

火床炉风室内横向配风特性的理论分析

缪正清, 窦文字, 周屈兰, 余战英

(西安交通大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 构建了火床炉双侧全截面进风风室和非全侧面进风风室的流动稳定段内流动的封闭方程组。通过理论推导, 获得了分析解, 并导出了火床面流量偏差的理论表达式。据此, 对双侧进风与单侧进风方式下极限流量偏差值所处的位置、流量偏差的极值比进行了比较, 并分析了风室结构和床层结构对流量偏差的影响。

关键词: 火床炉; 风室; 流动特性; 流量分配

中图分类号: TK229.6⁺1; TB126 文献标识码: A

1 前言

火床炉横向配风的均匀性直接影响火床的燃烧状况及锅炉的运行效率, 因而, 科研人员对此曾进行了长期、持续的研究。以往的研究, 单纯试验性的研究较多, 结合理论分析的研究较少。由于试验研究的条件与锅炉运行的真实条件有差异, 如实际床层的阻力较大, 而模拟试验的布风板的阻力一般较小, 因而试验结果难以直接外推到实炉; 此外, 有限的试验工况也难以全面反映真实的运行工况。因此, 对火床炉配风问题加强理论分析就显得尤为必要。

2 火床炉风室内流动物理模型

设风室为全截面双侧进风。风室截面积为 F , 单个风室的深度为 L (对非全截面进风方式, L 可视为扣除进风扩流段后的风室有效深度), 风室所占的床层宽度为 B , 进风截面上流动参数均匀, 速度分别为代数 u_0 和 u_L , 静压分别为 p_0 和 p_L 。同一风室上方各处静压为常量 p_b 。沿风室深度方向流动参数取截面平均值, 即将风室内流动特性参数的变化简化为沿风室深度变化的一元函数。整个流动过程中, 空气可作不可压缩流体处理。同一风室上方各处床层均匀平整, 床层阻力系数相同。忽略风室侧面的漏风。图1, 图2为火床炉示意图与单个风室的结构图。

3 流动特性方程组

沿风室深度方向建立一维坐标, 如图2所示。

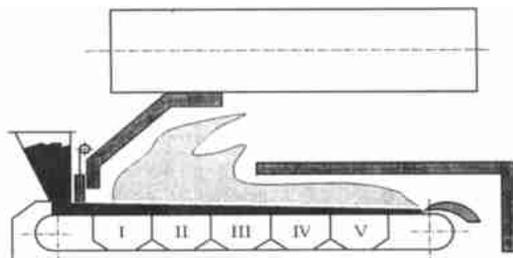


图1 火床炉示意图

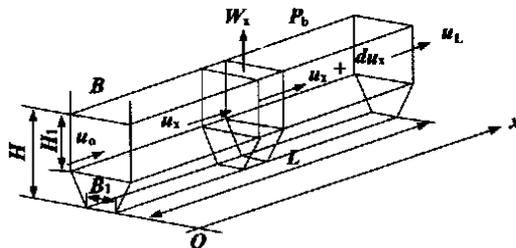


图2 全截面双侧进风风室结构

火床炉全侧面进风风室或非全侧面进风风室的流动稳流段内沿风室深度方向平均流动特性可视作沿风室深度方向一维分布, 流动过程主要受分流局部阻力的影响, 壁面沿程摩擦阻力的影响可以忽略不计。故沿风室深度 x 方向空气流动的能量方程表示为

$$p_x + \rho u_x^2 / 2 = p_{x+\Delta x} + \rho u_{x+\Delta x}^2 / 2 + \xi_{x \rightarrow x+\Delta x} \rho u_{x+\Delta x}^2 / 2 \quad (1)$$

其中的阻力系数 $\xi_{x \rightarrow x+\Delta x}$ 通过相似模化试验予以确定。 $\xi_{x \rightarrow x+\Delta x}$ 的定义为

$$\xi_{x \rightarrow x+\Delta x} = \frac{p_x - p_{x+\Delta x} + \rho u_x^2 / 2 - \rho u_{x+\Delta x}^2 / 2}{\rho u_{x+\Delta x}^2 / 2} \quad (2)$$

这样, 当按相似模化方法试验得到相应的 $\xi_{x \rightarrow x+\Delta x}$ 数据后, 经准确拟合代回方程(1), 便得到了描述该分流结构内轴向流动的能量方程。

$\xi_{x \rightarrow x+\Delta x}$ 的拟合式为:

$$\xi_{x \rightarrow x+\Delta x} = (1-n) [1 / (u_{x+\Delta x} / u_x)^2 - 1] \quad (3)$$

n 为常数。根据试验, 其值可取 0.9 ~ 1.0。

式(2)代入式(1), 经整理:

$$p_{x+\Delta x} - p_x = (1/2)\rho n(u_x^2 - u_{x+\Delta x}^2) \quad (1')$$

也正因为使用 n , 式(1)变得更为简单, 因而式(1)常简化为式(1') 这样更简单而常用的形式, 且给 n 一个更具实际意义的名称——风室内 x 轴方向空气流动的动、静压转换系数。

以式(1)定义的轴向流动能量方程物理意义明确, 而以式(1')表达的轴向流动过程方程则比较简洁。

式(1')中 $\Delta x \rightarrow 0$ 时

$$dp_x = -\rho n du_x^2/2 \quad (1'')$$

对式(1'')两边积分

$$\int_{p_0}^{p_x} dp_x = -\frac{1}{2}\rho n \int_{u_0}^{u_x} du_x^2$$

经整理, 得

$$p_x - p_0 = \rho n(u_0^2 - u_x^2)/2 \quad (4)$$

此方程与水动力计算中分配集箱流动能量方程^[1-3]相同。

分流能量方程为

$$p_x - p_b = \xi \rho w_x^2/2 \quad (5)$$

局部流量平衡方程为

$$F du_x = -B w_x dx \quad (6)$$

边界条件为

$$x = 0, u_x = u_0 \quad (7)$$

$$x = L, u_x = u_L \quad (8)$$

4 流动特性方程组的求解

由式(5)减去式(4), 得

$$p_b - p_0 = \rho n(u_0^2 - u_x^2)/2 - \xi \rho w_x^2/2$$

$$\therefore w_x = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_b) + \rho n(u_0^2 - u_x^2)}{\xi \rho}}$$

由式(6)代入, 经整理:

$$\frac{du_x}{\sqrt{[2(p_0 - p_b) + \rho n(u_0^2 - u_x^2)]/(\xi \rho)}} = -\frac{B}{F} dx$$

令 $r = (B/F)\sqrt{n/\xi}$, 对上式积分, 并结合边界条件式(7)、(8)消去 $(p_0 - p_b)$, 得:

$$u_x = \frac{u_0 \sin[r(L-x)] + u_L \sin(rx)}{\sin(rL)} \quad (9)$$

式(9)代入式(6), 积分并整理

$$w_x = \frac{\sqrt{n/\xi}}{\sin(rL)} \{u_0 \cos[r(L-x)] - u_L \cos(rx)\} \quad (10)$$

风室内静压变化规律可按欧拉数整理为无量纲形式 $Eu_x = 2(p_x - p_0)/\rho u_0^2$ 为

$$Eu_x = n \left\{ 1 - \left[\frac{\sin[r(L-x)] + (u_L/u_0)\sin(rx)}{\sin(rL)} \right]^2 \right\}^2 \quad (11)$$

5 床层阻力系数的确定

床层阻力系数 ξ 相对于床层空截面流速。其值包括穿过炉排、煤层的阻力系数与出入口阻力系数(与前两者相比, 后者可忽略不计)之和。当床层结构均匀时, 沿 x 方向 ξ 不变。

$$\xi = \Delta p_x / (\rho w_x^2/2) = \overline{\Delta p} / (\rho \bar{w}^2/2) \quad (12)$$

其中,

$$\bar{w} = (u_0 - u_L)F/(BL) \quad (13)$$

ξ 的计算有两种方法:

① 直接给出床层的平均压差, 由式(12)求得 ξ ;

② ξ 为炉排阻力系数 ξ_1 (相对于空截面流速)和煤层阻力系数 ξ_2 之和。其中,

$$\xi_2 = \Delta p^T / (\rho \bar{w}^2/2) \quad (14)$$

Δp^T 可据 Ergun 公式计算^[4]。

6 风室内流量分配偏差及其讨论

6.1 风室内流量分配偏差的定义

风室内流量分配偏差是考察风室结构配风均匀性的重要指标, 可采用不同的定义加以考察, 一文将其定义为沿床层横向(即 x 轴方向) x 处床层的空截面流速 w_x 与床层的平均空截面流速 \bar{w} 之比。即

$$\eta_Q = w_x / \bar{w}$$

将式(10)、式(13)代入上式, 得:

$$\eta_Q = \frac{rL}{(u_0 - u_L)\sin(rL)} \{u_0 \cos[r(L-x)] - u_L \cos(rx)\} \quad (16)$$

6.2 对风室内流量分配偏差的讨论

6.2.1 双侧进风时极限流量偏差值所处的位置

最小流量位于近进风口(这里未考虑实际侧密封处的漏风问题)。最大流量位于使 $\eta_Q(x)$ 的一阶导数为零的位置。

由 $\eta_Q(x) = 0$, 经整理:

$$x|_{w_{\max}} = \frac{1}{r} \arcsin[u_0 \sin(rL) / \sqrt{u_0^2 + 2u_0 u_L \cos(rL) + u_L^2}] \quad (17)$$

当 $u_L = -u_0$, 即双侧等速进风时, 化简上式, 得:

$$x|_{w_{\max}} = L/2$$

6.2.2 双侧进风与单侧进风方式流量偏差的比较

设两种方式下风室内总进风量相同。对双侧进风, 仅讨论 $u_0 = -u_L$ 。

① 单侧送风

以 $u_L = 0, 2u_0$ 代替 $u_0, x = L$, 代入式(16)

得: $\eta_{Q_{\max}}^f = \eta_Q^f |_{x=L} = rL / \sin(rL) \quad (18)$

② 双侧送风

以 $u_L = -u_0, x = L/2$ 代入式(16)

得: $\eta_{Q_{\max}}^b = \eta_Q^b |_{x=L/2} = (rL/2) / \sin(rL/2) \quad (19)$

所以, $\eta_{Q_{\max}}^a / \eta_{Q_{\max}}^b = 1 / \cos(rL/2) > 1$

即在输送相同风量情况下, 单侧送风是双侧送风最大流量偏差的 $1 / \cos(rL/2)$ 倍。

6.2.3 风室结构和床层结构对流量偏差的影响

由最大流量偏差表达式(18)、(19)可以推知, 当 rL 增大时, 最大流量偏差值随之增大。由于 r 与 B/F 成正比, 与 $\sqrt{\xi}$ 成反比。而 B/F 为风室高度的倒数, ξ 与煤层厚度和炉排通风截面比的大小。因此, 增加风室的高度 H 、采用双侧进风方式、适当减小炉排的通风截面比、增加煤层厚度都有利于减小风室内横向流量分配偏差。此与经验是相符的。

7 结论

(上接第 408 页)

6 应用效果及结论

该方法和热效率判据的推导过程虽然是结合特定煤粉炉的运行数据得到的, 但其分析过程对其它一些中小型煤粉炉同样适用; 在“青岛碱厂热车间 130 t/h 煤粉炉优化运行”这一横向项目中, 已经成功应用了这一新方法。经山东电力科学研究所的热效率测试证明: 应用了该方法后, 锅炉的热效率提高了近 3%, 证明了该方法适合于在中小型煤粉炉上

火床炉床面局部的配风量主要与两个因素有关, 床层上下的压差及床层的阻力特性。本文的讨论限于火床平整, 床面阻力系数均匀一致的条件下, 仅由风室内分流造成沿风室宽度静压变化引起的床面流量偏差问题。实例计算表明, 由此造成的流量偏差一般不大(约 1% ~ 2%)。实际燃烧的火床在强燃区和燃尽区流量偏差则比较显著。其原因在于, 风室内静压变化和床层阻力特性变化的联合作用。并且, 一般总是先由风室内静压分布的不均匀引起床面配风量稍有不均, 随后, 通过燃烧的不均而迅速改变床层阻力特性, 进而造成床面流量偏差增大, 并在经历其后的风室时不断扩大。显然, 若无风室内静压分布的不均匀这一“先天”因素的作用, 前期均匀平整的床面到燃烧中后期就不会出现沿炉宽规律性的流量分配偏差和燃烧偏差。因而, 解决沿炉宽火床燃烧不均匀的问题应首先研究风室内静压变化引起流量分配偏差的机制。本文的理论分析所获结论意义在此。

参考文献:

- [1] 缪正清, 王恩禄, 田子平. 电站锅炉分配集箱系统单相流体流动特性的研究[J]. 动力工程, 1998, 18(1): 43-47.
- [2] 缪正清. Z型集箱连接系统单相流体的流动特性[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(7): 81-85.
- [3] 缪正清. 电站锅炉集箱端部轴向引入引出的并联管组系统单相流体流动特性解的统一表达式[J]. 动力工程, 1998, 18(6): 32-38.
- [4] 巴苏 P, 弗雷泽 S A. 循环流化床锅炉的设计与运行[M]. 岑可法 倪明江, 骆仲决, 等译. 北京: 科学出版社, 1994.

(复 编辑)

推广应用。

参考文献:

- [1] 冯俊凯, 沈幼庭. 锅炉原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [2] 徐春晖. 中小煤粉炉燃烧控制的主导因素法[M]. 北京: 清华大学, 1999.
- [3] 金以慧. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [4] 邵裕森. 过程控制系统及仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [5] 孙增圻. 智能控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

(何静芳 编辑)

presented is a relevant pyrolysis mechanism. **Key words:** refuse derived fuel, pyrolysis characteristics, kinetic parameter, thermogravimetric analysis

滑动轴承支撑转子系统混沌响应计算 = **The Calculation of Chaotic Response of a Journal Bearing-supported Rotor System** [刊, 汉] / WU Xin-hua, ZHANG Xin-jiang (Energy College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), YU Zeng-bo (Harbin Turbine Works, Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 371 ~ 374

On the basis of the theory of rotor dynamics and nonlinear dynamics and in the light of the specific features of a nonlinear rotor-bearing system set up was a model of elastic rotor-bearing system with the use of a short bearing model. Moreover, through the use of a numerical integration and Poincaré mapping method a nonlinear vibration study was conducted of the above rotor-bearing system in the domain of certain parameters. As a result, obtained for the system in the above domain were bifurcation diagrams, Poincaré mappings and speed-varied three-dimensional spectral diagram. The results of calculation indicate that the rotor-bearing system may be subject to chaotic motions. An analysis was conducted of the nonlinear behavior of the system dynamics characteristics, which may vary with the change of certain parameters. A visual display is thereby obtained of the influence of parameter variation on the system dynamics characteristics. The above work can provide some theoretical reference data for the design of elastic rotor-bearing systems. **Key words:** turbomachinery, rotor dynamics, rotor-bearing system, nonlinear vibration, chaotic response

分离式热管换热器的工作原理及其在电厂余热回收中的应用 = **Working Principle of a Separation-type Heat-Pipe Heat Exchanger and Its Use in the Heat Recovery System of a Power Plant** [刊, 汉] / LIU Xiao-zhou, HUI Shi-en, XU Tong-mo, et al (Boiler Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi Province, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 375 ~ 376, 379

Described is the working principle of a separation-type heat-pipe heat exchanger along with its use in a separation-type heat-pipe economizer installed on a 670 t/h boiler of a 200 MW power plant. A comparison of the above-cited heat exchanger with a conventional low-pressure economizer shows that the recommended heat exchanger enjoys tremendous superiority in terms of heat recovery efficiency. **Key words:** separation type heat pipe, working principle, low-pressure economizer, economic benefit

水平管内油气水三相间歇流向环状流转换的研究 = **An Investigation on the Intermittent-to-Annular Flow Transition of Oil-gas-water Three-phase Flow in a Horizontal Tube** [刊, 汉] / ZHOU Yun-long, CAI Hui, HONG Wen-peng, LI Yan (Power Engineering Department, Northeastern Electric Power Institute, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 377 ~ 379

An experimental and theoretical study was conducted of the intermittent-to-annular flow transition of oil-gas-water three-phase flow in a horizontal tube. Proposed was a boundary equation featuring the transition of the intermittent-to-annular flow. The experimental study results show that the major factor governing the transition of the intermittent-to-annular flow is the gas-phase reduced speed and the liquid-phase reduced one with the effect of oil fraction and tube diameter playing an insignificant role. The results of calculation have been found to be basically in agreement with those of experiment. **Key words:** horizontal tube, oil-gas-water three-phase flow, flow pattern transition.

火床炉室内横向配风特性的理论分析 = **Theoretical Analysis of the Characteristics of Air Transverse Flow Distribution in a Stoker-boiler Air Compartment** [刊, 汉] / MIAO Zheng-qing, DOU Wen-yu, ZHOU Qu-lan, et al (Power and Energy College under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 380 ~ 382

Presented is an enclosed set of equations, which describes the air flow in a flow stabilized section of a stoker boiler dual lateral-side full-section air feed compartment and a full lateral-side air feed compartment. Through a theoretical deduction obtained was an analytical solution along with the deduction of a theoretical expression of the stoker surface flow-rate deviation. On this basis the limiting flow rate deviation location and the flow rate deviation limiting ratio were compared for the following cases: the dual lateral-side air feed mode and the single lateral-side air feed mode. Moreover, an analysis was performed of influence of air compartment construction and stoker grate layer structure on the flow rate deviation. **Key words:** stoker boiler, stoker air compartment, flow characteristics, flow distribution, flow deviation