量纲方程组, 发展了基于等参变换的连续曲面近似弯月面的模拟方法. 在此基础上定量考查感应器电流强度、电流频率、感应器位置及坩埚分片数等对弯月面形状的影响.

关键词 电磁连铸, 磁约束, 冷坩埚, 弯月面形状, 等参变换, 数值模拟

引 言

在连续铸钢过程中, 因结晶器振动而产生熔融保护渣的动压作用于初期凝固的弯月面上, 使铸坯表面产生波纹状的表面振痕. 表面振痕影响铸坯的表面质量. 一些常规的办法可以用来减小表面振痕的深度, 如提高结晶器振动频率; 减小振幅; 减小熔融保护渣的粘度等等, 然而这些方法未能从根本上解决铸坯表面振幅问题. 由磁流体力学理论可知, 利用交变磁场的磁约束效应, 实现弯月面与结晶器壁之间的“软接触”, 从而能连铸无表面缺陷的铸坯. 相对于传统连铸而言, 由于电磁压力的作用, 弯月面所受机械压力的作用要小一些, 所以称之为“软接触”. 基于高频磁场的冷坩埚(水冷铜坩埚) 电磁连铸(cold crucible continuous casting) 或称 4C 过程尤其具有良好的应用前景. 冷坩埚电磁连铸是将冷坩埚高频感应熔化炉移植到常规连铸中, 冷坩埚是将铜结晶器用纵向槽分隔成彼此电绝缘的若干片, 每片的内部通水冷却.

在电磁连铸中, 弯月面(或称自由面) 的形状由作用其上的钢水静压、表面张力、钢水动压和磁压等的平衡确定. 确定弯月面形状是磁约束计算中的重要内容, 而获得合适的弯月面形状是成功实现电磁连铸的关键. 以往不少作者研究过弯月面与交变磁场耦合的特点^[1~4], 本文将 D.P. Cook 的方法推广到方形冷坩埚电磁连铸, 并采用等参变换使得能用连续曲面近似弯月面, 在此基础上, 定量考查了感应器电流强度、电流频率、感应器位置和坩埚分片数等等对弯月面形状的影响.

1 无量纲方程和无量纲参数

图 1 是简化模型的示意图.

1998-07-21 收到第一稿, 1999-11-12 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目(19572069).

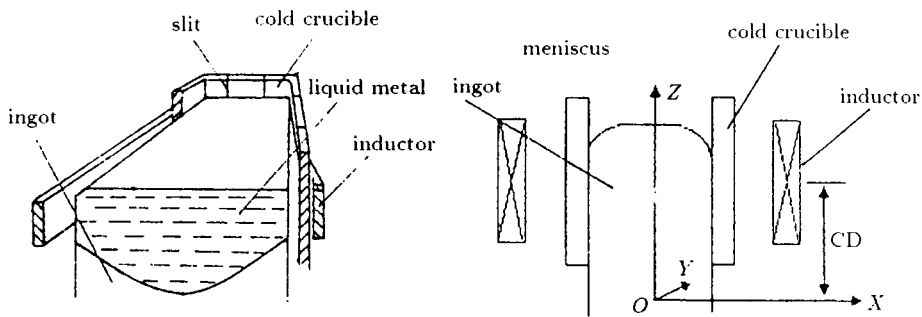


图 1 4C 过程和坐标系

Fig.1 4C process and the coordinate system

设特征长度为 L , 特征电流为 J_0 , 记

$$B_0 = \frac{\mu L J_0}{4\pi}, \quad P_0 = \frac{\mu L^2 J_0^2}{64\pi^2}, \quad B^* = B/B_0, \quad P_m^* = P_m/P_0, \quad r^* = r/L$$

则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无量纲方程组为

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

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

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

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

其中无量纲参数 K_r, K_s, K 分别反映表面张力、熔融保护渣静压和熔体静压与磁压的相对大小, K_s 反映渗透深度与特征长度的相对大小.

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

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

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

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

式中 B_0 为弯月面顶点的磁感应强度, P_0 为静压, μ 为导磁率, γ 为表面张力系数, ρ_s 为熔融保护渣密度, ρ 为熔体密度, g 为重力加速度, R_1^* 和 R_2^* 为弯月面曲率半径, 渗透厚度 $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$, σ 为熔体导电率, ω 为电源的角频率.

2 等参变换和网格加密

D.P. Cook 的离散方法采用直接在物理坐标系内划分，用台阶形的折线近似弯月面，如图 2(a) 所示。本文采用等参变换。

$$\zeta = \frac{x - x_l}{x_k - x_l} \quad \text{和} \quad \eta = \frac{z - z_l}{z_k - z_l}$$

及变换

$$\zeta = 1 - \frac{e^{k_1 \alpha} - 1}{e^{k_1} - 1} \quad \text{和} \quad \eta = 1 - \frac{e^{k_2 \beta} - 1}{e^{k_2} - 1}$$

将物理平面 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 2(b)。计算所考虑的熔体区域的上边界 Z_u 就是弯月面与 XOZ 平面的交线，下边界选在离上边界 3~4 倍特征长度，右边界 X_u 是熔体与坩埚壁相接触的部分，左边界 X_l 距右边界 4~5 倍的渗透厚度。弯月面的调整也就是调整函数 $Z_u(x)$ ，参数 k_1 和 k_2 分别控制向弯月面和侧面的加密。

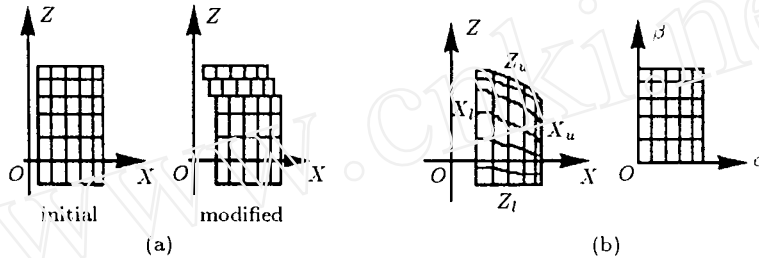


图 2 弯月面模拟方法的比较

Fig.2 Comparison of simulation to meniscus

3 计算结果

计算对象：钢水，计算所用参数量，铸坯尺寸：150 mm×150 mm²；坩埚厚度：10 mm；坩埚分片数：16 和 20；坩埚槽宽：2 mm；感应器线圈匝数：5；电流强度：200~1200 A；电流频率：10~100 kHz；线圈位置：可调。

不同电流强度、电流频率、感应器位置和坩埚分片数等对弯月面形状影响的计算结果分别见图 3~6。由图可见，它们都对弯月面形状产生不同程度的影响。但电流强度过强、感应器位

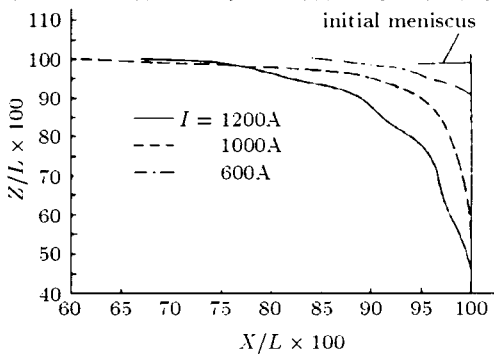


图 3 弯月面形状与电流强度的关系

Fig.3 Meniscus shapes with different inductor currents

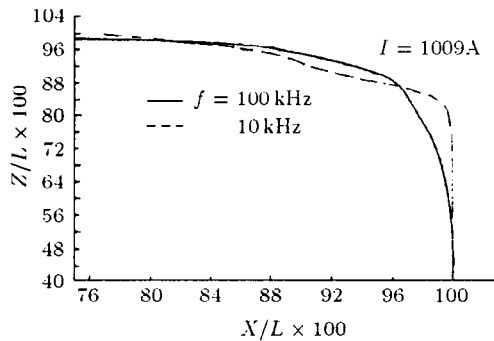


图 4 弯月面形状与电流频率的关系

Fig.4 Meniscus profile at different frequency

置过高, 弯月面弯曲过大, 这也是不希望出现的; 电流频率跨度过大, 坩埚分片数过多, 设备制造难度也太大。

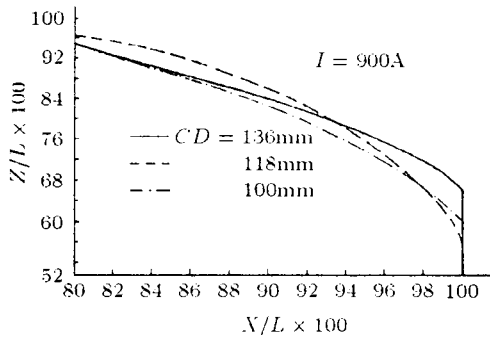


图 5 弯月面形状与感应器位置的关系

Fig.5 Meniscus shapes with different coil positions

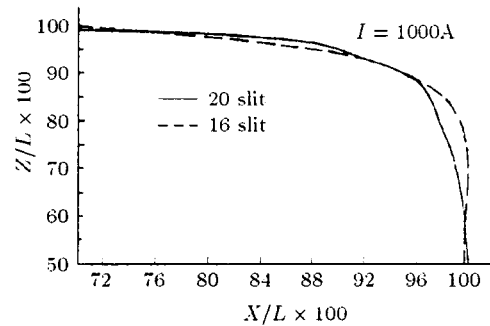


图 6 弯月面形状与坩埚分片数的关系

Fig.6 Meniscus profile with different slit numbers

4 结 论

本文建立了基于感应电流为未知量的冷坩埚电磁连铸弯月面与磁场耦合的数学模型; 发展基于参正变换的弯月面的模拟方法, 使之能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。

定量考查了各种因素对弯月面形状的影响, 从总体上把握了弯月面与磁场耦合作用的特点, 为今后模拟试验和工程设计以及工艺参数的选择提供一个比较简便的数值方法。

参 考 文 献

- 1 Sakane J et al. Mathematical modelling of meniscus profile and melt flow in electromagnetic casters. *Metall Trans B*, 1988, 19B(3): 397~408
- 2 Li Ben Q, Evans JW. Computation of shapes of electromagnetically supported menisci in electromagnetic casters, Part one: Calculation in two dimensions. *IEEE trans on Mag*, 1989, 25(6): 4443~4448
- 3 Li Ben Q, Evans JW. Computation of shapes of electromagnetically supported menisci in electromagnetic casters, Part two: Calculation in three dimensions. *IEEE trans on Mag*, 1989, 25(6): 4449~4453
- 4 Cook DP, Evans JW. A three dimensional mathematical model of electromagnetic casting and testing against a physical model: part one-the mathematical model. *Metall & Mater Trans B*, 1995, 26B: 1263~1270

NUMERICAL SIMULATION OF MAGNETIC CONFINEMENT IN ELECTROMAGNETIC CONTINUOUS CASTING¹⁾

Zeng Dehong Mao Bin E Xuequan
(*Institute of Mechanics CAS, Beijing 100080, China*)

Abstract In the process of continuous casting, in order to produce the strand without surface defect, it is very important to control the initial steel solidification to deduce the corrugated surface vibrated mark. According to the theory of magnetohydrodynamics, the strand without surface defect can be produced through the "soft contact" between meniscus and the wall of crystalline cell using magnetic confinement of the alternative magnetic fields. In the process of the continuous casting, confirmation of the meniscus shape is not only the essential factor of the magnetic confinement computation, but also the key to achieving EM continuous casting successfully. This paper takes square cold crucible continuous casting (4-C process) based on the high frequency electromagnetic field as the studying object, deduces a dimensionless equations taking into account parameters such as coil current, which describes equilibrium among various pressures including fluid and electromagnetism on the meniscus shape, develops the method of simulating meniscus to which approach the continuous curved surfaces on base of the isoparametric transformation. The effects of the coil current, frequency, coil position and slice number of the crucible on the meniscus shape are numerically studied.

Key words EM continuous casting, cold crucible, magnetic confinement, meniscus shape, isoparametric transformation, numerical simulation

Received 21 July 1998, revised 12 November 1990.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19572069).