

异形坯连铸过程流场与温度场耦合三维数值模拟*

杨建伟 杜艳平 崔小朝 史荣 刘才
(太原重型机械学院机电分院, 太原 030024) (燕山大学机械学院, 秦皇岛 066004)

摘要 建立了异形坯内流体流动与凝固传热的三维耦合模型, 充分考虑了对流换热对凝固过程的影响, 分析了铸坯与钢液之间的相互作用, 并对不同工艺条件下的温度场进行了比较. 运用此模型可预报铸坯的温度场、坯壳厚度及液芯长度等, 便于现场调整工艺参数.

关键词 异形坯, 连铸, 数值模拟

中图分类号 TG249.7, TF777 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2001)07-0767-05

3-D COUPLED NUMERICAL SIMULATION FOR FLOWING DISTRIBUTION AND TEMPERATURE DISTRIBUTION IN BEAM BLANK CONTINUOUS CASTING PROCESS

YANG Jianwei, DU Yanping, CUI Xiaochao
School of Machine-Electricity, Taiyuan Heavy Machinery Institute, Taiyuan 030024

SHI Rong, LIU Cai
School of Mechanism, Yanshan University, Qinghuangdao 066004

Correspondent: YANG Jianwei, lecturer, Tel: (0351)6223660, E-mail: yjwaa@freemail.sz.cn

Manuscript received 2000-09-11, in revised form 2001-02-22

ABSTRACT A three dimensional model of fluid flowing and solidification within the beam blank was established. The influence of fluid on solidification was carefully surveyed. This model can not only analyze the relation between shell and steel fluid, but also compare the temperature distribution in the different technical conditions which can be used to forecast the temperature field, solidification profile and liquid pool depth and adjust technical parameters.

KEY WORDS beam blank, continuous casting, numerical simulation

连铸坯的传热, 严格地说是对流、传导和辐射同时存在的复杂的三维凝固传热问题. 在建立连铸坯凝固传热数学模型时, 前人往往把钢水的对流效果转化为一个有效导热系数来考虑, 即在液相区采用一个大的导热系数去模拟钢液的流动效果. 如 Lait 等人^[1] 利用一维有限差分模型计算了铸坯温度分布和液相穴分布, 利用热焓法对凝固过程进行了处理; Lally 等人^[2] 建立了铸坯的二维非稳态传热数学模型, 并讨论了各种求解方式对模型计算精度及计算速度的影响; Choudhary 等人^[3] 对连铸传热过程建立了三维稳态模型, 并讨论了各种简化方式和参数选择对计算结果的影响; 文光华等人^[4] 对薄板坯的凝固传热

过程建立了二维非稳态数学模型, 对铸坯的凝固行为进行了分析; 董绍章等人^[5] 对圆坯、小方坯进行了二维分析计算. 对液相穴内的对流换热, 以上研究者都采用了 Mizikar^[6] 提出的有效换热系数概念. 而实际上, 钢水在各处的流动、传热均不相同, 因此计算结果与实际情况相悖. 此外, 由于略去了对流项的影响, 将导热系数增大即表明增加各方向的传热, 而事实上, 流体流动只增加流线方向的传热, 因此, 采用有效导热系数无法深入研究钢液流动对温度场的影响, 且坯壳的生成对钢液流动状态也有很大影响.

为了尽可能真实地描述连铸坯内的传热和流动过程, 必须将流动过程与凝固过程同时考虑, 即在一个体系内建立二者的耦合模型. Asai 等人^[7] 建立了二维轴对称体系的耦合模型, 认为采用流动与传热耦合模型是必要的, 能够更准确地描述圆坯内的钢液流动和坯壳形状; Flint^[8]

* 国家“九五”重点科技项目资助 95-528-03-01-03c

收到初稿日期: 2000-09-11, 收到修改稿日期: 2001-02-22

作者简介: 杨建伟, 男, 1971 年生, 讲师

建立了三维流动与传热耦合模型,采用三维模型不仅可以预测坯壳随拉坯时间的变化以及钢液的流动状态,而且还可预测坯壳形状在横断面上的变化,这对于防止拉漏有着十分重要的意义;Choudhary 等人^[9]在考虑了对流传热影响的条件下,计算了小方坯连铸过程坯壳的生长规律,并与实测数据、有效导热系数法进行了比较,结果发现,考虑对流传热的影响后,预测结果与实际结果吻合较好。

本文以马鞍山钢铁公司异形坯连铸工程为依托,以异形坯连铸过程流场与温度场耦合分析为主攻目标,建立了异形坯内流体流动与凝固传热的三维耦合数学模型,该模型包含流场、温度场、相变及复杂的凝固传热现象,是流动与传热耦合问题,应用此模型可得到凝固过程任一时刻、任一断面的温度场、流场分布,并可确定最佳连铸速度、极限连铸速度及合理的浇注温度,从而为连铸过程工艺参数的优化提供理论依据。

1 三维耦合数学模型

异形坯断面形状及浸入式水口结构如图 1 所示,考虑到异形坯形状的对称性,取其 1/4 作为计算区域,如图 2 所示。

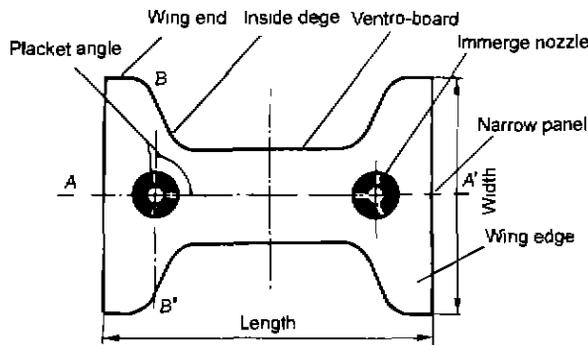


图 1 异形坯横断面及浸入水口结构示意图

Fig.1 Sketch map of beam blank transect and immerse nozzle

1.1 控制方程

连续性方程为

$$\partial(\rho u_i)/\partial x_i = 0 \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_i \quad (2)$$

其中

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$$

能量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_i \theta)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) + S_T \quad (3)$$

式中, Γ_{eff} 为有效温度扩散系数,可由下式确定

$$\Gamma_{\text{eff}} = \mu/Pr + \mu_t/Pr_t \quad (4)$$

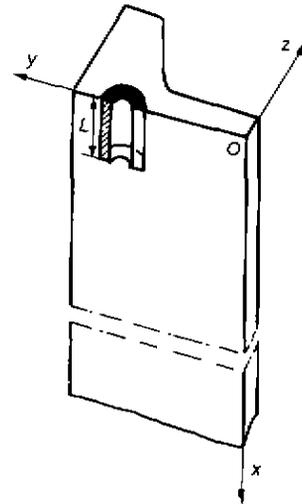


图 2 异形坯计算区域简图

Fig.2 Diagram of calculated area of beam blank

湍流模型采用目前通用的 $k-\varepsilon$ 双方程模型^[10],其中湍动能 k 方程为

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon \quad (5)$$

湍动能耗散率 ε 方程为

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \cdot \mu_t \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (7)$$

上述方程中, u_i 和 u_j 分别为 i 和 j 方向的速度, m/s; x_i 和 x_j 分别为 i, j 方向的结点坐标值, m; ρ 为流体密度, kg/m³; p 为压力, Pa; F_i 为体积力, N; μ 和 μ_t 分别为层流和湍流的粘度系数, μ_{eff} 为有效粘度系数, 单位均为 Pa·s; Pr 和 Pr_t 分别为层流和湍流的 Prandtl 数; θ 为温度, °C; S_T 为源项。

式(5—7)中的 $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k$ 和 σ_ε 均为经验常数,取自 Launder 和 Spalding 的推荐值^[11]: $C_1=1.44, C_2=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$ 。

1.2 初始条件与边界条件

(1) 初始条件为

$$t = 0, \quad x = 0, \quad \theta = \theta_c \quad (8)$$

其中, θ_c 为浇铸温度。

(2) 轴对称面上、热流为零。

$$\partial\theta/\partial z = 0, \quad \partial\theta/\partial y = 0 \quad (9)$$

(3) 铸坯表面。根据连铸工艺的操作特点，将铸坯的传热划分为三部分，即结晶器区、二冷区和辐射区，其边界条件各不相同。

(a) 结晶器的热流以文献 [12] 中引用的 Savage 和 Pritchard 的热流计算公式为原型，采用结晶器冷却热流拟合的方式，模拟计算出异型坯连铸结晶器内热流密度沿高度的变化状况。通过回归处理，得出异形坯结晶器内热流 $q(\text{W}/\text{m}^2)$ 的变化关系式如下

$$q = (2688 - 236\sqrt{t}) \times 10^3 \quad (10)$$

式中， t 为拉坯时间，min。

(b) 二冷区传热采用文献 [12] 中引用的 Ishiguro 的经验公式如下

$$h = [0.581W^{0.451}(1 - 0.0075\theta_w)] \times 10^3 \quad (11)$$

式中， h 为换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ； W 为喷水强度， $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； θ_w 为冷却水温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

(c) 辐射区换热采用文献 [13] 中如下辐射换热公式

$$q = \sigma \cdot \epsilon' \cdot (\theta_{\text{surf}}^4 - \theta_{\text{air}}^4) \quad (12)$$

式中， σ 为 Stefan-Boltzman 常数，取为 $5.765 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}^4)$ ； ϵ' 为黑度，取为 0.8； θ_{surf} 和 θ_{air} 分别为在铸坯表面及空气中的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 流动边界条件

在迭代求解过程中，坯壳的形状不断发生变化，而连铸钢水在凝固坯壳内流动，因此，就要细致地处理不规则边界条件下的流动情况。对不规则边界，本文采用梯形网格进行处理。如果控制体的固相率大于 0.7，就可以认为该控制体已变为固体。对于位于固体内的控制体，其速度等于固体本身的速度。

由于连铸坯以一定拉速向下移动，因此必须考虑坯壳移动对流动的影响。图 3 为移动边界示意图（以二维情况

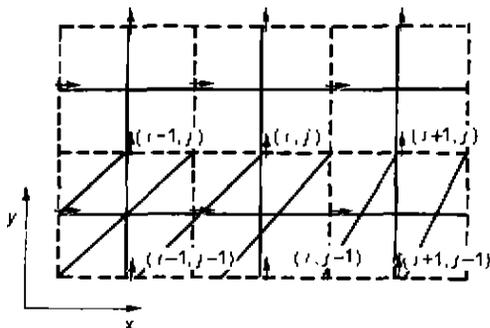


图 3 移动边界示意图

Fig.3 Sketch map of move boundary

为例进行说明)。其中斜线区代表固体边界以拉坯速度 U_0 向右移动， x 方向的速度 u 向后退半格， y 方向的速度 v 向下退半格，对于位于固体内的控制体即认为等于固体本身的速度，对于流体区域内靠近固体的速度分量采用壁面函数 [10] 处理。

2 计算结果分析

图 4 为异形坯耦合温度场示意图：图 5、6 分别为过热度及拉速对温度场的影响。

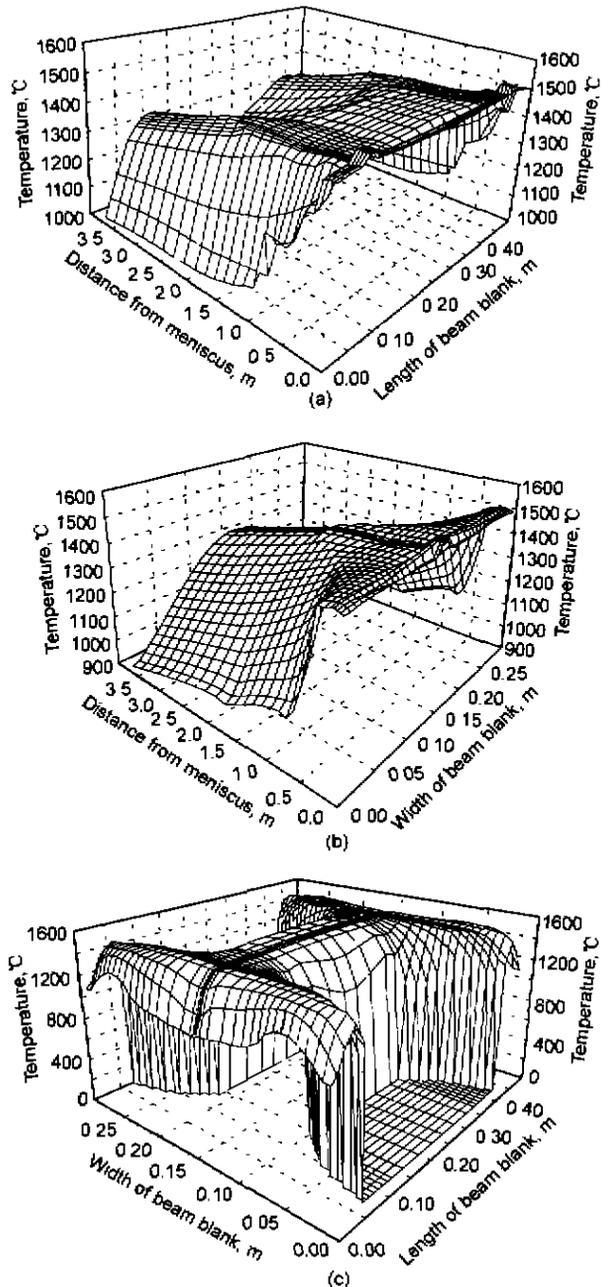


图 4 异形坯耦合温度场示意图

Fig.4 Sketch map of coupled temperature distribution in beam blank

(a) A-A' section (b) B-B' section

(c) cross section of mould exit

2.1 耦合温度场基本情况分析

图 4a,b,c 分别模拟马鞍山钢铁公司 500 mm × 300 mm × 120 mm 异形坯 A—A' 截面、B—B' 截面及结晶器出口处横断面的耦合温度场示意图。

从图 4a, b 可以看出, 钢水离开水口后, 过热度迅速

降低: 钢液离开水口向下冲击一定距离后, 以离开结晶器壁的方向形成向上的回流, 故铸坯内部温度较高, 而水口与结晶器壁之间基本无回流, 故在水口与结晶器壁之间的控制体温降较快, 温度较低; 冲击流股回流涡心的温度低于主冲击流股的温度。由图 4c(计算过程中假设腹板外侧

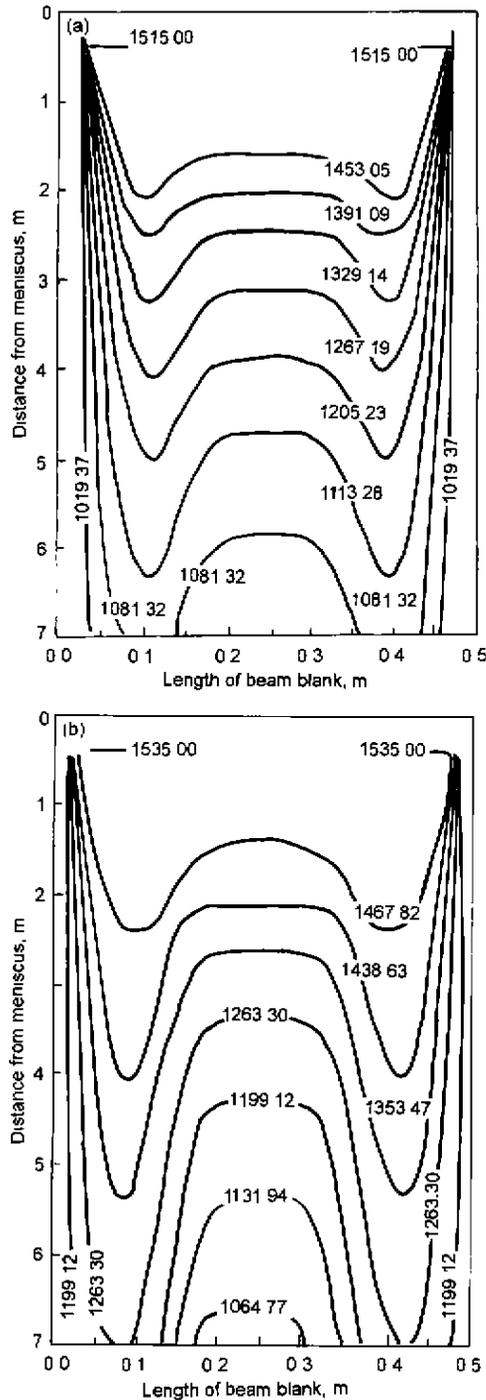


图 5 过热度对温度场的影响

Fig.5 Effect of superheat on temperature (°C) distribution
(a) superheat 10 °C
(b) superheat 30 °C

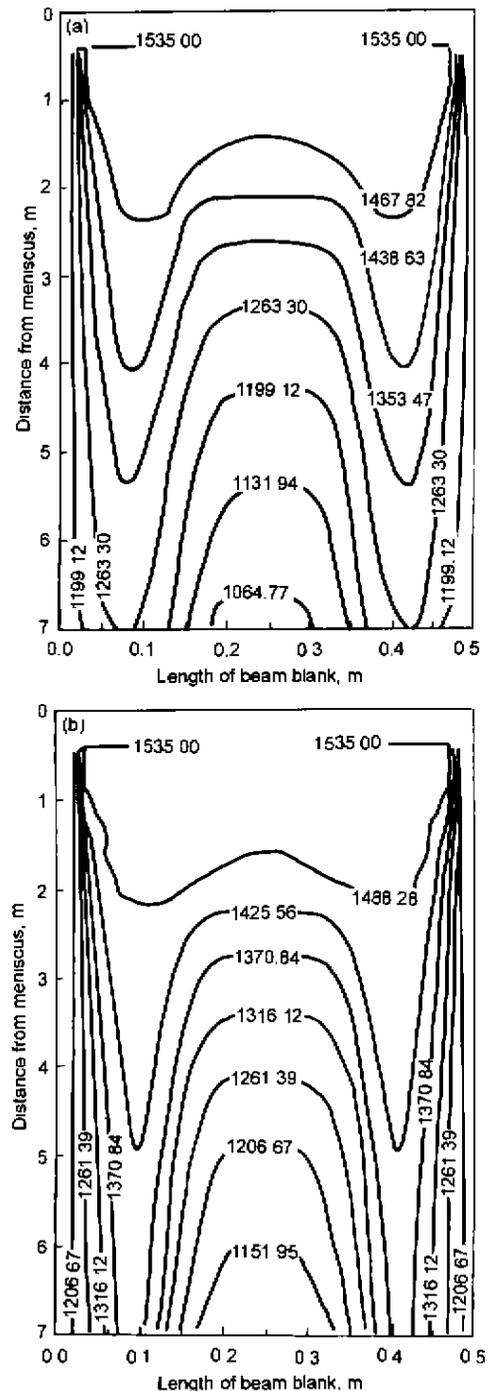


图 6 拉速对温度场的影响

Fig.6 Effect of drawing velocity on temperature (°C) distribution
(a) drawing velocity 0.9 m/min
(b) drawing velocity 1.2 m/min

温度为零)可以看出,异形坯窄面板中心及翼缘端部温度较低,其原因在于该部位回流较弱。

2.2 过热度对温度场的影响

图 5a、b 显示了过热度分别为 10 与 30 ℃ 时,铸坯内的温度场分布(图中曲线上数字表示等温线温度值)。

由图可见,当过热度提高后,结晶器上表面温度明显提高,计算结果表明,过热度每提高 10 ℃,结晶器上表面温度平均提高 3—4 ℃,液相穴下部温度约提高 6 ℃。过热度提高后,对总体坯壳厚度影响不大,但会使坯壳的某些局部更加薄弱。

2.3 拉速对温度场的影响

图 6 为拉速对温度场的影响(图中曲线上数字表示等温线温度值)。从图可见,当拉速提高时,结晶器上部温度变化不大,而下部高温区明显下移,铸坯中心温度明显提高。其原因是,拉速提高后结晶器下部钢液更新速度加快,从而导致温度升高。

3 结论

(1) 该模型可以预报铸坯的温度场、流场、坯壳厚度、两相区宽度及液芯长度。

(2) 在连铸过程中,提高生产率最积极的因素是提高拉坯速度,但是过多地提高拉速,液芯长度将随之增长,而且将增大铸坯内外的温差并妨碍熔渣上浮,因而增加发生裂纹和夹渣缺陷的倾向。

(3) 过热度提高后,结晶器上表面温度明显提高。计算结果表明,过热度每提高 10 ℃,结晶器上表面温度平均提高 3—4 ℃,液相穴下部温度约提高 6 ℃。所以,提高

过热度会使液相穴深度增加,从而增加裂纹及拉漏倾向。偏高的过热度有利于减少夹渣,但为了减少裂纹和变形,浇铸温度不宜过高。

(4) 此模型具有现场实用价值,可对现场生产情况进行静态模拟,调整工艺参数,从而选用最佳生产工艺。

参考文献

- [1] Lait J E, Brimacombe J K, Weinberg F. *Ironmaking Steelmaking*, 1974; (2): 23
- [2] Lally B, Bieger L, Henie H. *Metall Trans*, 1989; 21B: 761
- [3] Choudhary S K, Mazumdar D, Ghosh A. *ISIJ Int*, 1993; 33: 764
- [4] Wen G H, He J F. *Contin Cast*, 1995; (5): 14
(文光华, 何俊范. 连铸. 1995; (5): 14)
- [5] Dong S Z, Yan X L. *Iron Steel*, 1985; 20(7): 8
(董绍章, 阎小林. 钢铁. 1985; 20(7): 8)
- [6] Mizikar E A. *TMS AIME*, 1967; 239: 11
- [7] Asai S, Szekely J. *Ironmaking Steelmaking*, 1975; (3): 205
- [8] Flint P J. *Steelmaking Conference Proceedings*, Detroit: Iron and Steel Society Inc., 1990: 133
- [9] Choudhary S K, Mazumdar D. *ISIJ Int*, 1994; 34: 584
- [10] Zhu M Y, Xiao Z Q. *Maths-Physics Simulation of Steel Refining*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998: 67
(朱苗勇, 萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 67)
- [11] Launder B E, Spalding D B. *Mathematical Models of Turbulence*. London: Academic Press, 1972: 269
- [12] Cai K K. *Continuous Casting*. Beijing: Science Press, 1990: 226
(蔡开科. 连续铸钢. 北京: 科学出版社, 1990: 226)
- [13] Chen J X. *Handbook of Continuous Casting*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991: 180
(陈家祥. 连续铸钢手册. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 180)