

回转式空气预热器漏风对电站锅炉经济性的影响

胡 婷 邹斌华

国家电投集团江西电力有限公司分宜发电厂 江西 新余 336600

摘要: 回转式空预器是大型电站锅炉常用的尾部换热设备,但目前普遍存在漏风问题。为了确保机组的安全和经济运行,需要研究和提出有效的防治方法,以将空预器的漏风率控制在较低的水平。本文阐述空预器漏风原理及其造成的危害,并结合影响漏风的主要因素,分析减小漏风的可行方法。通过理论计算,对比分析了空预器冷端和热端漏风对锅炉效率的不同影响。研究结果为空预器的漏风优化改造提供了一定的指导意义。

关键词: 空预器;漏风率;冷端;热端;经济性

空气预热器,或简称空预器,是一种关键的辅助设备,可以提高锅炉的换热性能并降低能耗,这种设备在我国的大型电站锅炉中得到了广泛的应用。相比于管式空预器,回转式空预器的传热面密度更高、结构更紧凑、金属耗量更少、布置更容易,近年来得到越来越多的应用^[1]。回转式空预器的蓄热元件为一个旋转体,动静密封件之间存在一定间隙;在热态运行下,空预器的各个部件会受到热膨胀的影响,导致转子发生变形,转子与扇形板、弧形板的间隙也随之发生变化。考虑到蓄热体会受热发生膨胀,需要在动、静体之间保留间隙,这使得空气和烟气无法完全密封,致使漏风。

空预器的高漏风率严重威胁了锅炉机组的安全性和经济性,是燃煤电站目前亟待解决的重要问题。漏风会降低热空气的温度,导致受热面低温段发生腐蚀和堵灰;还会导致锅炉的排烟热损失增加,降低锅炉的热效率,并限制锅炉的出力。此外,过高的空预器漏风率,会显著增大引风机、一次风机、送风机的耗电量,直接影响电厂的经济性。因此,研究空预器漏风机理并提出有效检测和应对方法,对燃煤电厂的安全经济运行的重要性不言而喻。

1 空预器漏风原理及防治措施

空气预热器漏风通常包含两种形式:携带漏风和直接漏风。

1.1 携带漏风

空预器的转子在工作时,会将换热元件内的部分空气带入烟气侧,形成漏风,称为携带漏风^[2]。其漏风量计算公式见式(1)

$$Q = \frac{1}{60} \times \frac{\pi}{4} n (D^2 - d^2) H (1 - y) \quad (1)$$

式中: Q 为携带漏风量, m^3/s ; n 为空预器转速, r/min ; D 为转子直径, m ; d 为中心筒直径, m ; H 为转子高度, m ; y 为传热元件占转子的容积百分数。可见,这

类漏风与转速及传热元件在转子内的容积份额存在一定的关系。携带漏风又称结构漏风,由空预器的自身结构所决定,不可避免;空预器转速较低时,其产生的漏风量在总漏风量中所占比例很小。因此,在讨论如何降低空预器的漏风率时,通常不会考虑这种漏风因素的影响。

1.2 直接漏风

在回转式空预器中,直接漏风是总漏风的主要来源,80%以上的漏风量都是直接漏风产生的。在工程应用中主要针对直接漏风,对空预器进行优化设计。直接漏风量可按式(2)计算。

$$G = K \times F \sqrt{\Delta P \times \rho} \quad (2)$$

式中: G 为直接漏风量, kg/s ; K 为泄漏系数; F 为间隙面积, m^2 ; ΔP 为空气侧与烟气侧的压差, Pa ; ρ 为气体密度, kg/m^3 。

根据式(2),影响直接漏风量的主要因素包括泄漏系数、间隙面积以及空气侧与烟气侧的压差。空预器实际工作时,空气通常为正压,烟气则呈现负压状态,两者之间存在压差,驱使空气从间隙进入烟气侧,在轴向、环向和径向间隙之间容易出现漏风现象。其中,热端的径向漏风尤为显著。

在空预器工作过程中,烟气温度呈现由上层向底层逐步下降的态势;因为转子和定子间具有空隙,再加上空预器的尺寸很大,空气便由下往上流通,工作温度也逐渐增大。因此,转子上部的金属壁温大于下部,径向膨胀量也高于下部。此外,由于自身重量的影响,空预器转子会发生蘑菇状变形,进而导致动静间隙变大,漏风情况加剧。

1.3 降低空预器漏风措施

根据空预器直接漏风的原理公式,降低空预器漏风主要从降低泄漏系数、降低空预器空气侧和烟气侧之间的压差以及减小漏风间隙面积三个方面考虑。

降低泄漏系数。早期空预器普遍采用单密封结构,经过不断地工程应用和设备优化,大量学者和专家开始对双密封技术进行研究。在相同的工况和漏风间隙条件下,通过采用双密封结构,可以使漏风量降低约30%。

降低空预器空气侧和烟气侧之间的压差。对于回转式空预器,锅炉风烟系统的阻力是指风烟在流动过程中所遇到的阻力,这个阻力会影响空气侧与烟气侧之间的压差。在运行时,由于积灰堵塞导致传热元件阻力大大增加,导致空预器冷端的空气侧和烟气侧的压差增大,进而使漏风率增加。为了降低烟气侧和空气侧的压力差,可以在空预器中采用风机,抽出漏风或形成漏风栓塞区,从而改变空预器转子密封区的压力^[3]。

减小漏风间隙面积。空预器的漏风量与间隙面积密切相关,通过控制间隙面积可以显著降低漏风量。漏风的主要来源包括热端径向密封间隙、冷端径向密封间隙、轴向密封间隙和周向密封。目前,常用的降低漏风方法包括采用多重密封设计、设置软密封以及使用焊接型的静密封等措施。

2 空预器漏风对经济指标的影响

空预器运行时,如果漏风量过大,会引起一次风机、引风机和送风机的输出功率增大,从而导致风机的耗电量增加,进而导致整个厂的用电率上升。

空预器漏风也会降低机组的带负荷能力。当机组高负荷运行时,漏风会使三大风机的输出功率不足,严重时会导致一次风机送风能力降低,迫使机组降低负荷运行。

空预器的漏风会使锅炉的排烟温度上升。通过烟气通道漏入的空气,降低了漏风处烟气的温度,减少了向

$$V_y^0 = 1.866 \frac{C_{ar} + 0.375S_{ar}}{100} + 0.79V_0 + 0.8 \frac{N_{ar}}{100} + 0.111H_{ar} + 0.0124M_{ar} + 0.0161V_0^0 \quad (5)$$

为了确保燃料充分燃烧,锅炉实际消耗的空气量都会高于所需的理论空气量,两者的比值通常被称为过量空气系数 α 。由于锅炉在实际燃烧时的过量空气系数 α 大于1,实际烟气体积 V_y 除包含理论烟气体积 V_y^0 外,还包括过量空气 $(\alpha-1)V_0$ 及随之带来的水蒸气。实际烟气体积 V_y 为

$$V_y = V_y^0 + (\alpha-1)V_0 + 0.0161(\alpha-1)V_0 \quad (6)$$

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100\% = \frac{(\theta_{py} - t_0)(V_{gy} C_{p,gy} + V_{H_2O} C_{p,H_2O})}{Q_{net,ar}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, $C_{p,gy}$ 为干烟气的平均定压比热容, $\text{kJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$; C_{p,H_2O} 为水的平均定压比热容, $\text{kJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$; t_{py} 为排烟温度, $^\circ\text{C}$; t_0 为环境温度, $^\circ\text{C}$; Q_r 为锅炉输入热量, kJ/kg ; $Q_{net,ar}$ 为燃煤收到基低位发热量, kJ/kg 。漏风系数定义为空气泄漏量与燃料理论所需空气量的比值,为空气预热

下游加热面传递的热量,进而提高了排烟气温。通过计算,大型火力发电装置每增加炉膛内漏风系数0.1~0.2,排烟温度就会升高约3~8 $^\circ\text{C}$,锅炉的利用效率降低0.2%~0.5%。因此,降低回转式空预器的漏风率是提高锅炉效率的重要方法,在影响锅炉经济性的主要空预器性能指标中,降低排烟温度具有最大的经济性^[4]。

由于空预器漏风会降低锅炉效率,从而影响了机组经济性。漏风将导致烟气体积增加,进而导致排烟热损失 q_2 增大;漏风也可能导致一、二次风温度下降,化学不完全燃烧损失 q_3 、机械不完全燃烧热损失 q_4 增加。

3 定量计算

3.1 漏风对排烟损失的影响

某锅炉使用煤种参数如下。收到基元素分析:碳成分 $C_{ar} = 65.2\%$;氢成分 $H_{ar} = 4.21\%$;氧成分 $O_{ar} = 6.43\%$;硫成分 $S_{ar} = 0.7\%$;氮成分 $N_{ar} = 0.88\%$;水分 $M_{ar} = 7.4\%$;灰分 $A_{ar} = 15.18\%$;低位发热量 $Q_{net,ar} = 25080 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。

排烟热损失是排烟温度高于外界空气温度而产生的热损失。排烟热损失 q_2 在数值上等于排烟焓值减去进入锅炉的冷空气焓值,计算步骤如下

理论干空气量 V^0 为

$$V^0 = \frac{1}{0.21} \left(1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} + 5.56 \frac{H_{ar}}{100} - 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \right) \quad (3)$$

$$= 0.0889(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.0333O_{ar}$$

理论干烟气体积 V_{gy}^0 为

$$V_{gy}^0 = 1.866 \frac{C_{ar} + 0.375S_{ar}}{100} + 0.79V^0 + 0.008N_{ar} \quad (4)$$

理论烟气体积 V_y^0 为

实际干烟气体积 V_{gy}

$$V_{gy} = V_{gy}^0 + (\alpha-1)V_0 \quad (7)$$

实际烟气体积还可写成式(8),由此可以计算出 V_{H_2O} 。

$$V_y = V_{gy} + V_{H_2O} \quad (8)$$

排烟热损失 q_2

器烟气出口的过量空气系数与入口过量空气系数之差,漏风系数的大小直接影响到空气预热器的效率 and 安全性,用 a 表示。

在设计工况下,排烟温度 $\theta_{py}^0 = 130^\circ\text{C}$;环境温度 $t_0 = 25^\circ\text{C}$;漏风系数 $a = 1.2$ 。计算结果如表1所示。

表1 排烟热损失相关计算结果

项目	符号	数值
理论空气量 (m ³ /kg)	V_0	6.721
理论干烟气量 (m ³ /kg)	V_{gy}^0	5.322
理论烟气容积 (m ³ /kg)	V_y^0	7.202
实际干烟气量 (m ³ /kg)	V_{gy}	6.667
实际烟气容积 (m ³ /kg)	V_y	8.568
实际水蒸气容积 (m ³ /kg)	V_{H2O}	1.901
排烟热损失 (kJ/kg)	Q_2	1267.452
排烟热损失 (%)	q_2	5.054

3.2 空预器漏风对排烟热损失的影响

空预器不同部位漏风对烟气-空气整体换热的影响不同。当空预器冷端出现漏风现象时,会导致排烟温度下降,同时风机电耗也会增加;热端漏风时,不仅会造成排烟温度降低,而且由于热端漏风经过空预器换热元件,漏风会增大空预器两侧压差,迫使烟气流量降低,使空预器传热减弱,导致烟气中未被利用的热量直接排出烟道。另一方面,漏风减小了换热面的传热温差,导致换热面换热量减小。烟气的余热利用情况不佳,导致排烟热损失增加。因此,在计算空预器漏风率对锅炉效率、机组供电煤耗的影响时,需将空预器漏风按冷端和热端两种情况分别考虑。

空预器发生冷端漏风后的排烟温度 θ_{py} 计算式为

$$\theta_{py} = \frac{(V_{gy}C_{p,gy} + V_{H2O}C_{p,H2O})\theta_{py}^0 + 0.036\alpha V_{gk}C_{p,k}t_0}{V_{gy}C_{p,gy} + V_{H2O}C_{p,H2O} + 0.036V_{gk}C_{p,k}} \quad (10)$$

式中, V_{gy} 为实际的干烟气量, m³/kg; V_{H2O} 为水蒸气量, m³/kg; $C_{p,gy}$ 为干烟气的平均比热容, kJ/m³·°C; $C_{p,H2O}$ 为水蒸汽的平均定压比热容, kJ/m³·°C; $C_{p,k}$ 为空气的平均定压比热, kJ/m³·°C; θ_{py} 为空预器的排烟温度, °C。

空预器发生热端漏风后的排烟温度 θ'_{py} 计算式为

$$\theta'_{py} = \frac{(V_{gy}C_{p,gy} + V_{H2O}C_{p,H2O})\theta_{ry} + 0.036\alpha V_{gk}C_{p,k}\theta_{rk}}{V_{gy}C_{p,gy} + V_{H2O}C_{p,H2O} + 0.036V_{gk}C_{p,k}} \quad (11)$$

空预器发生漏风后,排烟温度发生变化,计算式为

$$\theta_{py} = \theta_{py}^0 - (\theta_{ry} - \theta'_{ry}) \quad (12)$$

式中, $C_{p,k}$ 为空气的平均定压比热容, kJ/m³·°C; θ_{ry} 为空预器的热端烟气温度, °C; θ_{rk} 为空预器的热端空气温度, °C, 此处取 $\theta_{ry} = 380^\circ\text{C}$, $\theta_{rk} = 345^\circ\text{C}$; θ'_{ry} 为空预器漏风后的烟气温度, °C。

用漏风系数变化模拟空预器的不同漏风情况,分别考虑漏风系数为1.2、1.3、1.4、1.5、1.6时,空预器发生冷端漏风与热端漏风两种情况时分别对锅炉效率的影响,其计算结果分别如表3和表4所示,不同漏风系数时煤燃烧计算结果如表2所示。

表2 不同漏风系数时煤燃烧计算结果

漏风系数 a	漏风系数变化量 Δa	实际干烟气量 V_{gy} (m ³ /kg)	实际烟气容积 V_y (m ³ /kg)	实际水蒸气容积 V_{H2O} (m ³ /kg)
1.2	0	6.667	8.568	1.901
1.3	0.1	7.334	9.251	1.917
1.4	0.2	8.010	9.934	1.924
1.5	0.3	8.683	10.617	1.934
1.6	0.4	9.355	11.300	1.945

表3 空预器冷端漏风计算结果

漏风系数 a	漏风系数变化量 Δa	排烟热损失 Q_2 (kJ/kg)	排烟热损失 q_2 (%)	锅炉效率变化量 (%)
1.2	0	1267.452	5.052	0
1.3	0.1	1333.900	5.319	-5.319
1.4	0.2	1441.503	5.748	-5.748
1.5	0.3	1595.371	6.361	-6.361
1.6	0.4	1640.947	6.543	-6.543

表4 空预器热端漏风计算结果

漏风系数 a	漏风系数变化量 Δa	排烟热损失 Q_2 (kJ/kg)	排烟热损失 q_2 (%)	锅炉效率变化量 (%)
1.2	0	1267.452	5.052	0
1.3	0.1	1349.213	5.380	-5.380
1.4	0.2	1468.434	5.855	-5.855
1.5	0.3	1629.949	6.499	-6.499
1.6	0.4	1720.237	6.859	-6.859

依据上述计算结果,绘制锅炉效率随空预器冷端和热端漏风率增加时的变化曲线,如图1所示。

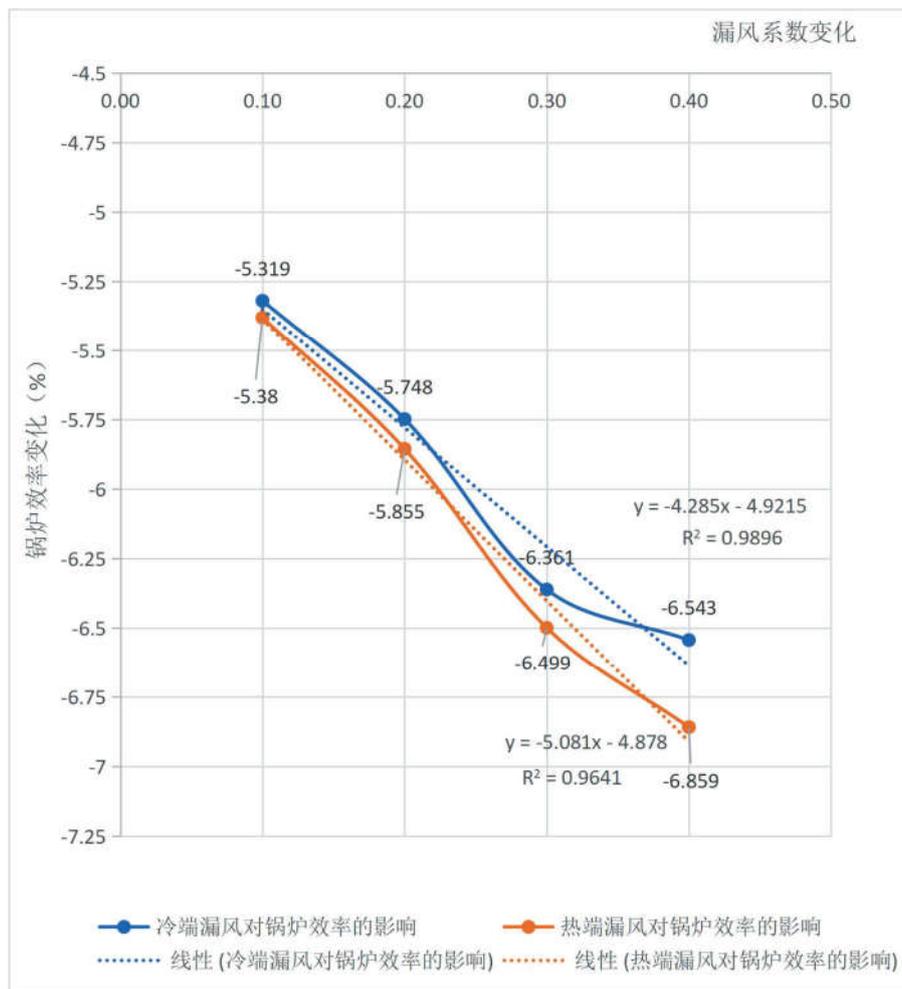


图1 空预器冷端/热端漏风对锅炉效率的影响

由图可见,热端漏风对锅炉效率的影响直线,相较于冷端漏风对锅炉效率的影响直线,斜率更大一些。这说明当漏风系数变化相同时,空热端漏风对锅炉效率的影响比冷端漏风更大。根据拟合直线的公式,当空预器冷端漏风率增大0.1时,锅炉效率降低约0.429%;当空预器热端漏风率增大0.1时,锅炉效率降低约0.508%。

4 结论

(1) 空预器的漏风增加了锅炉的排烟热损失,导致锅炉的热效率下降,限制了锅炉的出力,这种情况对机组的运行安全性产生了重大影响。提高空预器内的烟气温度,可以减少壁面的低温腐蚀现象,可以保障机组能够安全运行。因此,减少空预器的漏风,确保机组处于最佳的经济运行状态,是电厂争创一流企业并提高企业经济效益的必要条件。

(2) 空预器漏风位置对换热的影响情况不同。在计算空预器漏风率对锅炉效率、机组供电煤耗的影响时,

需将空预器漏风按冷端和热端两种情况分别考虑。

(3) 当空预器漏风率发生变化时,热端漏风比冷端漏风对锅炉效率的影响大。空预器热端漏风应当引起足够重视,需提出有针对性的防治和改进措施。

本文研究结果对回转式空预器的改造及热力计算有一定的参考价值。

参考文献

- [1]陈昌贤,孙奉仲,李飞,吴艳艳.四分仓回转式空气预热器热力计算方法[J].山东大学学报(工学版),2014,44(04):58-63.
- [2]杜中平,杨森,杨治国,马利君,孟金来.空气预热器柔性接触式密封改造[J].华电技术,2009,31(07):57-59+80-81.
- [3]蔡明坤.几种回转式空气预热器密封结构的比较[J].锅炉技术,2011,42(02):8-13.
- [4]蔡明坤.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[J].锅炉技术,2013,44(06):9-13+47.