

基于XR修正的回转式空气预热器换热效率计算方法

王宏武¹, 刘欢¹, 杨荣祖¹, 马汀山²

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 西安西热节能技术有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:依据逆流换热器换热理论模型,基于换热器无因次变量效能、传热单元数和热容量比之间的关系,对回转式空气预热器换热过程进行分析,提出基于XR修正的回转式空气预热器换热效率计算方法。根据某600 MW机组的空气预热器的设计参数及运行数据,利用该计算方法求解得到实际运行工况换热效率。并对该空气预热器进行了蓄热元件更换、密封间隙调整等改造,对改造前后实际运行工况换热效率进行计算。结果表明:未修正的换热效率与XR有较强的相关性,修正后的换热效率离散程度降低,更能反映空气预热器本身的换热能力。不进行修正情况下,改造前、后的平均换热效率分别为67.6%和67.4%,与设计值69.7%有较大的差距,不能体现出空气预热器改造的效果。通过XR修正,改造后的平均换热效率69.3%与设计值69.7%基本相当,高于改造前的平均换热效率,基本达到改造预期效果。该计算方法可更准确的评价空气预热器的实际性能及改造效果。

关键词:回转式空气预热器;换热效率;XR修正;计算方法

中图分类号:TK123 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.03.012

[引用本文格式]王宏武,刘欢,杨荣祖,等.基于XR修正的回转式空气预热器换热效率计算方法[J].热能动力工程,2024,39(3):92-99. WANG Hong-wu, LIU Huan, YANG Rong-zu, et al. Calculation method of heat exchange efficiency of rotary air preheater based on XR correction[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3): 92-99.

Calculation Method of Heat Exchange Efficiency of Rotary Air Preheater based on XR Correction

WANG Hong-wu¹, LIU Huan¹, YANG Rong-zu¹, MA Ting-shan²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710054;
2. Xi'an TPRI Energy Conservation Technology Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710054)

Abstract: Based on the theory of counterflow heat exchanger heat transfer model, using three dimensionless variables including heat exchanger effectiveness of heat exchanger, number of heat transfer unit and heat capacity ratio, through the analysis of the rotary air preheater heat transfer process, a calculation method of heat exchange efficiency of rotary air preheater based on XR correction was proposed. According to the design parameters and operation data of the air preheater of a 600 MW unit, the calculation method was used to obtain the heat exchange efficiency under the actual operating condition. The transformation for this air preheater was carried out, such as heat storage element replacement and sealing clearance adjustment, and the heat exchange efficiency under the actual operating condition before and after the transformation was calculated. The results show that the unmodified heat exchange efficiency is strongly correlated with the XR, and the modified heat exchange efficiency is less discrete, which can better reflect the heat exchange capacity of the air preheater itself. If not corrected, the average heat ex-

收稿日期:2023-05-26; 修订日期:2023-06-28

基金项目:中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ21-H66)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of Huaneng Power International Co., Ltd. (HNKJ21-H66)

作者简介:王宏武(1989-),男,西安热工研究院有限公司高级工程师。

change efficiency before the transformation is 67.6%, and the average heat exchange efficiency after the transformation is 67.4%, which is slightly lower than the heat exchange efficiency before the transformation, and there is a large gap with the design value of 69.7%, which cannot reflect the effect of the air preheater transformation. After correction, the average heat transfer efficiency of 69.3% after the transformation is basically equivalent to the design value of 69.7%, and higher than the average heat transfer efficiency of 67.3% before the transformation, which basically achieves the expected effect of the transformation. The performance of the air preheater is at a good level. The calculation method can more accurately evaluate the actual performance of the air preheater and the transformation effect.

Key words: rotary air preheater, heat exchange efficiency, XR correction, calculation method

引言

空气预热器是以锅炉尾部烟道中的高温烟气来加热燃烧所需低温空气的换热设备^[1]。目前,国内大中型燃煤机组基本都采用回转式空气预热器。回转式空气预热器具有传热面密度高、质量轻、占地小和布置灵活等优点^[2-6]。目前,主要采用美国机械工程师协会发布的 ASME PTC4.3《空气预热器性能试验规程》^[7]对回转式空气预热器的换热性能进行分析计算,以空气预热器烟气侧换热效率对空气预热器换热性能进行评价。由于实际运行中煤质变化、锅炉运行参数变化、漏风率变化及烟风系统阻力变化等因素影响,空气预热器中的空气流量与烟气流量的比例会发生变化,进而导致空气预热器烟气侧换热效率产生较大偏差,不能准确评价空气预热器的换热能力。在 ASME PTC 4.3 提出 XR 的定义为空气预热器的空气侧热容量与烟气侧热容量的比值,可通过将 XR 修正至设计工况,得到修正后的空气预热器换热效率,以准确评价其换热能力。

近年来,针对空气预热器的热力学建模计算已进行了大量研究^[8-11],主要在空气预热器蓄热元件的流动特性和换热能力评价、蓄热元件的腐蚀积灰情况评价、空气预热器内烟气-空气温度场变化数值模拟等方面。热力建模计算所做研究对空气预热器的总体换热能力评价较少,也少有对空气预热器的实际运行效果进行评估。在空气预热器换热性能计算方面,张知翔等人^[12]提出了一种利用空气预热器漏风率对修正空气预热器烟气侧效率的计算方法,利用空气预热器漏风率对锅炉排烟温度进行修正,使外界因素对空气预热器本身性能的影响降低。

李杨等人^[13]对多台锅炉的空气预热器设计参数进行分析计算得到,不同传热单元数下的空气预热器效能,建立了基于效能-传热单元数的空气预热器换热效率的计算模型。陈珣等人^[14]通过对空气预热器进出口烟气、空气的流量和温度等参数进行测试,结合空气预热器厂家提供的热力特性修正曲线,对空气预热器的入口烟气温度和入口空气温度进行修正,得到了空气预热器修正到设计条件下的烟气侧换热效率。

本文依据逆流换热器换热理论模型,获得逆流换热器无因次变量传热单元数、热容量比和效能之间的关系,再根据以上3个无因次变量的关系,结合回转式空气预热器的换热特点,在已知传热单元数的情况下,得到空气预热器效能、换热效率与 XR 之间的关系,将试验工况空气预热器换热效率修正至设计工况,计算得到基于 XR 修正的回转式空气预热器换热效率。以某 600 MW 锅炉回转式空气预热器作为计算对象,对该空气预热器实际运行工况换热效率进行计算,以验证该方法的准确性。该空气预热器进行了蓄热元件更换、密封间隙调整等改造,利用此方法对改造前后实际运行工况进行对比计算,对实际性能和改造效果进行评价。

1 空气预热器换热效率计算原理

按照 ASME PTC4.3《空气预热器性能试验规程》,空气预热器性能的评价标准是空气预热器烟气侧换热效率。在基本传热学原理层面,空气预热器烟气侧换热效率是空气预热器进出口烟气温度之差(烟气侧温降),与空气预热器进口烟气与进口空气温度之差与理论最大温差(理论最大温差)的比值。从计算公式可知,评价空气预热器的换热效率

不是依据空气的温升,而是依据烟气的温降。

在本文中使用的空气预热器出口烟气温度均已修正到零漏风工况,计算空气预热器换热效率和XR中涉及的空气预热器出口烟气温度也已修正到零漏风工况^[15]。空气预热器进口及出口空气温度为一次风温和二次风温加权计算所得。表1为典型空气预热器换热模型参数。工况1和工况2分别指XR为87.1和75.1时的空气预热器换热模型参数。

表1 典型空气预热器换热模型参数

Tab.1 Parameters of typical air preheater heat transfer model

参数	设计值	工况1	工况2
进口烟气温度/°C	360	360	360
出口烟气温度(修正)/°C	132	123	137
进口空气温度/°C	25	25	25
出口空气温度/°C	310	297	322
XR/%	80.0	87.1	75.1
换热效率/%	68.1	70.7	66.6

由表1可知,该空气预热器设计换热效率为68.1%。在运行中,空气预热器本身性能未发生改变,但会出现空气量不同的情况。在空气预热器进口烟气温度和进口空气温度不变的前提下,与工况2相比,工况1中的XR较大,即通过空气预热器的空气质量流量更大,出口烟气温度更低。工况1中空气预热器换热效率为70.7%,明显大于工况2中的换热效率66.6%。由此可知,在实际运行中,运行条件与设计工况不一致,经过空气预热器换热后,烟气未能达到足够的温降,而非空气预热器本身性能不达标。因此在不修正的前提下直接采用空气预热器换热效率来评价空气预热器本身换热能力就存在较大误差。

在实际运行中产生空气及烟气侧流量不均的原因有锅炉运行参数变化、炉膛漏风变化、燃用煤质变化和空气预热器内系统阻力变化等。目前,大部分平衡通风锅炉控制系统可以为一次风机、送风机及引风机设定偏置,操作人员根据运行情况可以适当调整通过空气预热器的空气及烟气质量流量。锅炉炉膛漏风增加会改变XR,并产生炉内不完全燃烧及排烟温度偏高等问题,无序的空气漏入锅炉会

增加经过空气预热器的烟气质量流量,但不增加空气质量流量,因此导致XR低于设计值。目前,煤炭市场紧张,大部分电厂改变实际燃用煤质,实际燃用煤质和设计煤质存在偏差也能导致通过空气预热器的空气及烟气质量流量的改变。在上述情况中,燃烧所产生的烟气质量与燃烧所需的空气质量之比与设计值存在偏差,因此有必要利用XR对空气预热器换热效率进行修正。ASME PTC 4.3中提到了XR对空气预热器换热效率的影响,文献[16]中提出空气预热器出口烟气温度需要经过合适的XR修正曲线修正。但是空气预热器制造厂很少提供XR修正曲线,导致这种修正计算方法很难应用到实际空气预热器换热效率计算中。

本文提出基于XR修正的回转式空气预热器换热效率计算方法是依据标准回热式换热器建立的。在涉及到较小修改的前提下,可将回热式换热器建立的计算方法运用到再生式换热器上^[17]。本文将基于XR修正的方法运用到常规回转式空气预热器换热效率计算中。

2 理论模型计算方法

2.1 理论模型

在逆流换热器中,冷流体及热流体的温度变化情况如图1所示^[18]。

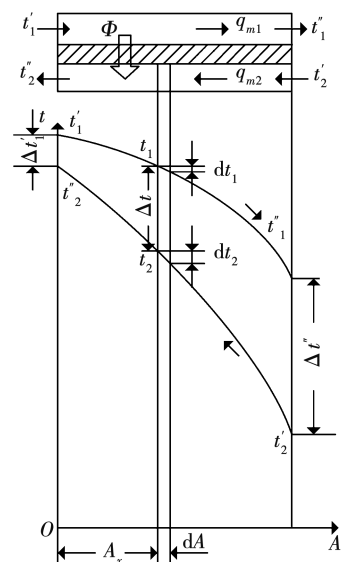


图1 逆流换热器中冷流体和热流体的温度变化情况

Fig.1 Temperature change of cold and hot fluids in countercurrent heat exchanger

2.1.1 换热器热平衡

在微元面积 dA 处,两侧热流体与冷流体的温差为:

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (1)$$

式中: t_1 —热流体的温度,℃; t_2 —冷流体的温度,℃。

通过微元面 dA 的热流量为:

$$d\Phi = K\Delta t dA \quad (2)$$

式中: $d\Phi$ —传热量,W; K —传热系数,W/(m²·K)。

热流体放出热流量 $d\Phi$ 后,温度下降为 dt_1 。热流体在微元面 dA 上放出的热量和冷流体吸收的热量相等,均为热流量 $d\Phi$,即:

$$d\Phi = -Q_1 dt_1 \quad (3)$$

$$d\Phi = -Q_2 dt_2 \quad (4)$$

式中: Q_1 —热流体热容量,W/K; Q_2 —冷流体热容量,W/K。其中,负号表示沿换热方向温度下降。设冷热流体热容量存在以下关系:

$$\mu = \frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2} \quad (5)$$

在逆流换热模型中存在以下关系:

$$\frac{t_1'' - t_2'}{t_1' - t_2''} = e^{-\mu kA} \quad (6)$$

式中: t_1'' —热流体的终温,℃; t_2' —冷流体的初温,℃;
 t_1' —热流体的初温,℃; t_2'' —冷流体的终温,℃。

换热器计算中的热平衡方程式为:

$$\Phi = Q_1(t_1' - t_1'') = Q_2(t_2' - t_2'') \quad (7)$$

2.1.2 换热器无因次量

描述换热器性能的无因次量主要有3个,即热容量比、效能和传热单元数^[19]。

换热器的热容量比 R 为两种换热流体中较小的热容量与较大的热容量之比,即:

$$R = Q_{\min}/Q_{\max} \quad (8)$$

式中: Q_{\min} —最小热容量,W/K; Q_{\max} —最大热容量,W/K。

换热器的传热单元数 NTU 为传热系数 K 与传热面积 A 的乘积与两种流体中较小的热容量之比,即:

$$NTU = KA/Q_{\min} \quad (9)$$

换热器的效能 ε 的定义为换热器的实际传热量与最大可能的传热量之比,即:

$$\varepsilon = (t' - t'')_{\max}/(t_1' - t_2'') \quad (10)$$

式中: $(t' - t'')_{\max}$ —冷流体或热流体在换热器中的实

际温差值中的大者,℃; $(t_1' - t_2'')$ —流体在换热器中可能发生的最大温差值,℃。

2.1.3 无因次量之间的关系

在逆流换热器中,为了推导出热容量比、效能和传热单元数3个无因次量之间的关系进行如下计算。

已知换热器的效能后,换热器的热流量可依据冷流体和热流体的进口温度确定:

$$\Phi = Q_{\min}(t' - t'')_{\max} = \varepsilon Q_{\min}(t_1' - t_2'') \quad (11)$$

换热器逆流换热时能效关系可进行以下计算。

假定 $Q_1 < Q_2$,由式(10)可知:

$$t_1' - t_1'' = \varepsilon(t_1' - t_2'') \quad (12)$$

根据式(7)可知:

$$t_2'' - t_2' = \frac{Q_1}{Q_2}(t_1' - t_1'') \quad (13)$$

将式(12)、式(13)相减得:

$$(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2') = \varepsilon(t_1' - t_2'') - \frac{Q_1}{Q_2}(t_1' - t_1'') \quad (14)$$

将式(7)、式(12)代入式(14)计算可得:

$$1 - \left(\frac{t_1'' - t_2'}{t_1' - t_2''}\right) = \varepsilon - \varepsilon \frac{Q_1}{Q_2} \left(\frac{t_1'' - t_2'}{t_1' - t_2''}\right) \quad (15)$$

将式(6)代入式(15)计算可得:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-\mu kA)}{1 - \frac{Q_1}{Q_2} \exp(-\mu kA)} \quad (16)$$

将式(5)代入式(16)计算可得:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{KA}{Q_1}\left(1 - \frac{Q_1}{Q_2}\right)\right]}{1 - \frac{Q_1}{Q_2} \exp\left[-\frac{KA}{Q_1}\left(1 - \frac{Q_1}{Q_2}\right)\right]} \quad (17)$$

当 $Q_1 > Q_2$ 时,类似的推导可得:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{KA}{Q_2}\left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right)\right]}{1 - \frac{Q_2}{Q_1} \exp\left[-\frac{KA}{Q_2}\left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right)\right]} \quad (18)$$

将式(17)、式(18)合并为:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left\{-\frac{KA}{Q_{\min}}\left[1 - \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}}\right]\right\}}{1 - \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}} \exp\left\{-\frac{KA}{Q_{\min}}\left[1 - \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}}\right]\right\}} \quad (19)$$

其中 Q_{\max} 与 Q_{\min} 分别指 Q_1 和 Q_2 中的大者与小者。

将式(8)、式(9)代入(19)计算可得:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[(-NTU)(1-R)]}{1 - R \exp[(-NTU)(1-R)]} \quad (20)$$

式(20)为热容量比、效能和传热单元数3个无因次量之间的关系式。

2.1.4 空气预热器换热效率、XR和效能

空气预热器烟气侧换热效率是烟气侧温降与理论最大温差的比值,公式为:

$$\eta_G = \frac{T_{Gi} - T_{Go}}{T_{Gi} - T_{Ai}} \quad (21)$$

式中: η_G —烟气侧换热效率; T_{Gi} —进口烟气温度,K; T_{Go} —出口烟气温度,K; T_{Ai} —进口空气温度,K。

ASME PTC 4.3 中给出 XR 的计算方法^[7]:

$$XR = \frac{m_A c_{pA}}{m_G c_{pG}} = \frac{T_{Gi} - T_{Go}}{T_{Ao} - T_{Ai}} \quad (22)$$

式中: $m_A c_{pA}$ —空气侧的热容量,W/K; $m_G c_{pG}$ —烟气侧的热容量,W/K; T_{Ao} —出口空气温度,K。

式(22)与式(8)中换热器的热容量比 R 计算方法一致。

根据式(10),在空气预热器传热过程中利用换热器效能的概念,空气预热器烟气侧温降小于空气

预热器空气侧温升,因此空气预热器的换热器效能为:

$$\varepsilon = \frac{T_{Ai} - T_{Ao}}{T_{Gi} - T_{Ai}} \quad (23)$$

将式(21)、式(22)代入式(23)计算可得:

$$\varepsilon = \frac{\eta_G}{XR} \quad (24)$$

将式(22)代入式(20)计算可得:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-XR)]}{1 - XR \exp[-NTU(1-XR)]} \quad (25)$$

式(25)为空气预热器的 ε 、XR、NTU 三者的关系式,可以看出因变量 ε 是一个以 XR 和 NTU 为自变量的函数。

2.1.5 空气预热器换热效率修正

传热单元数 NTU 是一个反映换热器传热性能的无因次量,是换热器 KA 值大小的一种度量,是一个反映空气预热器换热综合技术经济性能的重要指标^[20]。为确定 ε 与 XR 之间的关系,根据不同容量的锅炉空气预热器设计参数,对 NTU 设计值进行计算,如表2所示。

表2 不同容量锅炉空气预热器 NTU 值

Tab.2 NTU values of boiler air preheater with different capacities

机组	机组容量/MW	进口烟气温度/℃	出口烟气温度/℃	进口空气温度/℃	出口空气温度/℃	传热温压/℃	NTU
1	300	376	127	20	312	83.8	3.5
2	600	365	135	31	311	76.3	3.7
3	1 000	366	125	24	320	69.9	4.2
4	300	371	126	19	327	70.9	4.3
5	660	389	126	20	341	73.1	4.4
6	1 000	380	132	29	336	69.0	4.5
7	330	390	132	24	349	69.0	4.7
8	600	392	132	25	355	66.3	5.0
9	1 000	383	126	25	348	62.5	5.2
10	660	383	126	24	348	62.3	5.2
11	1 000	382	110	56	331	52.7	5.2
12	350	366	127	25	339	56.7	5.5
13	600	366	122	29	338	53.7	5.8
14	600	378	129	26	353	54.7	6.0
15	300	307	130	20	294	45.2	6.1

基于表 2 中不同容量锅炉空气预热器 NTU 值,通过式(25)计算换热器效能与 XR 之间的关系如图 2 所示。

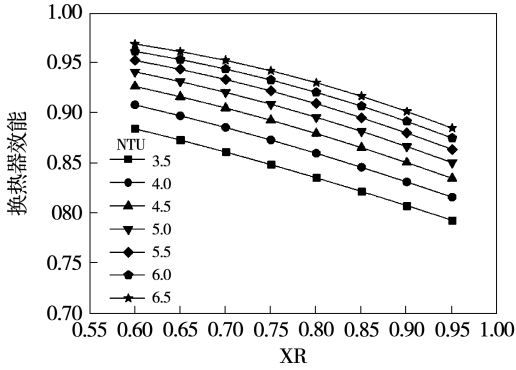


图 2 不同 NTU 值时换热器效能与 XR 之间的关系

Fig. 2 The relationship between heat exchanger efficiency and XR at different NTUs

从图 2 可以看出,对于一个给定的 NTU,换热器效能随着 XR 的增加逐渐降低,基本呈线性变化。对于不同给定的 NTU,换热器效能随着 XR 变化的各条曲线基本是平行的。

基于表 2 中不同容量锅炉空气预热器 NTU 值,对图 2 中的换热器效能与 XR 进行计算, $d\epsilon/dXR$ 与 XR 之间的关系如图 3 所示。

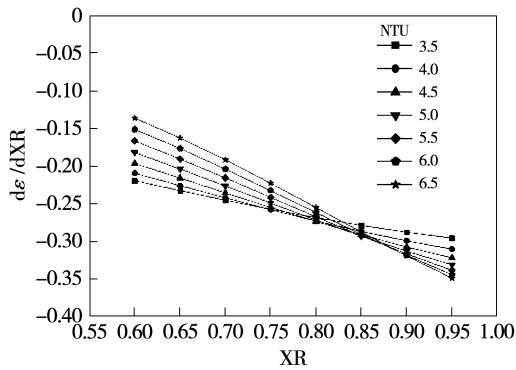


图 3 不同 NTU 值时 $d\epsilon/dXR$ 与 XR 之间的关系

Fig. 3 The relationship between $d\epsilon/dXR$ and XR at different NTUs

采用一系列的 NTU 来表征相应的空气预热器情况。XR 在 0.6 ~ 0.95 范围时, $d\epsilon/dXR$ 恒小于零, XR 在此范围时换热器效能随 XR 是单调递减的。对于给定的空气预热器,在 NTU 已知的情况下,随 XR 变化, $d\epsilon/dXR$ 在各工况下的数值均可通

过计算得到。因此,可理解为对于给定的空气预热器, $d\epsilon/dXR$ 的变化是由 XR 单一变量引起的,那么试验工况下的换热效率为:

$$\epsilon_{\text{test}} = \epsilon_{\text{des}} + \frac{d\epsilon}{dXR} (XR_{\text{test}} - XR_{\text{des}}) \quad (26)$$

式中: ϵ_{test} —试验工况换热效率; ϵ_{des} —设计工况换热效率; XR_{test} —试验工况 XR; XR_{des} —设计工况 XR。

把公式(24)带入到公式(26)中,可得:

$$\frac{\eta_{\text{test}}}{XR_{\text{test}}} = \frac{\eta_{\text{des}}}{XR_{\text{des}}} + \frac{d\epsilon}{dXR} (XR_{\text{test}} - XR_{\text{des}}) \quad (27)$$

式中: η_{test} —试验工况烟气侧换热效率; η_{des} —设计工况烟气侧换热效率。

式(27)为空气预热器的 η 、XR、 ϵ 三者的关系式。将试验工况空气预热器换热效率修正到设计工况,计算出基于 XR 修正的空气预热器换热效率:

$$\eta_{\text{cr}} = \left[\frac{\eta_{\text{test}}}{XR_{\text{test}}} - \frac{d\epsilon}{dXR} (XR_{\text{test}} - XR_{\text{des}}) \right] XR_{\text{des}} \quad (28)$$

2.2 模型验证

某 600 MW 机组配备有 2 台三分仓回转式空气预热器,设计换热效率为 69.7%,设计 XR 为 78.3%,具体设计参数见表 3。为评价该空气预热器的实际运行状态,将实际运行中高、中、低负荷工况下的未修正空气预热器换热效率、修正后换热效率及 XR 进行计算,如图 4 所示。

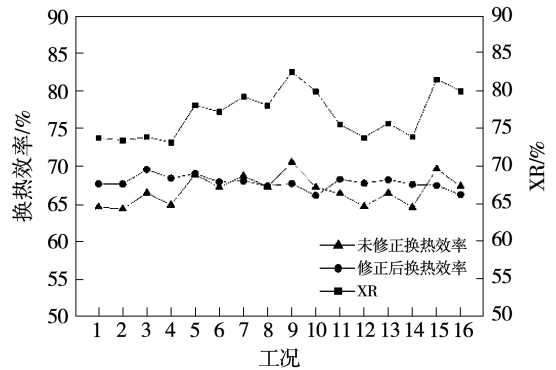


图 4 不同工况下空气预热器换热效率和 XR

Fig. 4 Air preheater heat transfer efficiency and XR under different working conditions

从图 4 可知,未修正的换热效率与 XR 有较强的相关性, XR 增加时未修正的换热效率增加, XR 降低时未修正的换热效率降低。

未修正的空气预热器换热效率变化范围为 64.4% ~ 70.6%, XR 变化范围为 73.2% ~ 82.6%。未修正换热效率的平均值为 66.9%, XR 的平均值为 76.9%。通过计算可知,空气预热器换热效率的方差为 3.3%,换热效率的变化曲线波动较大,离散程度较高。

利用 XR 对换热效率进行修正,修正后换热效率变化范围为 66.2% ~ 69.6%,平均值为 67.8%,通过计算可知,方差为 0.7%。修正后的换热效率更接近设计值,换热效率的变化曲线更加平滑,离散程度降低,趋于平均,更能反映空气预热器本身的换热能力。

3 案例分析

随着火电机组实施超低排放,空气预热器已经过长周期运行,出现较严重的积灰堵塞情况,蓄热元件出现较严重的破损情况。电厂对 2 台空气预热器进行了蓄热元件更换、密封间隙调整等改造工作。为准确评价改造前、后空气预热器热性能,对额定工况下的空气预热器运行参数进行计算汇总,如表 3 所示。

表 3 空气预热器设计值及运行参数

Tab.3 Air preheater design values and operating parameters

参 数	设计值	改造前		改造后	
		A 侧	B 侧	A 侧	B 侧
进口一次风温度/℃	34	26.9	26.7	29.3	28.7
进口二次风温度/℃	27	22.3	22.4	23.8	23.6
进口空气平均温度/℃	29.1	23.7	23.7	25.5	25.2
出口一次风温度/℃	328	316.0	319.6	325.8	328.8
出口二次风温度/℃	337	323.2	323.7	338.9	337.6
出口空气平均温度/℃	334.3	321.1	322.5	335.0	334.9
漏风率/%	4.5	7.9	8.2	5.2	4.6
进口烟气温度/℃	372	373.6	372.9	374.9	370.0
出口烟气温度(漏风修正)/℃	133	138.0	135.7	138.5	138.6
换热效率(未修正)/%	69.7	67.3	67.9	67.6	67.1
换热效率(修正)/%	69.7	66.7	67.2	69.0	69.6

改造完成后,随着漏风率下降,掺入烟气中的冷风量减少使得排烟温度有一定程度的升高。不进行修正,改造前的换热效率为 67.3% 和 67.9%,改造后的换热效率为 67.6% 和 67.1%,略低于改造前的

换热效率,与设计值有较大的差距,不能体现出空气预热器改造的效果,与实际情况不符。利用 XR 对换热效率进行修正后,改造后的换热效率为 69.0% 和 69.6%,与设计值基本相当,基本达到改造预期效果,空气预热器性能处于较好水平。改造前的换热效率为 66.7% 和 67.2%,低于设计值和改造后的换热效率,与实际情况一致。

4 结 论

(1) 依据逆流换热器理论换热模型,根据逆流换热器无因次变量之间的关系,提出基于 XR 修正的回转式空气预热器换热效率计算方法。与未修正的换热效率相比,该计算方法可更准确地评价空气预热器本身的换热能力。

(2) 利用在线监测系统中的历史或实时数据,可相应计算出 XR 修正的空气预热器换热效率,该方法适用于运行人员及试验人员,可更准确地了解空气预热器的实际性能及改造效果。

(3) 通过对改造前、后的空气预热器换热效率进行计算发现,改造后的换热效率与设计值基本相当,高于改造前的换热效率,基本达到改造预期效果,空气预热器性能处于较好水平。

参考文献:

- [1] 应静良,李永华,庞力平,等.电站锅炉空气预热器[M].北京:中国电力出版社,2002.
YING Jing-liang, LI Yong-hua, PANG Li-ping, et al. Air preheater for utility boilers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 刘建民,陈国庆,黄启龙,等.燃煤脱硝机组空气预热器蓄热片表面飞灰沉积板结机理研究[J].中国电机工程学报,2016,36(S1):132-139.
LIU Jian-min, CHEN Guo-qing, HUANG Qi-long, et al. Study on mechanism of fly ash deposition and hardening on the air preheater regenerative piece surface of the coal-fired and denitration unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 132-139.
- [3] 陈 珣,段学农,杨 益,等.转速对三分仓回转式空气预热器热力性能的影响[J].热能动力工程,2016,31(6):85-92,126.
CHEN Xun, DUAN Xue-nong, YANG Yi, et al. Influence of rotational speed on thermal performance of tri-sector rotary air preheaters based on finite difference method[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(6): 85-92, 126.
- [4] 朱冬生,李修真,孙晋飞,等.三维变形管与三维内肋管在管式空气预热器上的应用研究[J].热能动力工程,2018,33(4):

- 139 - 144.
- ZHU Dong-sheng, LI Xiu-zhen, SUN Jin-fei, et al. Study of the applications of three-dimensional deformed tubes and three-dimensional internally ribbed tubes in tubular air preheaters[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(4) : 139 - 144.
- [5] 白德龙, 张劲松, 解冠宇, 等. 漏风分配对回转式空气预热器热力性能的影响[J]. 动力工程学报, 2018, 38(1) : 43 - 49.
- BAI De-long, ZHANG Jin-song, XIE Guan-yu, et al. Influence of air leakage distribution on the thermodynamic performance of rotary air heater[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(1) : 43 - 49.
- [6] 王春昌, 马剑民, 张宇博, 等. 1 000 MW 机组锅炉空气预热器旁路余热利用系统节能效果分析[J]. 热力发电, 2019, 48(11) : 56 - 61.
- WANG Chun-chang, MA Jian-min, ZHANG Yu-bo, et al. Study on energy-saving effect of bypass waste heat utilization system of air preheater in a 1 000 MW unit boiler[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(11) : 56 - 61.
- [7] ASME PTC 4.3—2017, 空气预热器试验规程[S].
- ASME PTC 4.3—2017, Air heaters performance test codes [S].
- [8] 李 杨, 周元祥, 谢 天, 等. 三分仓空气预热器热力计算的简化方法[J]. 动力工程学报, 2013, 33(1) : 37 - 41.
- LI Yang, ZHOU Yuan-xiang, XIE Tian, et al. A simplified method for heat balance calculation of tri-sectional regenerative air heater [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(1) : 37 - 41.
- [9] 王洪跃, 毕小龙, 司风琪, 等. 求解回转式空气预热器传热模型的解析数值法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11) : 51 - 55.
- WANG Hong-yue, BI Xiao-long, SI Feng-qi, et al. Analytical-numerical method based on the model of heat transfer in rotary regenerator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11) : 51 - 55.
- [10] 陈 珣, 王利民, 杨 益, 等. 流动布置方式对三分仓回转式空气预热器热力性能和硫酸氢铵沉积规律的影响[J]. 热能动力工程, 2019, 34(8) : 102 - 108, 115.
- CHEN Xun, WANG Li-min, YANG Yi, et al. Influence of flow arrangement pattern on thermal performance of tri-sector rotary regenerative air pre-heater and deposition rule for ammonium bisulfate[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(8) : 102 - 108, 115.
- [11] 秦 赟, 关 欣, 顿 喆, 等. 波纹板式空气预热器内流动换热过程的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2015, 35(3) : 213 - 218.
- QIN Yun, GUAN Xin, DUN Zhe, et al. Numerical simulation on fluid flow and heat transfer in a corrugated plate air preheater [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(3) : 213 - 218.
- [12] 张知翔, 徐远纲, 王慧青, 等. ASME PTC 4.3 标准若干问题的探讨[J]. 锅炉技术, 2016, 47(2) : 27 - 31.
- ZHANG Zhi-xiang, XU Yuan-gang, WANG Hui-qing, et al. Discussion on some problems of ASME PTC 4.3 standard[J]. Boiler Technology, 2016, 47(2) : 27 - 31.
- [13] 李 杨, 井新经, 王宏武, 等. 基于效能-传热单元数的回转式空气预热器换热性能计算方法[J]. 热力发电, 2019, 48(1) : 73 - 76.
- LI Yang, JING Xin-jing, WANG Hong-wu, et al. Calculation method for heat transfer efficiency of rotary air preheaters based on effectiveness-NTU [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(1) : 73 - 76.
- [14] 陈 珣, 段学农. 基于 ASME PTC 4.3 的三分仓回转式空气预热器换热性能评价[J]. 锅炉技术, 2014, 45(2) : 18 - 22, 40.
- CHEN Xun, DUAN Xue-nong. Evaluation of the heat transfer performance of tri-sector rotary air preheater based on ASME PTC 4.3[J]. Boiler Technology, 2014, 45(2) : 18 - 22, 40.
- [15] 张知翔, 郭 睿, 王慧青. 空气预热器 X 比对排烟温度的修正方法[J]. 热力发电, 2014, 43(11) : 116 - 119.
- ZHANG Zhi-xiang, GUO Rui, WANG Hui-qing. Effect of X ratio on correction method of exhaust temperature in air heaters[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(11) : 116 - 119.
- [16] 王祝成, 梁 昊, 徐 凯, 等. 标准 ASME PTC 4.3—1968 和 ASME PTC 4.3—2017 关于空气预热器性能计算区别[J]. 热力发电, 2019, 48(5) : 25 - 30.
- WANG Zhu-cheng, LIANG Hao, XU Kai, et al. Difference in air heaters performance calculation between ASME PTC 4.3—1968 and ASME PTC 4.3—2017 [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(5) : 25 - 30.
- [17] HAUSEN H. Heat transfer in counterflow parallel flow & cross flow[M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1983.
- [18] PARKER J, BOGGS J, BLICK E. An introduction to fluid mechanics and heat transfer[M]. New Jersey: Addison-Wesley Publishing Inc., 1970.
- [19] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [20] 张 利, 李友荣. 换热器原理与计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- ZHANG Li, LI You-rong. Heat exchanger principle and calculation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.