

# 燃煤电站锅炉总风量跟随负荷控制理念分析

周怀春<sup>1,2</sup>, 范海鸿<sup>3</sup>, 赵 钧<sup>4</sup>, 刘尧平<sup>4</sup>, 程 超<sup>1</sup>, 曾雄伟<sup>1</sup>, 唐 文<sup>5</sup>, 刘 兴<sup>6</sup>, 谭厚章<sup>6</sup>

(1. 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 北京 100026; 2. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012;

3. 苏州吉杰电力科技有限公司, 江苏 苏州 215011; 4. 湖北华电襄阳发电有限责任公司, 湖北 襄阳 441141;

5. 江苏新奥能源发展有限公司, 江苏 南京 210019; 6. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**传统锅炉燃烧风量基于风、煤配比的概念,根据燃料量进行前馈粗调,再基于排烟氧含量的偏差进行反馈细调,燃料的调节会作用到风量的控制。智能发电技术的发展需要对现有燃烧控制的基本方法加以创新。燃煤发电机组控制的本质是负荷控制,即根据负荷指令控制从燃料化学能释放到汽轮发电机做功发电的各个能量转化环节。笔者分析了不同煤种燃烧产生相同的热量(对应大致相同的能量水平以及机组的发电功率)所需的理论空气量基本不变,该结论与目前国内外相关权威技术著作中的结论相符。因此提出用“风碳比”的概念代替“风煤比”,即一定空气量与完全燃烧的碳量的比值,“风碳比”(质量比)约为 11.5,该值对不同煤种大致均为常数。并进一步提出了空热当量的概念,即在受限空间(炉膛)内任何煤种连续稳定燃烧每千克空气释放的热量,约为定数 3.01 MJ/kg air。在此基础上,提出应根据负荷的变化对锅炉总送风量进行控制,相同负荷下的总送风量控制可基本忽略燃料变化的影响。锅炉燃用煤种改变后,若锅炉效率下降,需燃料在炉内产生更多的热量,因而需增加锅炉送风量。本文的风量控制理念已在一台 300 MW 燃煤四角切圆燃烧发电机组上得到了成功应用,从 2017 年 8 月投运到现在,投入率超过 80%,为实施风、煤独立解耦锅炉燃烧控制新策略奠定了基础。

**关键词:**燃煤电站;锅炉;风量;火电机组;煤燃烧;燃烧控制

中图分类号:TK323;TM621

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)02-0018-07

## Analysis of control of total air flowrate following load demand for coal-fired utility boilers

ZHOU Huaichun<sup>1,2</sup>, FAN Haihong<sup>3</sup>, ZHAO Jun<sup>4</sup>, LIU Yaoping<sup>4</sup>, CHENG Chao<sup>1</sup>, ZENG Xiongwei<sup>1</sup>,  
TANG Wen<sup>5</sup>, LIU Xing<sup>6</sup>, TAN Houzhang<sup>6</sup>

(1. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, Ministry of Education (North China Electric Power University), Beijing 100026, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 3. Suzhou Jijie Power Technology Co., Ltd., Suzhou 215011, China; 4. Hubei Huadian Xiangyang Power Generation Co., Ltd., Xiangyang 441141, China; 5. Jiangsu Xinao Clean Energy Developments Ltd., Nanjing 210019, China; 6. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The traditional boiler combustion air flowrate control is based on the concept of air to coal ratio, and the feedforward roughly adjustment is made according to the fuel flowrate, and the fine adjustment is made according to the deviation of the oxygen content in the flue gas. The adjustment of fuel flowrate will affect the control of air flowrate. The development of smart power generation technology needs to innovate the existing basic methods of existing combustion control. The essence of coal-fired generation unit control is load control, that is, the energy conversion stages should be adjusted according to the load demand from the release of chemical energy in fuel combustion to the power generation of turbo-generator. The theoretical air volume required for different kinds of coal in combustion to produce the same amount of heat (corresponding to roughly the same energy level and power output of the unit) was basically unchanged, which was consistent

收稿日期:2018-12-05;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18120512

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0601900)

作者简介:周怀春(1965—),男,湖北仙桃人,教授,博士生导师,主要从事热辐射分析、燃烧监测与控制、智能发电技术研究。

E-mail:hczhou@necpu.edu.cn

引用格式:周怀春,范海鸿,赵钧,等.燃煤电站锅炉总风量跟随负荷控制理念分析[J].洁净煤技术,2019,25(2):18-24.

ZHOU Huaichun, FAN Haihong, ZHAO Jun, et al. Analysis of control of total air flowrate following load demand for coal-fired utility boilers[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 18-24.



移动阅读

ent with the conclusions in the relevant authoritative technical works. Therefore, the concept of "air-carbon ratio" was proposed to replace "air-coal ratio", that is, the ratio of a certain mass of air to a certain mass of carbon in complete combustion, which is about 11.5 (mass ratio), being roughly constant for different types of coal. The concept of air-heat equivalent is further put forward, which means that the heat released by any kind of coal burning steadily and continuously per kilogram of air in a confined space (furnace) is approximately equal to a constant value of 3.01 MJ/kg air. On this basis, it is proposed that the total air flowrate rate into a boiler should be controlled mainly according to the change of load demand, and the influence of fuel kind changes can be neglected in the total air flowrate control under the same load level. If the efficiency of boiler decreased as the change of coal kind burned in the boiler, more heat would be generated by the fuel in the furnace, and the air flowrate of the boiler should be increased, and vice versa. The new concept of air flowrate control in this paper has been successfully applied into a 300 MW tangentially coal-fired power generation unit from August 2017. The input rate has exceeded 80%, which laid a foundation for the implementation of a new strategy of air-coal decoupling and independent control for boiler combustion.

**Key words:** coal-fired power plants; boiler; air flowrate; thermal power unit; coal combustion; combustion control

## 0 引言

目前,由于节能、环保、低碳要求越来越高,新能源电力在电力供应中的比重不断增大,对传统燃煤火电发电提出了高效、清洁、灵活调节的新要求。随着数字化、信息化、网络化和智能化技术的发展,智能电厂和智慧发电研发已成为行业技术进步的热点<sup>[1-2]</sup>。对锅炉运行控制的基本理念,包括风煤比、水煤比等,均可能成为束缚提升锅炉控制水平技术的障碍<sup>[3]</sup>。锅炉燃烧控制的任务是控制进入锅炉的燃料量(满足锅炉对外提供蒸汽(做功或者供热)的要求(根据主蒸汽压力变化来控制)、送风量(提供燃烧所需要的氧含量(根据烟气氧含量来控制))以及引风量(带走燃烧产生的烟气(根据炉膛压力的变化来控制))<sup>[4]</sup>。一般而言,送风控制子系统的任务是保证燃烧过程的风量与燃料量比例合适(即恰当的“风煤比”),通常,燃料量发生变化,送风量也相应变化。由于燃料量和送风量的最佳比值随负荷和燃料品质等变化<sup>[4]</sup>,因而需要检测烟气的氧含量,根据烟气氧含量偏离最佳氧含量的程度校正送风量。引风量控制较简单,根据炉膛负压偏离设定值的变化加以调整。

笔者曾提出采用锅炉炉膛断面辐射能量来控制燃烧的思想<sup>[5]</sup>,并以现场测试的对象模型为基础,仿真研究了以辐射能信号为中间被调量的燃料控制策略<sup>[6]</sup>。文献[7]将炉膛辐射能信号引入单元机组负荷控制系统中,以期改善单元机组负荷控制的品质。近期,炉膛辐射能信号进一步发展为炉膛实时燃烧负荷信号(MW),单位与机组负荷指令单位一致,可与机组负荷指令直接比较,其偏差用于控制进入炉膛的燃料量<sup>[8]</sup>。基于辐射能信号的燃料控制策略,将有效提高锅炉控制系统响应燃料扰动的能力,改善燃烧控制品质。

目前对锅炉送风的研究,仍基于优化风量与燃料品质的变化有很大关联的基本认识,需要根据燃料的变化调整风量。李钧等<sup>[9]</sup>在某锅炉由贫煤改烧烟煤的改造研究中,将一、二次风量分别增加了118 t/h和62 t/h。肖卓楠<sup>[10]</sup>对某300 MW锅炉燃用不同煤种消耗的燃料量进行了计算,得出含碳量高且与含氮量差值大的煤种,其烟气量和燃料消耗量变化较大,即送风量变化较大。赵航<sup>[11]</sup>在煤质变化对机组热经济性研究中指出,随收到基碳含量增加,引风机与送风机电耗均增加,送风量和烟气量随之增大。黄剑光等<sup>[12]</sup>在煤种变化对锅炉运行工况影响的探讨中,提出燃用挥发分较低的煤种时通过增大过量空气系数来提高燃烧效率。

本文首先计算和分析了锅炉理论空气量随机组负荷的变化规律,形成了随机组负荷变化控制锅炉总风量的新理念,提出用“风碳比”的新概念替代传统的“风煤比”。然后,进一步提出了空热当量的概念,扩展了新的风量控制理念和内涵。

## 1 不同负荷下所需理论空气量的变化分析

锅炉运行调整最主要的驱动是外界对锅炉出力(蒸汽流量)需求的改变。对于燃煤发电机组,锅炉运行调整的最主要驱动来源于电网调度发出的AGC(automatic generation control)指令(以及根据机组负荷爬坡率、由AGC指令生成的一个渐变的机组负荷指令)。因此,锅炉运行调整的首要任务是快速满足对锅炉出力变化的指令,风煤比、水煤比的控制均为满足该首要任务服务。不同负荷下,锅炉的送风量需要变化,若负荷不变时,改变燃料,锅炉送风量是否需要很大的改变?

文献[13-14]指出,若按单位质量的燃料计算理论空气量,不同煤种相差很大;若按单位热量计算理论空气量,相差较小。文献[15]指出,缺少元素

分析成分时,可根据燃料低位发热量近似估算理论空气量(每10 MJ 发热量需要理论空气 $2.63 \text{ Nm}^3$ ),说明单位发热量对应的理论空气量基本相同。

文献[16]根据文献[17]提供的全国统一检查煤样(66种可燃基高位发热量分布在 $30.1 \sim 36.4 \text{ kJ/g}$ 的煤样),计算燃烧不同煤种产生一定热量(100 MJ)所需的理论空气量。计算方法为:根据煤样热值计算所需煤量,根据元素分析计算完全燃烧所需的总氧量,从而得到总理论空气量。

若不同煤种燃烧产生的热量相同,假定燃烧产生的热量全部来自碳燃烧,碳和氧量均恒定,相同的热量对应确定的风量。煤中的主要化学元素有C、H、O、N、S,碳是主要的发热元素。当量碳含量<sup>[16]</sup>指将其他元素的发热量折算成碳含量,即认为煤燃烧释放的所有热量均由碳产生,然后按照 $1 \text{ mol}$ 碳消耗 $1 \text{ mol O}_2$ 计算其消耗的空气量。

按上述方法计算燃烧不同煤种产生100 MJ热量所消耗的空气量,计算结果如图1所示。理论空气量的标准差计算结果显示,95%置信度时,由实测热值和当量碳含量计算的理论空气量的相对标准偏差分别为 $\pm 4.25\%$ 、 $\pm 2.25\%$ ,均 $< \pm 5\%$ ,说明产生100 MJ热量所需理论空气量的计算值变化不大。

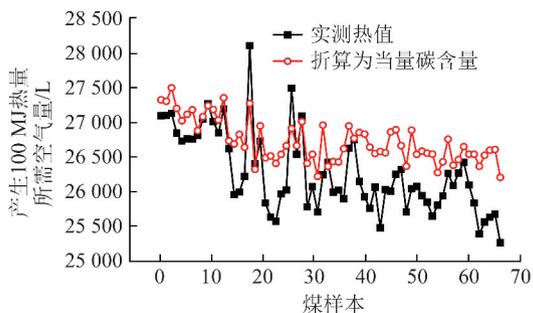


图1 产生100 MJ热量需要的理论空气量

Fig. 1 Theoretical volume of air required to generate 100 MJ heat

66个煤种燃烧产生100 MJ热量所消耗的理论空气量均值为 $26\,650 \text{ L}$ ,与文献[15]的结果一致。理论空气量偏差结果如图2所示,由实测热值计算结果可知,66个煤样本中,除1个煤样外,其他煤样所需理论空气量的偏差均 $< \pm 5\%$ ,14个煤样在 $\pm 2.5\% \sim \pm 5\%$ ,其他51个煤样偏差均 $< \pm 2.5\%$ ,说明燃烧不同煤种产生相同热量所需理论风量基本不变。由折算为当量碳含量计算的空气量偏差均 $< \pm 5\%$ 。

现有文献未将燃烧所需空气量的分析引入对锅炉送风量的控制策略中。当锅炉燃用不同煤种时,考虑相同的负荷,若假设锅炉燃烧效率、锅炉热效率等不变,则锅炉产生具有相同参数的相等蒸汽量,对

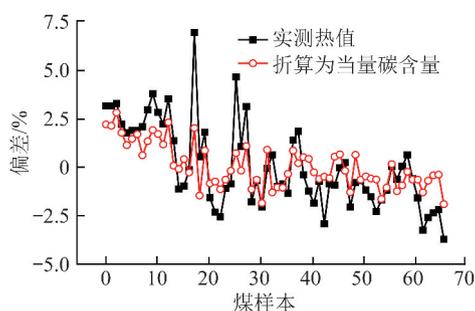


图2 理论空气量偏差

Fig. 2 Deviation of theoretical air volume

应于炉内基本相同的燃烧放热量,锅炉燃烧所需的理论空气量基本相同(误差在 $\pm 2.5\%$ 左右)。事实上,当不同炉型、不同燃料的燃烧效率差别过大,如无烟煤与褐煤,燃料在炉内不能完全燃烧,飞灰和炉渣中的含碳量较高时,该部分碳量不是有效碳量,不能为该部分碳量配比输入相应的风量。因而相同负荷下的锅炉送风量仍基本不变。

以上结果说明,锅炉送风量的控制主要需要根据负荷变化调整,而燃料品质的波动对总风量的影响不大。锅炉总风量随负荷优化控制,不再随燃料品质的变化频繁控制,从而实现了风煤之间的基本解耦,风煤比的优化控制变成了风煤同时随负荷变化的优化控制。

对“风煤比”进行改进,提出“风碳比”的概念,即空气量和燃烧所需的碳量的比值。根据文献[15], $12 \text{ kg}$ 碳与 $32 \text{ kg O}_2$ 反应,考虑到标准状态下空气中 $\text{O}_2$ 的体积分数为 $21\%$ ,质量分数为 $23.2\%$ ，“风碳比”(质量比)约为 $(32/0.232) : 12 = 11.5 : 1$ ,定义风碳比为 $11.5$ ,即燃烧 $1 \text{ kg}$ 碳所需要的空气量为 $11.5 \text{ kg}$ 。“风碳比”中的“碳”限定为“能够完全燃烧产生热量的碳”,不包括未完全燃烧的碳。

综上,燃烧不同煤种产生相同热量所需的风量基本不变,据此形成了“随机组负荷变化控制锅炉总风量”的新理念,实现了锅炉燃烧所需风和煤的解耦控制;并采用“风碳比”(约为 $11.5 \text{ kg/kg}$ )替代传统的、随煤种变化的“风煤比”。虽然“风碳比”比“风煤比”更确定,但也不是绝对不变的量。

目前,未考虑锅炉类型的影响,实际运行时,同一锅炉不同负荷时,其空气过量系数不必相同,在实际锅炉送风优化控制时,不同负荷下分别对优化送风量进行寻优,并未采用相同的过剩空气系数。

## 2 空热当量及对负荷-风量控制的意义

空热当量定义为 $1 \text{ kg}$ 收到基煤的收到基低位发热量与其完全燃烧所需的理论空气量的比值。空

热当量的物理意义是单位质量的空气进入炉内燃烧能够产生的热量,即炉内燃烧消耗单位质量的空气量所产生的发热量。由于文献[17]提供的全国统

一检查煤样缺少收到基低位发热量数值,因而从国内科技论文文献中统计了66种煤样数据(表1),计算其空热当量,其平均值为2.95 MJ/kg。

表1 66种煤样的煤质分析  
Table 1 Coal quality analysis of 66 kinds of coal samples

序号	煤种	$w(C_{ar})/\%$	$w(H_{ar})/\%$	$w(O_{ar})/\%$	$w(N_{ar})/\%$	$w(S_{ar})/\%$	$M_{ar}/\%$	$A_{ar}/\%$	$V_{daf}/\%$	$Q_{ar,net,p}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	数据来源
1	烟煤	54.98	3.70	7.28	0.82	0.96	8.27	23.99	35.00	21.35	文献[18]
2	烟煤	55.43	3.12	6.54	0.87	0.75	10.10	23.19	32.69	22.07	文献[18]
3	烟煤	64.72	3.65	9.51	0.94	1.50	13.20	6.48	32.93	24.28	文献[13]
4	烟煤	54.88	3.72	6.31	1.13	1.27	10.36	22.33	31.27	21.43	文献[19]
5	烟煤	61.87	4.80	13.64	0.97	0.78	11.54	6.40	37.16	21.85	文献[20]
6	烟煤	62.58	3.70	10.05	1.07	0.40	14.50	7.70	37.89	24.00	文献[21]
7	烟煤	52.96	3.03	8.99	0.58	0.66	8.80	24.98	35.27	20.23	文献[22]
8	烟煤	56.06	3.30	8.01	0.61	0.56	9.60	21.86	34.14	21.20	文献[23]
9	烟煤	54.15	2.92	6.14	0.82	0.75	1.18	34.04	33.70	20.44	文献[24]
10	烟煤	53.88	3.63	6.28	0.87	0.28	6.30	28.76	34.44	20.70	文献[25]
11	烟煤	50.50	3.50	6.00	1.00	1.00	8.00	30.00	25.50	19.99	文献[26]
12	烟煤	52.25	3.02	6.36	0.98	0.64	8.80	27.95	23.00	19.99	文献[27]
13	烟煤	57.33	3.62	9.94	0.70	0.41	13.00	15.00	33.64	21.81	文献[27]
14	烟煤	64.35	3.64	10.05	0.79	0.43	12.05	8.69	37.93	23.83	文献[27]
15	烟煤	52.09	2.85	4.29	0.91	0.30	8.00	31.56	25.23	20.03	文献[28]
16	烟煤	53.48	3.38	9.84	0.99	0.53	13.90	17.88	37.54	20.05	文献[20]
17	烟煤	63.00	4.10	6.70	1.50	1.20	10.00	13.50	36.99	24.70	文献[29]
18	烟煤	47.62	3.01	8.77	0.47	0.88	13.25	26.00	38.00	17.98	文献[27]
19	烟煤	57.05	3.68	9.23	0.95	0.49	16.00	12.60	38.98	22.33	文献[13]
20	烟煤	55.46	3.35	6.52	0.78	1.07	9.81	23.01	35.30	21.37	文献[30]
21	烟煤	60.51	3.62	9.50	0.70	0.43	12.54	12.70	36.56	20.80	文献[31]
22	烟煤	63.25	3.40	11.18	0.64	0.50	14.00	7.03	33.18	23.39	文献[32]
23	烟煤	58.05	1.70	13.72	0.81	0.42	16.20	9.10	37.48	23.05	文献[33]
24	烟煤	53.80	3.95	8.14	1.11	0.60	8.00	24.40	39.00	21.27	文献[34]
25	烟煤	51.44	3.35	9.86	0.60	0.41	8.10	26.24	27.10	19.68	文献[35]
26	烟煤	51.51	2.96	7.36	0.90	0.53	6.30	30.44	40.74	19.30	文献[35]
27	烟煤	60.33	3.62	9.94	0.70	0.41	13.00	12.00	36.44	22.76	文献[34]
28	烟煤	60.51	3.62	9.32	0.70	0.61	12.70	12.54	27.33	22.80	文献[29]
29	烟煤	52.30	3.20	5.30	1.40	1.04	29.20	7.56	21.00	20.30	文献[24]
30	无烟煤	62.87	2.25	1.72	0.75	2.38	5.00	25.03	8.05	22.62	文献[19]
31	无烟煤	49.60	1.71	1.53	0.58	1.20	9.39	35.99	7.00	18.84	文献[19]
32	无烟煤	57.28	1.16	1.02	0.56	0.98	9.00	30.00	3.80	20.68	文献[19]
33	无烟煤	62.76	1.57	2.83	0.68	0.64	7.02	24.50	7.23	22.45	文献[19]
34	无烟煤	65.55	2.52	1.94	1.04	1.29	7.67	19.99	8.75	25.09	文献[19]
35	无烟煤	72.95	1.18	0.58	0.14	0.50	10.80	13.85	2.84	25.77	文献[19]
36	无烟煤	65.35	1.96	4.19	1.02	1.31	5.00	21.17	8.99	23.28	文献[19]
37	无烟煤	62.30	2.53	1.93	0.94	0.80	8.00	23.50	9.30	23.17	文献[19]
38	无烟煤	57.33	2.10	1.37	0.81	0.90	10.00	27.49	8.30	21.10	文献[19]
39	无烟煤	48.67	0.74	2.92	0.40	0.14	4.13	43.00	6.00	16.88	文献[19]
40	无烟煤	53.00	1.20	3.30	1.35	1.50	7.50	32.15	5.50	18.81	文献[19]
41	无烟煤	49.20	2.01	3.95	1.22	0.75	3.25	39.62	8.84	18.95	文献[19]
42	无烟煤	74.15	1.19	0.59	0.14	0.15	9.80	13.98	2.84	25.44	文献[19]
43	无烟煤	59.60	2.00	0.80	0.80	0.50	10.00	26.30	8.20	22.19	文献[19]
44	无烟煤	65.09	2.99	2.05	1.05	5.14	1.55	22.13	8.50	25.85	文献[19]
45	无烟煤	65.35	2.75	2.25	1.00	0.68	11.00	16.97	8.50	23.45	文献[19]
46	无烟煤	63.63	3.32	5.33	1.15	0.47	7.00	19.10	7.62	27.20	文献[19]
47	无烟煤	79.10	0.89	2.11	0.54	0.76	9.27	7.33	5.42	28.52	文献[19]

续表

序号	煤种	$w(C_{ar})/\%$	$w(H_{ar})/\%$	$w(O_{ar})/\%$	$w(N_{ar})/\%$	$w(S_{ar})/\%$	$M_{ar}/\%$	$A_{ar}/\%$	$V_{daf}/\%$	$Q_{ar,net,p}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	数据来源
48	无烟煤	54.37	2.04	1.73	0.66	3.58	9.20	28.42	8.13	22.78	文献[19]
49	无烟煤	60.83	1.45	1.85	0.69	0.53	6.71	27.94	7.33	21.01	文献[19]
50	无烟煤	62.29	1.08	2.83	0.42	0.38	8.11	24.89	6.19	21.25	文献[19]
51	无烟煤	78.30	0.86	1.71	0.50	0.79	8.00	9.84	2.63	27.68	文献[19]
52	无烟煤	56.96	2.55	4.38	0.97	0.70	3.82	30.62	7.97	23.49	文献[19]
53	贫煤	51.50	2.12	1.49	0.85	3.83	7.60	32.61	14.97	19.46	文献[36]
54	贫煤	53.77	3.35	3.96	1.12	2.30	7.26	28.24	16.65	24.04	文献[37]
55	贫煤	67.00	3.23	3.06	0.96	0.27	5.93	19.55	15.74	25.24	文献[36]
56	贫煤	55.31	2.57	3.00	0.74	0.78	10.30	27.30	12.64	20.68	文献[36]
57	贫煤	62.45	3.09	3.20	0.65	0.35	7.96	22.30	14.42	23.60	文献[36]
58	贫煤	53.27	3.23	2.80	0.71	2.15	6.00	31.84	15.60	21.35	文献[38]
59	褐煤	30.99	2.28	10.44	0.49	1.02	27.65	27.13	45.35	11.90	文献[39]
60	褐煤	29.90	2.39	7.73	0.68	0.67	32.94	25.69	52.12	11.14	文献[39]
61	褐煤	36.12	3.83	10.63	0.78	0.16	40.00	8.48	54.89	13.50	文献[39]
62	褐煤	38.11	2.39	9.51	0.73	0.30	31.80	17.16	49.03	13.20	文献[39]
63	褐煤	42.41	1.89	11.90	0.53	0.26	31.03	11.98	45.42	14.74	文献[39]
64	褐煤	37.17	1.97	9.38	0.45	1.14	39.10	10.79	40.60	13.26	文献[39]
65	褐煤	42.11	2.81	10.36	0.46	0.24	36.80	7.22	42.66	14.94	文献[39]
66	褐煤	40.79	2.89	9.99	1.08	0.21	28.70	16.34	48.51	17.92	文献[39]

由于风碳比是燃烧单位质量的碳所需要的空气量,空热当量和风碳比相结合,即为单位质量碳燃烧产生的热量(碳反应热),即碳和O<sub>2</sub>燃烧反应的生成热,为常数。碳完全反应生成CO<sub>2</sub>的反应热为-393.6 kJ/mol,单位质量(kg)碳反应热为-393.6 MJ/kmol/12 kg=-32.8 MJ/kg。

风碳比×空热当量=碳反应热,即 11.5 kg/kg×(-2.95 MJ/kg)=33.93 MJ/kg。与碳反应热(-32.8 MJ/kg)的误差为3.43%,基本吻合。

空热当量偏差结果如图3所示,正负偏差<5%的煤样有54种,占81.8%。但正负偏差≥±5%的数值相对较大,超限煤种空热当量最大正偏差为14.48%,最大负偏差为-10.75%。分析中发现:超限煤的V<sub>daf</sub>过大或过小,范围为>36%或<10%。因此,对煤质做出限定,V<sub>daf</sub><36%时,有46个煤样,超限5个,正负偏差<5%的煤种占89.1%;V<sub>daf</sub><10%时,共有23个煤样,4个超限,正负偏差<5%的煤种占82.6%;V<sub>daf</sub>=10%~36%时,煤样数量为22个,超限1个,正负偏差<5%的煤种占95.5%。文献[40]也提出,通过分析燃烧机理发现,国内主要煤种燃烧时空气热量比近似为常数<sup>[41-44]</sup>,可根据氧含量、热量、风量间的函数关系计算风量。

若考虑高压风机、送风机风温的提升带入的热量,并结合更多煤种的计算结果,空热当量为

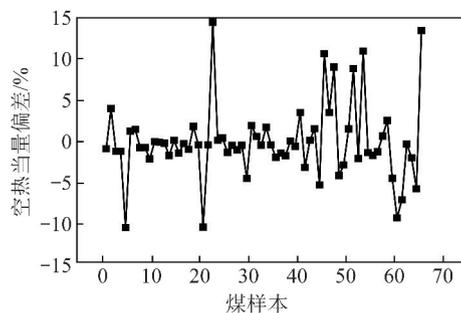


图3 空热当量偏差

Fig. 3 Deviation of air-heat equivalent

3.01 MJ/kg,其物理意义为:在受限空间(炉膛)内任何煤种连续稳定燃烧每千克的理论空气释放的热量约为3.01 MJ/kg air。对不同煤种的测算表明,其误差大多在±3%以内,对应于控制表盘0.13%的氧含量波动值<sup>[45-47]</sup>。根据空热当量概念,一定负荷下,原来燃烧控制以多变的“风(空气)”去适应“多变的煤”,改为以“多变的煤”去适应“不变的风(空气)”。

### 3 结 论

1)通过66个典型煤种,验算了燃烧释放相同的热量时,所需要的空气量基本不变;因此锅炉送风量的控制主要需根据负荷变化进行调整,而燃料品质的波动对总风量的影响并不大。

2)对“风煤比”进行改进,提出“风碳比”的概

念,即空气量和燃烧所需碳量的比值。根据碳和 $O_2$ 生成 $CO_2$ 的化学反应,“风碳比”约为 $11.5\text{ kg/kg}$ 。

3)定义空热当量为:在受限空间(炉膛)内任何煤种连续稳定燃烧每千克空气释放的热量,约为 $3.01\text{ MJ/kg air}$ (误差 $\pm 3\%$ ,对应于控制表盘 $0.13\%$ 的氧含量波动值)。

4)锅炉燃用煤种的改变,会引起燃料在炉内燃烧过程和锅炉热效率的变化,相同负荷下锅炉的总风量、锅炉配风和燃烧组织也随之变化。考虑到风碳比已排除燃烧效率的影响,不同煤种除了反应速度不同外,灰分不同影响炉内和烟道的传热,从而影响锅炉效率。当锅炉效率下降时,需要燃料在炉内产生更多的热量,增加锅炉送风量。

5)本文的风量控制理念已在一台 $300\text{ MW}$ 燃煤四角切圆燃烧发电机组上得到了成功应用,从2017年8月投运至今,投入率超过 $80\%$ 。

## 参考文献(References):

[1] 林文孚,胡燕.单元机组自动控制技术[M].北京:中国电力出版社,2003.

[2] 陈进发,高伟,刘军辉.智能化火电站建设现状、发展方向与展望[C]//智能化电站技术发展研讨暨电站自动化2013年会.上海:[s.n.],2013:7-12.

[3] 陈世和.智能电站发展现状及展望[C]//智能化电站技术发展研讨暨电站自动化2013年会.上海:[s.n.],2013:30-40.

[4] 周怀春.炉内在线检测与燃烧智能优化控制[R].北京:2018智慧电厂论坛(第二期),2018.

[5] 周怀春,韩才元.电站燃煤锅炉燃烧计算机控制问题探讨[J].热能动力工程,1994,9(2):111-116.

[6] 周怀春,娄新生,尹鹤龄,等.采用辐射能信号的电站锅炉燃料调节对象建模及控制仿真研究[J].中国电机工程学报,1996,16(4):226-229.

ZHOU Huaichun, LOU Xinsheng, YIN Heling, et al. Model establishment of fuel controlled objective in utility boilers based on signal of radiative energy from furnaces and simulation on its control [J]. Proceeding of the CSEE, 1996, 16(4): 226-229.

[7] 张师帅,周怀春,黄勇理,等.采用辐射能反馈信号的火电单元机组负荷控制系统仿真研究[J].中国电机工程学报,2001,21(2):85-88.

ZHANG Shishuai, ZHOU Huaichun, HUANG Yongli, et al. Simulation on a load control of thermal power units based on the feed back signal of radiant energy [J]. Proceeding of the CSEE, 2001, 21(2): 85-88.

[8] LIU Z, ZHENG S, LUO Z, et al. A new method for constructing radiative energy signal in a coal-fired boiler [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101: 446-454.

[9] 李钧,阎维平,刘亚芝.煤质变化对锅炉燃烧工况的影响[J].热力发电,2009,38(8):59-64.

LI Jun, YAN Weiping, LIU Yazhi. Influence of coal quality varia-

tion upon combustion performance of tangential firing boilers [J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(8): 59-64.

[10] 肖卓楠.不同煤种对富氧燃烧锅炉热经济性的影响[J].热力发电,2014,43(10):12-15.

XIAO Zhuonan. Effect of coal type on thermal efficiency of oxygen-enriched firing boilers [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(10): 12-15.

[11] 赵航.煤质变化对燃煤发电机组运行热经济性影响研究[D].北京:华北电力大学,2017.

[12] 黄剑光,柳清华.煤种变化对电站锅炉运行工况的影响及对策探讨[J].当代化工研究,2018(3):1-2.

HUANG Jianguang, LIU Qinghua. Discussion on influence of coal variety on operating condition of power plant boiler and countermeasures [J]. Chemical Intermediate, 2018(3): 1-2.

[13] KITTO J B, STULTZ S C. Steam, its generation and use [M]. Grande: B & W Company, 2005.

[14] SINGER J G. Combustion: Fossil power systems [M]. Carson: Combustion Engineering Inc, 1981.

[15] 冯俊凯,沈幼庭,杨瑞昌.锅炉原理及计算[M].北京:科学出版社,2003.

[16] 唐文.基于辐射能信号的燃煤火电机组燃料在线优化控制研究与应用[D].武汉:华中科技大学,2013.

[17] 石达.现代配煤生产配方优化设计、工艺控制及煤质评定标准实务全书[M].北京:当代中国音像出版社,2011.

[18] 李楠.300 MW四角切圆锅炉燃尽风布置方式及其低氮燃烧特性的研究[D].武汉:华中科技大学,2014.

[19] 杨姣.某600 MW机组锅炉低 $NO_x$ 改造数值模拟研究[D].北京:华北电力大学,2014.

[20] 操瑶.660 MW旋流对冲锅炉低 $NO_x$ 运行的优化数值模拟[D].武汉:华中科技大学,2014.

[21] 杨蓓.锅炉改烧烟煤采用低温烟气对燃烧与 $NO_x$ 排放影响的数值模拟[D].武汉:华中科技大学,2012.

[22] 张文革.电站锅炉空气分级燃烧的数值模拟[J].电站系统工程,2008,24(5):9-12.

ZHANG Wenge. Numerical simulation of air-staged combustion in utility boiler [J]. Power System Engineering, 2008, 24(5): 9-12.

[23] 许涛.600 MW对冲燃烧锅炉防高温腐蚀改造的数值模拟[D].北京:华北电力大学,2016.

[24] 姜敏,金保昇,周英贵,等.300 MW燃煤锅炉SNCR过程的数值模拟[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(4):691-695.

JIANG Min, JIN Baosheng, ZHOU Yinggui, et al. Numerical simulation of SNCR in a 300 MW pulverized-coal boiler [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(4): 691-695.

[25] 王鹏.燃煤锅炉不同氧分压富氧燃烧过程数值模拟[J].电站系统工程,2015,31(6):4-6.

WANG Peng. Numerical Simulation of pulverized coal oxy-fuel combustion boiler in different oxygen concentration [J]. Power System Engineering, 2015, 31(6): 4-6.

[26] 刘珊伯,孟繁兵,杜利梅,等.烟煤锅炉掺烧褐煤时干燥剂的计算选取[J].黑龙江电力,2012,34(3):217-219.

- LIU Shanbo, MENG Fanbing, DU Lihai, et al. Calculation and selection of drier for bituminous coal fired boiler blending lignite [J]. Heilongjiang Electric Power, 2012, 34(3): 217-219.
- [27] 王松浩. 旋流对冲锅炉烟煤低氮燃烧特性数值模拟[J]. 发电设备, 2018, 32(2): 108-113.
- WANG Songhao. Numerical simulation on low  $\text{NO}_x$  combustion of bituminous coal in a swirl-opposed firing boiler [J]. Power Equipment, 2018, 32(2): 108-113.
- [28] 王定. 大容量超临界锅炉金属氧化皮问题综合分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [29] 李永华, 周滨选, 郑平安. 低  $\text{NO}_x$  旋流燃烧器改造数值模拟[J]. 动力工程学报, 2014, 34(4): 260-266.
- LI Yonghua, ZHOU Binxuan, ZHENG Ping'an. Numerical simulation on optimized swirl burner with low- $\text{NO}_x$  emission [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(4): 260-266.
- [30] 李政, 梁心玉, 薛亚丽. 基于烟煤、褐煤的 IGCC 系统技术经济性对比[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(5): 39-47.
- LI Zheng, LIANG Xinyu, XUE Yali. Techno-economic comparison of IGCC systems employing bituminous and lignite [J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(5): 39-47.
- [31] 吕伟为, 赵振宁, 武振新, 等. 过量空气系数对 600 MW 对冲燃烧锅炉燃烧过程影响的数值模拟[J]. 华北电力技术, 2013(11): 1-5.
- LYU Weiwei, ZHAO Zhenning, WU Zhenxin, et al. Numerical simulation for the influence of excess air coefficient on the combustion process in a 600 MW face-fired boiler [J]. North China Electric Power, 2013(11): 1-5.
- [32] 邵伟涛, 潘卫国, 王文欢, 等. 基于不同配风方式下的四角切圆燃煤锅炉燃烧特性的数值计算研究[J]. 环境工程, 2017, 35(6): 73-77.
- SHAO Weitao, PAN Weiguo, WANG Wenhuan, et al. Numerical simulation on combustion characteristics in a tangentially-fired boiler based on different air distribution [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(6): 73-77.
- [33] 刘亚明, 李方勇, 徐齐胜, 等. 600 MW 对冲燃烧锅炉  $\text{NO}_x$  排放特性的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2015, 35(5): 341-347.
- LIU Yaming, LI Fangyong, XU Qisheng, et al. Numerical study on  $\text{NO}_x$  emission characteristics of a 600 MW opposed firing boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(5): 341-347.
- [34] 汪华剑, 赵斯楠, 方庆艳, 等. 1 000 MW 塔式锅炉中低负荷下低  $\text{NO}_x$  排放优化[J]. 动力工程学报, 2016, 36(10): 765-772.
- WANG Jianhua, ZHAO Si'nan, FANG Qingyan, et al.  $\text{NO}_x$  emission optimization of a 1 000 MW tower boiler during medium and low load operation [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(10): 765-772.
- [35] 钟礼今, 邓坚, 孙伟杰, 等. 低负荷下燃烧器投运方式对锅炉性能的影响[J]. 动力工程学报, 2015, 35(9): 693-698.
- ZHONG Lijin, DENG Jian, SUN Weijie, et al. Effects of burner operation mode on performance of the boiler under low load conditions [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(9): 693-698.
- [36] 李想. 1 000 MW 超超临界前后墙旋流对冲锅炉燃烧数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [37] 张晓辉, 孙锐, 孙绍增, 等. 200 MW 锅炉空气分级低  $\text{NO}_x$  燃烧改造实验研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(6): 676-681.
- ZHANG Xiaohui, SUN Yue, SUN Shaozeng, et al. Experimental study of an air-staged and low  $\text{NO}_x$  emission-based combustion modification to 200 MW boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(6): 676-681.
- [38] 袁宏伟, 余岳溪, 李方勇. 600 MW 四角切圆锅炉深度分级配风低  $\text{NO}_x$  燃烧系统的改造分析[J]. 电设备, 2017, 31(3): 196-199.
- YUAN Hongwei, YU Yuexi, LI Fangyong. Retrofit and analysis on deep air staging low nox combustion system of a 600 MW tangentially-fired boiler [J]. Power Equipment, 2017, 31(3): 196-199.
- [39] 李兵臣. 对冲燃烧锅炉二次风配风影响的数值模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [40] 田亮, 霍秋宝, 刘鑫屏, 等. 电站锅炉总风量软测量[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(8): 1261-1267.
- TIAN Liang, ZHAI Qiubao, LIU Xinpeng, et al. Soft-sensors of the total air volume in utility boilers [J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(8): 1261-1267.
- [41] 肖祥. 660 MW 旋流对冲燃煤锅炉燃烧过程的数值模拟[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [42] 王世昌. 中国典型无烟煤挥发分发热量分布规律[J]. 华北电力技术, 2012(1): 21-26.
- WANG Shichang. Distribution law of volatile heat value for Chinese typical anthracites [J]. North China Electric Power, 2012(1): 21-26.
- [43] 李文博. 风量对比对 600 MW 超临界 W 火焰锅炉燃烧特性影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [44] 茹启明, 陆骑, 苏胜, 等. 300 MW 贫煤锅炉低氮燃烧系统改造及性能优化[J]. 煤炭转化, 2016, 39(2): 59-64.
- RU Qiming, LU Qi, SU Sheng, et al. Application and performance optimization of low-nitrogen combustion system retrofit for 300 MW lean coal-fired boiler [J]. Coal Conversion, 2016, 39(2): 59-64.
- [45] 张倩. 600 MW 对冲燃煤锅炉低  $\text{NO}_x$  改造数值模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [46] 蔡桃, 段耀辉, 乔晓磊, 等. 过量空气系数对四角切圆燃烧锅炉特性影响的数值模拟[J]. 电站系统工程, 2013, 29(2): 17-19, 23.
- CAI Tao, DUAN Yaohui, QIAO Xiaolei, et al. Numerical simulation for impact of excess air ratio on tangential combustion [J]. Power System Engineering, 2013, 29(2): 17-19, 23.
- [47] 王世昌. 中国典型褐煤的挥发分发热量分布规律分析[J]. 内蒙古电力技术, 2011, 29(6): 9-13.
- WANG Shichang. Analysis on distribution regularities for volatile constituent calorific value of typical lignitous coal in Chinese [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2011, 29(6): 9-13.