

## 65t/h生物质循环流化床锅炉冷态实验研究

李成喜<sup>1</sup>，王焕新<sup>1</sup>，陈国艳<sup>2</sup>

(1.武汉凯迪控股投资有限公司，湖北武汉430223；2.清华大学热能系，北京100084)

**摘要：**武汉凯迪公司自主研发的生物质直燃循环流化床锅炉，不同于普通的燃煤循环流化床锅炉和它的生物质直燃锅炉。其锅炉燃料品种主要以稻壳、麦壳、枝桠薪材、秸秆、树皮、木材厂边角废料等农林废弃物为主，与普通的燃煤循环流化床锅炉有较大差异，适合于各种农林废弃物混合循环流化燃烧。65t/h生物质循环流化床锅炉的冷态测试对流化床锅炉的安全高效运行具有重要意义。

我国生物能源资源丰富，农业、畜牧业、林业残余物和工业用木料加工剩余物的生物质资源量以及能源植物生物质资源量，每年存量相当于6.74亿t标准煤，其中，年可开发资源相当于1.78亿t标准煤，而且其利用不受区域限制，比太阳能、风能等新能源更适合我国地广人多且分布不均衡的国情。在我国，不仅具有广泛的生物质能源资源优势，而且开发生物质能源的相关技术条件和法律环境也已经具备。《可再生能源中长期发展规划》目标是，到2020年生物质发电总装机容量达到3000万kW<sup>[1-6]</sup>。

凯迪公司自主研发的循环流化床锅炉燃烧生物质，具有相对其它型锅炉燃烧生物质高效、高脱硫效率、低NO<sub>x</sub>排放、高碳燃尽率、长燃料停留时间、强烈的颗粒返混、均匀的床温、燃料适应性广等优点，被公认为是一种最具发展前景的“洁净”煤燃烧技术。我国自20世纪80年代末开始对燃生物质流化床锅炉进行了研究，后期根据稻壳的物理、化学性质和燃烧特性，设计出以流化床燃烧方式为主，辅之以悬浮燃烧和固定床燃烧的组合燃烧式流化床锅炉，并且为配合三段组合燃烧采取了四段送风的方式<sup>[7-9]</sup>。

因此，本文充分利用凯迪公司研发的生物质直燃循环流化床锅炉，研究适合生物质直燃循环流化床锅炉性能测试的方法。对1号炉冷态实验完成了各风管道18个风量测量一次元件风量标定实验、布风板阻力特性实验、料层阻力及临界流化风量实验等相关实验内容。选择出最佳的一次风、二次风运行方式，并为炉子的热态运行提供基础数据。

### 1 实验系统简介

本实验锅炉（如图1所示）是中温次高压参数、单锅筒、自然循环、单段蒸发系统、集中下降管、平衡通风的CFB锅炉。锅炉主要由炉膛、高温绝热分离器、自平衡“U”形返料器和尾部3个烟道组成。炉膛蒸发受热面采用膜式水冷壁，尾部第1、第2烟道采用水冷包墙。炉膛下部布置水冷布风板，布风板上安装钟罩式风帽，具有布风均匀、防堵塞、防结焦和便于维修等优点。锅炉采用2个高温绝热分离器，布置在燃烧室与尾部对流烟道之间，外壳由钢板制造，内衬绝热材料及耐磨耐火材料，分离器上部为蜗壳形，下部为锥形。防磨绝热材料采用拉钩、抓钉、支架固定。高温绝热分离器回料腿下布置一个非机械型返料器，返料为自平衡式，流化密封风用高压风机单独供给。返料器外壳由钢板制成，内衬绝热材料和耐磨耐火材料。

耐磨材料和保温材料采用拉钩、抓钉和支架固定。炉膛、旋风分离器和返料器三部分构成了CFB锅炉的核心部分——物料热循环回路，燃料在炉膛内和循环物料混合并燃烧，产生热烟气，形成气固两相流。气固两相流在炉膛内向上流动。在这一过程中大颗粒循环物料在不同高度向下回落，形成循环流化床锅炉的内循环。其余循环物料随热烟气经炉膛出口进入到旋风分离器，分离器对气流进行分离净化，分离下来的固体颗粒经过返料器返回到炉膛，形成锅炉的外循环。实验系统的基本参数如表1所示。

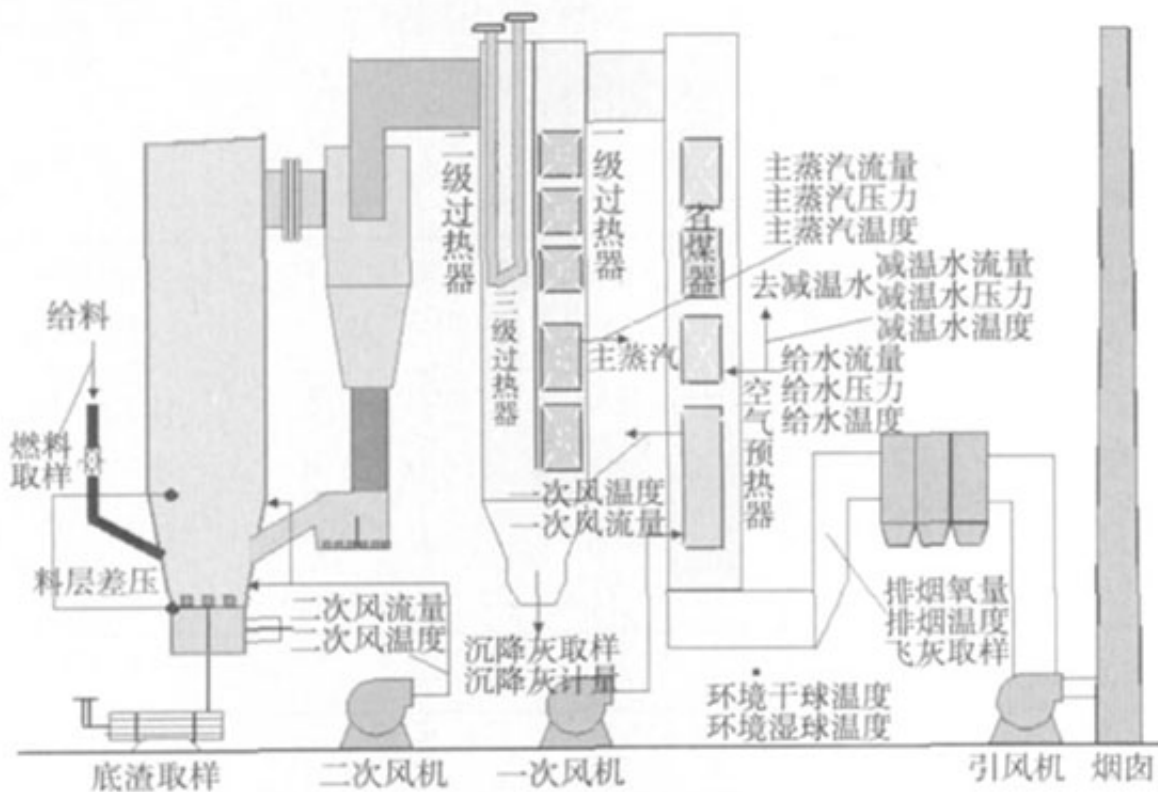


图 1 实验系统示意图

表 1 实验系统主要参数

| 项目                      | 数值    |
|-------------------------|-------|
| 额定蒸发量/t·h <sup>-1</sup> | 65.00 |
| 给水量/t·h <sup>-1</sup>   | 64.53 |
| 主蒸汽压力/MPa               | 5.29  |
| 主蒸汽温度/°C                | 450.0 |
| 给水温度/°C                 | 152.2 |
| 给水压力/MPa                | 6.537 |
| 排烟温度/°C                 | 145.0 |
| 锅炉设计效率/%                | 90.49 |

## 2实验原理与方法

根据流量测速元件的工作原理，一定温度下，通过流量测量元件所在风道的流量与该测量元件差压值之间存在着确定的对应关系，如下式所示：

$$Q_{\text{实测}} = 3600 \times F \times w_i \quad (1)$$

式中： $Q_{\text{实测}}$ —实测气体的流量， $\text{m}^3/\text{h}$

$F$ —被测管道截面积， $\text{m}^2$

$w_i$ —气流在被测截面的平均流速， $\text{m/s}$

$$w_i = \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{毕托管}}}{\rho}} \quad (2)$$

式中： $\Delta P_{\text{毕托管}}$ —毕托管实测压差， $\text{Pa}$

$\rho$ —实测气流的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$

$$Q\rho \times Q_{\text{实测}} = \rho_{\text{标}} \times Q_{\text{标}} \quad (3)$$

式中： $Q_{\text{标}}$ —标准状态下（ $0\text{ }^\circ\text{C}$ ，1标准大气压）气体的流量， $\text{m}^3/\text{h}$

$\rho_{\text{标}}$ —标准状态下空气的密度， $1.293\text{ kg}/\text{m}^3$

流量系数 $K$ 定义为标准毕托管差压值开方与一次测量元件差压值开方比值：

$$K = \frac{\sqrt{\Delta P_{\text{毕托管}}}}{\sqrt{\Delta P}} \quad (4)$$

式中： $\Delta P$ —一次元件测量元件差压， $\text{Pa}$

当黏性流体的流动进入自模化区后，流量系数 $K$ 应该为一定值。考察差压型一次流量测量元件是否具有好的测量特性，主要看其流量系数 $K$ 值随流量变化是否保持恒定。

对于同一管道，标准流量计算公式可以简化为：

$$Q_{\text{标}} = C \times \sqrt{\Delta P} \times \sqrt{\frac{P_{\text{当地}} + P_s}{273.15 + t}} \quad (5)$$

式中： $C$ —标定系数，对同一风管道， $C$ 为常数

DCS流量计算公式中的修正系数是和管道面积 $F$ 、流量系数 $K$ 、设计工况下的静压和温度有关系的，对于同一风管道只要知道流量系数 $K$ 就可以准确计算得到修正系数了。

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{表盘}} - Q_{\text{标}}}{Q_{\text{标}}} \times 100 \quad (6)$$

式中： $Q_{\text{表盘}}$ —DCS系统表盘显示的流量， $\text{m}^3/\text{h}$

$Q_{\text{标}}$ —标准状态下气体的流量， $\text{m}^3/\text{h}$

$\varepsilon$ —现有误差，%

风量标定实验采取各个测量元件单独测定的方法进行。对于每个测量元件，调整相关风门挡板，在不同的风量下，测量通过该风道的实际风量值和该测量元件的动压值，得出风量与测量元件输出动压值之间的对应关系。

实际风量值按照多点等截面网格法用标准毕托管和电子微压计进行测量。测量元件动压值用电子微压计测量。

对本次标定的18个测量元件实验结果逐一进行说明。实验结果中，给出了每个测量元件的流量系数K和修正系数C，并给出了实验条件下流量与测量元件差压开方的关系曲线。测试工况主要有三种：锅炉最大连续出力、常用负荷及额定负荷对应的发电功率为15MW、13.5MW、12MW。

### 3实验结果与分析

本实验采用的进口便携式电子微压计精度较高，并且能够方便地对测量值取平均值，实验中，对每一测量网格点除了往复进行一次外，对每一点还利用该电子微压计进行了30次左右的平均。

#### 3.1一次热风测量元件标定结果

表2是一次热风总风测量元件标定实验结果，图2与图3分别是实测风量与测量元件差压开方和DCS显示风量的关系曲线。

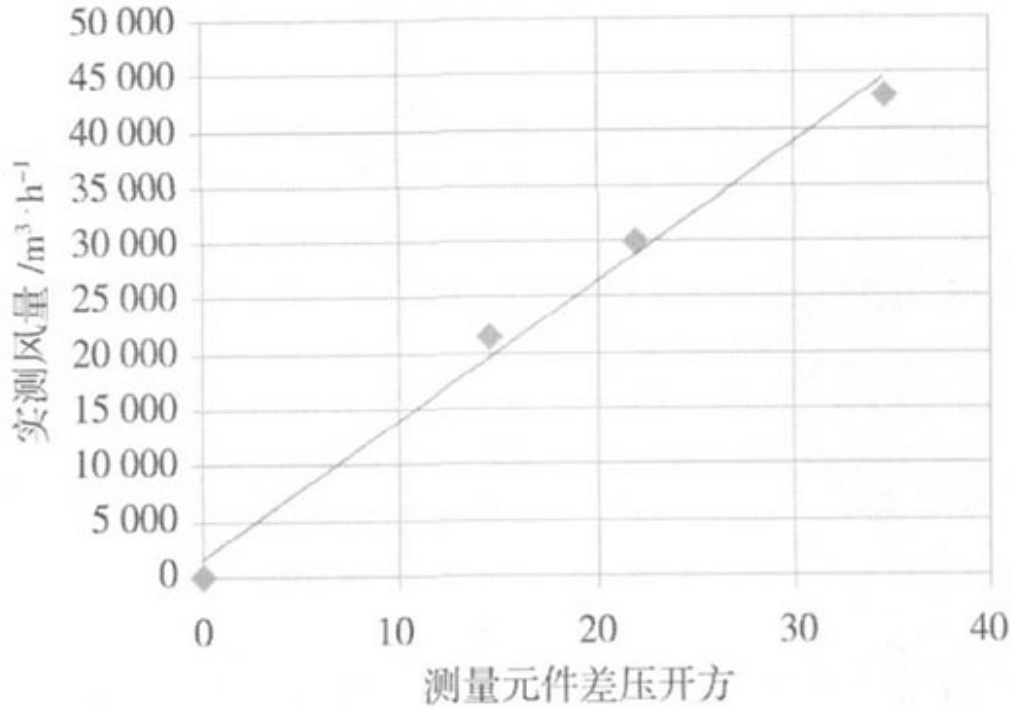


图2 一次热风总风实测流量与 DCS 测量元件差压开方的关系图

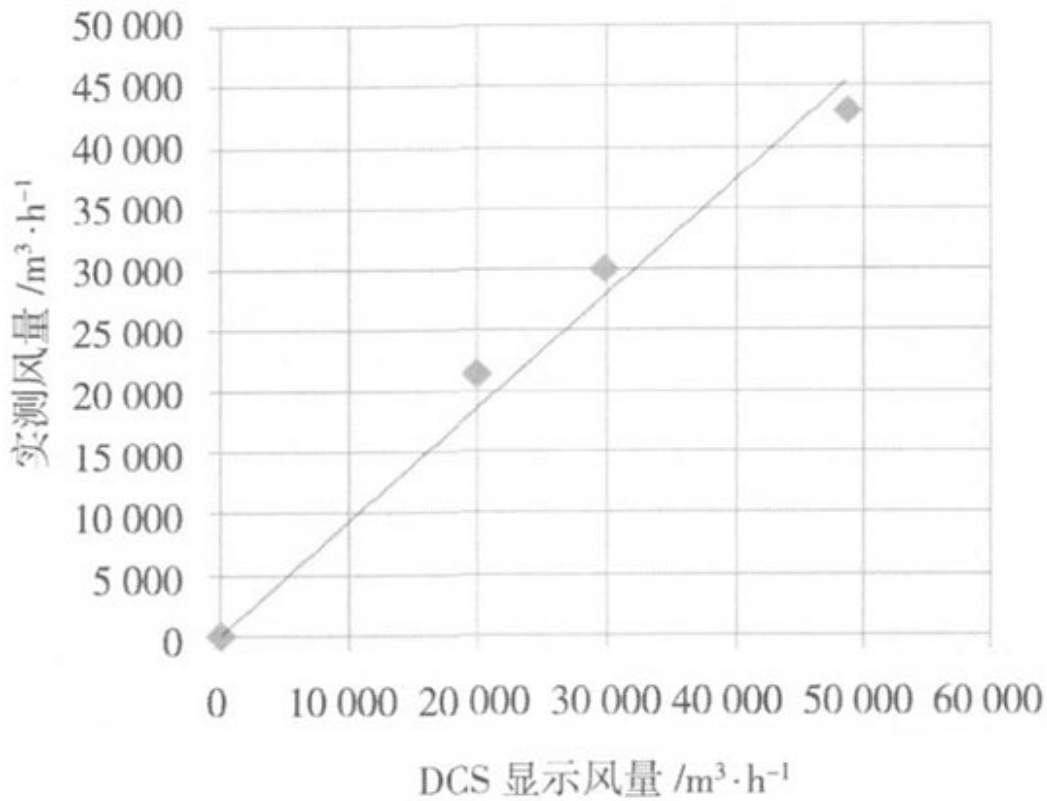


图3 一次热风总风实测流量与显示风量的关系图



如图2所示，一次热风总风测量元件流量系数K值均比较稳定，实验条件下风道的流量与测量元件差压开方呈良好的线性关系。从图3中可以看出，DCS显示风量比实际测量值偏差仅为1.73%，原风量显示值准确。

### 3.2左风室一次热风测量元件标定结果

表3是左风室一次热风测量元件标定实验结果，图4与图5分别是实测风量与测量元件差压开方和DCS显示风量的关系曲线。

表 2 一次热风总风测量元件标定实验结果

| 项目   | 表盘风量 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> | 实测风量 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> | 现有误差/% | 实测动压差/Pa | 测量元件动压 ΔP/Pa | 测量面静压 P/Pa | 测量面温度 t/°C | 流量系数 K  | DCS 修正后系数 C <sub>修正</sub> |
|------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|----------|--------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 工况 1 | 48 555                                | 42 848                                | 13.32  | 220.09   | 1 200        | 8 100      | 28.4       | 0.427 6 | 0.028 1                   |
| 工况 2 | 29 675                                | 29 943                                | -0.89  | 111.61   | 480          | 4 120      | 28.6       | 0.481 4 | 0.031 7                   |
| 工况 3 | 19 841                                | 21 388                                | -7.23  | 58.32    | 210          | 2 030      | 29.4       | 0.525 8 | 0.034 6                   |
| 平均   |                                       |                                       | 1.73   |          |              |            |            | 0.478 3 | 0.031 5                   |

表 3 左风室一次热风测量元件标定实验结果

| 项目   | 表盘风量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> | 实测风量/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> | 现有误差/% | 实测动压差/Pa | 测量元件动压 ΔP/Pa | 测量面静压 P/Pa | 测量面温度 t/°C | 流量系数 K  | DCS 修正后系数 C <sub>修正</sub> |
|------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------|----------|--------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 工况 1 | 6 972                                | 17 158                               | -59.37 | 97.23    | 162          | 8 100      | 28.4       | 0.764 6 | 0.049 4                   |
| 工况 2 | 4 710                                | 11 788                               | -60.05 | 47.92    | 91           | 3 890      | 28.6       | 0.715 0 | 0.046 2                   |
| 工况 3 | 3 372                                | 8 069                                | -58.21 | 23.00    | 42           | 1 950      | 29.4       | 0.728 1 | 0.047 0                   |
| 平均   |                                      |                                      | -59.21 |          |              |            |            | 0.735 9 | 0.047 5                   |

如图4所示，左风室一次热风测量元件流量系数K值均比较稳定，实验条件下风道的流量与测量元件差压开方呈良好的线性关系。从图5中可以看出，DCS显示风量比实际测量值偏小较多，左风室一次热风平均偏差-59.21%。

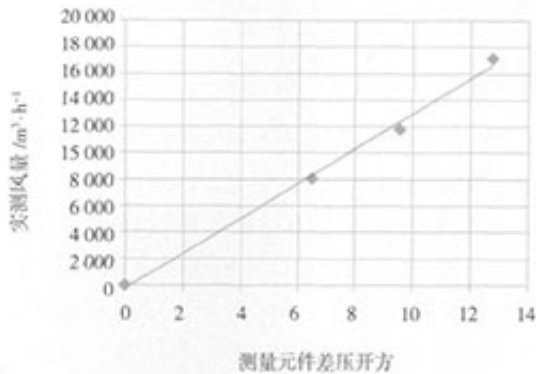


图 4 左风室一次热风实测流量与 DCS 测量元件差压开方的关系图

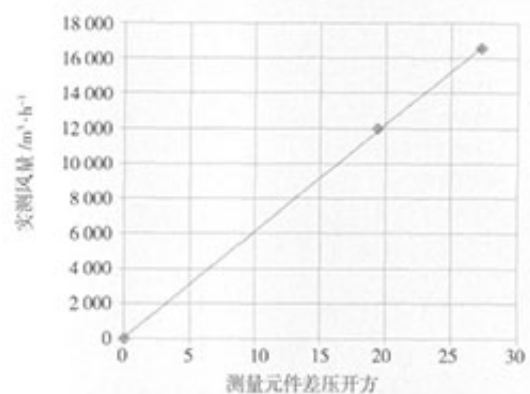


图 6 右风室一次热风实测流量与 DCS 测量元件差压开方的关系图

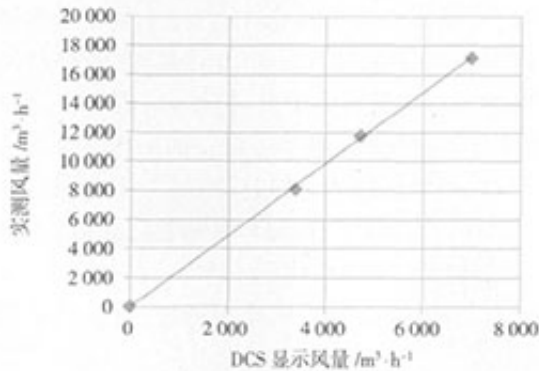


图 5 左风室一次热风实测流量与显示风量的关系图

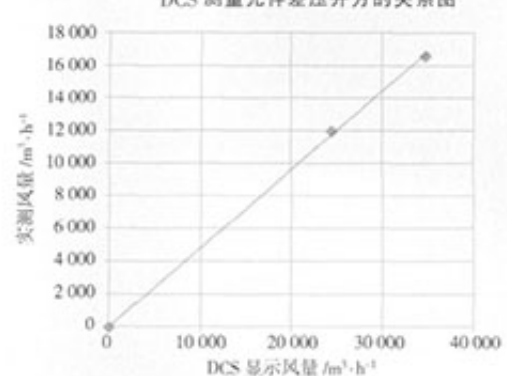


图 7 右风室一次热风实测流量与显示风量的关系图

### 3.3右风室一次热风测量元件标定结果

表4是右风室一次热风测量元件标定实验结果，图6与图7分别是实测风量与测量元件差压开方和DCS显示风量的关系曲线。

表 4 右风室一次热风测量元件标定实验结果

| 项目   | 表盘风量<br>$/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 实测风量<br>$/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 现有误差/% | 实测动<br>压差/ $\text{Pa}$ | 测量元件动<br>压 $\Delta P/\text{Pa}$ | 测量面静<br>压 $P/\text{Pa}$ | 测量面温<br>度/ $^{\circ}\text{C}$ | 流量系数<br>$K$ | DCS 修正后<br>系数 $C_{DCS}$ |
|------|---|---|--------|------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------|
| 工况 1 | 34 702                                    | 16 546                                    | 109.73 | 89.13                  | 740                             | 8 100                   | 28.4                          | 0.345 0     | 0.022 3                 |
| 工况 2 | 24 358                                    | 11 967                                    | 103.54 | 48.90                  | 375                             | 3 856                   | 28.6                          | 0.357 6     | 0.023 1                 |
| 平均   |   |   | 106.63 |                        |                                 |                         |                               | 0.351 3     | 0.022 7                 |

表 5 二次总风测量元件标定实验结果

| 项目   | 表盘风量<br>$/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 实测风量<br>$/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 现有误差/% | 实测动<br>压差/ $\text{Pa}$ | 测量元件动<br>压 $\Delta P/\text{Pa}$ | 测量面静<br>压 $P/\text{Pa}$ | 测量面温<br>度/ $^{\circ}\text{C}$ | 流量系数<br>$K$ | DCS 修正后<br>系数 $C_{DCS}$ |
|------|---|---|--------|------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------|
| 工况 1 | 35 703                                    | 40 253                                    | -11.30 | 125.98                 | 737                             | 7 430                   | 20                            | 0.372 2     | 0.034 9                 |
| 工况 2 | 20 752                                    | 23 370                                    | -11.20 | 44.53                  | 360                             | 3 750                   | 20                            | 0.376 2     | 0.035 3                 |
| 工况 3 | 9 635                                     | 11 353                                    | -15.13 | 11.25                  | 98                              | 1 055                   | 20                            | 0.373 0     | 0.035 0                 |
| 平均   |   |   | -12.54 |                        |                                 |                         |                               | 0.373 8     | 0.035 1                 |

图6所示，右风室一次热风测量元件流量系数 $K$ 值均比较稳定，实验条件下风道的流量与测量元件差压开方呈良好的线性关系。从图7中可以看出，DCS显示风量比实际测量值偏大较多，右风室一次热风平均偏差106.63%。

### 3.4二次总风测量元件标定结果

表5是二次总风标定实验结果，图8与图9分别是实测风量与测量元件差压开方和DCS显示风量的关系曲线。

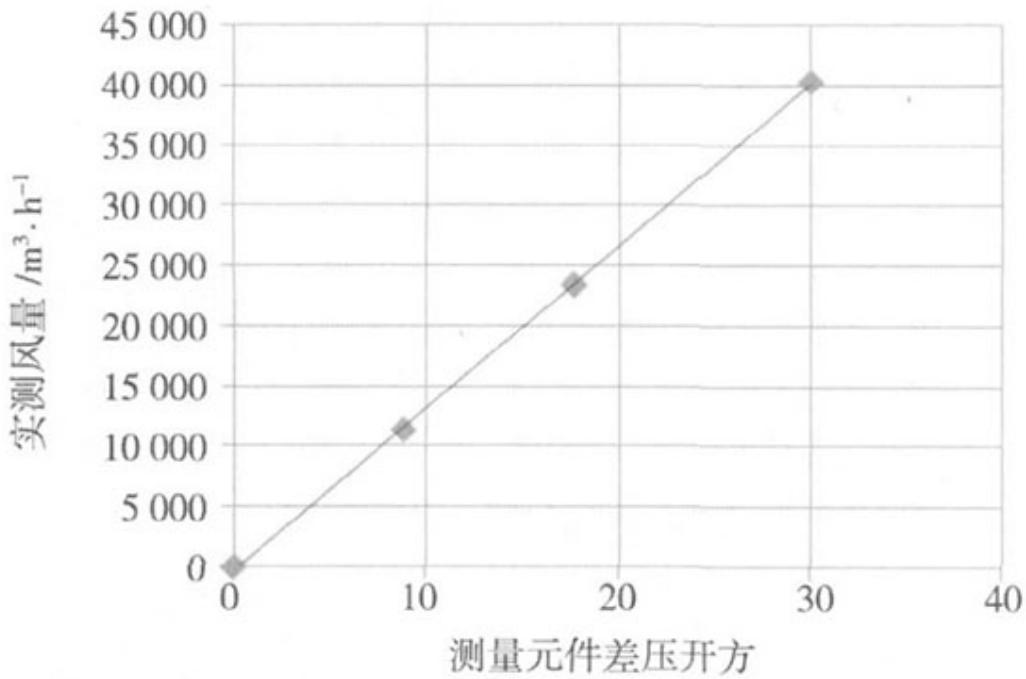


图 8 二次总风实测流量与 DCS 测量元件差压开方的关系图

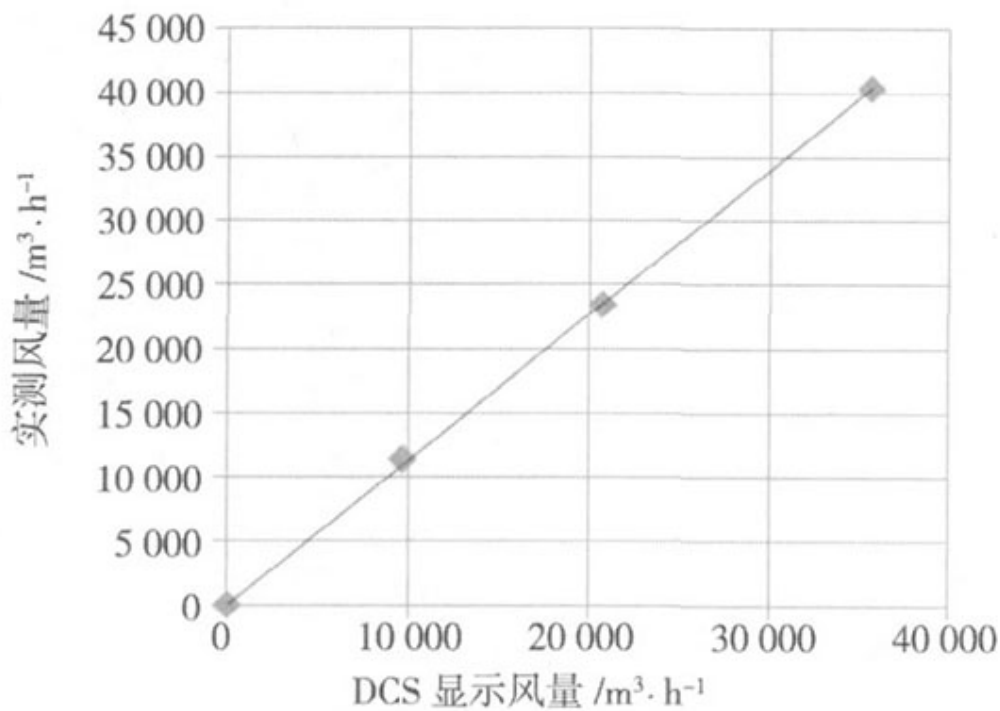


图 9 二次总风实测流量与显示风量的关系图



如图8所示，二次总风测量元件流量系数K值均比较稳定，实验条件下风道的流量与测量元件差压开方呈良好的线性关系。从图9中可以看出，显示风量比实际测量值偏小，二次总风平均偏差为-12.54%。

实验过程中发现DCS系统中，除一次热风总风风量、左、右风室一次热风流量外，其余风量均无流量计算公式，锅炉画面上的显示值为风量测量元件输出差压值。本次实验给出了锅炉侧18个流量测量元件的修正系数，并完成了风量测量元件计算公式的组态工作。

风量标定过程中，发现左、右侧二次风量差压变送器故障，DCS上无法正确显示风量，建议对故障变送器进行更换；左侧下层二次风量测量元件与变送器所连取样管堵塞，DCS上无法正常显示风量，建议对取样管进行更换。

根据上述实验结果，协助公司完成了测量元件的DCS组态及显示工作。风量元件的标定和在DCS的正确显示，有助于锅炉运行风量与风量配比调节，使锅炉的运行工况更加合理，有利于提高效率、控制磨损、降低厂用电耗，对于锅炉安全经济运行具有重要意义。

#### 4结论

(1) 1号炉一次风测量元件标定结果显示，测量元件流量系数K值均比较稳定，实验条件下风道的流量与测量元件差压开方呈良好的线性关系，说明标定的数据准确可靠，可以满足现场使用的要求。

(2) 目前部分表盘显示风量与实际测量值偏差较大。左风室一次热风偏差-59.2%，右风室一次热风偏差106.6%。左侧燃烧器混合风偏差21.3%，左侧燃烧器点火风偏差-16.6%，右侧燃烧器点火风偏差-26.9%。二次风总风量偏差-12.5%。右侧下二次风偏差-14.5%。左侧松动风偏差-18.9%，右侧松动风偏差-24.2%，右侧返料风偏差-13.3%。也有一部分显示风量与实际测量值基本一致，如一次热风总风偏差-1.7%。播料风冷风量偏差-2.0%，密封风冷风量偏差4.7%。右侧燃烧器混合风偏差-2.6%。

(3) 选择出了最佳的左一次风、右一次风、左二次风、右二次风的风量、风压等特性，可以指导热态实验。

#### 参考文献：

- [1]李福河，戴守恒.黄色秸秆发电锅炉给料系统安装调试及问题分析[J].吉林电力，2009，37(2)：33-35.
- [2]丁淑芳.流化床内介质主要流化特性参数的研究[J].洁净煤技术，2008，14(1)：24-28.
- [3]周勇平.65t/h燃生物质燃料CFB锅炉给料系统的改进[J].发电设备，2009，23(5)：374-375.
- [4]陈国艳，张忠孝，黄志强.纳米级石灰石钙基脱硫试验研究[J].洁净煤技术，2007，13(2)：73-76.
- [5]TREE D R，CLARK A W.Advanced reburning measurements of temperature and species in a pulverized coal flame[J].Fuel，2000，79(13): 1687-1695.
- [6]高春萍，李祥华，黄伟为，等.浅析燃煤小火电机组的生物质能技术改造[J].中国资源综合利用，2007，25(8)：31-33.
- [7]于希宁.保定热电厂450t/h CFB锅炉床温控制系统改造[J].中国电力，2007，40(2)：51-54.
- [8]陶晓华，张忠孝.天然气再燃还原NO<sub>x</sub>动力学模拟及试验研究[J].洁净煤技术，2006，12(3)：67-70.
- [9]张伟，姚飞.望奎黄色秸秆采用直燃技术发电工程设计浅谈[J].电力设计，2008(1)：35-39.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/94369.html>