

## 轮带式连铸机结晶器的流场

陈 克\* 徐宝升\*\* 黄宏忠\*\* 田毅盛\*\*

**摘 要:** 利用 $k-\epsilon$ 紊流模型和水模型对结晶器流场进行了数值和物理模拟。结果表明: 钢液对坯壳冲刷速度的最大值发生在结晶器入口附近回流区, 其值达拉坯速度的2.52倍, 并且流动模式不随拉坯速度变化。

**关键词:** 流场, 轮带式连铸机, 曲壁

## Turbulent Flow in Mold Region of High Speed Wheel Caster for Thin Billet

*Chen Ke\* Xu Baosheng\*\* Huang Hongzhong\*\* Tian Yisheng\*\**

**ABSTRACT:** The extensive investigations on the flow fields with  $k-\epsilon$  mathematical model of turbulence and water model are presented. A quite different flow pattern from ordinary caster was found because of mild curvature of mold and strong jet from enclosed nozzle. The typical difference is the unsymmetry of flow whose recirculation zone on wheel side is larger than belt side and extends as long as 4 times the mold width. Another feature is that maximum speeds near walls are in recirculation zones and their values are 2.52 (wheel side) and 2 (belt side) times casting speed respectively.

**KEY WORDS:** turbulent flow, wheel caster, curved wall

轮带式连铸机结晶器是弧形的, 它不仅长而且曲率大, 加上采用徐宝升教授首次提出的封闭式浇注系统<sup>[1]</sup>, 使之具有许多普通连铸机无法比拟的优点。它速度快, 被公认为是连

1989-06-01 收 稿

• 冶金部设备研究所 (Equipment Research Institute, Ministry of Metallurgical Industry, Beijing)

• • 机械系 (Department of Mechanical Engineering)

铸一连轧技术中最理想的铸机类型<sup>[2]</sup>。其结晶器内钢液流场也与普通连铸机有很大区别,且对铸坯凝固和非金属夹杂分布产生重要影响。Miziker<sup>[4]</sup>和Szekely<sup>[3, 5~7]</sup>等在铸坯传热计算中考虑了钢液流动的影响,并对流场进行了计算。

本文通过修正壁函数法将弯曲壁对紊流结构的影响引入双方程紊流模型中,利用改进后的模型对采用闭式浇注系统的轮带式连铸机结晶器流场进行了计算,同时做了相应的水模型试验,观察并测量了流场。

# 1 数学模型

## 1.1 模型的简化

- (1) 将结晶器内钢液流动简化为二维问题。
- (2) 流体物性参数是常数。
- (3) 流动是稳定的。
- (4) 水口出水流均匀,而且稳定。

## 1.2 基本方程

在极坐标下,  $k-\epsilon$ 紊流模型中各方程可统一表示成以下输运方程的形式:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv\rho\phi) + \frac{\partial}{r\partial\theta} (u\rho\phi) =$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu_r \frac{\partial\phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{r\partial\theta} \left( r\mu_\theta \frac{\partial\phi}{\partial\theta} \right) + S_\phi \quad (1)$$

表 1 对应于方程 (1) 的守恒方程

Table 1 Conservation equation corresponding to equation (1)

| 方 程    | $\phi$     | $r\phi$               | $S_\phi$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------|------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 连续方程   | 1          | 0                     | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 角动量    | $u$        | $\mu_\theta$          | $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \mu_\theta r \left( \frac{\partial v}{r\partial\theta} - \frac{u}{r} \right) \right] + \frac{\partial}{r\partial\theta} \left[ \frac{\mu_\theta}{r} \left( \frac{\partial u}{\partial\theta} + 2r \right) \right]$<br>$+ \frac{\mu_\theta}{r} \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{r\partial\theta} - \frac{u}{r} \right) - \rho \frac{uv}{r} - \frac{\partial \rho}{r\partial\theta} + F_\theta$ |
| 径角动量   | $v$        | $\mu_r$               | $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu_r \frac{\partial v}{r} \right) + \frac{1}{r\partial\theta} \left( r\mu_\theta \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u}{r} \right) \right)$<br>$- \frac{2\mu_\theta}{r^2} \frac{\partial u}{\partial\theta} - \frac{2\mu_\theta}{r^2} v + \rho \frac{u^2}{r} - \frac{\partial \rho}{\partial r} + F_r$                                                                                                         |
| 紊动能    | $k$        | $\mu_\theta/\delta$   | $\mu_\theta G^* - \rho \epsilon$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 紊动能耗散率 | $\epsilon$ | $\mu_\theta/\delta_k$ | $c_1 c_\mu G \rho k - c_2 \rho \epsilon^2/k$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

$$G = 2 \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{r\partial\theta} + \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v}{r\partial\theta} + \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right)^2$$

不同的方程各项表达式见表1。表中,有效涡粘性系数:

$$\mu_e = \mu_1 + \mu_t$$

式中:  $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ ——涡粘性系数。

$\mu_1$ ——粘性系数。

$F_r$ ,  $F_\theta$ 为体积力分量。对于立式结晶器  $F_\theta = \rho g \sin \theta$ ,  $F_r = -\rho g \cos \theta$ 。对于水平结晶器  $F_\theta = F_r = 0$ 。各模型常数见表2。

### 1.3 边界条件、弯曲壁影响对壁函数的修正

(1) 边界条件 结晶器入口:  $u$ ,  $v$ ,  $k$ ,  $\varepsilon$ 值由拉坯速度和上游水口的紊流度决定<sup>[7]</sup>。

$$\text{结晶器出口: } \frac{\partial u}{\partial \theta} = \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{\partial k}{\partial \theta} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} = 0$$

结晶器壁面(入口壁、凸壁、凹壁):

$$u = v = k = \varepsilon = 0。$$

(2) 壁函数、弯曲壁的影响 由于粘性作用,湍流模型在近壁区是不适用的,因此在近壁区本文采用了应用广泛的壁函数法。由于弯曲壁上紊流附面层结构与平壁的有很大区别,可以通过修正紊流混合长度 $l_m$ 来反映曲壁的影响<sup>[8]</sup>。

$$[l_m]_c = \beta_m l_m$$

式中:  $\beta_m$ —曲壁修正系数,  $\beta_m = 1 - \alpha_c R_{ic}$ , 其中 $\alpha_c$ —实验常数,7.0;  $R_{ic}$ —曲壁Richardson数,  $R_{ic} = (2u/R) / (\partial u / \partial r)$ ;  $R$ —壁面曲率半径,凸壁 $R > 0$ ,凹壁 $R < 0$ 。

## 2 方程离、散求解及收敛条件

本文采用交错离散单元,将方程组(1)离散成以下形式:

$$a_p \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (2)$$

由于方程组(1)的非线性,其相应的离散方程(2)也是非线性的,因而,要用迭代法求解。本文采用逐行迭代的TDMA解法,辅以块修正和欠松弛技术确保并加速其收敛<sup>[7]</sup>,速度场计算应用Simple算法。

因为采用欠松弛技术,理想的收敛条件是所有离散方程的最大余数 $R_{max}$ 足够小。即:

$$R_{max} = M_x (\sum a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p) \leq \varepsilon \quad (3)$$

## 3 实验结果比较及分析

### 3.1 计算准备

紊流模型参数见表2。 $x$ 方向计算范围:  $0 \sim 20\text{deg}$ (相当于弧长407mm)。因为水模

型实验表明<sup>〔8〕</sup>，20deg后它成为充分发展紊流。依据结晶器不同放置和铸坯速度（转化为入口速度 $u_{in}$ ）制定的计算工况及各工况的收敛精度见表3。

表 2  $k-\epsilon$  模型 参 数 值  
Table 2 The value of constants in the  $k-\epsilon$  model

| 名 称 | $C_\mu$ | $\sigma_k$ | $\sigma_\epsilon$ | $C_1$ | $C_2$ |
|-----|---------|------------|-------------------|-------|-------|
| 数 值 | 0.09    | 1.30       | 1.00              | 1.44  | 1.82* |

\* 见后述

表 3 计算工况及收敛精度  
Table 3 The calculating cases and converging accuracies

| 计算工况                | L26                   | L4                    | V25                   | V4                    |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 结晶器放置形式             | 水 平                   | 水 平                   | 立 式                   | 立 式                   |
| 入口速度 $u_{in}$ (m/s) | 2.65                  | 4.00                  | 2.57                  | 4.00                  |
| 收敛精度 $R_{max}$      | $2.28 \times 10^{-3}$ | $9.71 \times 10^{-4}$ | $2.52 \times 10^{-3}$ | $9.64 \times 10^{-4}$ |

3.2 计算结果分析与实验的比较

3.2.1 流动模式 L26 流场计算结果如图1所示。由于水口出口突扩，结晶器流场内形成了3个大的回流区。上角回流区位于水口出口上壁结晶器壁和水口射流之间，其长度达到8.5deg；下角回流区位于水口出口下壁结晶器凸壁和水口射流之间，长度为3.5deg；凸壁中部回流区，从3.5deg开始至13.5deg结束。它们将使钢液非金属夹杂向涡心聚集，影响初

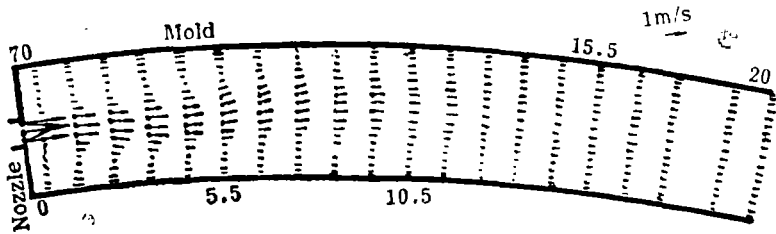


图1  $u_1 = 2.65\text{m/s}$ 时速度场（水平）  
Fig.1 Velocity field at  $u_1 = 2.65\text{m/s}$ (L.type)

生坯壳质量。特别是水口出口附近过长的上下角回流区，使钢液有机会与结晶器充分换热，以致在水口出口处形成具有相当尺寸的角壳，这对该类连铸机正常浇注极为不利<sup>〔7〕</sup>。

4 结 果 讨 论

以L26为例，分析 $u$ 、 $p$ 、 $k$ 、 $\epsilon$ 的变化规律。

(1) 速度。图2是不同截面上的速度分布。其中, A: 入口速度; B: 凸壁侧(轮侧)回流速度最大, 是入口的21%; C: 凹壁回流速度最大处, 其值为入口速度的17%; D: 凹壁回流终止, 主流股开始偏向凹壁(带侧); E: 凸壁回流终止, 进入再接触区; F: 出口速度分布最大偏向带侧, 对带侧的冲刷速度比槽底高30%~40% (由壁的影响), 但其值较小只是入口的5.6%和4.1%。

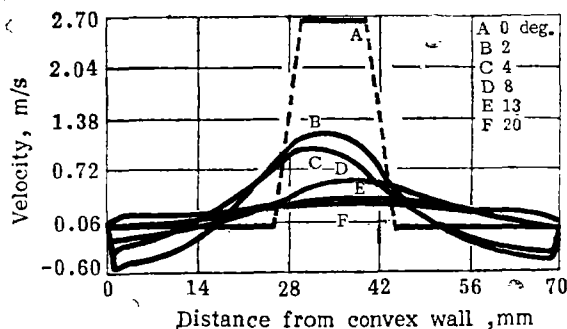


图2 不同截面上的速度分布  
Fig.2 Velocity distributions at different sections of mold

近壁速度反映钢液对凝固坯壳的冲刷, 带侧和槽底的冲刷速度沿结晶器长度方向的分布如图3所示。

另外, 如果忽略密度随温度的变化, 立

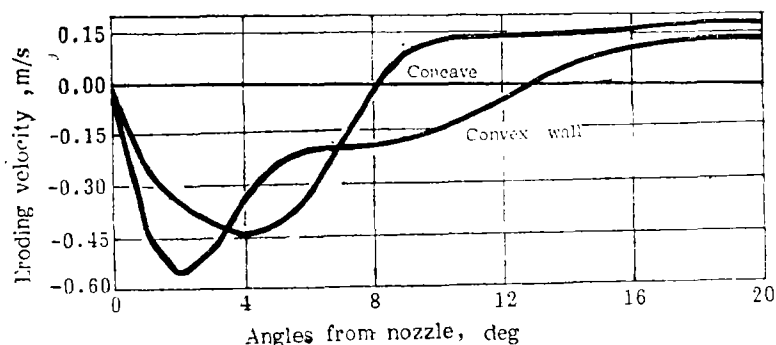


图3 冲刷速度随结晶器长度的变化  
Fig.3 The near-wall speed along the mold

式和水平结晶器流场在相同拉速的条件下, 速度场完全相同; 唯一不同的是压力场, 也就是说重力只影响压力场。

图4是计算的结晶器出口(20deg)速度与水模型实验值的比较。计算实践表明, 当紊流模型的参数 $C_2 = 1.82$ 时, 计算与实测值最为吻合。

(2) 壁面压力。相对壁面压力系数定义如下:

$$C_p = C_p' / C_{pmax}'$$

式中:  $C_p' = (p(x) - p_i) / \left( \frac{1}{2} \rho u_0^2 \right)$

$u_0$ —出口速度;  $p_i$ —入口壁压力。

如图5, 它们的分布规律与相应的冲刷速度分布相似。这使我们能够通过比较简单的壁面压力实验掌握冲刷速度的变化规律。由于结晶器是弯曲管道, 它的流动表现出显著的不对称

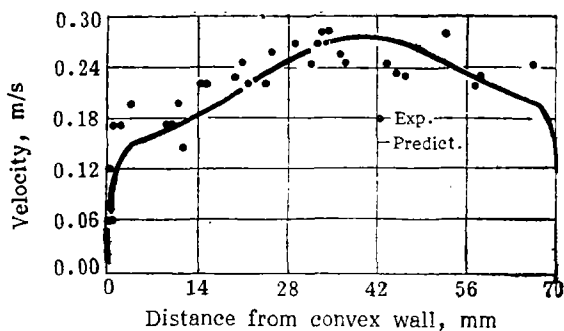


图4 速度计算值与实验值比较 (20deg)  
Fig.4 Comparison between measured and predicted velocity at section of 20deg

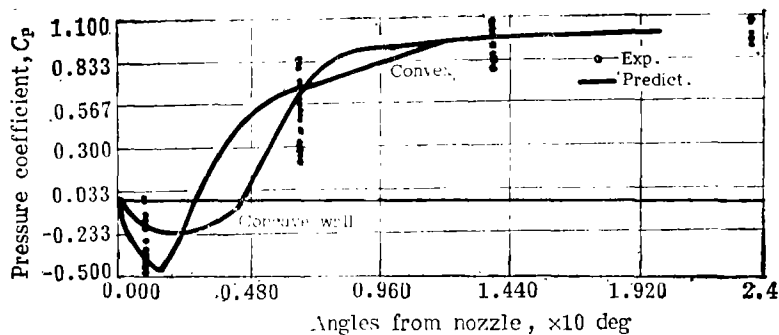


图5 壁面压力系数计算值与实验值比较

Fig.5 Comparison of the measured and predicted results of the wall static pressure coefficient

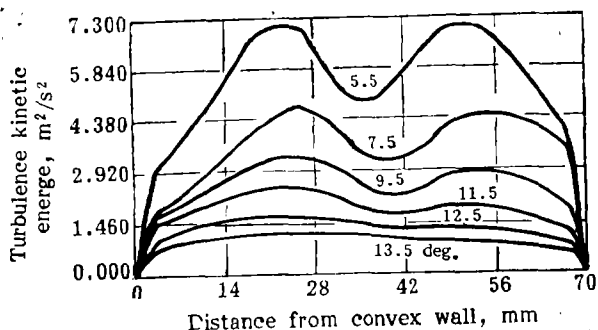


图6 不同截面紊动能分布

Fig.6 The turbulence kinetic energy distribution at different sections of mold

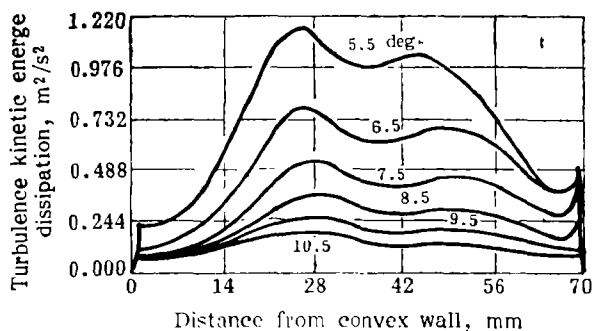


图7 不同截面紊动耗散率分布

Fig.7 The distribution of turbulence kinetic energy dissipation rate at different sections of mold

性, 因此带侧和轮侧的压力系数也不一样。而实测值是根据测量截面上的平均压力求得。

(3) 紊动能及紊动能耗散率。图6表示紊动能在不同截面上的分布, 两峰值位置在主该股与两侧回流区间的过渡区。此处剪切变形率极大, 进入再接触区后( $x > 13.5 \text{ deg}$ )峰值只有一个偏向凹壁, 这是弯曲引起的。它使凹壁紊动能增加, 凸壁的下降, 凹壁比凸壁高出3%。

不同截面上紊动能耗散率分布曲线如图7所示, 近壁区的两个小峰是边界层紊流生成和

耗散之间的平衡造成的。

## 5 结 论

(1) 钢液对坯壳的最大冲刷速度在回流区, 其速度分别是拉速的2.52倍(槽底侧 $x_0/H_0 = 0.56$ )和1.92倍(带侧,  $x_0/H_0 = 1.2$ )。高拉速时(如20m/s)冲刷速度接近坯壳熔化临界速度0.8m/s( $\Delta T$ —过热度,  $20^\circ\text{C}$ )。

(2) 冲刷速度与壁面压力分布规律相似, 可由壁面静压实验求得其分布。

(3) 计算实践表明,  $C_2 = 1.82$ 更适合于突扩弯曲管道紊流计算。

(4) 流场内3个大的回流区使非金属夹渣向涡心集聚, 并促使钢液在水口出口附近凝成角壳, 不利于轮铸机顺利浇注。

## 参 考 文 献

- 1 徐宝升. 北京钢铁学院学报, 1988, 10(3): 337
- 2 王廷博. 钢铁, 1985, 20(2): 54
- 3 Szekely J, et al. Metall. Trans. 1972, 3: 2673
- 4 Mizikar E A. Trans. AIME, 1967, 239: 1747
- 5 Szekely J, et al. Metall. Trans. 1970, (1): 119
- 6 田毅盛. 北京科技大学硕士论文. 1988
- 7 陈 克. 北京科技大学博士论文. 1988
- 8 Bradshaw P. AGARD. 1975: 169
- 9 萨莫伊洛维奇 Ю А (鲁开凝、俞景录译). 连续铸钢的热过程. 北京: 冶金工业出版社. 1985