

基于响应面分析的660 MW灵活二次再热锅炉汽温特性研究

许威,张剑,范浩杰,张忠孝

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要:以某660 MW超超临界二次再热锅炉为研究对象,建立了热力计算分区模型,研究了烟气挡板调节、烟气再循环以及摆动燃烧器对再热汽温的影响,并通过响应面回归法得出不同工况下的再热汽温回归模型。研究结果表明:锅炉最大连续蒸发量(BMCR)工况下,一次再热侧挡板每增加1%,一次再热汽温升高1.1℃,二次再热汽温降低1.8℃;回归模型能准确预测在不同调温方式作用下的再热蒸汽温度,最大误差仅4.9℃;该模型给出了蒸汽温度的影响因素显著性排序,其中,烟气挡板开度的变化对再热汽温的影响最大。

关键词:二次再热;蒸汽温度;分室模型;响应面

中图分类号:TK222 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.02.015

[引用本文格式]许威,张剑,范浩杰,等.基于响应面分析的660 MW灵活二次再热锅炉汽温特性研究[J].热能动力工程,2020,35(2):110-116. XU Wei, ZHANG Jian, FAN Hao-jie, et al. Study on the steam temperature characteristic of a 660 MW flexible double-reheat boiler based on response surface analysis[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 110-116.

Study on the Steam Temperature Characteristic of a 660 MW Flexible Double-Reheat Boiler based on Response Surface Analysis

XU Wei, ZHANG Jian, FAN Hao-jie, ZHANG Zhong-xiao

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: With a 660 MW ultra-supercritical double-reheat boiler as the research object, a thermodynamic calculation model with divided cells is established. The influence of gas damper regulation, flue gas regulation and swinging burners on reheat steam temperatures are studied. Regression models of reheat steam under different loads are obtained by response surface analysis. The results show that: For every 1% jump of damper opening in front flue, the primary reheat steam temperature rises 1.1℃ and secondary reheat steam temperature drops 1.8℃ under boiler maximum continuous rating (BMCR) condition. The regression models can predict the reheat steam temperatures under different regulation methods, and the maximum of errors is only 4.9℃. The impact order of regulating methods is obtained by the model, and the variation of dampers opening has the greatest influence on the reheat steam temperatures.

Key words: double-reheat, steam temperature, cell model, response surface

收稿日期:2018-12-19; 修订日期:2019-01-08

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0602102)

Fund-supported Project: National Key Research & Development Program of China (2017YFB0602102)

作者简介:许威(1994-),男,江苏泰州人,上海交通大学硕士研究生。

通讯作者:范浩杰(1969-),男,上海交通大学副教授, E-mail: hjfan@sjtu.edu.cn.

引言

二次再热技术是目前最为可行的高效燃煤发电技术^[1],可将机组的效率提高2%左右^[2]。二次再热在原有的一次再热基础上增加了一级再热,锅炉内部热量需重新分配,受热面布置紧凑复杂,且不同蒸汽温度之间具有较强的耦合性,给再热汽温及二次再热汽温的调节带来困难^[3]。二次再热蒸汽温度的调节主要有3种方式^[4]:烟气再循环、摆动燃烧器以及烟气挡板调节。

针对二次再热汽温的调节方式,龙志云^[5]以1000 MW 二次再热直流塔式炉为研究对象,研究了烟气循环率对再热汽温的影响,结果表明烟气再循环率每增加1%,再热汽温上升1.5℃;王林^[6]对660 MW 二次再热Ⅱ型炉的再热蒸汽影响因素进行了研究,结果表明烟气再循环率从0增加至20%时,一、二次再热汽温分别上升25.5℃及25.4℃,燃烧器角度从0°增加至20°时,一、二次再热汽温分别上升4.05℃及4.10℃;杨新民^[7]研究了3种调温方式分别对660 MW 二次再热Ⅱ型炉再热汽温的影响,并给出了一、二次再热汽温随调温方式的变化趋势以及再热汽温的调节建议;孙俊威^[8-9]及Zhang^[10]分别研究了不同再循环方案对二次再热锅炉的影响。但现有对二次再热锅炉再热汽温的研究,大多针对单一调温方式进行探究,缺少关于多种调温方式联合作用对再热汽温的影响。

本文以国电宿迁660 MW 二次再热塔式锅炉为研究对象,建立了分区热力计算模型,分别研究了不同调温方式对再热汽温的影响,并在此基础上对调温方式的交互作用进行了响应面回归分析,得出了各工况下再热汽温的回归模型,给出了再热汽温的影响因素显著性排序。

1 研究对象及模型

1.1 锅炉结构

该锅炉为超超临界二次再热直流塔式炉,型号为SG—1903/32.45—M6101,由上海锅炉厂制造,深、宽均为18.15 m,高度83.95 m,系统如图1所示。

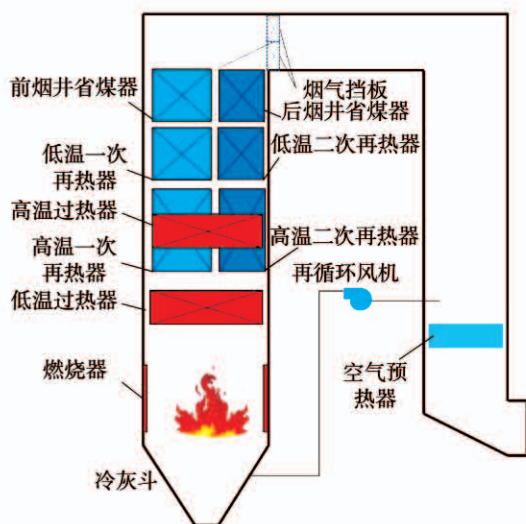


图1 二次再热锅炉系统图

Fig.1 System diagram of the double reheat boiler

该二次再热锅炉配备了3种调温方式:烟气挡板调节,摆动燃烧器以及烟气再循环。其中,挡板开度范围为30%~70%;以水平位置为基准,燃烧器摆动角度范围 $-20^{\circ} \sim +20^{\circ}$;最大再循环率为25%,再循环抽出点为空气预热器前,再循环烟气温度为300~380℃。同时,该锅炉采用了组合式受热面,将一、二次高温再热器向炉膛侧移动,并与高温过热器组合,加强了一、二次再热蒸汽的辐射吸热能力,以解决二次再热锅炉中再热蒸汽欠温的问题^[11-13]。

1.2 分区模型建立及验证

建立分区计算模型,通过将炉内复杂的受热面分成若干小区,对各个区进行相对独立的热力计算,各区计算完成后再进行整体计算,避免了复杂烟气、蒸汽流程给计算带来的困难,如图2所示。高温过热器分为4个区,一、二次再热器分别分为3个区,不同分区均以虚线隔开,高温过热器与一、二次再热器重合的部分以不同的填充图案加以区分^[14]。现有热力计算方法大多选取屏式过热器下方作为炉膛出口,并以此处的烟气温度作为炉膛出口烟温,而塔式炉的受热面全部布置在炉膛上部空间,能直接接收到炉膛的辐射热,若仍然选取屏式过热器下方作为炉膛出口,会使得水冷壁的热负荷过高,从而导致主汽温偏高^[15];且现行热力计算标准中规定布置于炉膛出口烟窗横向间距不小于700 mm的受热面

应当折算后与炉膛一起进行热力计算。因此,选取 高温再热器冷段出口作为炉膛出口。

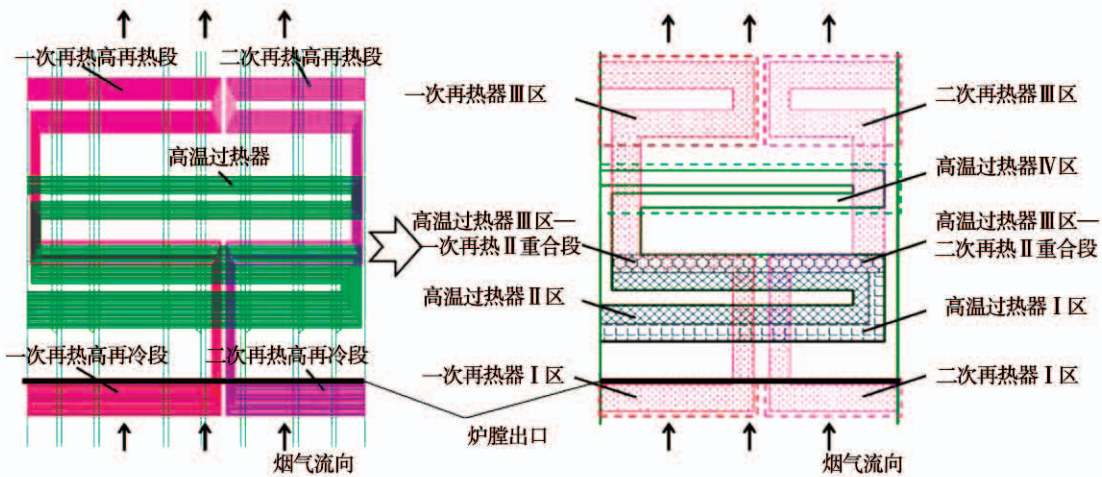


图 2 一、二次再热器分区模型

Fig. 2 Division model of primary and double reheater

利用引入修正系数后的分区模型对该锅炉进行热力计算^[14],不同工况下的计算结果与设计数据对比如图 3 所示。

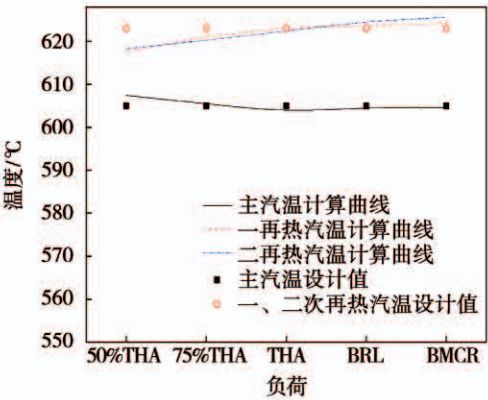


图 3 模型计算蒸汽温度与设计值比较

Fig. 3 Comparison of steam temperature between calculation results and design value

2 响应面分析

2.1 单因素对再热汽温的影响

利用该分区模型分别研究了各工况下 3 种单一调温方式对再热蒸汽温度的影响,以 BMCR 工况为例,再热汽温随调温方式的变化如图 4 所示。

从图 4 可以看出,一、二次再热蒸汽温度是随着

3 种调温方式的变化而单调变化的,其中:随着一次再热侧挡板开度增加,一次再热侧烟气份额与烟气流速增加,强化了一次再热器与烟气间的换热效果,因此一次再热蒸汽温度上升,二次再热蒸汽则反之;增加烟气再循环率与燃烧器向上摆动的调节效果类似:均降低了炉内的传热温度,使得火焰中心上移,削弱炉膛辐射换热的同时增强了对流受热面的对流换热,因此随着燃烧器向上摆动以及烟气再循环率的增加,一、二次再热蒸汽温度均增加。

但在图 4(b)中,相比较于二次再热蒸汽温度而言,一次再热蒸汽温度随着调温方式变化的曲线拐点较多,不如二次再热蒸汽温度曲线平缓,分析原因:一次再热蒸汽温度对燃烧器角度的变化并不敏感,因此有时在燃烧器角度变化较小时(如 $-10^{\circ} \sim -5^{\circ}$),一次再热汽温变化不明显,在此基础上进一步变化时,一次再热蒸汽温度才会有明显的变化(如 $-5^{\circ} \sim 10^{\circ}$)。这是造成一次再热汽温变化趋势时而平缓时而陡峭的原因。

2.2 响应面试验设计

根据 Box-Behnken 中心组合试验原理以及单因素试验结果,选取一次再热器侧挡板开度(a)、烟气再循环率(b)以及燃烧器摆动角度(c)为关键因素,每种因素取 3 个水平,如表 1 所示。

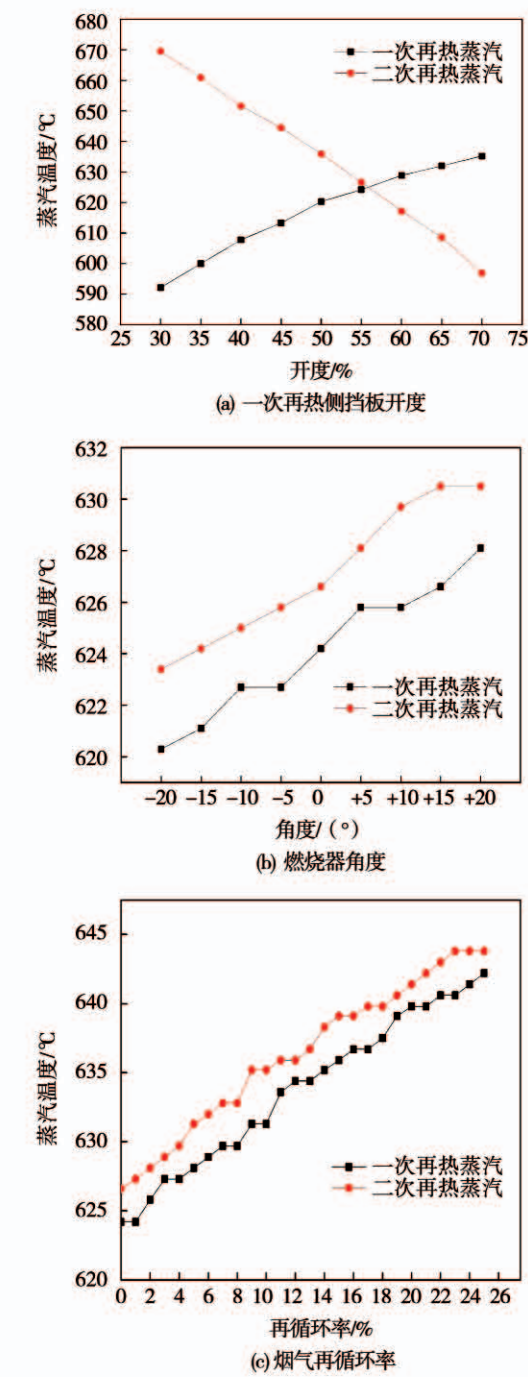


图 4 BMCR 工况下再热汽温随调温方式的变化趋势
Fig.4 Influence of different regulating methods on reheat steam temperature under BMCR

表 1 Box-Behnken 试验因素及水平
Tab.1 Variables and levels in Box-Behnken design

编码水平	a/%	b/%	c/(°)
-1	30	0	-20
0	50	12.5	0
1	70	25.0	20

根据选定的 3 个因素,对其进行响应面回归分析。试验设计与结果如表 2 所示,其中 1~12 为析因分析,13~17 为中心点试验,以估计随机误差。

表 2 BMCR 工况再热汽温 Box-Behnken 设计方案及试验结果

Tab.2 Design and results of Box-Behnken for reheat steam temperature under BMCR

试验序号	a/%	b/%	c/(°)	一次再热汽温/℃	二次再热汽温/℃
1	30	12.5	-20	595.3	664.8
2	50	0	20	621.1	635.2
3	70	12.5	20	654.7	613.3
4	50	25	20	636.7	653.1
5	30	25	0	607.0	680.5
6	70	25	0	660.2	617.2
7	50	25	-20	630.5	646.1
8	70	0	0	639.8	603.1
9	30	12.5	20	601.6	672.7
10	30	0	0	591.4	657.0
11	50	0	-20	614.3	628.9
12	70	12.5	-20	646.9	607.8
13	50	12.5	0	626.4	641.7
14	50	12.5	0	627.0	641.5
15	50	12.5	0	626.1	641.0
16	50	12.5	0	626.0	641.9
17	50	12.5	0	626.6	641.4

2.3 回归模型的建立与分析

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行回归分析,其中, T_1 、 T_2 分别为一次、二次再热蒸汽温度,且其中自变量 A、B、C 均为编码值。对模型(1)、(2)的方差分析见表 4 及表 5(“×”表示交互作用)。

$$t_1 = 626.42 + 25.788A + 8.475B + 3.388C + 1.200AB + 0.375AC - 0.15BC - 1.42A^2 - 0.397B^2 - 0.372C^2 \quad (1)$$

$$t_2 = 641.5 - 29.20A + 9.09B + 3.34C - 2.35AB - 0.6AC + 0.17BC - 1.61A^2 - 0.44B^2 - 0.24C^2 \quad (2)$$

表 4 回归模型(1)方差分析表

Tab.4 Variance analysis of regression model (1)

变异源	方差和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	6003.19	9	667.02	1110.25	<0.0001	* *
A - 挡板	5319.96	1	5319.96	8855.01	<0.0001	* *
B - 再循环率	574.61	1	574.61	956.42	<0.0001	* *
C - 摆角	91.80	1	91.80	152.80	<0.0001	* *
A × B	5.76	1	5.76	9.59	0.0174	*
A × C	0.56	1	0.56	0.94	0.3655	
B × C	0.090	1	0.090	0.15	0.7102	
A ²	8.52	1	8.52	14.18	0.0070	*
B ²	0.67	1	0.67	1.11	0.3276	
C ²	0.58	1	0.58	0.97	0.3569	
残差	4.21	7	0.60			
失拟项	3.56	3	1.19	7.32	0.0422	显著
纯误差	0.65	4	0.16			
总和	6007.40	16				

注: * *, $P < 0.01$, 差异极显著; *, $P < 0.05$, 差异显著。

表 5 回归模型(2)方差分析表

Tab.5 Variance analysis of regression model (2)

变异源	方差和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	7 607.05	8	950.88	5 264.39	<0.000 1	* *
A - 挡板	6 821.12	1	6 821.1237	763.99	<0.000 1	* *
B - 再循环率	660.66	1	660.66	3657.64	<0.000 1	* *
C - 摆角	89.11	1	89.11	493.35	<0.000 1	* *
A × B	22.09	1	22.09	122.30	<0.000 1	* *
A × C	1.44	1	1.44	7.97	0.022 4	*
A ²	10.95	1	10.95	60.61	<0.000 1	* *
B ²	0.81	1	0.81	4.46	0.067 6	
C ²	0.24	1	0.24	1.31	0.284 7	
残差	1.44	8	0.18			
失拟项	0.98	4	0.25	2.14	0.2395	不显著
纯误差	0.46	4	0.11			
总和	7 608.49	16				

回归模型(1)、(2)均极显著($P < 0.01$),失拟项 P 值分别为 0.042 2、0.239 5(失拟项 $P > 0.05$ 表示失拟项不显著,模型预测值与实际值拟合度较好),说明二次再热回归模型拟合度较好,而一次再热汽温回归模型拟合度较差,因此剔除二再汽温模型不显著因子 $B \times C$ 、 B^2 及 C^2 后重新进行回归,得到的回归模型如下:

$$t_1 = 626.08 + 25.79A + 8.28B + 3.39C + 1.20AB + 0.38AC - 1.47A^2 \tag{3}$$

重新回归后的模型仍为极显著($P < 0.01$),失拟项为 0.068 2,拟合度较好。由于回归模型为编码模型,因此各项系数大小可反映其相关性系数,对于一次再热蒸汽温度而言,显著性排序为:挡板调节 > 烟气再循环 > 摆动燃烧器 > 挡板调节 × 烟气再循环 > 挡板调节 × 摆动燃烧器(其中“×”表示交互作用,且不考虑平方项)。类似地,二次再热蒸汽温度的显著性排序:挡板调节 > 烟气再循环 > 摆动燃烧器 > 挡板调节 × 烟气再循环 > 挡板调节 × 摆动燃烧器 > 烟气再循环 × 摆动燃烧器。

其余各工况下,一次、二次再热汽温的回归模型:

锅炉额定负荷(BRL):

$$t_1 = 624.46 + 23.21A + 8.66B + 3.82C + 1.75AB + 0.17AC + 0.025BC - 6.36A^2 - 1.11B^2 - 0.33C^2 \tag{4}$$

$$t_2 = 645.6 - 37.19A + 8.49B + 3.52C - 1.55AB - 0.57AC + 0.22BC - 3.85A^2 - 1.5B^2 - 0.53C^2 \tag{5}$$

热耗率验收工况(THA):

$$t_1 = 613.3 + 25.56A + 8.89B + 3.62C + 1.95AB + 0.43AC + 0.18BC - 3.57A^2 - 1.83B^2 - 1.45C^2 \tag{6}$$

$$t_2 = 636.62 - 28.21A + 8.49B + 3.5C - 1.97AB - 0.6AC - 0.2BC - 4.45A^2 - 3.25B^2 - 1.87C^2 \tag{7}$$

75% THA:

$$t_1 = 614.38 + 22.74A + 8.21B + 3.2C + 1.38AB - 0.2BC - 2.68A^2 - 1.33B^2 - 0.75C^2 \tag{8}$$

$$t_2 = 625.4 - 23.42A + 7.71B + 3.04C - 1.18AB - 0.38AC + 0.2BC - 3.05A^2 - 1.28B^2 - 0.075C^2 \tag{9}$$

50% THA:

$$t_1 = 614.5 + 8.79A + 6.84B + 2.73C + 0.2AB - 0.23AC - 0.18BC - 0.77A^2 - 0.78B^2 \tag{10}$$

$$t_2 = 617.6 - 9.19A + 6.15B + 2.44C - 0.38AB$$

$$-0.4AC-0.17BC-0.98A^2-0.8B^2-0.03C^2 \tag{11}$$

2.4 回归模型验证

该锅炉设计工况的主汽温及一、二再汽温分别为 605、623、623 ℃。以调温方式设计值为基础,利用回归模型计算各工况下的汽温,如表 6 所示。回归模型的预测结果接近设计值,最大误差仅为 4.9 ℃,验证了回归模型的准确性。

表 6 回归模型计算结果

Tab.6 Calculation results of regression models

工况	挡板开度/%	烟气再循环率/%	燃烧器摆动角度/(°)	主汽温/℃	一次再汽温/℃	二次再汽温/℃
BMCR	55	4	-8	603.4	625.6	623.6
BRL	56.5	6	-4	601.3	625.4	627.9
THA	59	8	3	603.9	624.3	623.2
75% THA	55.5	14	12	604.7	623.3	621.3
50% THA	51.5	25	20	605.4	623.8	624.1

3 结 论

(1) BMCR 工况下,一次再热侧挡板每增加 1%,一次再热汽温升高 1.1 ℃,二次再热汽温降低 1.8 ℃;烟气再循环率每增加 1%,一次再热汽温增加 0.72 ℃,二次再热汽温增加 0.69 ℃。

(2) 回归模型能很好地反映不同调温方式对汽温的影响,预测值与设计值的最大误差为 4.9 ℃,大大简化计算的同时得出了不同调温方式及交互作用对汽温的显著性排序,其中,烟气挡板调节对再热汽温的影响最大。

参考文献:

[1] 高昊天,范浩杰,董建聪,等. 超超临界二次再热机组的发展[J]. 锅炉技术,2014(4): 1-3.
GAO Hao-tian,FAN Hao-jie,DONG Jian-cong,et al. Development of Ultra Supercritical Unit with Double Reheat cycle[J]. Boiler Technology,2014(4): 1-3.

[2] 王月明,牟春华,姚明宇,等. 二次再热技术发展与应用现状[J]. 热力发电,2017,46(8): 1-10.
WANG Yue-ming,MU Chun-hua,YAO Ming-yu,et al. Review of the development and application of double-reheat power generation

technology[J]. Thermal Power Generation,2017,46(8): 1-10.

[3] 胡尊民,于国强,爰建军,等. 1 000 MW 二次再热机组汽温控制策略[J]. 华电技术,2018,40(5): 33-37.
HU Zun-min,YU Guo-qiang,SHU Jian-jun. Control strategy on steam temperature of 1 000 MW double reheat units[J]. Huadian Technology,2018,40(5): 33-37.

[4] 莫春鸿,刘宇钢,王冬平,等. 更高参数二次再热超超临界锅炉关键技术探讨[J]. 中国电力,2018,51(9): 73-77.
MO Chun-hong,LIU Yu-gang,WANG Dong-ping,et al. Discussion on critical technologies of double-reheat ultra-supercritical boiler with higher steam parameters[J]. Electric Power,2018,51(9): 73-77.

[5] 龙志云,宋宝军. 烟气再循环份额对二次再热机组汽温的影响[J]. 电站系统工程,2018,34(3): 21-22.
LONG Zhi-yun,SONG Bao-jun. Influence of flue gas recirculation rate on temperature of double-reheater unit[J]. Power System Engineering,2018,34(3): 21-22.

[6] 王 林,杨 博,高景辉,等. 660 MW 二次再热机组锅炉再热汽温调整[J]. 热力发电,2017,46(8): 91-95.
WANG Lin,YANG Bo,GAO Jing-hui,et al. Adjustment on reheat steam temperature for a 660 MW double-reheat boiler[J]. Thermal Power Generation,2017,46(8): 91-95.

[7] 杨新民,吴恒运,茅义军. 超超临界二次再热机组再热汽温的控制[J]. 中国电力,2016,49(1): 19-22.
YANG Xin-min,WU Heng-yun,MAO Yi-jun. Reheat steam temperature control of an ultra supercritical unit with second reheat cycle[J]. Electric Power,2016,49(1): 19-22.

[8] 孙俊威,蔡 培,黄启龙,等. 烟气再循环对某 1 000 MW 超超临界二次再热锅炉运行参数的影响[J]. 动力工程学报,2018,38(11): 861-866.
SUN Jun-wei,CAI Pei,HUANG Qi-long,et al. Effect of flue gas recirculation on operation parameters of a 1 000 MW Ultra-supercritical double reheat boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2018,38(11): 861-866.

[9] 孙俊威,戴维葆,阎维平,等. 不同烟气再循环方案对 1 000 MW 超超临界二次再热锅炉的影响[J]. 热能动力工程,2019,34(5): 49-56.
SUN Jun-wei,DAI Wei-bao,YAN Wei-ping,et al. Influence of different flue gas recirculation schemes on 1 000 MW ultra-supercritical double reheat boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2019,34(5): 49-56.

[10] ZHANG Guo-qiang,XU Wen-long,WANG Xiu-yan,et al. Analysis and optimization of a coal-fired power plant under a proposed flue gas recirculation mode[J]. Energy Conversion and Management,2015,102(SI): 161-168.

- [11] 李 冬,赵诗泉. 1 000 MW 二次再热机组低负荷段二次再热汽温研究[J]. 电力科技与环保,2018,34(6): 6-8.
LI Dong,ZHAO Shi-quan. Study on the double reheat steam temperature during low load operation of 1 000 MW double reheat boiler[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection,2018,34(6): 6-8.
- [12] 党黎军,杨 辉,应文忠,等. 660 MW 超超临界锅炉再热汽温偏低问题分析及技术改造[J]. 动力工程学报,2017,37(04): 261-266.
DANG Li-jun,YANG Hui,YING Wen-zhong, et al. Analysis and technical retrofit on low reheat steam temperature of a 660 MW ultra-supercritical boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2017,37(04): 261-266.
- [13] 刘 超,刘 辉,王 林,等. 1 000 MW 二次再热机组塔式锅炉过热器与再热器优化改造[J]. 热力发电,2017,46(8): 96-100.
LIU Chao,LIU Hui,WANG Lin, et al. Optimization and reconstruction of superheater and reheater for a 1 000 MW tower type boiler with double-reheat cycle[J]. Thermal Power Generation,2017,46(8): 96-100.
- [14] 许 威,张 剑,范浩杰,等. 宽负荷下灵活二次再热超超临界锅炉调温特性研究[J]. 中国电力,2019,52(4): 119-126.
XU Wei,ZHANG Jian,FAN Hao-jie, et al. Study on steam temperature regulation characteristics in flexible ultrasupercritical boiler with double reheat cycle under wide loads[J]. Electric Power,2019,52(4): 119-126.
- [15] 李德龙. 百万等级超超临界二次再热机组锅炉特性研究[D]. 上海交通大学,2015.
LI De-long. Research on the boiler of 1 000 MW ultra supercritical double reheat units[D]. Shanghai Jiao Tong University,2015.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 109 页)

- [5] PETER RN Childs. 燃气轮机发动机内流及二次流系统(英文)[J]. 风机技术,2018,60(6): 53-58.
PETER RN Childs. Gasturbine engine internal and secondary flow systems[J]. Chinese Journal of Turbomachinery,2018,60(6): 53-58.
- [6] 唐雨萌,柳阳威,陆利蓬,等. 高速高负荷压气机叶栅损失特性实验研究[J]. 工程热物理学报,2017,38(8): 1624-1633.
TANG Yu-meng,LIU Yang-wei,LU Li-peng, et al. Experimental investigation of losses in a high-speed high-loading compressor cascade[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2017,38(8): 1624-1633.
- [7] 赵小虎,吴 云,李应红,等. 高负荷压气机叶栅分离结构及其等离子体流动控制[J]. 航空学报,2012,33(2): 208-219.
ZHAO Xiao-hu,WU Yun,LI Ying-hong, et al. Separation structure and plasma flow control on highly loaded compressor cascade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2012,33(2): 208-219.
- [8] CARSTENS V,SCHMITT S. Comparison of theoretical and experimental data for an oscillating transonic compressor cascade[R]. ASME,GT99-408,1999.
- [9] 魏 巍,刘 波,杜 炜,等. 可控扩散叶型与双圆弧叶型实验对比研究[J]. 推进技术,2017,38(1): 61-68.
WEI Wei,LIU Bo,DU Wei, et al. Experimental comparison of controlled diffusion airfoils with double circle airfoils[J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(1): 61-68.
- [10] 潘若痴,孙 鹏,徐文峰,等. 高负荷风扇末级静叶气动特性试验研究[J]. 热能动力工程,2016,31(7): 47-54,133-134.
PAN Ruo-chi,SUN Peng,XU Wen-feng, et al. Experimental study on aerodynamic characteristics of end stage static blade of a high load fan[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2016,31(7): 47-54,133-134.
- [11] 陶立权,孙 鹏,杨 坤,等. 高负荷风扇静叶气动特性的实验与数值研究[J]. 推进技术,2015,36(9): 1331-1338.
TAO Li-quan,SUN Peng,YANG Kun, et al. Experimental and numerical investigation on aerodynamic performance of a highly loaded fan stator[J]. Journal of Propulsion Technology,2015,36(9): 1331-1338.
- [12] HUNT J C R,ABELL C J,PETERKA J A, et al. Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles, applying topology to flow visualization[J]. Journal of Fluid Mechanics,2006,86(1): 179-200.
- [13] 康 顺. 拓扑方法在叶栅三元流场分析中的应用(I)-表面摩擦力线和截面流线的拓扑法则[J]. 应用数学和力学,1990,11(5): 457-462.
KANG Shun. Application of topological method to the analysis of three-dimensional flow field in Cascades (I)-topological rules of surface friction lines and section streamlines[J]. Applied Mathematics and Mechanics,1990,11(5): 457-462.

(姜雪梅 编辑)