

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.01.012

耗差分析法在超临界压力直流锅炉能耗分析中的应用

Application of fuel consumption difference analysis method in a supercritical pressure once-through boiler

王志永¹, 许贺², 朱慧敏³, 葛俊沛¹, 许静¹

WANG Zhiyong¹, XU He², ZHU Huimin³, GE Junpei¹, XU Jing¹

(1. 河南能信热电有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 中国大唐集团科学技术研究院有限公司华中电力试验研究院, 郑州 450000; 3. 国家电投集团郑州燃气发电有限公司, 郑州 450001)

(1. Henan Nengxin Thermal Power Company Limited, Xuchang 461000, China; 2. Central-China Electric Power Test Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Company Limited, Zhengzhou 450000, China; 3. State Power Investment Group Zhengzhou Gas Power Generation Company Limited, Zhengzhou 450001, China)

摘要: 为研究锅炉侧大、小节能指标对直流锅炉能耗的影响,以某超临界压力直流锅炉为例,针对锅炉侧耗差影响变量,在100%、75%、50%负荷率下对机组进行锅炉侧考核试验,并根据考核试验数据进行耗差分析计算,得出机组运行中排烟氧量、排烟温度、飞灰含碳量、炉渣含碳量、锅炉效率及厂用电率的变化对供电煤耗的影响。通过能耗分布的数据监测,分析各项耗差指标对锅炉侧煤耗影响的比重,可为超临界机组运行指标考核及性能监测提供参考。

关键词: 超临界; 直流锅炉; 供电煤耗; 耗差分析; 厂用电率; 飞灰含碳量

中图分类号: TK 227.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2020)01-0058-05

Abstract: In order to study the influence of boiler-side large and small energy-saving indicators on the fuel consumption of once-through boilers, analysis was made on a supercritical pressure once-through boiler. Boiler-side performance tests on variables affecting fuel-consumption were made under 100%, 75%, and 50% load ratios, and the test results were used to calculate and analyze the consumption difference. It was confirmed that oxygen in discharged gas, exhaust gas temperature, unburned combustible in fly ash and slag, boiler efficiency and service power rate of power plant would affect the fuel consumption for power-supply. Through the data tracing on fuel consumption distribution, the impact of each consumption indicator on the fuel consumption on boiler side was analyzed, which could provide a reference for power plants in evaluating operation indexes and inspecting performance of supercritical units.

Keywords: supercritical; once-through boiler; fuel consumption for power-supply; consumption difference analysis; service power rate of power plant; unburned combustible in fly ash

0 引言

超临界机组的运行经济性具有明显的优势,目前已在国内外火力发电行业得到广泛应用。随着国内660 MW超临界火力发电机组的陆续投产,超临界机组成为目前国内火力发电的主力机组。为了使机组各运行指标保持目标值,发挥高参数机组运行的最大潜力,对机组运行指标进行实时监测,是火力发电企业节能降耗的关键工作,针对机组各项运行

指标进行耗差分析是必不可少的工作^[1-3]。

耗差分析通常根据不同的参数采取不同的方法,对于锅炉侧来说,排烟温度、排烟氧量、飞灰含碳量、炉渣含碳量、厂用电率等主要运行参数是耗差分析中的主要考核指标,又称为可控耗差^[4-8]。本文对某超临界压力直流机组锅炉侧耗差进行分析,分析结果可为660 MW超临界机组的炉侧运行调整、指标考核及性能监测提供参考。

1 设备概况

某电厂#1锅炉为超临界压力直流炉,一次中间

收稿日期:2019-06-05; 修回日期:2019-09-23

再热、平衡通风、“W”火焰燃烧方式、固态排渣、单炉膛露天岛式布置、全钢架结构、Π形布置。锅炉设计煤种条件下主要技术参数见表 1(其中:BMCR 工况为锅炉最大连续蒸发量工况;BRL 工况为额定工况;THA 工况为机组热耗率验收工况),煤质参数见表 2。

表 1 锅炉主要技术参数

Tab.1 Main parameters of the boiler

项目	工况		
	BMCR	BRL	THA
过热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	2080	2010	1968
过热器出口蒸汽压力/MPa	25.30	25.18	25.14
过热器出口蒸汽温度/℃	570.0	570.0	570.0
再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1740	1652	1560
再热器进口蒸汽压力/MPa	4.746	4.499	4.269
再热器出口蒸汽压力/MPa	4.543	4.310	4.092
再热器进口蒸汽温度/℃	324.2	318.1	313.1
再热器出口蒸汽温度/℃	568.0	568.0	568.0
给水温度/℃	288.0	285.0	281.0
总煤量/(t·h ⁻¹)	340	326	310
设计进风温度/℃	20.0	20.0	20.0
大气相对湿度/%	75	75	75
设计排烟温度/℃	125.0	124.0	123.0
设计排烟温度(修正后)/℃	124.0	120.0	118.0
锅炉效率保证值/%		91.71	

表 2 煤质参数

Tab.2 Coal indicators

项目	设计煤种	校核煤种
收到基低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	17.24	14.84
收到基氢/%	2.40	1.94
收到基氧/%	3.56	3.65
收到基氮/%	0.75	0.71
收到基硫/%	2.82	3.31
哈氏可磨系数	72	73
灰变形温度/℃	1320	1310
灰软化温度/℃	1320	1330
灰半球温度/℃	1330	1340
灰流动温度/℃	1340	1350

2 研究路线

火力发电厂锅炉侧的耗差分析计算通常需要考虑 2 个方面的影响,即直接变量与间接变量。

2.1 直接变量的耗差计算

影响耗差的直接变量集中表现在锅炉效率、厂用电率及机组热耗率,这 3 个变量在公式表现形式

上彼此独立,式(1),(2)分别为锅炉效率和厂用电率每变化 1 百分点引起的供电煤耗变化,式(3)为汽轮机热耗率每变化 1 kJ/(kW·h)引起的供电煤耗变化。

$$(b_g)_\eta = \frac{q}{29.31\eta_0\eta^2(100-\zeta)} \times 10^6, \quad (1)$$

$$(b_g)_\zeta = \frac{q}{29.31\eta_0\eta(100-\zeta)^2} \times 10^6, \quad (2)$$

$$(b_g)_q = \frac{q}{29.31\eta_0\eta(100-\zeta)} \times 10^6, \quad (3)$$

式中: q 为机组热耗率, kJ/(kW·h); η_0 为管道效率,%; η 为锅炉效率,%; ζ 为厂用电率,%; $(b_g)_\eta$ 为锅炉效率变化对机组供电煤耗的影响, g/(kW·h); $(b_g)_\zeta$ 为厂用电率变化对机组供电煤耗的影响, g/(kW·h); $(b_g)_q$ 为机组热耗率变化对机组供电煤耗的影响, g/(kW·h)。

2.2 间接变量的耗差计算

影响耗差的间接变量集中表现在排烟氧量、排烟温度、飞灰及炉渣中碳的质量分数,这些影响因素相互制约,通过改变锅炉效率,对供电煤耗产生影响^[9-10],间接变量的耗差分析可根据式(4)~(6)进行计算。

$$(b_g)_c = \Delta\eta_c \times (\Delta b_g)_\eta, \quad (4)$$

$$(b_g)_t = \Delta\eta_t \times (\Delta b_g)_\eta, \quad (5)$$

$$(b_g)_{\varphi(O_2)} = \Delta\eta_{\varphi(O_2)} \times (\Delta b_g)_\eta, \quad (6)$$

式中: $\Delta\eta_c$ 为灰、渣中碳的质量分数变化对锅炉效率的影响,%; $\Delta\eta_t$ 为排烟温度变化对锅炉效率的影响,%; $\Delta\eta_{\varphi(O_2)}$ 为排烟氧量变化对锅炉效率的影响,%; $(\Delta b_g)_\eta$ 为单位锅炉效率变化对机组供电煤耗的影响, g/(kW·h); $(b_g)_c$ 为灰、渣中碳的质量分数变化对机组供电煤耗的影响, g/(kW·h); $(b_g)_t$ 为排烟温度变化对机组供电煤耗的影响, g/(kW·h); $(b_g)_{\varphi(O_2)}$ 为排烟氧量变化对机组供电煤耗的影响, g/(kW·h)。

3 考核试验

为充分了解并摸清机组运行状况,在考核试验期间,按 ASME PTC4.1—1998《锅炉机组性能试验规程》、ASME PTC4.3—2017《空气预热器试验规程》、GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》、DL/T 1616—2016《火力发电机组性能试验导则》等行业及国家标准,分 100% 负荷、75% 负荷及 50% 负荷 3 个典型工况对机组进行考核试验及耗差分析计算。锅炉性能试验结果见表 3。

由表 3 可知:3 个典型工况下,锅炉实测热效率分别为 92.19%、92.24% 及 92.75%;各工况下,低位发热量基准锅炉毛效率损失主要集中在干烟气热

表 3 锅炉性能试验结果
Tab.3 Performance test results of the boiler

项目	单位	660 MW	501 MW	330 MW	
压力和温度	锅炉周围空气温度(环境)	°C	27.60	26.10	26.00
	空气相对湿度	%	49.00	59.00	62.00
	就地大气压	kPa	95.30	95.50	95.60
	燃烧用空气温度(基准温度)	°C	27.60	26.10	26.00
	空气预热器入口一次风温	°C	46.50	41.30	42.10
	空气预热器入口二次风温	°C	43.20	36.50	36.00
	空气预热器出口烟温	°C	137.50	128.00	124.70
灰、渣中碳的质量分数	飞灰	%	3.90	4.20	1.80
	炉渣	%	2.20	2.60	3.60
空气预热器出口烟气分析	$\varphi(\text{CO}_2)$	%	15.98	13.72	11.80
	$\varphi(\text{O}_2)$	%	3.95	6.06	8.15
	$\varphi(\text{CO})$	%	0.00	0.00	0.00
	过剩空气系数		0.21	0.36	0.55
入炉煤分析	收到基碳	%	45.52	50.64	50.64
	收到基氢	%	1.92	2.24	2.24
	收到基氧	%	5.03	2.56	2.56
	收到基氮	%	0.65	0.83	0.83
	收到基硫	%	3.01	3.74	3.74
	收到基水	%	6.00	6.80	6.80
	空干基水	%	1.23	1.27	1.27
	收到基灰分	%	37.88	33.20	33.20
	收到基低位发热量	kJ/kg	16890.00	19520.00	19520.00
低位发热量基准热损失	干烟气热损失	%	4.18	4.62	5.25
	燃料中水的热损失	%	0.07	0.07	0.06
	氢燃烧生成水引起的热损失	%	0.21	0.20	0.19
	灰渣中可燃物的热损失	%	2.86	2.37	1.21
	空气中水蒸气热损失	%	0.11	0.13	0.15
	生成一氧化碳引起的热损失	%	0.00	0.01	0.00
	辐射热损失	%	0.18	0.18	0.18
	未测量的热损失	%	0.20	0.20	0.20
	总计	%	7.81	7.76	7.25
低位发热量基准锅炉毛效率	%	92.19	92.24	92.75	

损失及灰渣未完全燃烧热损失,且随机组负荷的降低,干烟气热损失波动范围为 4.18% ~ 5.25%,灰渣未完全燃烧热损失波动范围为 1.21% ~ 2.86%。由此可见,随着负荷的降低,锅炉运行氧量增加,飞灰炉渣未燃尽引起的热损失减少幅度明显高于氧量提高导致排烟热损失增加的幅度,因此,随着机组负荷的降低,锅炉效率提高。锅炉效率随机组负荷变化拟合曲线如图 1 所示。

取汽轮机侧各试验工况下的热耗率考核值及厂用电率对该厂供电煤耗进行汇总计算,见表 4。

由表 4 可知,3 个典型工况下,机组供电煤耗分别为 315.03,323.64,341.23 g/(kW·h)。对比表 3 可以看出,全厂经济性同锅炉侧效率趋势相反,锅炉效率变化对全厂经济性的影响力有限,因此,为考核煤耗的变化需同时考核汽轮机热耗率及厂用电率的变化。由图 2 所示的汽轮机热耗率随机组负荷变化拟合曲线可以看出,考核试验期间,随着机组负荷的增加,汽轮机热耗率逐渐降低,且降低幅度收窄。由图 3 所示的机组供电煤耗随机组负荷变化拟合曲线可以看出,考核试验期间,机组供电煤耗的变化趋势

同汽轮机热耗率及厂用电率变化趋势相同,随着机组负荷的增加,供电煤耗逐渐降低,波动范围为 315.03 ~ 341.23 g/(kW·h)。

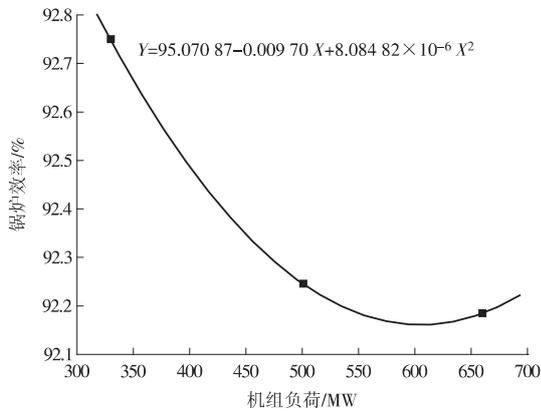


图 1 锅炉效率随机组负荷变化拟合曲线

Fig.1 Fitting curve of the boiler efficiency changing with loads of the unit

表 4 机组供电煤耗计算结果

Tab.4 Calculation results of the fuel consumption for power-supply of the unit

项目	660MW	501MW	330MW	均值
锅炉修正前效率/%	92.19	92.24	92.75	92.39
汽轮机修正前热耗率/ [kJ·(kW·h) ⁻¹]	7863.7	7957.8	8400.9	8074.1
管道效率/%	99	99	99	99
厂用电率/%	6.56	8.01	8.40	7.66
发电煤耗/ [g·(kW·h) ⁻¹]	294.37	297.72	312.57	301.55
供电煤耗/ [g·(kW·h) ⁻¹]	315.03	323.64	341.23	326.63

4 耗差分析

根据考核试验结果,对影响锅炉侧耗差的各项指标进行分解计算,计算结果见表 5。

表 5 锅炉侧耗差分析结果

Tab.5 Boiler-side consumption differences analysis results

项目	660 MW		500 MW		300 MW		供电煤耗均值/ [g·(kW·h) ⁻¹]
	锅炉效 率/%	供电煤耗/ [g·(kW·h) ⁻¹]	锅炉效 率/%	供电煤耗/ [g·(kW·h) ⁻¹]	锅炉效 率/%	供电煤耗/ [g·(kW·h) ⁻¹]	
厂用电率升高 1 百分点		↑ 3.40		↑ 3.50		↑ 3.70	↑ 3.50
排烟氧量升高 1 百分点	↓ 0.26	↑ 0.88	↓ 0.33	↑ 1.17	↓ 0.45	↑ 1.65	↑ 1.23
排烟温度升高 1℃	↓ 0.05	↑ 0.17	↓ 0.05	↑ 0.19	↓ 0.06	↑ 0.24	↑ 0.20
飞灰中碳的质量分数升高 1 百分点	↓ 0.67	↑ 2.29	↓ 0.50	↑ 1.78	↓ 0.48	↑ 1.78	↑ 1.95
炉渣中碳的质量分数升高 1 百分点	↓ 0.12	↑ 0.40	↓ 0.09	↑ 0.31	↓ 0.08	↑ 0.31	↑ 0.34
锅炉效率升高 1 百分点		↓ 3.41		↓ 3.50		↓ 3.60	↓ 3.50

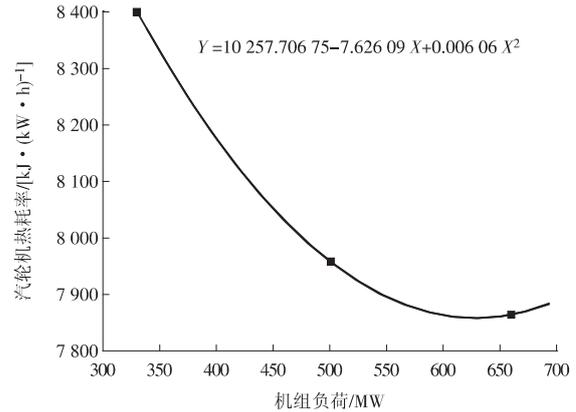


图 2 汽轮机热耗率随机组负荷变化拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of the steam turbine heat consumption changing with loads of the unit

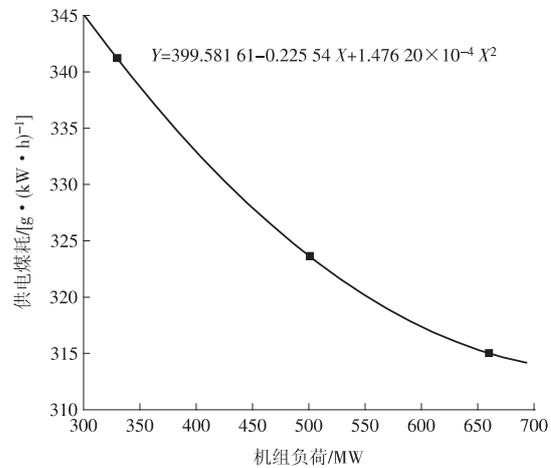


图 3 供电煤耗随机组负荷变化拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of the fuel consumption for power-supply changing with loads of the unit

由表 5 可知,厂用电率对供电煤耗的影响最大,厂用电率每升高 1 百分点,供电煤耗均值提高约 3.5 g/(kW·h),表明实际生产过程中机、炉侧各辅机设备的电能消耗对全厂经济性影响显著。排烟氧量每升高 1 百分点,会增加锅炉侧排烟热损失,使得不同负荷下锅炉效率降低 0.26 ~ 0.45 百分点,低负

荷时尤为明显,间接对机组供电煤耗影响均值为 $1.23 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。在空气预热器入口送风温度不变的情况下,排烟温度每升高 $1 \text{ }^\circ\text{C}$,锅炉效率降低 $0.05 \sim 0.06$ 百分点,供电煤耗均值降低 $0.20 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

飞灰中碳的质量分数在固体未完全燃烧损失中占比较大,对锅炉效率的影响较大。由表 5 可知,飞灰中碳的质量分数每升高 1 百分点,不同负荷下锅炉效率降低 $0.48 \sim 0.67$ 百分点,高负荷时尤为明显,对供电煤耗的影响均值为 $1.95 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。就该机组而言,飞灰中碳的质量分数的单位变化对供电煤耗的影响仅次于厂用电率单位变化的影响。炉渣中碳的质量分数每升高 1 百分点,锅炉效率降低 $0.08 \sim 0.12$ 百分点,对供电煤耗的影响均值为 $0.34 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

火力发电厂炉侧各耗差分析指标在节能控制中至关重要,各项指标相互制约相互耦合,不可单纯追求某一项指标优秀,而忽略与其相关指标的变化,需要根据现场实际情况,综合分析求取最优指标。如飞灰中碳的质量分数对机组供电煤耗影响较大,现场治理时往往采取降低煤粉细度 R_{90} 的措施,而忽略制粉系统厂用电率的增加,对机组供电煤耗降低产生不利影响。因此,火力发电厂治理煤耗时,应在掌握基本分析方法的基础之上,综合多因素具体分析,方可节能降耗提供指导建议。

5 结论

通过耗差分析计算,可以直观并极具目的地分析各项能耗指标的分布范围及分布区间,该方法能够将供电煤耗这个单一指标加以层层分离,从而找出影响煤耗的主要原因和主要节能潜力。大型电站特别是超临界和超超临界机组采用性能监测系统对发电过程中的能耗进行实时监测与控制,充分发挥机组大容量、高参数、高经济性的优势,使机组运行保持最佳状态,是节能降耗的有效措施。本文以某超临界压力直流锅炉为例,在 100% 、 75% 及 50% 负荷率工况下,对锅炉侧实际运行数据进行了详细的热经济性计算,找出影响煤耗的因素,为电厂经济运行和节能降耗提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 林万超. 火电厂热系统节能理论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
- [2] 李恩辰. 火力发电厂锅炉计算知识 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [3] 朱建峰, 李爱红. 耗差分析方法介绍 [J]. 中国电力教育, 2006(S3): 213 - 214.
ZHU Jianfeng, LI Aihong. Introduction to the analysis method of consumption difference [J]. China Electric Power Education, 2006(S3): 213 - 214.
- [4] 王松浩. 耗差分析方法的现状及其发展研究 [J]. 江苏科技信息, 2017(32): 25 - 27.
WANG Songhao. Study on the status and development of consumption difference analysis [J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2017(32): 25 - 27.
- [5] 马芳礼. 电厂热力系统节能分析原理: 电厂蒸汽循环的函数与方程 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [6] 倪学林. 火力发电厂技术经济指标计算 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [7] 容鑫恩. 电站锅炉原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [8] 蔡杰进, 马晓茜, 廖艳芬. 主蒸汽参数耗差分析方法的比较研究 [J]. 汽轮机技术, 2006, 48(1): 31 - 33, 72.
CAI Jiejing, MA Xiaoqian, LIAO Yanfen. Research on energy-loss analysis methods of main-steam-parameter [J]. Turbine Technology, 2006, 48(1): 31 - 33, 72.
- [9] 王加璇, 王清照, 宋乃辉. 热经济学研究的使命与任务 [J]. 热能动力工程, 2002, 17(2): 111 - 114, 212.
WANG Jiaxuan, WANG Qingzhao, SONG Naihui. Mission and assignments of thermoeconomics research [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(2): 111 - 114, 212.
- [10] 陈国年, 钟史明. 电厂热力系统矩阵计算法 [J]. 汽轮机技术, 1991, 33(5): 39 - 45.
CHEN Guonian, ZHONG Shiming. Matrix calculation method for thermal system of power plant [J]. Turbine Technology, 1991, 33(5): 39 - 45.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

王志永(1973—), 男, 河南许昌人, 电力工程师, 注册安全工程师, 从事大中型火电机组施工、调试及运行生产管理工作(E-mail: 13569933939@163.com)。