

# 循环流化床锅炉热效率统计分析研究

蒋绍坚<sup>1</sup>, 刘 乐<sup>1</sup>, 何相助<sup>2</sup>, 艾元方<sup>1</sup>

(1. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083 2 湖南省节能中心, 湖南 长沙 410007)

**摘 要:** 针对循环流化床锅炉炉膛容积采用经验比较法适应性差的问题, 采用幂函数规律拟合循环流化床锅炉运行数据。研究循环流化床锅炉热效率与其主要影响因素(吨汽有效容积、煤的挥发分)之间的关系, 提出了吨汽有效容积的概念。结果表明: 吨汽有效容积与燃用煤种的挥发分是影响炉膛容积的重要因素。为使循环流化床锅炉热效率达到 80% 以上, 吨汽有效容积(用  $Y$  表示)与煤的挥发分(用  $X$  表示)应满足:  $Y \geq 7.78 X^{0.136}$ 。

**关 键 词:** 循环流化床锅炉; 炉膛容积; 挥发分; 回归分析; 热效率; 吨汽有效容积

中图分类号: TK229.6 文献标识码: A

## 引 言

锅炉炉膛是燃料与空气发生燃烧反应, 并产生辐射传热过程的有限空间。如何根据给定条件合理确定炉膛容积, 是锅炉设计与锅炉改造中重要的问题。目前, 解决这一问题的常用方法是经验比较法<sup>[1~3]</sup>。首先根据煤种对照类似锅炉, 确定炉膛截面热负荷, 定出炉膛横截面积, 再根据长宽比确定炉膛的长与宽, 最后确定炉膛的高度。采用经验比较法需收集大量锅炉的设计煤种、额定蒸发量等信息, 当这些参数与投运锅炉不符时, 还需进行相似分析, 对使用者的专业知识要求高。由于炉膛容积不合理导致热效率偏低的情况时有发生。对运行中的低效锅炉而言, 目前尚缺乏概念直观、变量少、计算简单、准确度高、便于工程技术人员掌握的判断炉膛容积大小是否合理的标准, 因此, 有必要展开相关研究。

## 1 炉膛有效容积和吨汽有效容积的概念

煤在炉膛内的燃烧过程由挥发分析出和固定碳燃烧两个阶段构成。为获得高效率, 煤在炉内应尽可能燃尽。虽影响煤燃尽的因素很多, 但总体而言可分为由煤质特性决定的内因和由炉膛几何特性、

温度特性等决定的外因两大方面<sup>[5~6]</sup>。在煤质特性方面, 煤的挥发分含量对挥发分析出过程以及紧接着的固定碳燃烧过程都有显著影响。挥发分含量越高, 挥发分析出后煤孔隙率越大, 燃烧表面积越大, 完全燃烧所需时间就越短, 燃烧越充分<sup>[7~9]</sup>。

固定碳的燃烧, 其燃尽度与炉膛几何特性和温度特性直接相关。炉膛几何特性对煤在炉内的停留时间及炉内传热效果有决定性影响; 而温度特性对煤在炉内的燃烧速度有决定性影响。为综合反映炉膛几何特性和温度特性的影响程度, 本研究提出炉膛吨汽有效容积的概念。有效容积是指具备能使煤发生燃烧所需温度条件的炉膛容积。文献 [10] 指出: 流化床炉膛温度分布均匀, 在锅炉尾部离炉烟气温高于 850~950℃ 时, 炉膛容积即具备了燃烧所需温度条件。因此, 采用“离炉烟气温高于 850℃”作为炉膛有效容积定义中所涉及的燃烧反应所需温度条件, 炉膛有效容积与锅炉设计吨位之比即为吨汽有效容积。

## 2 锅炉等热效率曲线图

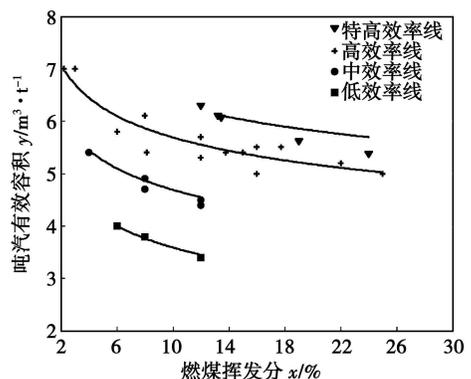


图 1 热效率与炉膛吨汽有效容积、煤煤挥发分之间的函数关系

为探讨锅炉热效率的变化规律,本研究以挥发分含量为横坐标,吨汽有效容积为纵坐标,采用统计分析绘制锅炉等热效率曲线。统计分析中所采集的样本信息为:旋风分离器、出口烟温在 850 °C以上,分离下来的粒径<0.08 mm的灰占 80 %以上,炉膛平均烟速在 4.5~6.5 m/s之间、炉膛宽深比在 1~2之间的中小型循环流化床锅炉,表 1列出了相关数据。

将表 1数据绘制成曲线,如图 1所示,发现可用曲线拟合热效率接近的点。为确定该曲线的函数关系,将调查数据分成 4个区:当热效率在 60 %~70 %之间,属于低效率区;当热效率在 70 %~80 %之间,属于中效率区;当热效率在 80 %~90 %之间,属于高效率区;当热效率大于 90 %时,属于特高效率区。

表 1 锅炉热效率统计数据

吨位 / t	h <sup>-1</sup>	热效率 / %	挥发分 / %	有效容积 / m <sup>3</sup>	吨汽有效容积 / m <sup>3</sup> · t <sup>-1</sup>	炉膛平均烟速 / m · s <sup>-1</sup>	循环倍率	分离器形式及数量 / 个
75		82	2.21	525	7	6.2	高	高温 2
45		81	8.13	243	5.4	6.1	高	高温 2
65		81	13.8	351	5.4	6.1	高	高温 2
35		84	17.72	193	5.5	6	高	高温 1
45		83	22	234	5.2	6	高	高温 2
75		84	15	405	5.4	5.8	高	高温 2
15		88	6	87	5.8	4.5	低	高温 1
35		88	12	199.5	5.7	4.6	高	高温 1
45		88	25	225	5	4.8	低	高温 2
75		88	12	427.5	5.7	5.6	高	高温 2
130		88	8	793	6.1	5.4	低	高温 2
130		88	16	715	5.5	5.4	高	高温 2
75		88	3	525	7	5.6	高	高温 2
20		84	12	106	5.3	4.8	高	高温 1
35		84	16	175	5	5.3	高	高温 2
20		79	8	98	4.9	5.6	高	高温 1
75		78	12	340	4.5	6.1	高	高温 2
240		78	4	1290	5.4	5.9	高	高温 2
130		72	8	610	4.7	6.1	高	高温 1
20		72	12	88	4.4	5.5	高	中温 2
15		65	6	60	4	5.4	高	中温 2
35		69	12	120	3.43	5.8	高	中温 1
20		68	8	76	3.8	5.8	高	中温 1
45		90	13.24	275	6.1	4.5	低	高温 2
75		92	13.45	455	6.1	5.8	高	高温 2
240		90	24	1290	5.375	5.8	高	高温 2
130		92	12	820	6.31	5.6	高	高温 2
240		90	19	1350	5.625	5.6	高	高温 2

如图 1所示,处于高效率区的原始数据最多,故先优选该区数据分析。令  $x = (x_i, i=1 \sim 15)^T$ ,  $y = (y_j, j=1 \sim 15)^T$ 。

假设该函数满足函数  $y = a \cdot x^b$  且  $b < 0$  两边同时取对数,且令  $Y = \ln y$ ,  $X = \ln x$ ,  $A = \ln a$  得到线性方程  $Y = A + bX + \epsilon$ ,  $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。经计算可得:  $\sum$

$X_i = 35.38$ ,  $\sum Y_j = 25.95$ ,  $\sum X_i^2 = 90.06$ ,  $\sum X_i Y_j = 60.29$ ,  $\bar{X} = 2.36$ ,  $\bar{Y} = 1.73$ 。由最小二乘法估计值公式,得:

$$b = \frac{\frac{1}{n} \sum X_i Y_j - \bar{X} \bar{Y}}{\frac{1}{n} \sum X_i^2 - \bar{X}^2} = \frac{60.29 - 15 \times 2.36 \times 1.73}{90.06 - 15 \times 2.36^2} = -0.136$$

$$\bar{y} = \hat{A} + b\bar{X} \Rightarrow \hat{A} = \bar{y} - b\bar{X} = 1.73 - (-0.136) \times 2.36 = 2.05$$

$$\hat{A} = \bar{Y} - b\bar{X} = 1.73 + 0.136 \times 2.36 = 2.05$$

$$a = e^{\hat{A}} = 7.78$$

对所求 Y 对 X 的一元线性回归方程为:

$$\hat{Y} = 7.78 - 0.136X$$

求 A 的置信区间 ( $\alpha = 0.05$ ) 则:

$$k_x = \sum X_j^2 - n \times \bar{X}^2 = 90.06 - 15 \times 2.36 \times 2.36 = 6.63$$

$$k_y = \sum Y_j^2 - n \times \bar{Y}^2 = 45.02 - 15 \times 1.73 \times 1.73 = 0.147$$

$$\sigma^{*2} \text{的观测值为: } \sigma^{*2} = \frac{1}{n-2} (k_y - \hat{B} k_x) = \frac{1}{13} \times$$

$$(0.147 - 0.136^2 \times 6.63) = 0.0018$$

$$\sigma^* = 0.043$$

故 A 的  $1-\alpha = 0.95$  的置信区间为:

$$\hat{A} \pm t_{\frac{\alpha}{2}} (n-2) \sigma^* \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{k_x}} = 2.05 \pm 2.1604 \times$$

$$0.043 \times \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{2.36 \times 2.36}{6.63}} = 2.05 \pm 0.088$$

$$= (1.962, 2.138)$$

而 b 的  $1-\alpha = 0.95$  的置信区间为:

$$b \pm t_{\frac{\alpha}{2}} (n-2) \sigma^* \sqrt{\frac{1}{k_x}} = -0.136 \pm 2.1604 \times$$

$$0.043 \times \sqrt{\frac{1}{6.63}} = -0.136 \pm 0.036 = (-0.172, -0.1)$$

故 b 的置信区间相应为:

$$a = e^{\hat{A}} = e^{(1.962, 2.138)} = (7.11, 8.48)$$

检验线性关系是否显著, 采用 F 检验, 则:

$$F = \frac{\hat{B} \sqrt{k_x}}{\sqrt{\frac{1}{n-2} (k_y - \hat{B} k_x)}} = \frac{-0.136 \times \sqrt{6.63}}{\sqrt{\frac{1}{13} (0.147 - 0.136^2 \times 6.63)}} = -8.22$$

查表得:  $t_{-(\alpha/2)}(13) = 2.1604$  故有  $|F| = 8.22 > 2.1604 = t_{-(\alpha/2)}(13)$

拒绝  $H_0$ , 即认为该函数线性回归效果显著<sup>[11~13]</sup>, 从而得到:  $y = 7.78 \bar{x}^{-0.136}$ 。

同理, 可得其它 3 条曲线回归式, 从上到下依次为  $y = 10.95 \bar{x}^{-0.225}$ ,  $y = 6.8 \bar{x}^{-0.169}$ ,  $y = 6 \bar{x}^{-0.234}$ 。

### 3 结 论

本研究在调查数据基础之上, 采用幂函数拟合

方法, 统计分析出循环流化床锅炉热效率与吨汽有效容积、燃用煤种挥发分之间的数学关系。研究指出: 吨汽有效容积与燃用煤种挥发分存在对应关系, 且共同影响热效率。当燃用同一煤种时, 热效率随吨汽有效容积减少而降低; 当吨汽有效容积确定时, 热效率随煤种挥发分减少而降低。为使锅炉热效率达到 80% 以上, 炉膛容积满足  $\geq 7.78 \bar{x}^{-0.136}$  是必要条件之一。

循环流化床锅炉热效率与吨汽有效容积、燃用煤种挥发分之间的数学关系必须建立在大量可靠、准确的数据之上, 同时, 函数中的相关参数选取也至关重要。本研究只是初步性工作。随着调查数据的增加, 锅炉的等热效率曲线图将进一步修正, 更趋于合理。

致谢: 在写作过程中, 得到了黄波、魏烈旭等人提供的许多宝贵意见, 在此, 作者表示诚挚的感谢。

### 参考文献:

- [1] 向 军, 孙学信. 煤性与炉膛性能参数的非线性耦合关系的研究 [J]. 动力工程, 2003, 23(2): 2289-2293.
- [2] 左志雄, 唐必光. 煤质燃烧特性与炉膛性能关系研究 [J]. 华中电力, 2003, 16(3): 23-25.
- [3] YIN C G, LUO Z Y, NIM J, et al. Investigation of the flow combustion, heat transfer and emissions from a 609 MW utility tangentially fired pulverized-coal boiler [J]. Fuel, 2002, 81(3): 997-1006.
- [4] 李永星, 陈听宽. 电站锅炉炉膛性能设计方法优化研究 [J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(7): 674-677.
- [5] 于 龙, 吕俊复, 王智微, 等. 循环流化床燃烧技术的研究展望 [J]. 热能动力工程, 2004, 19(4): 336-341.
- [6] 陈凤玉, 陶玉霞. 大型煤粉锅炉燃烧方式及炉膛热力特性参数的选择 [J]. 锅炉制造, 2003(4): 1-12.
- [7] 易海清. 35 t/h 煤粉锅炉综合技术改造 [J]. 节能, 2002(12): 26-28.
- [8] BUHRE B J P, HINKLEY J T, GUPTA R P, et al. Submicron ash formation from coal combustion [J]. Fuel, 2005, 4(10): 1206-1214.
- [9] 王智微, 李定凯, 唐松涛, 等. 高挥发份燃料在循环流化床燃烧室中挥发份释放的统计模型 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(1): 121-126.
- [10] 邱 燕, 添茅诚, 牛蔚然, 等. 降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的理论及其应用 [J]. 热能动力工程, 2005, 20(4): 370-372.
- [11] 刘碧玉, 李军英. 高等数学教程 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000.
- [12] 韩 瑾, 杨云龙, 沈鹤龄. 灰色模型用于山西省污水排放量的预测 [J]. 山西建筑, 2008(7): 203-204.
- [13] 庄楚强, 吴亚森. 应用数理统计基础 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1999.

(编辑 陈 滨)

atively close tendency to that of the currently available test results. The particle concentration at the center of the central jet zone is relatively high. After dropping step by step to a partial minimum value, it will gradually increase with an increase of the radial distance. The particle concentration in the annulus zone remains basically unchanged. The influence of the action force between the fluid and particles as well as the particle elastic recovery coefficient etc. on the kinetic characteristics of the fluid in the reactor was analyzed. The research results show that the greater the particle collision recovery coefficient, the more uniform the particle concentration distribution on the cross section in the flow field. Key words: fluidized bed nuclear reactor, two-phase flow theory, numerical simulation

循环流化床锅炉热效率统计分析研究 = Statistical Analysis and Study of the Thermal Efficiencies of a Circulating Fluidized Bed Boiler [刊, 汉] / JIANG Shao-jian, LU Le, AI Yuan-fang (College of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha, China, Post Code: 410083), HE Xiang-zhu (Hunan Provincial Energy Conservation Center, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 627 ~ 629

In the light of the problem that the adoption of the empirical comparison method has a poor adaptability to the furnace volume of a CFB boiler, a power function regularity was used to perform a fitting of the operating data of a CFB boiler. On this basis, the relationship between the thermal efficiency and the main influencing factors (such as ton steam effective volume, volatile content of the coal) of the boiler was studied and a concept of ton steam effective volume put forward. The research results show that the tonnage steam effective volume and the volatile content of the coal burned are the major factors influencing the furnace type selection. To make the thermal efficiency of the boiler attain over 80%, the tonnage steam effective volume (represented by letter  $y$ ) and the volatile content of the coal (represented by letter  $x$ ) shall meet the requirement below  $y \geq 7.78x^{1.36}$ . Key words: circulating fluidized bed boiler, furnace volume, volatile content, regression analysis, thermal efficiency, ton steam effective volume

炉内燃烧器射流组组合特性分析 = Analysis of the Jet Flow Group Combination Characteristics of a In-furnace Burner [刊, 汉] / SHI Guang-mei, LIMing-hai, CHEN Jun et al (Structural Mechanics Research Institute, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, China, Post Code: 621900) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 630 ~ 634

With an oil-fired boiler serving as a concrete object of study, the in-furnace three-dimensional turbulent flow combustion field characteristics were numerically simulated by adjusting several main combination modes of the burners and the regularity of the jet flow group combination characteristics of the burners influencing the in-furnace aerodynamic field was obtained. A comparison of the simulation calculated results with the test ones shows that the calculated data are in relatively good agreement with the actually measured ones. This is of realistic significance for determining the combined operating condition of the burners and designing a test scheme, thereby providing a theoretical reference and basis for regulating the operating condition of indoor oil-fired boilers. Key words: turbulent flow combustion, jet flow group combination characteristics, numerical simulation, oil-fired boiler