

回转式空气预热器性能变动和锅炉经济性变化间关系探讨

蔡明坤

(上海锅炉厂有限公司, 上海 200245)

摘要: 对空气预热器的漏风、阻力和排烟温度对锅炉风机电耗、发电煤耗的影响做了详细的理论分析,并根据选择 300 MW、600 MW 和 1 000 MW 机组的具体参数进行了计算。计算表明,降低 1 个百分点的漏风率只能降低发电煤耗 0.065 g/kW·h~0.071 g/kW·h,排烟温度上升 1 °C 相当于漏风率上升 2.5%~3% 或烟气阻力升高 250 Pa~300 Pa 的影响的结论,对空气预热器设计、运行中,对提高锅炉经济性的空气预热器性能优化次序做了分析,并指出,在新设计的空气预热器中,关注的主导方向应是提高换热效率,采用真正有经济价值的漏风控制手段而不是只追求漏风率的数值大小,重视控制空气预热器运行阻力和控制漏风率同等重要。

关键词: 回转式空气预热器; 性能; 经济性比较

中图分类号: TK223.3⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1672-4763(2013)06-0009-05

0 前言

大型回转式空气预热器的成功运用已有几十年的历史,和早期使用的管式预热器相比,其体现在占地省、成本低、运行维护简便、耐低温腐蚀等,这些特点已为广大用户所熟知^[1]。在广大设计、制造、安装和运行人员的努力下,回转式换热器的性能不断提高^[2]。空气预热器的性能好对电厂经济性的影响也不断受到重视,发展出很多行之有效的应对技术,但不可否认的是,这些新采用的改善预热器性能的技术多偏重直观感受,很少有人对这些手段的技术经济数据进行核算,造成部分改造性价比偏低的不足。本文从空气预热器的性能指标和锅炉机组经济性关系的原理出发,得出空气预热器在出现性能变化时,对机组经济性的整体影响程度进行分析,提供一些理论分析方法手段,供解决实际问题时参照,合理提升设备的整体性能。

1 空气预热器的主要性能参数

空气预热器是转动机械和换热设备完美结合的典范,这个特点决定了它需要考虑的问题包括以下几项:

(1) 换热能力: 反应在运行指标上主要是回

收烟气余热的能力,以排烟温度和热风温度的高低来判断,根据热平衡关系,热风温度的变化和排烟温度的变化是相关联的,因此可以归结为排烟温度高低是反应回转式空气预热器换热能力的较直接指标;

(2) 运行阶段多耗用的能源: 和管式预热器相比,受热面回转所产生的空气向烟气的泄漏增加了风机的出力、增加的烟空气流量也导致设备内通流阻力上升又进一步增加了风机的电耗,这方面的开销长期存在,因而特别受到用户关注,在空气预热器的性能上,反映为漏风率的高低和烟空气流通阻力的大小;

(3) 维持运行的投入水平: 反应在设备运行功耗、吹灰费用、备件更换水平等。因回转式空气预热器的运行功率通常只有几千瓦到几十千瓦,运行费用占电厂的总额比率非常低,用户一般不多关注;吹灰费用因回转式预热器吹灰器台数少,也要小于管式预热器;备件费用也要低于同等级管式空气预热器管束更换费用,维持运行的投入费用少是回转式空气预热器的优点之一。

综上所述,回转式空气预热器的主要控制性能参数就归结为换热效率或排烟温度的高低、漏风比率的大小和气流流通阻力的高低,控制和改善这三个主要参数,就能提高回转式空气预热器

收稿日期: 2013-07-20

作者简介: 蔡明坤(1967-),男,博士,教授级高工,长期从事回转式空气预热器技术工作。

的综合经济性。本文主要针对这三个参数的变化情况和电厂的经济性参数间的关系做详细分析。

2 漏风、阻力和电厂经济性关系的理论探讨

2.1 回转式空气预热器漏风对换热影响的分析

漏风的存在曾经一度制约了回转式空气预热器的的发展。不少学者都分析过不同部位的漏风对预热器整体性能的影响^[3], 旁路漏风因导致空气不被加热而混入热风中, 会使得预热器换热效率有所下降, 这个问题随着旁路密封和轴向密封结构的采用而得到有效控制, 现代空气预热器设备的旁通漏风比率已能控制在1%以内, 对换热性能影响已经很小。鉴于冷端径向漏风和轴向漏风并不通过转子, 对空气预热器的换热不造成影响(只会混入流出转子的烟气中, 使排烟温度出现下降)。从热端径向通道漏入热端烟气的漏风, 因热风温度低于烟气入口温度, 导致烟气入口混入这部分漏风后温度略有下降, 但考虑这部分漏风率为1%~2%, 对烟气入口温度的下降幅度不足0.5℃, 考虑这部分漏风增加了烟气速度, 对改善烟气和传热元件间换热略有好处, 从精确的换热计算来看, 考虑和不考虑热端漏风对排烟温度的影响从计算结果上来看难以察觉(不足±0.05℃)。携带漏风则由于同时存在烟气携带入空气现象, 烟空气的整体流速变化微小, 同时由于空气平均温度小于烟气平均温度, 使得携带漏风漏入烟气后烟气温度略有下降, 但由于携带漏风率仅为1.5%~2.5%, 混入烟气后对烟气的温度降幅不足0.5℃, 而携带烟气进入空气后, 事实上会轻微提高热风温度。从上面分析可以得到结论, 大型空气预热器的漏风对换热的影响是微不足道的, 并且, 在提供给电厂的数据中, 这个影响在性能计算时已经考虑。

2.2 漏风和阻力增加风机功耗的计算方法

漏风的最大影响还是增加了锅炉烟风系统风机的电耗。长期以来, 由于风机能耗受到整个锅炉系统的影响, 难以区分出由空气预热器漏风而引起的能耗变化部分所占份额。本文的思路是根据空气预热器的烟风流量、流通阻力的设计值和各风机的设计提升压头数值为出发点, 用风机输送功的计算式来分析漏风率变化后风机能耗的变化量。

风机的作用事实上是提高输送气流的储能, 包括压能(提升压头)、动能(增加流速)和势能(高度改变)的增减量。根据伯努利准则和能量守恒准则^[4], 风机前后的气流强制流动造成的能量差由风机输入^[5], 这样, 风机的输入能量可以记为:

$$P = F_v \left[\frac{1}{2} (\rho v^2 - \rho_0 v_0^2) + (\rho g h - \rho_0 g h_0) + (p - p_0) \right] / \eta \quad (1)$$

式中: F_v —— 为风机输送的体积流量, m^3/s ;

ρ —— 密度, kg/m^3 ;

v —— 流速, m/s ;

h —— 标高, m ;

p —— 气流表压力, Pa , 下标为0的量为风机吸入端的参数, 无下标的量为风机出口参数;

g —— 重力加速度, $9.81\text{m}/\text{s}^2$;

η —— 风机效率。

式(1)中, 动能和势能改变项的量和压能改变项相比通常差一个数量级以上(对风机提升压头为数个到数十千帕的送、引风机而言), 常忽略(其影响归入效率 η 中), 这样, 风机功率的计算式可以简化为:

$$p_f = \frac{F_{\text{tot}} p_{\text{fan}}}{\rho \cdot \eta} \quad (2)$$

式中: F_{tot} —— 风机输送的质量流量, kg/s ;

p_{fan} —— 风机总提升压头(Pa , 用设计值)。

漏风量 ΔF_w 计算式为^[6](kg/s)。

$$\Delta F_w = F_{\text{gin}} \cdot A_L \quad (3)$$

式中: F_{gin} —— 预热器烟气入口流量, kg/s ;

A_L —— 空气预热器漏风率。

对式(1)两边取全微分, 并将式(2)代入, 有:

$$dp_f = \frac{1}{\rho \cdot \eta} (F_{\text{tot}} dp_{\text{fan}} + p_{\text{fan}} F_{\text{gin}} dA_L) \quad (4)$$

上式的右边, 第一部分为阻力变化引起的功耗变化, 第二部分为流量变化引起的功耗变化。这样, 漏风增加所引起的风机能耗增加量为 Δp_L :

$$\Delta p_L = \frac{p_{\text{fan}}}{\rho \cdot \eta} (F_{\text{gin}} dA_L) \quad (5)$$

可以大致认为, 增加风机消耗功率和漏风率 A_L 及风机的总升压量 p_{fan} 成正比。对空气预热器流通阻力的增加, 风机为保证预热器输出热风 and 烟气的压力保持满足系统需要, 必须增加风机

的输出压头,类似地可以得到阻力变化引起风机能耗变化量 Δp_p :

$$\Delta p_p = \frac{F_{gin}}{\rho \cdot \eta} (1 + A_L) \Delta p \quad (6)$$

式中: Δp ——空气预热器阻力变化量,Pa;

F_{gin} ——空气预热器出口风量,kg/s;

A_L ——空气的泄漏率,%。

注意在计算空气输送风机能耗变化时,也需使用对应空气仓的阻力变化量。

2.3 排烟温度变化对机组输出功率影响计算

排烟温度变化意味着锅炉得到热能的变化,即排烟损失 q_2 的变化或锅炉效率 q_1 的变化,为比较方便,引入电厂发电效率 η_{pw} ,继续将这个损失处理为对电厂发电输出功率的影响量 $W^{[7]}$:

$$\Delta p_{py} = F_{gin} (1 + A_L) c_{pg} \eta_{pw} \Delta T_{py} \quad (7)$$

式中: c_{pg} ——烟气比热,J/(kg·K);

ΔT_{py} ——排烟温度变化量,°C。

3 漏风、阻力、排烟温度变化对电厂经济性指标的定量分析

有了上述计算方法,就可以具体计算出因空气预热器漏风率变化、预热器阻力变化和排烟温度变化对电厂厂用电和输出电功率的影响数值。现以三分仓预热器为例,比较下列 3 种情况下对电厂运行经济性的影响幅度:

(1) 漏风率增加 1 个百分点(其中的 60% 为一次风漏入烟气量,对应一次风量约增加 4.8%;其余 40% 为二次风漏入烟气量,对应的二次风量增加 0.6%);

(2) 预热器烟气阻力增加 100 Pa (相应地,一次风阻力同步增加 60 Pa,二次风阻力同步增加 20 Pa);

(3) 排烟温度升高 1 °C。

选取近期设计的 3 个典型机组(300 MW、660 MW 和 1 000 MW)的 BMCR 工况数据,用式(5)~(7)式来计算,为更直观,按照不同机组的发电煤耗情况,按每年利用小时 6 500 h 计算出对应的对发电煤耗的影响量。每千瓦厂用电对应的年运行费用为:

$$m_{pkw} = t_y p_m C_e \quad (8)$$

式中: t_y ——年利用小时数,h/年;

p_m ——标煤价格,元/kg;

C_e ——发电煤耗,kg/kW·h。

煤耗每变动 1g/kwh 耗费燃料费用变化量为:

$$m_{pg} = L_0 \cdot t_y \cdot p_y \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

式中: L_0 ——机组核定发电容量,kW/h。

上述 3 种情形对电厂运行功耗和经济指标费用影响列于表(1~3)中,典型机组的性能数据列于表 4 中。风机效率为方便起见,统一按照 0.85 考虑。

表 1 漏风率变动 1% 产生的风机功耗变化和年运行费用变化

序号	名称	300 MW 机组	600 MW 机组	1 000 MW 机组
1	一次风机增加功耗/kW	18.79	44.03	97.18
2	二次风机增加功耗/kW	4.15	7.86	17.55
3	引风机增加功耗/kW	15.18	30.77	46.04
4	脱硫风机增加功耗/kW	16.31	30.77	46.04
5	小计/kW	54.42	113.43	206.82
6	年增加运行费用/(万元·年 ⁻¹)	8.773	17.106	30.112
7	对应发电煤耗上升/(g·kWh ⁻¹)	0.056	0.055	0.058

注:考虑空气预热器一次风旁通率为 30%。

表 2 烟气阻力变化 100Pa 产生的风机功耗变化和年运行费用变化

序号	名称	300 MW 机组	600 MW 机组	1 000 MW 机组
1	一次风机增加功耗/kW	3.25	6.63	7.90
2	二次风机增加功耗/kW	4.94	9.08	14.44
3	引风机增加功耗/kW	49.27	92.31	137.47
4	小计/kW	57.45	108.02	159.80
5	年增加运行费用/(万元·年 ⁻¹)	9.261	16.290	23.267
6	对应发电煤耗上升/(g·kWh ⁻¹)	0.059	0.052	0.045

注:考虑预热器阻力的变化部分由引风机完成补偿,对脱硫风机无影响。

表3 排烟温度增加1℃产生的风机功耗变化和年运行费用变化

序号	名称	300 MW 机组	600 MW 机组	1 000 MW 机组
1	减少发电量/kW	177.459	344.192	532.670
2	年增加运行费用/(万元·年 ⁻¹)	28.606	51.904	77.557
3	对应发电煤耗上升/(g·kWh ⁻¹)	0.183	0.166	0.149
4	按每20℃对应1%锅炉效率折算煤耗增加/(g·kWh ⁻¹)	(0.155)	(0.145)	(0.140)

表4 3个典型机组的性能数据

序号	名称	300 MW 机组	600 MW 机组	1 000 MW 机组
1	烟气入口流量/(kg·s ⁻¹)	360.673	684.054	1028.72
2	一次风出口流量/(kg·s ⁻¹)	44.885	95.117	119.853
3	二次风出口流量/(kg·s ⁻¹)	251.307	463.713	759.5
4	引风机提升压头/kPa	3.25	3.5	3.5
5	脱硫增压风机提升压头/kPa	3.5	3.5	3.5
6	一次风机提升压头/kPa	9.5	12	18.5
7	二次风机提升压头/kPa	3	3	4.5
8	电厂发电效率/%	42.5	43.5	44.8
9	设计漏风率/%	5.5	5	4.5
10	设计一次风漏风率/%	32	30	29
11	设计二次风漏风率/%	2.5	2.2	0.3
12	排烟温度/℃	128	126	124
13	一次风机出口温度/℃	27	27	29
14	二次风机出口温度/℃	23	23	24
15	引风机前烟气比热/[kJ·(kg·K) ⁻¹]	1.157 7	1.156 7	1.155 8
16	一次风机出口空气密度/(kg·m ⁻³)	1.287 0	1.316 1	1.382 3
17	二次风机出口空气密度/(kg·m ⁻³)	1.227 9	1.227 9	1.241 4
18	引风机出口烟气密度/(kg·m ⁻³)	0.908 7	0.915 4	0.920 0
19	脱硫风机出口烟气密度/(kg·m ⁻³)	0.910 8	0.915 4	0.920 0
20	机组发电煤耗/[kg·(kWh ⁻¹)]	0.310	0.290	0.280
21	标煤价格/(元·kg ⁻¹)	0.800	0.800	0.800
22	年利用小时数/(h·年 ⁻¹)	6 500	6 500	6 500
23	每克煤耗年运行费用/(万元·年 ⁻¹)	156	312	520

4 计算结果分析

4.1 漏风影响和选用漏风控制手段分析

从表1中数据不难看出,漏风率对风机电耗的增加主要受到一次风提升压头的影响,这是因为在空气预热器的直接漏风中,大部分来自一次风,一次风压头越高,输送无效漏风的花费就要高一些,但一次风率大的机组,漏风对风机电耗增加的份额未必就高,因为直接漏风的多少主要取决于一次风和烟气间的压差,与一次风总量关系不大。因漏风增加的同时,烟空气阻力也上升,但幅度有限,因为漏风增加1%,考虑烟气阻力和流速的平方成正比,烟气阻力约升高2.01%,烟气阻力变化约20~25 Pa。这个影响

对总体分析影响不大,可以将这个影响合并纳入漏风的影响中去,即将表3中数值的20%~25%也考虑为漏风率变动1个百分点的影响,这样,漏风率变动1%对电厂发电煤耗的影响范围为0.065 g/kW·h~0.071 g/kW·h。

考虑不少电厂在对空气预热器降低漏风率改造的投入,很多采用的控制漏风结构花费不菲,如采用弹簧密封、波纹节密封片、刷式密封片、设置漏风抽出系统等^[9],一次投入往往在百万以上,鉴于这些设备的使用寿命难以超过一个大修期,有效降低的漏风率往往只有0.5%~3% (注:有些预热器改造往往声称降低漏风率很多,但其中的大部分并非采用新技术的原因,而是对老密封装置的正常维修结果^[10])。相比而言,及

时修复或加装热端漏风控制系统、不扩大密封区的多道密封改造、改进静密封密封性等技术手段,则既可以使漏风率下降,又不增加流通阻力。鉴于目前新机组空气预热器漏风率已普遍很小,能达到 5% 上下的水平,继续降低漏风率能得到的收益将非常有限,但投入却很高,采用不恰当或过多的控制漏风手段反而可能使得设备经济性下降。

4.2 空气预热器阻力的影响

对空气预热器阻力增加的影响不能轻视,从表 2 可以发现,烟气增加 100 Pa 阻力造成的损失并不比漏风率增加 1% 造成的损失小多少。因此,在运行阶段及时吹扫换热面也是经济划算的。

4.3 空气预热器排烟温度的影响分析

表 3 中所列的排烟温度上升 1 °C 造成的损失明显要比漏风率上升 1% 或烟气阻力上升 100 Pa 要大。可见,控制排烟温度是提升空气预热器经济性的首要目标,但很多电厂往往忽视了这一点。相比较而言,降低 1 °C 排烟温度能获得相当于降低 2.5%~3% 漏风率或 250 Pa~300 Pa 烟气阻力的效果。无疑,将来对提高空气预热器的性能指标的重点工作需转移到降低排烟温度上来。

对一些传热元件已使用较长时间的电厂,如 300 MW 机组,更换传热元件的费用一般在 200 万元~300 万元,根据表 3 不难发现,若排烟温度较新机组阶段上升超过 8 °C,每年通过排烟温度上升造成的损失就可以购买全部传热元件了。这个结果说明,对老机组,刻意延长传热元件的使用寿命并不经济。

从表 3 还可以发现,本文得到的排烟温度上升 1 °C 所造成的发电煤耗增加量和传统的估算^[8]方法(排烟温度每升高 20 °C,锅炉效率下降 1% 左右,对应数据已列于表 3 中。)有差异,但差异不大,说明传统对排烟温度上升对锅炉效率影响的估算有一定的准确性,但本文的计算方法显然要精确一些。

5 结 语

本文虽然根据理论方法推导,但经和多个实际工程比对,计算结果符合较好。上海锅炉厂有限公司对近百台空气预热器检修前后的风机功耗变化记录数据表明,对应 1% 的漏风率变化,对

300 MW 机组,风机使用 3 kV 三相电源,电流变化在 10 A~12 A 之间,对风机使用 6 kV 三相电源的 600 MW 机组,风机总电流变化幅度为 9.5 A~11A,1 000 MW 机组的风机多使用 10 kV 三相电源,对应的风机总电流变化幅度为 10.2 A~11.5 A。据此计算的风机功率变化和表 2 中的功率变化值吻合良好,(由于检修后一般空气预热器阻力会得到改善,因此表 3 中数值不能计入。)通过本文的分析,我们不难得到以下结论:

(1) 在影响锅炉经济性的主要空气预热器性能指标中,降低排烟温度具有最大的经济性。(2) 及时对换热面吹灰能起到和降低漏风率相当的作用。(3) 本文计算表明,降低 1 个百分点的漏风率只能降低发电煤耗 0.065 g/kW·h~0.071 g/kW·h,对预热器进行漏风改造时,需核算投入和收益的比值,采用真正有收效的技术手段。(4) 刻意延长传热元件的使用寿命有时候并不能提高锅炉系统的经济性。

本文对实际运行中的一些因素如风机效率的差异加以简化处理,因此一些计算结论可能和各具体工程运行参数略有差异,限于本人专业水平,不当之处请各位读者指正。

参考文献:

- [1] 章成骏. 空气预热器原理与计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1995.
- [2] 陈干锦, 蔡明坤. 上海锅炉厂有限公司新型容克式换热器设计技术[J]. 锅炉技术, 2003, 34(1): 1-6.
- [3] Shah RK., Skiepko T. Influence of Leakage distribution on the thermal performance of a rotary regenerator[J]. Appl. Therm. Eng. 1999, 19(7) 685-705.
- [4] 李复. 可压缩流体的伯努利方程[J]. 大学物理, 2008, 27(8): 15-18.
- [5] 郭立君主编. 泵与风机[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [6] Test Code ASME PTC4. 3, Performance Test Codes for Air Heaters, supplement to performance test code for steam generating units PTC 4. 1. Released by ASME Engineers United Engineering Center, 1968
- [7] 车得福, 庄正宁, 李军, 等. 锅炉[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.
- [8] 陈昕宽. 锅炉原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [9] 蔡明坤, 几种新型回转式空气预热器密封结构的比较[J]. 锅炉技术, 2010, 42(2): 8-13.
- [10] 马悦, 孙奉仲, 史月涛, 等. 电站锅炉回转式空气预热器漏风率过高的分析与对策[J]. 电站系统工程, 2007, 23(2): 20-22.

(下转第 47 页)

Experimental Study on NO_x Emission and Coal Burnout with a Radial Biased Whirl Burner When Change of Inner and Outer Secondary Air

XUE Shan¹, HUI Shi-en², ZHOU Qu-lan²

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Xi'An Technological University, Xi'An 710032, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'An Jiaotong University, Xi'An 710049, China)

Abstract: A double radial vortex bias burner with burnout air is represented in this paper, the coal distribution of the burner is thin outside and thick inside in the diametrical of burner nozzle. The combustion properties of this burners was investigated on Xi'An Jiaotong University 1 MW (heat input power) furnace. The results show that; the change of inner and outer secondary air has significant impacts on NO_x emissions and carbon in fly-ash. When the inner and outer secondary air increased appropriately, the content of carbon in fly-ash will be decreased. However, it may cause the increase of the NO_x emissions. If the power of inner and outer secondary air is too strong or too early to combine with the primary air, the content of carbon in fly-ash will be increased in the gas and the emission of NO_x will reduced at the same time.

Key words: biased combustion; swirling burners; NO_x emission; carbon burnout

(上接第 13 页)

An Analysis on the Relationship between Boiler's Economic Performance and Air Preheater's Main Performance Parameters

CAI Ming-kun

(Shanghai Boiler Works Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: An detail analysis about the relationship between boiler's economic performance and air preheater's main performance parameters was done. Some typical data from 300 MW, 600 MW and 1 000 MW unit's air preheater were used in calculating the economic performance values. According the calculation, 1 percent leakage ratio decreasing can save the coal consumption about 0.065~0.071 g/kW·h, The calculating results show that 1 deg. C gas out temperature increasing can have the equivalent effect to unit's economic performance as 2.5~3 percents air leakage increasing or 250~300 Pa gas side pressure drop increasing. The air heater performance improving order was discussed and supplied in this article. In the new air heater design work, the first point need concern is try to enhance the heat exchanging efficiency, use the leakage controlling methods with reasonable economic technologies and no only seek for a small leakage value. During operation, controlling the air and gas pressure drop are same important as controlling leakage value.

Key words: rotary air preheater; performance; comparison of boiler economic performance