

# 600 MW 燃煤锅炉二次汽欠温改造及实施效果

严林博<sup>1</sup>, 何伯述<sup>1</sup>, 孟建国<sup>2</sup>, 曹建臣<sup>2</sup>

(1 北京交通大学 机电学院, 北京 100044; 2 河北大唐国际王滩发电有限责任公司, 河北 唐山 063611)

**摘 要:** 某电厂 1 号锅炉自投运以来, 一直存在在非满负荷下二次汽温达不到设计温度即二次汽欠温的问题, 对锅炉运行的安全性和经济性带来了不利影响, 急需对此进行改造治理。从长期运行数据及热平衡分析看, 锅炉的原受热面布置不合理, 需要进行改造。在详细热力校核计算的基础上提出了前分隔屏截短 1、2 和 3 m 的 3 种改造方案。通过热力计算结果的全面对比分析, 选择对锅炉高温屏式受热面进行截短 2 m 的改造。改造完成后, 锅炉运行稳定, 非满负荷下二次汽温欠温问题得到了解决, 取得了满意的改造效果。

**关 键 词:** 煤粉锅炉; 二次汽欠温; 分隔屏; 热力计算

中图分类号: TK223.3 文献标识码: A

## 引 言

某电厂一期工程 2×600 MW 锅炉是根据美国 ABB-CE 公司技术设计、制造的, 配 600 MW 汽轮发电机组, 亚临界压力带一次中间再热控制循环汽包锅炉。该锅炉采用平衡通风中速磨正压直吹式送粉系统, 以烟煤为燃料。锅炉在最大连续负荷 (BMCR) 工况下, 最大蒸发量为 2 030 t/h, 过热器、再热器蒸汽出口温度为 541 °C, 给水温度为 282.5 °C。

该电厂一期 1 号锅炉自投产以来, 满负荷下主要运行参数基本都能达到设计值, 但锅炉一直存在非满负荷下二次汽欠温的问题, 如 75% THA (汽轮机热耗验收工况) 时, 末级再热器出口汽温统计值为 535.35 °C; 50% THA 时统计值为 530.77 °C, 而非满负荷时再热器出口汽温设计值都为 541 °C。此外, 锅炉运行各负荷工况时, 左右侧汽温偏差也比较严重, 包括过热汽温和再热汽温。

非满负荷下二次汽欠温, 一方面减小了机组热力循环的温差, 机组循环热效率会降低; 另一方面, 二次汽欠温还会使乏汽的干度下降, 过多含水湿蒸气 (水滴) 冲击汽机叶片, 降低汽轮机组的内效率。这些都严重威胁锅炉机组长期安全、稳定、经济运行, 急需对锅炉受热面进行全面分析并实施相应的

技术改造。

国内一些电厂, 例如哈三电厂、北仑电厂等也曾出现过二次汽欠温的问题。哈三电厂采取的改造方案是: 将省煤器面积减少 2 536 m<sup>2</sup>, 同时将末级再热器面积增加 585 m<sup>2</sup>; 北仑电厂采取的主要方案是:

(1) 燃烧器改造; (2) 墙式再热器入口联箱到前墙辐射再热器出口联箱加装旁路管; (3) 后屏再热器加长 3 050 mm, 面积约增加 890 m<sup>2</sup> 等等<sup>[1]</sup>。这些改造方案对解决某电厂二次汽欠温问题具有一定的借鉴意义, 在初期改造方案设计中也对类似上述电厂的改造方案进行了校核热力计算, 发现如果减少省煤器的受热面积, 会导致锅炉蒸汽产量下降, 进而会导致锅炉出力不足或过热器减温水过量; 如果增加再热器受热面, 会降低尾部烟道的烟温, 使省煤器吸热减少, 从而降低锅炉的蒸汽产量, 同时还有使再热器超温的风险。经过对大量改造方案的热力校核计算、分析及对比, 最终决定将某电厂 1 号锅炉的改造重心放在截短锅炉前分隔屏上, 通过初步理论分析提出了将分隔屏截短 1、2 和 3 m 的 3 种方案, 并进行了相应的热力校核计算和数值模拟研究以确定这 3 种方案的可行性, 为实施锅炉受热面改造提供理论依据。

## 1 改造方案及分析

### 1.1 改造方案

以某电厂一期 1 号锅炉为对象, 锅炉燃烧设计煤种 (开滦煤) 在不同负荷 (100% THA、75% THA 和 50% THA) 条件下, 对前分隔屏分别进行截短 1、2 和 3 m 的改造。改造方案如图 1 所示 (图中阴影部分为截除部分)。分隔屏截短 1 m 面积减少约 5.29%; 分隔屏截短 2 m 面积减少约 10.58%; 分隔屏截短 3 m 面积减少约 15.87%。

收稿日期: 2010-01-06 修订日期: 2010-09-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2009 BZ017-1)

作者简介: 严林博 (1987-), 男, 陕西华阴人, 北京交通大学博士研究生。

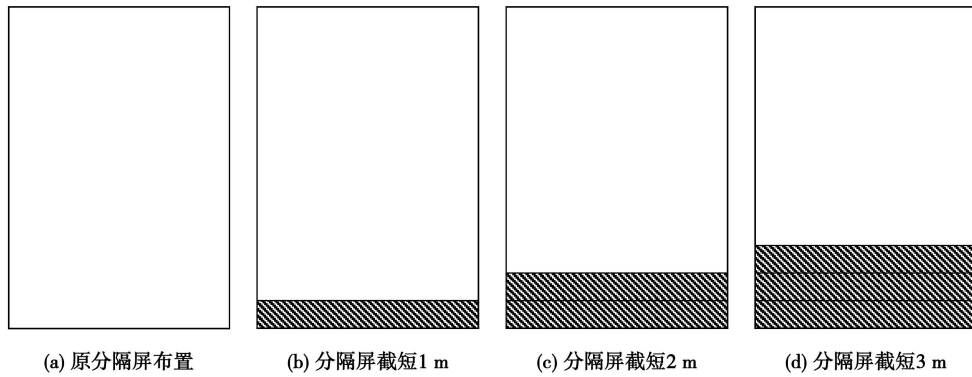


图 1 原分隔屏及其截短改造后的示意图

1.2 校核热力计算结果及分析

根据锅炉热力校核计算的原理<sup>[2-7]</sup>, 编写了热力校核计算程序对锅炉进行了全面的热力校核计算<sup>[8]</sup>。为了确定热力计算的可靠性, 将锅炉实际运行参数和校核工况下的热力计算结果进行了比较, 如表 1 所示。同时, 为了说明各个改造方案的理论

改造效果的差异, 将各个改造方案的热力计算结果也进行了比较分析。不同负荷下, 对校核工况和改造方案进行热力计算得出的锅炉关键热力参数的结果如表 2~表 4 所示, 不同负荷下各改造方案的热力计算结果汇总如表 5 所示。

表 1 校核热力计算结果和锅炉实际运行参数对比 (开滦煤)

	100% THA		75% THA		50% THA	
	计算值	统计值	计算值	统计值	计算值	统计值
过热减温水总量 $\Delta D / t \cdot h^{-1}$	122.45	121.00	83.47	89.01	68.79	80.12
低过出口汽温 $T_2 / ^\circ C$	405.66	407.08	400.98	400.88	406.08	404.98
分隔屏入口汽温 $T_2 / ^\circ C$	388.24	378.00	384.31	375.35	363.21	345.62
后屏出口汽温 $T_2 / ^\circ C$	518.85	510.99	526.30	521.06	535.83	534.82
未过入口汽温 $T_2 / ^\circ C$	500.32	500.61	508.13	509.12	515.36	515.55
未过出口汽温 $T_2 / ^\circ C$	540.63	542.29	540.80	543.86	541.09	543.65
再热减温水总量 $/ t \cdot h^{-1}$	24.77	24.40	0.00	2.10	0.00	0.02
未再出口汽温 $T_2 / ^\circ C$	541.22	544.37	535.73	535.35	530.57	530.77
排烟温度 $T_2 / ^\circ C$	122.59	113.26	119.63	98.63	104.84	92.14
锅炉计算热效率 $\eta / \%$	92.83	93.66	92.55	93.35	92.70	93.90

表 2 100% THA 负荷时校核工况及各改造方案下锅炉运行参数的热力计算结果 (开滦煤)

	校核工况	截短 1 m	截短 2 m	截短 3 m
一次汽出口压力 $P_1 / MPa$	17.27	17.27	17.27	17.27
一次汽出口温度 $T_1 / ^\circ C$	540.63	540.92	540.92	540.92
二次汽进口压力 $P_v / MPa$	3.32	3.32	3.32	3.32
二次汽出口压力 $P_o / MPa$	3.16	3.16	3.16	3.16
二次汽出口温度 $T_2 / ^\circ C$	541.22	541.24	541.26	541.28
锅筒工作压力 $P_j / MPa$	18.59	18.59	18.59	18.59
排烟损失 $q_3 / \%$	4.81	4.82	4.82	4.82
化学不完全燃烧损失 $q_3 / \%$	1.06	1.06	1.06	1.06

续表 2 100% THA负荷时校核工况及各改造方案下锅炉运行参数的热力计算结果(开滦煤)

	校核工况	截短 1 m	截短 2 m	截短 3 m
机械不完全燃烧损失 $q_4/\%$	0.80	0.80	0.80	0.80
散热损失 $q_5/\%$	0.20	0.20	0.20	0.20
灰渣物理热损失 $q_6/\%$	0.30	0.30	0.30	0.30
锅炉效率 $\eta_1/\%$	92.83	92.82	92.82	92.82
过热器一级减温水 $\Delta D_1 / t \cdot h^{-1}$	81.64	49.31	46.68	44.01
过热器二级减温水 $\Delta D_2 / t \cdot h^{-1}$	40.81	24.65	23.33	22.00
喷水总量 $\Delta D / t \cdot h^{-1}$	122.45	73.96	70.01	66.01

表 3 75% THA负荷时校核工况及各改造方案下锅炉运行参数的热力计算结果(开滦煤)

	校核工况	截短 1 m	截短 2 m	截短 3 m
一次汽出口压力 $P_1 / MPa$	17.00	17.00	17.00	17.00
一次汽出口温度 $T_1 / ^\circ C$	540.80	541.14	541.14	541.14
二次汽进口压力 $P_i / MPa$	2.53	2.53	2.53	2.53
二次汽出口压力 $P_o / MPa$	2.41	2.41	2.41	2.41
二次汽出口温度 $T_2 / ^\circ C$	535.73	537.07	538.39	539.74
锅筒工作压力 $P / MPa$	17.66	17.66	17.66	17.66
排烟损失 $q_2/\%$	5.09	5.09	5.10	5.10
化学不完全燃烧损失 $q_3/\%$	1.06	1.06	1.06	1.06
机械不完全燃烧损失 $q_4/\%$	0.8	0.8	0.8	0.8
散热损失 $q_5/\%$	0.2	0.2	0.2	0.2
灰渣物理热损失 $q_6/\%$	0.3	0.3	0.3	0.3
锅炉效率 $\eta_1/\%$	92.55	92.55	92.54	92.54
过热器一级减温水 $\Delta D_1 / t \cdot h^{-1}$	55.65	33.48	31.41	29.32
过热器二级减温水 $\Delta D_2 / t \cdot h^{-1}$	27.82	16.74	15.70	14.66
喷水总量 $\Delta D / t \cdot h^{-1}$	83.47	50.22	47.11	43.98

表 4 50% THA负荷时校核工况及各改造方案下锅炉运行参数的热力计算结果(开滦煤)

	校核工况	截短 1 m	截短 2 m	截短 3 m
一次汽出口压力 $P_1 / MPa$	9.44	9.44	9.44	9.44
一次汽出口温度 $T_1 / ^\circ C$	541.09	541.08	541.08	541.07
二次汽进口压力 $P_i / MPa$	1.71	1.71	1.71	1.71
二次汽出口压力 $P_o / MPa$	1.63	1.63	1.63	1.63
二次汽出口温度 $T_2 / ^\circ C$	530.57	531.94	533.29	534.30
锅筒工作压力 $P / MPa$	9.76	9.76	9.76	9.76
排烟损失 $q_2/\%$	4.94	4.95	4.95	4.96
化学不完全燃烧损失 $q_3/\%$	1.06	1.06	1.06	1.06
机械不完全燃烧损失 $q_4/\%$	0.8	0.8	0.8	0.8
散热损失 $q_5/\%$	0.2	0.2	0.2	0.2
灰渣物理热损失 $q_6/\%$	0.3	0.3	0.3	0.3
锅炉效率 $\eta_1/\%$	92.70	92.69	92.69	92.68
过热器一级减温水 $\Delta D_1 / t \cdot h^{-1}$	51.59	36.46	34.70	33.04
过热器二级减温水 $\Delta D_2 / t \cdot h^{-1}$	17.20	12.15	11.57	11.01
喷水总量 $\Delta D / t \cdot h^{-1}$	68.79	48.61	46.27	44.05

表 5 热力计算结果简单汇总

	锅炉效率 /%	过热器喷水总量 / t · h <sup>-1</sup>
100% THA	92.83	122.45
校核工况	75% THA	92.55
	50% THA	92.70
100% THA	92.82	73.92
	截短 1 m	75% THA
50% THA		92.69
100% THA	92.82	70.01
	截短 2 m	75% THA
50% THA		92.69
100% THA	92.82	66.01
	截短 3 m	75% THA
50% THA		92.68

从表 1 可以看出, 热力校核计算的主要结果和锅炉实际运行参数基本一致, 可以认为计算结果可靠。将分隔屏截短后, 机组非满负荷下二次汽温有所上升, 过热器减温水量也有所下降。分隔屏截短越多, 非满负荷下二次汽温度上升越多, 过热器减温水量下降也越多。但是, 截短分隔屏对残余旋转气流的切割作用可能会减弱, 水平烟道入口可能会出现局部烟气短路通道, 对水平烟道中残余旋转导致的左右侧汽温偏差可能会恶化, 即汽温偏差可能更严重。分隔屏截短后炉膛出口流场的变化可以通过冷炉空气动力场试验或数值模拟进行全面了解。对锅炉等温烟气流场进行的数值模拟显示, 前分隔屏截短后在水平烟道入口没有形成烟气走廊<sup>[9]</sup>。

综合二次汽温度变化情况、左右侧速度偏差变化情况、机组运行经济性和数值模拟结果等因素, 最终选择了对前分隔屏截短 2 m 改造。

## 2 改造后实际运行结果

为了比较改造前后的锅炉运行状况变化, 采集了 600、450 以及 300 MW 负荷工况改造前后的运行表盘参数。由于锅炉截屏改造之后投入运行时间较短, 没有采集到 300 MW 负荷工况的稳定运行数据, 以 325 MW 负荷工况下的运行数据加以修正后进行计算。

### 2.1 改造的安全性

实施改造后, 锅炉在各负荷下运行正常, 运行期间没有出现安全隐患, 因此可以认为改造是安全的。

### 2.2 改造对一次汽温度的影响

由于改造减少了一次汽的受热面, 因此是否会对一次汽的温度造成重大影响一直是改造前的重大顾虑之一。通过对改造后的锅炉不同负荷下运行数据的统计, 表明改造前后的一次汽温度并没有太大的变化, 可以保证各负荷下的主汽温度, 如表 6 所示。

表 6 改造前后一次汽温度对比

负荷 /MW	改造前一次汽温度 /°C	改造后一次汽温度 /°C	改造前后差值 /°C
600	542.29	541.16	-1.13
450	543.86	543.61	-0.25
300	543.65	543.09	-0.56

### 2.3 改造对二次汽温度的影响

本次改造的主要目的就是解决在非满负荷工况下二次汽欠温的问题, 统计的运行数据显示这个问题得到了很好的解决<sup>[10]</sup>, 如表 7 所示。

表 7 改造前后二次汽温度对比

负荷 /MW	改造前二次汽温度 /°C	改造后二次汽温度 /°C	改造前后差值 /°C	修正后差值 /°C
600	544.37	547.10	2.73	0.00
450	535.35	546.21	10.86	5.65
300	530.77	546.61	15.84	10.23

由表 7 可见, 在所有的负荷工况下, 二次汽均没有出现欠温问题, 甚至存在轻微的超温现象 (可以通过运行调整予以解决)。综合改造前后不同负荷稳定工况下的二次汽温统计值, 改造后约使二次汽温度上升 10 °C。按 70% 负荷率考虑, 由此使发电煤耗下降约 1.19 g/(kW·h), 各工况下发电煤耗变化分别为 -0.273/-1.09/-1.58 g/(kW·h)。但是若考虑到超温现象的存在, 则应将二次汽温加以修正再进行计算。修正后计算结果为改造后约使二次汽温度上升 8 °C。按 70% 负荷率考虑, 由此使发电煤耗下降 0.65 g/(kW·h), 各工况下发电煤耗变化分别为 0.00/-0.57/-1.02 g/(kW·h)。

### 2.4 改造对左右侧汽温偏差的影响

统计的运行数据显示, 受热面改造实施后, 左右侧汽温偏差问题得到了一定的改善, 由于改造前大多数负荷再热器减温水量几乎为零, 故此仅列出过热器减温水量作为对比, 如表 8 所示。可以看到, 与

改造前相比,相同负荷下改造后左右侧减温水量的比值在减小,说明左右侧热偏差有好转的趋势。过热器减水量也有所下降,各个负荷平均下降 30 t/h 左右,有助于提高锅炉机组运行的安全性和经济性。

表 8 改造前后左右侧过热器减水量对比

负荷 /MW	改造前过热器减水量 /t h <sup>-1</sup>			改造后过热器减水量 /t h <sup>-1</sup>		
	左侧	右侧	左右侧比值	左侧	右侧	左右侧比值
600	77.17	43.83	1.76	53.40	37.60	1.42
450	59.22	29.79	1.99	31.22	22.79	1.37
300	45.40	34.72	1.31	26.90	33.22	0.81*

\*—右侧比左侧的值为 1.12

### 2.5 改造对排烟温度的影响

热力校核计算结果表明,改造实施后,排烟温度将会有一定的上升,统计的运行数据体现了这一计算结果(高于计算值,这可能是由于实际使用的入炉煤种与计算采用的设计煤种的差异导致的),如表 9 所示。

表 9 改造前后排烟温度对比

负荷 /MW	改造前排烟温度 /℃	改造后排烟温度 /℃	改造前后差值 /℃
600	113.26	116.66	3.40
450	98.63	101.76	3.13
300	92.14	95.10	2.96

综合改造前后不同负荷稳定工况的排烟温度统计值,改造后约使排烟温度上升 3.1℃。按 70%负荷率考虑,由此使发电煤耗上升 0.52 g/(kW·h)(此值仍小于因分隔屏截短导致的发电煤耗下降值),各工况下发电煤耗变化分别为 0.57/0.53/0.50 g/(kW·h)。进一步的改造方案应该考虑在保证省煤器出口工质欠焓不致过低,即保证水动力循环安全的情况下,适当增加布置省煤器的受热面积,以降低排烟温度,进一步提升锅炉的整体经济性。

### 3 结论

针对某电厂 1 号锅炉实际运行中存在的非满负荷下二次汽欠温问题,提出了 3 种改造方案。通过全面的热力校核计算及经济性估算,最终对锅炉受热面分隔屏实施截短 2 m 改造,改造后非满负荷下

二次汽欠温问题得到了很好地解决,过热器的左右偏差问题也相应地得到了改善,但排烟温度有所上升。通过本次改造得到以下结论:

(1) 采用实施截短 2 m 改造方案治理二次汽欠温,非满负荷下二次汽温均上升了 10℃以上,圆满的解决了该问题,同时使 75% 和 50% THA 工况下机组煤耗分别下降约 0.57 和 1.02 g/(kW·h)。提高了机组的经济性。

(2) 截短分隔屏后,一次汽温没有明显下降,从满负荷到 50% THA 温度分别下降了 1.13、0.25 和 0.56℃。截屏后,各负荷下过热系统减水量平均下降约 30 t/h 有助于提高锅炉机组运行的安全性和经济性。

(3) 改造前后过热器左右两侧减水量的大小对比可以看出,分隔屏截短后,过热器左右两侧汽温偏差得到了改善。

(4) 截屏后排烟温度有所上升,600、450 和 300 MW 工况下分别上升了 3.40、3.13 和 2.96℃,在一定程度上削减了二次汽温上升带来的经济利益。建议在保证省煤器出口欠焓不致过低的情况下适当增加布置省煤器受热面来解决该问题。

### 参考文献:

- [1] 罗洪新,徐海康.国产首台 600 MW 二次汽温和空气预热器入口烟温偏低的原因分析和采取的对策[J].黑龙江电力,2000,22(3):32-34.
- [2] 严林博.哈锅 660 MW 四角切圆煤粉锅炉受热面优化研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [3] 冯俊凯,沈幼庭.锅炉原理及计算[M].第二版.北京:科学出版社,2002.
- [4] 中国动力工程学会.火力发电设备技术手册(锅炉)[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [5] 胡荫平.电站锅炉手册[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [6] 李振全,尹艳山,张国尼,等.我国电站锅炉热力计算方法应用的现状[J].锅炉技术,2006,37(3):41-44.
- [7] 霍志红,唐必光,张志学.电站锅炉热力计算软件的改进与完善[J].锅炉技术,2003,34(1):65-67.
- [8] 何伯述,李鸣扬,严林博.锅炉热力计算软件 V1.0 [J].计算机软件著作权(软著登字第 B.22489 号)2009-08.
- [9] 严林博,何伯述,裴晓辉,等.截短过热器分隔屏治理再热汽欠温的数值模拟研究[J].热能动力工程,2011,26(1):67-72.
- [10] 孟建国,曹建臣,严林博,等.通过受热面改造解决再热汽温低问题[J].华北电力技术,2010,4:27-31.

(编辑 陈 滨)

this purpose a method for modeling an air and flue gas system of a turbocharged boiler based on a fluid network was presented. The fluid network models for various parts of the air and flue gas system of the turbocharged boiler were also established. The fluid network was used to obtain and calculate the coupling relationship between the flow rate and pressure of the system in question. A comparison of the simulation results and test data shows that the model under discussion enjoys a relatively high precision. On this basis the influence of a change in air and flue gas flow resistance on the performance of the turbocharged unit was further analyzed. It has been found that to increase the flue gas flow resistance of the boiler will result in an increase of the power consumed by the compressor and the power provided by the flue gas turbine will decrease accordingly. The power supplemented by the auxiliary steam turbine will increase and the steam supply capacity of the boiler will decrease correspondingly. The foregoing can offer reference for matching design of a turbocharged unit for a turbocharged boiler. Key words: turbocharged boiler; air and flue gas system; fluid network; simulation and modeling; resistance characteristics

600 MW燃煤锅炉二次汽欠温改造及实施效果 = Modification of a 600 MW Coal-fired Boiler Due to an Excessively Low Temperature of the Secondary Steam and Its Implementation Effectiveness [刊, 汉] YAN Lin-bo, HE Bao-shu (College of Electromechanical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, Post Code: 100044), MENG Jian-guo, CAO Jian-chen (Hebei Datang International Wangan Power Generation Co. Ltd, Tangshan, China, Post Code: 063611) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26 (3). — 328 ~ 332

Since its operation, No. 1 boiler of a power plant exists all along a problem of its secondary steam not reaching the design temperature at non-full loads, i.e. an excessively low temperature of the secondary steam, bringing about an adverse effect on the safety and cost-effectiveness of the boiler operation. A modification and rectification is urgently needed. As viewed from the long-term operation data and thermal balance analysis, the original heating surface of the boiler was not arranged most rationally and needed to be reconstructed. For this purpose, on the basis of a detailed check of the thermal calculation, three versions by cutting short the partition panel were presented for the reconstruction, i.e. cutting short the partition panel by 1, 2 and 3 meters respectively. Through a comprehensive contrast and analysis of the thermal calculation results, the modification of cutting short the high temperature platen of the boiler by 2 meters was chosen. After the reconstruction, the boiler realized a stable operation and the problem of the excessively low temperature of the secondary steam was solved with a satisfactory modification result being achieved. Key words: pulverized coal-fired boiler; excessively low temperature of secondary steam; partition panel; modification; thermal calculation

旋流对高温空气燃烧影响的模拟研究 = Numerical Simulation of the Influence of a Swirling Flow on High Temperature Air Combustion [刊, 汉] SU Ya-xin, WANG Wen-hui, DENG Wen-yi (College of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, China, 201620). // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26 (3). — 333 ~ 337