

660 MW 超超临界机组不同炉型高温再热器管壁温度分布规律研究

王小华,刘瑞鹏,丁奕文,陈 敏

(西安热工研究院有限公司苏州分公司,江苏 苏州 215153)

摘 要: 为了解塔式锅炉高温再热器分布规律,并与Ⅱ型锅炉做比较,以国内已投运的几大锅炉厂生产的设计再热蒸汽温度为 623 ℃ 的Ⅱ型锅炉和 ALSTOM 公司生产的塔式锅炉为研究对象,比较了两种炉型下的高温再热器管壁温度的分布规律。研究表明:Ⅱ型锅炉高温再热器管壁温度呈现“M”型分布,塔式锅炉的管壁温度呈现出“Ⅱ”型分布;同等蒸汽温度水平下,塔式锅炉高温再热器最高点温度比Ⅱ型锅炉要低,660 MW 负荷下塔式锅炉 A、B 侧的再热蒸汽温度分别为 620.3 和 619.3 ℃,同时再热器管壁温度最高点温度值为 626.3 ℃,比Ⅱ型锅炉低 12.7 ~ 18.1 ℃,提高了再热器管材的安全裕量。

关 键 词: 超超临界机组;Ⅱ型锅炉;塔式锅炉;高温再热器;管壁温度;超温;分布规律

中图分类号:TK229 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.07.023

[引用本文格式]王小华,刘瑞鹏,丁奕文,等. 660 MW 超超临界机组不同炉型高温再热器管壁温度分布规律研究[J]. 热能动力工程,2021,36(7):145-150. WANG Xiao-hua, LIU Rui-peng, DING Yi-wen, et al. Study on 660 MW ultra supercritical unit of different furnace type high temperature reheater tube wall temperature distribution [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(7):145-150.

Study on 660 MW Ultra Supercritical Unit of Different Furnace Type High Temperature Reheater Tube Wall Temperature Distribution

WANG Xiao-hua, LIU Rui-peng, DING Yi-wen, CHEN Min

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co. Ltd., Suzhou Branch, Suzhou, China, Post Code: 215153)

Abstract: In order to understand the distribution law of high temperature reheater in tower boiler and compared with Ⅱ type boiler, the Ⅱ type boiler produced by several major domestic boiler factories with 623 ℃ reheat steam temperature and the tower boiler produced by Alstom company are taken as the research objects. The distribution law of the tube wall temperature of the high temperature reheater under the two furnace types is compared. It is found that the tube wall temperature of high temperature reheater of Ⅱ type boiler presents “M” type distribution, while that of tower type boiler presents “Ⅱ” type distribution. At the same steam temperature level, the highest temperature of high temperature reheater of tower boiler is lower than that of Ⅱ type boiler. Under the load of 660 MW, the reheat steam temperature of A and B sides of tower boiler is 620.3 ℃ and 619.3 ℃, respectively. At the same time, the highest temperature of reheater tube wall is 626.3 ℃, which is 12.7 ~ 18.1 ℃ lower than that of Ⅱ type boiler, which improves the safety margin of reheater tube.

Key words: ultra supercritical unit, Ⅱ type boiler, tower boiler, high temperature reheater, tube wall temperature, over temperature, distribution law

引 言

炉膛出口残余旋转的存在造成的左右侧烟温偏差和汽温偏差所引发的过热器、再热器局部超温爆管,是四角切圆燃烧方式锅炉最突出且棘手的问题。随着机组容量的增加,这一现象更趋严重。相较于Π型锅炉,塔式锅炉从根本上解决了由于水平烟道烟气能量不平衡所带来的过热器、再热器超温问题^[1-8]。同时,塔式锅炉具有布置占地小、受热面磨损小并且停炉检查和维护方便等优点,受到越来越多电厂的青睐。

为了解塔式锅炉高温再热器管壁温度的分布规律并与Π型锅炉高温再热器管壁温度做比较,以国内已投运的几大锅炉厂生产的再热蒸汽温度为623℃的Π型锅炉与ALSTOM公司生产的塔式锅炉为研究对象,研究不同炉型下再热器管壁温度分布规律,并阐述了不同炉型下高温再热器管壁温度的调整方法。为今后锅炉的选型及锅炉厂燃烧器和受热面的设计提供参考。

1 锅炉概述

选取了东方锅炉厂、上海锅炉厂和哈尔滨锅炉厂生产的再热蒸汽温度为623℃的超超临界参数Π型布置锅炉以及ALSTOM生产的同参数塔式锅炉为研究对象。

东方锅炉厂生产的锅炉为超超临界参数变压运行直流炉,锅炉采用前后墙对冲燃烧方式,一次中间再热、单炉膛、平衡通风、固态排渣、露天Π型布置。锅炉主要设计参数及结构参数如表1和表2所示。

上海锅炉厂生产的锅炉为超超临界参数变压直流炉,锅炉为四角切圆燃烧方式,单炉膛、一次再热、平衡通风、半露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构Π型锅炉。锅炉主要设计参数及结构参数如表3和表4所示。

哈尔滨锅炉厂生产的锅炉为超超临界参数变压直流炉,锅炉为墙式切圆燃烧方式,单炉膛、一次再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构Π型锅炉。锅炉主要设计参数及结构参数如表5和表6所示。

表 1 (东方锅炉)主要设计参数
Tab. 1 Main design parameters of boiler(Dongfang Boiler)

参 数	锅炉最大连续 蒸发量(BMCR)	锅炉额定蒸 发量(BRL)
主蒸汽流量/t · h ⁻¹	1 950	1 887. 31
主蒸汽温度/℃	605	605
主蒸汽压力/MPa	29. 40	29. 31
再热器进口压力/MPa	5. 80	5. 60
再热器进口温度/℃	353	347
再热器出口压力/MPa	5. 61	5. 41
再热器出口温度/℃	623	623
再热蒸汽流量/t · h ⁻¹	1 563. 58	1 510. 61
给水温度/℃	308	305

表 2 (东方锅炉)几何尺寸和计算值
Tab. 2 Geometric dimension and calculation
value of boiler (Dongfang Boiler)

参 数	数值
炉膛断面(宽/深/高)/mm	22 162. 4/15 456. 8/65 000
顶棚标高/mm	72 500
顶板高度/mm	84 900
炉膛容积/m ³	19 659. 4
炉膛有效辐射受热面/m ²	6 761. 7
燃烧器区域受热面积/m ²	1 029
顶层燃烧器中心到屏底的距离/m	25. 836 9
底层燃烧器至冷灰斗折角的距离/m	3. 259 8
炉膛容积热负荷/kW · m ⁻³	76. 13
炉膛截面热负荷/MW · m ⁻²	4. 37
燃烧器区域壁面热负荷/MW · m ⁻²	1. 45
炉膛出口烟气温度/℃	965
屏式过热器底部烟气温度/℃	1 294

表 3 (上海锅炉)主要设计参数
Tab. 3 Main design parameters of boiler(Shanghai Boiler)

参 数	锅炉最大连续 蒸发量(BMCR)	锅炉额定蒸 发量(BRL)
主蒸汽流量/t · h ⁻¹	1 978	1 920
主蒸汽温度/℃	605	605
主蒸汽压力/MPa	29. 30	29. 22
再热器进口压力/MPa	5. 56	5. 37
再热器进口温度/℃	353	347
再热器出口压力/MPa	5. 36	5. 17
再热器出口温度/℃	623	623
再热蒸汽流量/t · h ⁻¹	1 566. 00	1 515. 00
给水温度/℃	301	298

表 4 （上海锅炉）几何尺寸和计算值

Tab.4 Geometric dimension and calculation value of boiler(Shanghai Boiler)	
参 数	数值
炉膛断面(宽/深/高)/mm	18 816/18 816/61 383
炉顶管中心标高/mm	75 500
大板梁底标高/mm	84 100
炉膛容积/m ³	20 852.0
炉膛容积热负荷/kW·m ⁻³	73.61
炉膛截面热负荷/MW·m ⁻²	4.335
燃烧器区域壁面热负荷/MW·m ⁻²	1.643
炉膛出口烟气温度/℃	992
屏式过热器底部烟气温度/℃	1 321

表 5 （哈尔滨锅炉）主要设计参数

Tab.5 Main design parameters of boiler(Harbin Boiler)		
参 数	锅炉最大连续	锅炉额定蒸
	蒸发量(BMCR)	发量(BRL)
主蒸汽流量/t·h ⁻¹	1 968.6	1 911.3
主蒸汽温度/℃	605	605
主蒸汽压力/MPa	29.30	29.22
再热器进口压力/MPa	5.82	5.61
再热器进口温度/℃	356.5	350.5
再热器出口压力/MPa	5.6	5.4
再热器出口温度/℃	623	623
再热蒸汽流量/t·h ⁻¹	1 653.10	1 597.10
给水温度/℃	301	298

表 6 （哈尔滨锅炉）几何尺寸和计算值

Tab.6 Geometric dimension and calculation value of boiler (Harbin Boiler)	
参 数	数值
炉膛断面(宽/深/高)/mm	19 268/19 230/68 250
顶棚标高/mm	74 800
顶层燃烧器中心到屏底的距离/m	21.550
炉膛容积/m ³	20 556
炉膛容积热负荷/kW·m ⁻³	78.00
炉膛截面热负荷/MW·m ⁻²	4.35
燃烧器区域壁面热负荷/MW·m ⁻²	1.52
炉膛出口烟气温度/℃	957
屏式过热器底部烟气温度/℃	1 306

Ⅱ型锅炉炉膛下部由膜式水冷壁和垂直水冷壁构成,炉膛上部布置有屏式过热器,炉膛出口折焰角处布置有高温过热器,高温再热器布置在水平烟道,后烟井分为双烟道,前烟道布置有低温再热器和省煤器,后烟道布置有低温过热器和省煤器。

ALSTOM 生产的锅炉为超超临界参数变压运行螺旋管圈直流炉,锅炉采用四角切圆燃烧方式,固态排渣、单炉膛、一次再热、平衡通风、露天布置、全钢结构架、全悬吊塔型结构。锅炉主要设计参数及结构参数如表 7 和表 8 所示。

表 7 （ALSTOM 锅炉）主要设计参数

Tab.7 Main design parameters of boiler(Alstom Boiler)		
参 数	锅炉最大连续 蒸发量(BMCR)	锅炉额定蒸 发量(BRL)
主蒸汽流量/t·h ⁻¹	2 025.5	1 929.1
主蒸汽温度/℃	605	605
主蒸汽压力/MPa	29.30	29.30
再热器进口压力/MPa	5.85	5.54
再热器进口温度/℃	361	352
再热器出口压力/MPa	5.68	5.38
再热器出口温度/℃	623	623
再热蒸汽流量/t·h ⁻¹	1 692.2	1 605.7
给水温度/℃	306	302

表 8 （ALSTOM 锅炉）几何尺寸和计算值

Tab.8 Geometric dimension and calculation value of boiler(Alstom Boiler)	
参 数	数值
炉膛断面(宽/深)/mm	19 320/19 320
炉顶管中心标高/mm	100 094
大板梁底标高/mm	108 000
顶层燃烧器中心到屏底的距离/m	22.66
炉膛容积/m ³	20 020
炉膛容积热负荷/kW·m ⁻³	78.92
炉膛截面热负荷/MW·m ⁻²	4.22
燃烧器区域壁面热负荷/MW·m ⁻²	1.21
炉膛出口烟气温度/℃	977
屏式过热器底部烟气温度/℃	1 223

塔式锅炉炉膛下部由膜式水冷壁和垂直水冷壁构成,炉膛出口布置有屏式过热器、高温过热器、高温再热器、低温过热器、低温再热器、二级省煤器和一级省煤器。

从Ⅱ型炉和塔式炉的结构参数看,塔式炉比Ⅱ型炉高出 25 m 左右,屏式过热器底部烟气温度较Ⅱ型炉低 60 ~ 98 ℃ 不等。

2 两种炉型高温再热器管壁温度分布规律

2.1 Ⅱ型锅炉高温再热器管壁温度分布规律

额定负荷下,参考再热器管壁温度偏差的调整方法,在保证蒸汽参数和管壁不超温的前提下,对高温再热器管壁温度偏差进行了优化调整,3 个Ⅱ型锅炉的高温再热器管壁温度分布如图 1 所示,统计的机组蒸汽参数汇总如表 9 所示。

从 3 个Ⅱ型锅炉高温再热器管壁温度分布图可以看出,高温再热器管壁温度呈现不规则的“M”型分布规律。上海锅炉厂和哈尔滨锅炉厂的切圆燃烧锅炉在炉膛区域,无论是顺时针还是逆时针旋转气流,射流从喷口喷出后,将在炉膛中心形成一个强烈旋转的上升气流。但由于射流间的挤压和离心力的作用,实际切圆大小是假想切圆直径的 8 倍左右,而在炉膛中心和近墙面处,将是垂直速度极低的微风区,流速低,即便有屏式过热器的切割作用,也无法完全消除残余旋转。由于残余旋转的存在,烟气进入水平烟道后,造成了烟温和烟速的偏差,这是形成高温再热器管壁温度分布规律的根本

原因^[8-10]。对于东方锅炉厂的对冲燃烧锅炉而言,由于没有残余旋转的影响,其温度分布较切圆燃烧锅炉已有所改善。相对而言,其受热负荷分布的影响更大^[11]。

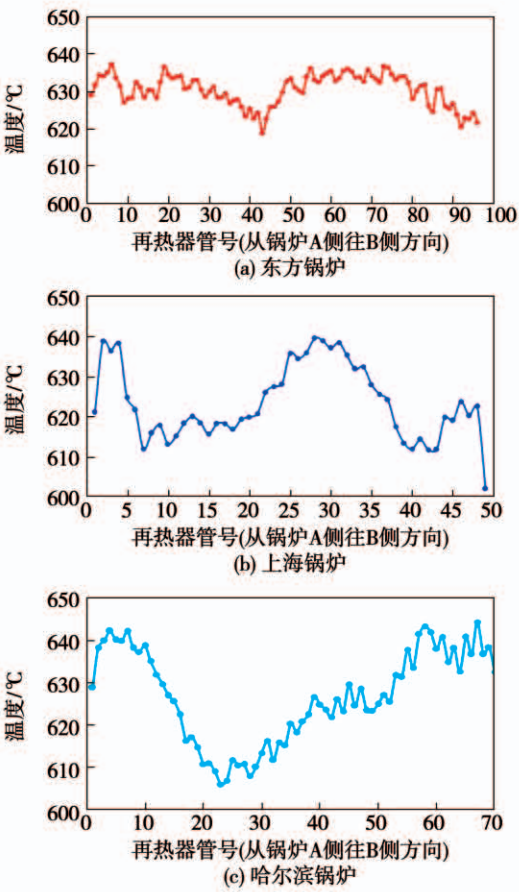


图 1 3 个Ⅱ型锅炉高温再热器管壁温度分布
Fig. 1 Temperature distribution of heating surface tube wall of three II type boilers

表 9 3 个Ⅱ型锅炉主要蒸汽参数汇总

Tab. 9 Summary of main steam parameters of three II type boilers

锅炉厂	机组负荷/MW	磨煤机组合方式	主蒸汽温度(A/B)/℃	再热蒸汽温度(A/B)/℃	高温再热器管壁最高点位置	高温再热器管壁最高点温度值/℃	高温再热器管壁最低点位置	高温再热器管壁最低点温度值/℃
东方锅炉	659.9	ABCDE	601.6/601.8	620.5/620.5	第 6 屏	639.0	第 43 屏	598.8
上海锅炉	670.2	ABCDEF	596.2/600.7	622.8/622.4	第 27 屏	639.5	第 48 屏	602.2
哈尔滨锅炉	660.0	ABCDE	597.0/599.0	618.6/617.4	第 4 屏	644.4	第 22 屏	606.1

统计数据表明,上述机组在 660 MW 负荷下,主、再热蒸汽均能达到设计值,且偏差不超过 5 ℃。但最高点管壁温度值均较高,超过了 639 ℃,最高点与最低点管壁温度差值在 37 ~ 40 ℃ 之间。但需要

说明的是,上述数据是在负荷稳定状态下获得的,随着运行工况的变化,管壁温度最高点有超温的风险(超温报警值为 642 ~ 648 ℃)。

2.2 塔式锅炉高温再热器管壁温度分布规律

为进一步消除残余旋转对高温再热管壁温度的影响,ALSTOM 公司设计了地毯式固定燃尽风系统,SOFA 风燃烧器包括前后墙各 6 个喷口和左右墙各两个喷口,分别从前后左右四面墙喷入炉膛。

塔式锅炉的高温再热器管壁温度分布如图 2 所示,统计的机组蒸汽参数汇总如表 10 所示。

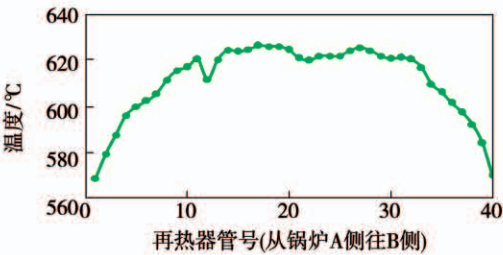


图 2 塔式锅炉高温再热器管壁温度分布
Fig.2 Temperature distribution of heating surface tube wall of tower boilers

表 10 塔式锅炉主要蒸汽参数汇总

Tab.10 Summary of main steam parameters of tower boiler	
参 数	数值
机组负荷/MW	657.9
磨煤机组合方式	ABCDE
燃烧器摆角位置(1 号/2 号/3 号/4 号)/°	32/32/32/32
主蒸汽温度(A/B)/°C	600.7/602.5
再热蒸汽温度(A/B)/°C	620.3/619.3
高温再热器管壁最高点位置	第 16 屏 12 号管
高温再热器管壁最高点温度值/°C	626.3
高温再热器管壁最低点位置	第 40 屏 12 号管
高温再热器管壁最低点温度值/°C	568.5

从管壁温度分布和统计数据可以看出,在 660 MW 负荷下,将主、再热蒸汽温度提升至额定参数时,塔式锅炉的管壁温度呈现出“Π”型分布规律,这可能与地毯式燃尽风设计有关。当带有残余旋转的气流进入燃尽风区域时,由于四面墙气流的挤压作用,将抬高炉膛中间区域的火焰高度。同时,燃尽风穿透至炉膛中心区域,加速了气流的混合,有利于残余旋转的消除。中心区域吸热明显增强,但也造成近壁区域流速低,吸热较弱。

统计数据表明,管壁温度最高点温度值仅为

626.3℃,较Ⅱ型锅炉壁温最高点低 12.7~18.1℃,有利于管壁温度的控制,提高了再热器管材的安全裕量。但塔式锅炉管壁温度最高点与最低点偏差值达到 57.8℃,仍需进一步优化设计。

3 再热蒸汽和管壁温度偏差的调整方法

选取了机组蒸汽温度和受热面管壁温度最高的再热器作为研究对象,阐述了两种炉型下高温再热器管壁温度的调整方法,并比较了两种炉型下高温再热器管壁温度的分布规律。

对于切圆燃烧方式锅炉,再热蒸汽和管壁温度及偏差的主要调整手段包括过/再热烟气挡板开度、燃烧器摆角、燃尽风摆角、风门挡板开度、磨煤机组合方式^[12-14]。而对于前后墙对冲燃烧方式锅炉,再热蒸汽和管壁温度及偏差的主要调整手段包括过/再热烟气挡板开度、燃烧器拉杆位置、燃尽风拉杆位置、燃尽风门挡板开度、磨煤机组合方式^[14-16]。两种燃烧方式下的调整手段基本一致。

4 结 论

(1) 相较于Ⅱ型锅炉,塔式锅炉从根本上解决了由于水平烟道烟气能量不平衡所带来的过热器、再热器超温问题。同时,塔式布置占地小、受热面磨损小、停炉检查和维护方便。

(2) 以国内已投运的几大锅炉厂生产的再热蒸汽温度为 623℃的Ⅱ型锅炉与 ALSTOM 公司生产的塔式锅炉为研究对象,比较了两种炉型下的高温再热器管壁温度的分布规律。研究发现,Ⅱ型锅炉高温再热器管壁温度呈现“M”型分布规律,塔式锅炉的管壁温度呈现出“Π”型分布规律。

(3) 660 MW 负荷下,在同等再热蒸汽温度水平下,塔式锅炉最高点温度值仅为 626.3℃,较Ⅱ型锅炉壁温最高点低 12.7~18.1℃,有利于管壁温度的控制,提高了再热器管材的安全裕量。

(4) 但塔式锅炉管壁温度最高点与最低点偏差值达到 57.8℃,仍需进一步优化设计。

参考文献:

[1] 范浩杰,朱 敬,刘金生,等.切向燃烧锅炉超大型化后的选型[J].动力工程,2006,26(3):342-345.
FAN Hao-jie,ZHU Jing,LIU Jin-sheng,et al. Type option for super

- enlarged tangentially fired boilers[J]. Jouurnal of Power Engineering, 2006, 26(3): 342-345.
- [2] 叶勇健. 1 000 MW 机组塔式锅炉与 II 型锅炉之比较[J]. 锅炉技术, 2007, 38(4): 1-5.
- YE Yong-jian. Technical comparison of tower type boiler and two pass tpey boiler in 1 000 MW unit[J]. Boiler Technology, 2007, 38(4): 1-5.
- [3] 梁奎. 塔式锅炉与 II 型锅炉特点对比[J]. 中国特种设备安全, 2011, 28(2): 12-14.
- LIANG Kui. Comparison of tower boiler and II type boiler[J]. China Special Equipment Safety, 2011, 28(2): 12-14.
- [4] 马新立. 1 000 MW 超超临界塔式锅炉特点及调试技术[J]. 锅炉制造, 2009, 213(1): 5-9.
- MA Xin-li. The characteristic and commissioning technique of 1 000 MW ultra-supercritical tower type boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2009, 213(1): 5-9.
- [5] 高子瑜, 徐雪元, 姚丹花. 1 000 MW 超超临界锅炉塔式锅炉设计特点[J]. 锅炉技术, 2006, 37(1): 1-5.
- GAO Zi-yu, XU Xue-yuan, YAO Dan-hua. The design characteristics of 1 000 MW ultra supercritical tower type boiler[J]. Boiler Technology, 2006, 37(1): 1-5.
- [6] 冯伟忠. 900 MW 超临界塔式锅炉的技术特点[J]. 动力工程, 2006, 26(1): 15-20.
- FENG Wei-zhong. A 900 MW supercritical tower boiler's technical characteristics[J]. Jouurnal of Power Engineering, 2006, 26(1): 15-20.
- [7] 张腾飞. 660 MW 超超临界塔式炉机组四大管道布置[J]. 低碳技术, 2018(11): 45-46.
- ZHANG Teng-fei. Layout of four pipelines for 660 MW ultra supercritical tower boiler unit[J]. Low Carbon World, 2018(11): 45-46.
- [8] 董师宏. 660 MW 超超临界塔式锅炉优化设计[J]. 能源研究与信息, 2017, 33(3): 167-172.
- DONG Shi-hong. Optimized design of 660 MW ultra-supercritical tower-type boiler[J]. Energy Research and Information, 2017, 33(3): 167-172.
- [9] 刘福国. 四角切圆燃烧锅炉炉膛出口烟速、烟温偏差的防治[J]. 山东电力技术, 1997, 93(1): 6-8.
- LIU Fu-guo. The cure to the gas velocity and temperature deviation in tangential firing furnace exit[J]. Shandong Electric Power, 1997, 93(1): 6-8.
- [10] 张才根, 庄文贤. 锅炉两侧烟温差的起因及改善措施探讨[J]. 锅炉技术, 1992(2): 1-6.
- ZHANG Cai-gen, ZHUANG Wen-xian. Discussion on the causes and improvement measures of flue gas temperature difference on both sides of boiler[J]. Boiler Technology, 1992(2): 1-6.
- [11] 李文军, 黄伟, 阳剑平, 等. 600 MW 超临界锅炉燃烧特性运行分析[J]. 湖南电力, 2005, (25): 45-48.
- LI Wen-jun, HUANG Wei, YANG Jian-ping, et al. Operation analysis of combustion characteristics of 600 MW Supercritical Boiler[J]. Hunan Electric Power, 2005, (25): 45-48.
- [12] 刘基昌, 方庆艳, 马仑, 等. SOFA 风速度偏置对 660 MW 塔式锅炉烟温偏差影响的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2019, 39(4): 257-266.
- LIU Ji-chang, FANG Qing-yan, MA Lun, et al. Effects of SOFA velocity bias setting on the flue gas temperature deviation of a 660 MW tangentially-fired tower-type boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(4): 257-266.
- [13] 王小华, 梅振锋, 陈敏, 等. 超超临界二次再热机组塔式锅炉再热器管壁温度优化调整试验[J]. 热力发电, 2017, 46(8): 101-106.
- WANG Xiao-hua, MEI Zhen-feng, CHEN Min, et al. Experimental study on optimization of metal temperature of reheater of ultra supercritical double reheat boiler[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 101-106.
- [14] 王小华, 俞胜捷, 薛晓奎, 等. 再热汽温为 623 ℃ 的再热器管壁温度优化调整[J]. 热力发电, 2018, 47(6): 91-97.
- WANG Xiao-hua, YU Sheng-jie, XUE Xiao-lei, et al. Optimization and adjustment of reheater tube wall temperature with reheater steam temperature of 623 ℃ [J]. Thermal power generation, 2018, 47(6): 91-97.
- [15] 王小华, 赵鹏, 刘瑞鹏, 等. 东方百万机组锅炉管壁温度分布规律研究与应用[J]. 热能动力工程, 2019, 34(11): 131-139.
- WANG Xiao-hua, ZHAO Peng, LIU Rui-peng, et al. Research and application of temperature distribution law of boiler tube wall in Dongfang million unitsr[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(11): 131-139.
- [16] 宁志, 何金龟, 王小华, 等. 1 000 MW 超超临界机组锅炉再热蒸汽温度优化调整试验[J]. 热能动力工程, 2018, 33(12): 111-116.
- NING Zhi, HE Jin-gui, WANG Xiao-hua, et al. Experimental study on Optimization of reheated steam temperature of 1 000 MW Ultra Supercritical Unit Boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(12): 111-116.

(刘颖 编辑)