

89-58

16

方坯连铸结晶器壁面速度分布规律的研究

A Study on Wall Velocity Distribution Law in Mould for C C Billets

何俊范
He Junfan

文光华
Wen Guanghua

雷霆 ✓
Lei Ting

(重庆大学, 重庆, 630044)

(昆明冶金研究所, 昆明, 650011)

摘 要 针对合金钢方坯连铸结晶器内钢液的流体流动, 采用二维激光测速仪测定了4孔水口下结晶器内垂直平板壁面附近不同区域的流体运动速度。同时, 根据对数壁面律, 用回归方法导出不同壁面区域附近的对数壁面律方程和相应的经验常数, 得到了结晶器壁面附近区域流体速度分布规律。

关键词 方坯连铸; 结晶器; 壁面速度; 对数壁面律; 激光测速仪
中国图书资料分类法分类号 TF 777.2

连铸坯 方坯

ABSTRACT In view of liquid steel flow in mould for C C alloy steel billets, the flow velocity of fluid in the different zones in the vicinity of vertical wall on condition of four hole nozzle has systematically been measured by Laser Doppler Anemometre (LDA). At the same time, according to the logarithmic wall law, logarithmic wall law equations near by different wall zones and experimental constants have been derived by regression method. The velocity distribution law near by wall in mould is obtained.

KEYWORDS C C billet; mould; wall velocity; logarithmic wall law; LDA

0 引 言

连铸技术的广泛应用和发展, 对铸坯质量的要求日益提高, 迫使冶金工作者对连铸结晶器内的钢液流动行为作更深入的研究, 采用水力学模拟研究结晶器内流场已很普遍^[1~4]。但是, 采用激光测速仪直接测定连铸结晶器内流场, 尤其是对于结晶器壁面附近区域内的速度测定及研究, 目前, 国内外报导甚少。结晶器壁面附近区域内的流体流动, 不仅影响着铸坯初期的凝固和铸坯的表面质量, 而且也是数学模型计算中的重要边界条件。因此, 测定和研究结晶器壁面不同区域内的速度分布, 并推出相应的表达式。对进一步研究铸坯初期的凝固, 改善铸坯的表面质量, 进行数值计算和优选伸入式水口结构形式都有着重大的实际意义。

1 实验及研究方法

实验选择结晶器断面 180×180 mm 方坯为模拟对象。模型设计的理论基础是相似理论。采用伸入式水口浇注引入结晶器内的注流特征为有限空间内的湍流射流,控制运动状态的主要作用力是惯性力、粘滞力和重力。因此,模型与原型动力相似,是取决于那些决定惯性力、重力和粘滞力相互关系的准数相等,即

$$\text{雷诺准数} \quad Re = \frac{\rho u L}{\mu}$$

$$\text{付鲁德准数} \quad Fr = g \cdot L / u^2$$

准数中: μ ——流体的动力学粘度 $\text{kg/m} \cdot \text{s}$;

ρ ——流体密度 kg/m^3 ;

L ——几何尺寸 m ;

u ——流体流动速度 m/s ;

g ——重力加速度 m/s^2 。

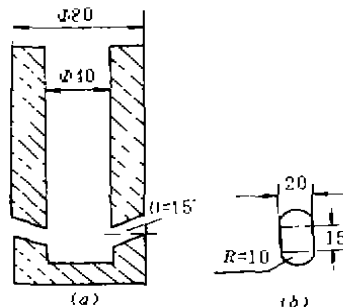


图1 水口结构示意图

根据 $Re_{\text{实}} = Re_{\text{模}}$ 、 $Fr_{\text{实}} = Fr_{\text{模}}$, 可由原型参数计算出模型参数, 选用几何相似比为 1:1, 则速度相似比为 $u_{\text{实}}:u_{\text{模}} = 1:1.09 \approx 1:1$. 伸入式水口为向上倾斜 15° 的 4 孔水口, 如图 1 所示, 水口插入深度为 160 mm.

结晶器模型和水口皆用有机玻璃制成。用阀门和转子流量计、水泵等组成测量循环系统。为了能正确测定结晶器壁面附近区域的速度分布, 首先采用流场照相法观察其流动状态, 然后用激光测速仪测定各区域的速度值。根据对数壁面律, 对测试数值进行数据处理。

2 实验结果及分析

方坯连铸使用 4 孔水口结晶器内流体边界层属平板湍流边界层, 一般分为内层和外层^[5]。在占内层大部分的紊流区域内, 雷诺应力即湍流剪应力大体保持常数值。即使在粘性底层和过渡层中, 层流剪应力与雷诺应力之和, 也大体为常数^[6]。由此, 可根据紊流理论推导出内层的壁面定律为^[6]:

$$y^+ = u^+ e^{-Kn} \left\{ e^{Kn} - 1 - nu^+ - \left(\frac{nu^+}{2} \right)^2 - \left(\frac{nu^+}{6} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

式中: y^+ —— 无量纲距离;

u^+ —— 无量纲速度

n, K, B —— 常数值。

以 1 维流动为基础, 假定壁面是光滑的, 该处湍动能的生成等于其耗散, 垂直于壁面的分速度在壁面处为零^[2], 从而得出描述壁面附近区域的速度分布的对数壁面律 (Logarithmic Wall Law) 方程为:

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(Eu^+) \quad (2)$$

其中 $U^+ = (C_k K^2)^{\frac{1}{4}} \cdot \rho \cdot U / T \omega$

$$n^+ = (C_\mu K^2)^{\frac{1}{4}} \cdot \rho \cdot n / \mu$$

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$$

式中: U^+ —— 无量纲速度;
 n^+ —— 无量纲距离;
 k, E —— 常数。对于不同流动, k, E 不同;
 C_μ —— 常数(0.9);
 K —— 湍动能;
 ρ —— 流体密度 kg/m^3 ;
 n —— 距壁面垂直距离 m ;
 v —— 在位置 n 处的速度值 m/s ;
 T_τ —— 剪切应力 N/m^2 ;
 μ —— 流体粘度 $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ 。

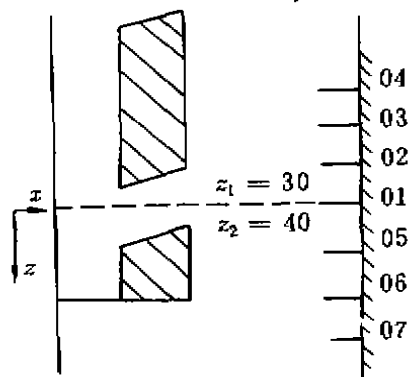


图 2 测量网格和坐标的选取

根据方程(2),测定不同距离 n 处的速度 v ,采用回归方法,可求出常数 k, E ,从而确定壁面附近不同区域的壁面律方程。

2.1 实验测定

经过流动显示分析,可知在射流出口上、下部壁面附近区域内,流体有各自的流动特性,其速度大小及方向皆不同,射流冲击壁面后,形成上、下两个回流区。研究对象呈对称性,选 1/4 部分作为实验测定对象,网格点的选取和坐标如图 2 所示。对于 01 ~ 04 行上部网格取 30 mm; 05 ~ 07 行下部网格 40 mm; 在 x 方向上,激光点由壁处向内移动,取网格间距为 0.3 mm,每格共测定 18 个节点,测量时流量 $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$,对应拉速 1.3 m/min。

2.2 数据处理及分析

采用线性回归方法^[7]求方程(2)中的常数 k 和 E 。

$$\text{令 } a = \frac{1}{k} \ln E, \quad b = \frac{1}{k}, \quad n' = \ln n^+;$$

$$U^+ = U/U_{\max}, \quad n^+ = \Delta X/X_{\max}$$

式中: X_{\max} 为测定速度最大值 V_{\max} 时的离壁面距离。

$$\text{则方程(2)变为: } U^+ = a + b n' \quad (3)$$

系数 a, b 由下述方程求得:

$$a = \bar{U}^+ - b \bar{n}' \quad (4)$$

$$b = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N n'_i \cdot U^+_i - \left(\sum_{i=1}^N n'_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N U^+_i \right)}{N \cdot \sum_{i=1}^N n'^2_i - \left(\sum_{i=1}^N n'_i \right)^2} \quad (5)$$

式中: N —— 回归的网格点数目;

$$\bar{U}^+ \text{ —— } U^+ \text{ 的平均值, } \bar{U}^+ = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N U^+_i;$$

$$\bar{n}^+ \text{ —— } n^+ \text{ 的平均值, } \bar{n}^+ = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N n^+_i;$$

再根据： $R = \frac{1}{b}$ 和 $E = e^{a[6]}$ 可求出 k, E 。

从计算结果来看，由于在壁面不同区域 k, E 值不同，则有不同的参数壁面律方程。

对于 01 ~ 04 行网格有：

$$U^+ = \frac{1}{3} \ln(20n^+)$$

05 ~ 07 行网格有：

$$U^+ = \frac{1}{5} \ln(148n^+)$$

以 V/V_{\max} 作为纵坐标， X/X_{\max} 作为横坐标作速度分布图，如图 3 所示，实验测试曲线与回归计算曲线拟合较好。

图 3 中回归曲线和实验曲线分布与平板湍流附面层内速度分布曲线规律相似^[6]。由此可见，采用对数壁面律描述水口附近射流冲击下结晶器壁面附近区域的流动是可行的。在壁面附近不同区域，有不同的壁面律方程，以水口出口线为准，上部区域，流体运动服从 $U^+ = \frac{1}{3} \ln(20n^+)$ 方程；下部区域服从于 $U^+ = \frac{1}{5} \ln(148n^+)$ 的壁面规律。

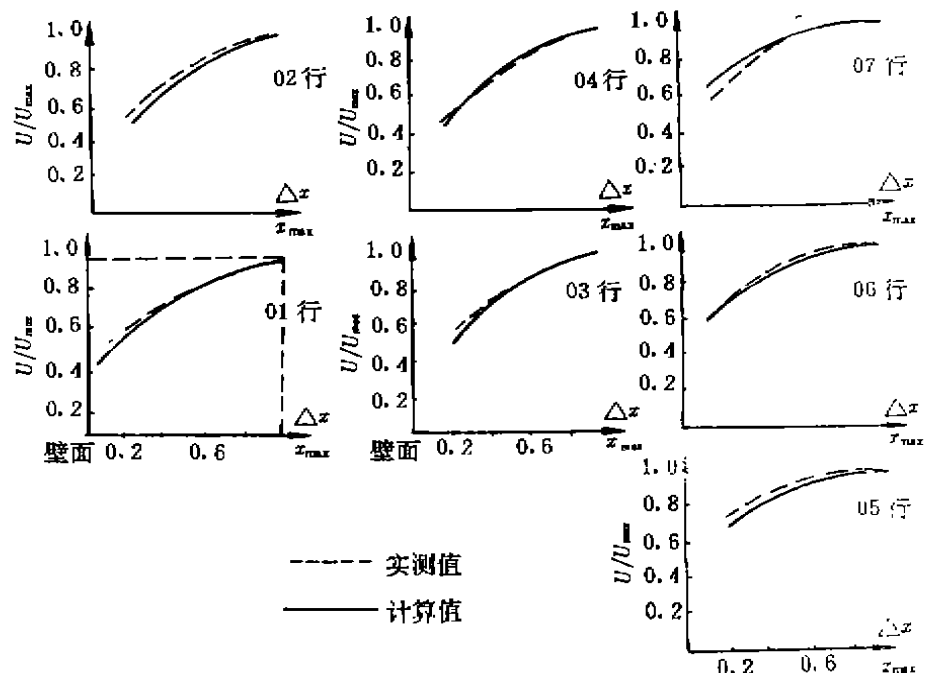


图 3 $U/U_{\max} - \Delta X/X_{\max}$ 曲线

图 4 表示速度—距离分布规律。从图可知，随着离壁面距离的增大，01 ~ 07 行网格点的速度值均是逐渐增大的，增大到一定值后，曲线变得平缓，速度与主流值趋于一致，此时距壁面的距离为附面层的厚度。水口出口上部区域内的速度值大于下部区域的速度值。其原因是采用水口出口向上 15° 和水口占据了上部区域部分空间，使得上部流体运动的有限空间比下部区域小，回流强烈，速度值较大，因此附面层厚度上部区域小于下部区域。从图上看，在上部区域的 04 行网格点速度值最小，这是因为该行网格点正处于上部区域开始形成回流的位置。由于上下流股的相互作用，使该位置的速度值最小，湍流度最大。无论是上部区域，

还是下部区域,随着高度上离水口出口距离的增大,附面层的厚度都是逐渐增大的。

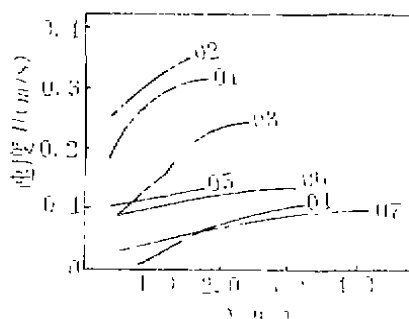


图4 速度-距离分布

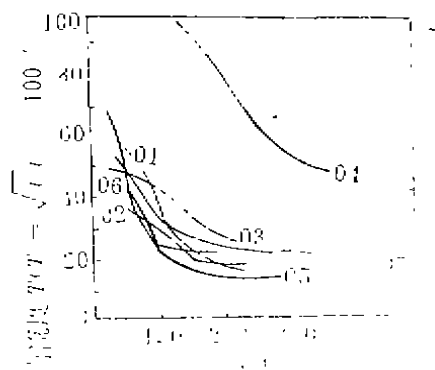


图5 湍流度-距离变化曲线

通过测定壁面附近区域的湍流度 T (其定义为 $T = \frac{\sqrt{u_1^2}}{\bar{u}} \times 100\%$, 即为脉动速度与平均速度之比), 绘制的随距离 x 的变化曲线如图5所示。随着壁面距离的减小, 湍流度逐渐增大。各行网格点的变化规律相似, 这与湍流附面层的湍流度变化规律相符合^[6]。除04行网格点外, 在上下区域整个附面层内, 各行网格点的湍流度变化较小, 比较平稳。这说明所测试的伸入式水口, 具有较好的流动格式, 有利于形成均匀的凝固坯壳, 改善铸坯表面质量。

3 结 论

3.1 连铸结晶器采用伸入式水口浇注时, 水口出口射流冲击结晶器壁面附近区域内的流体运动规律, 可用方程 $U^+ = \frac{1}{k} \ln(Eu^+)$ 来描述。

3.2 四孔水口射流冲击下结晶器内壁面区域的流动可分为上下两个区域的流动, 在不同的区域内有不同的壁面律方程。

3.3 随着距离水口出口长度增加, 其壁面附近区域内的附面层厚度也变大; 上部壁面附近区域内的流体运动速度比下部区域大, 附面层的厚度比下部区域小。

3.4 在测定的整个附面层区域内, 湍流度较稳定, 有利于形成均匀的凝固坯壳, 改善铸坯表面质量。被测试的水口具有合理的结构尺寸, 促进连铸工艺顺行。

参 考 文 献

- 1 B E launder and D B spalding. The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(1), 269~289
- 2 K Y Mlai, et al. Mathematical modelling of flows in charge tundish system in steelmaking. Met. Trans., 1986 17B (9), 403~408
- 3 魏天秀. 水口形状对连铸结晶器内流动状态的研究. 钢铁, 1984, 19(1), 7~11
- 4 J szejely. The physical and mathematical modeling of the flow field in the mould region in C C system. Met. Trans., 1972, 3(4), 316~321
- 5 赵学端等. 粘性流体力学. 北京: 机械工业出版社, 1983
- 6 生井武文等. 粘性流体力学. 海洋出版社, 1983
- 7 江宏俊. 流体力学. 北京: 高等教育出版社, 1981