

过热器分配集箱三通区域静压分布试验研究

袁益超, 柯帅康, 徐国鹏, 曾宪钰

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 热偏差与汽温偏差是大型电站锅炉过热器与再热器系统运行过程中存在的主要问题, 也是导致过热器与再热器受热面超温爆管的主要原因。过热器与再热器系统采用三通引入、引出结构会产生较大的蒸汽流量偏差和热偏差, 甚至导致受热面超温爆管。针对某 660 MW 超临界锅炉炉顶过热器分配集箱三通区域部分管子超温爆管问题, 根据该过热器分配集箱的三通引入结构及受热面布置特点, 对进口三通区域的静压分布进行试验研究, 揭示了三通两侧分流比、三通区域支管分流比不同时三通涡流区的影响范围、三通涡流区不同部位以及三通两侧集箱的静压分布规律, 指出进口三通区域涡流是该锅炉炉顶过热器超温爆管的主要原因, 并提出了行之有效的对策。

关键词: 锅炉; 过热器; 再热器; 三通; 静压分布; 流量偏差

中图分类号: TK 175 **文献标志码:** A

Experimental study on the static pressure distribution in the T-junction of the distribution header

YUAN Yichao, KE Shuaikang, XU Guopeng, ZENG Xianyu

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The thermal deviation and steam temperature deviation are the main problems during the operation of superheater and reheater systems of large utility boilers, and also the main cause for the tube failure of superheaters and reheaters. The T-junction inlet and outlet mode of steam in the superheater and reheater system can result in obvious steam flow deviation and thermal deviation, and even the tube failure. An experimental study on the static pressure distribution in the T-junction was conducted to analyze the cause for the tube failure in the T-junction of the roof superheater distribution header in a 660 MW super critical boiler, according to the structure characteristics of the T-junction inlet of the distribution header and the arrangement of tubers of the roof superheater. The coverage of the vortices and the static pressure distribution in the T-junction at different conditions were revealed. The main cause for the tube failure of the roof superheater is the vortices in the T-junction. The effective countermeasure is put forward.

Keywords: boiler; superheater; reheater; T-junction; static pressure distribution; flow rate deviation

大型电站锅炉过热器与再热器系统各级之间采用径向引入、引出集箱的导汽管可简化炉顶导汽管布置,减小阻力^[1],但分配集箱三通区域涡流会使部分管子流量减小而超温爆管^[2]。为此,王孟浩等^[3-4]通过无支管三通试验研究,揭示了三通区域涡流的影响范围以及三通两侧分流比为1:1,0:1时三通区域周向特定部位和两侧集箱轴向静压分布规律;分析了三通两侧集箱及三通区域支管分流对三通区域和两侧集箱静压分布的影响,但文中未给出三通区域有支管时的相关试验结果。罗永浩等^[5]通过无支管三通试验获得了两侧分流比1:1时特定部位及不同分流比时正母线上的静压分布,通过有支管三通试验获得了两侧分流比对支管入口阻力系数的影响规律。卫飞飞等^[6]针对三通引入、引出集箱的并联管组模型进行试验和数值模拟,获得了三通两侧支管数比不同时分配、汇集集箱侧母线上的静压分布。此外,不少学者基于三通区域静压分布的数值模拟研究提出了一些改进措施^[7-10]。但是,对于有支管三通区域静压分布及其变化规律的系统性试验研究成果一直未见报道。

随着600~1000 MW超临界、超超临界机组的批量投运,锅炉过热、再热汽温已分别高达605℃和623℃,过热器与再热器高温管屏壁温更加接近

所用钢材的允许温度,为此,一方面通过燃烧器及燃烧系统优化设计以调整沿宽度方向的热负荷偏差^[11],另一方面通过增加受热面壁温测点以根据实际运行时壁温分布和超温情况进行燃烧调整,减小热负荷偏差^[12]。但是,由于燃烧工况受多种因素影响,运行过程中烟气侧热负荷偏差总是不可避免,而蒸汽流量偏差主要决定于结构设计,如二者匹配不合理,则可能导致受热面超温甚至爆管^[11,13]。

本文针对某660 MW超临界锅炉炉顶过热器超温爆管问题,对其分配集箱三通区域的静压分布开展试验研究,以分析超温爆管原因,并提出相应对策。

1 锅炉及事故概况

某电厂660 MW超临界锅炉的过热蒸汽分两路由内径203 mm等径三通进入炉顶过热器分配集箱,其中一部分过热蒸汽由分配集箱上均匀分布的4根旁通管直接引至尾部烟道前、后包覆过热器。炉顶过热器沿集箱长度方向以管间距112 mm布置177根 $\phi 63.5 \times 12.5$ mm管子,如图1所示。在锅炉运行过程中,炉顶过热器进口三通区域引出的第39,45,133,139号管在距前墙约2.5 m处发生超温爆管,大致位置如图1所示。

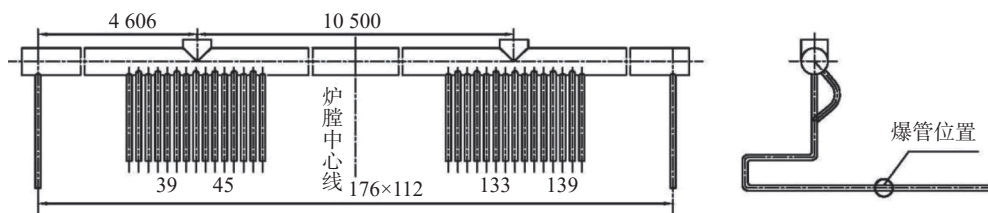


图1 炉顶过热器布置及爆管位置示意图

Fig.1 Schematic of the roof superheater arrangement and the tube failure position

2 试验系统及数据处理

2.1 试验系统

根据该过热器爆管特点,本文采用如图2所示的试验系统,以空气代替实际高温高压蒸汽,对分配集箱三通区域静压分布进行试验。环境空气由鼓风机送入有支管三通模型,经各支管及三通左、右侧集箱排出。试验过程中,通过风机转速、支管上调节阀及两侧集箱上调风挡板调节进入三通模型的风量及由各支管和三通左、右侧集箱排出的风量。

2.2 试验模型及测点布置

采用有机玻璃按实际进口三通1:1加工了有支管三通模型(见图2),其中,在三通区域及其两侧集箱上布置15根支管,支管内径、管间距及其引出位置、引出方式与实际产品相同,并沿右侧母线、右下40°线、右下16°线和正母线以一定间距(112 mm)布置静压测点,如图3所示。

2.3 试验仪表及试验数据处理方法

试验过程中,用毕托管测量进入三通总风量及左、右侧集箱排出风量,用精度1.5%的DN50孔板流量计测量各支管风量;用精度0.2%的EJA120A

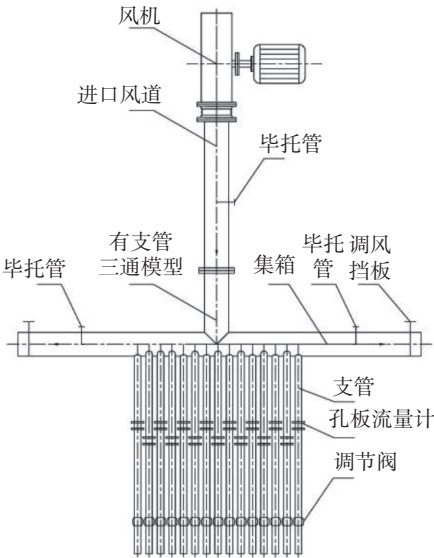


图2 分配集箱三通区域静压分布试验系统示意图

Fig.2 Schematic of the experiment system for the static pressure distribution in the T-junction of the distribution header

型差压变送器测量毕托管动压及孔板流量计压差，用精度0.15%FS的MSI 9116型压力扫描系统测量毕托管所在截面、孔板流量计进口及三通模型各部位的静压，用A级精度Pt100铂电阻测量

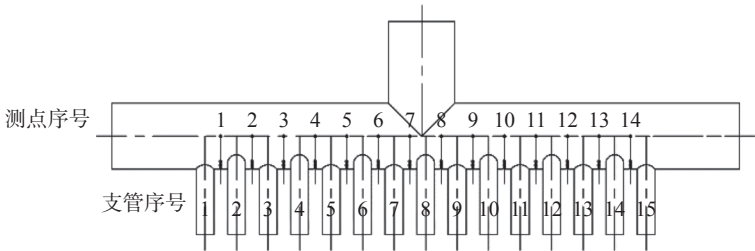


图3 有支管三通模型静压测点布置

Fig.3 Layout of static pressure measuring points for T-junction with branch tubes

3 试验结果及分析

3.1 三通区域及两侧集箱静压分布特性

图4为三通区域支管分流比 $\alpha=0.1366$ (当炉顶过热器所有管子流量分配均匀时，所研究的三通区域15根管子流量之和与进入该三通的总流量之比)、三通两侧分流比 R (三通左、右侧集箱排出风量之比)为1:1时三通区域及两侧集箱静压分布。进入三通的气流因向两侧集箱分流，在转弯处形成涡流，即一次涡流^[3]；与此同时，入流气流

风温。为了达到通用性的目的，用欧拉数 Eu 表示三通区域静压，用雷诺数 Re 表示三通进口空气流速，用无量纲长度 X/D 表示沿集箱长度方向各测点的位置，其中： X 为各测点所在截面与三通轴向引入管轴线之间的距离， D 为三通内径。

雷诺数 Re 为

$$Re = \frac{uD}{\nu}$$

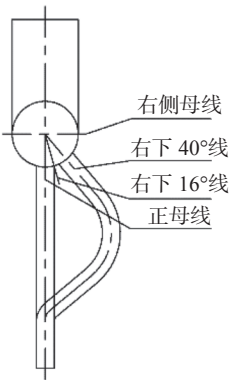
式中： u 为三通进口空气流速，m/s； ν 为三通进口处空气运动粘度， m^2/s 。

欧拉数 Eu 为

$$Eu = \frac{P_i - P_0}{\rho u^2}$$

式中： p_i 为各测点静压，Pa； p_0 为三通进口处静压，Pa； ρ 为三通进口处空气密度， kg/m^3 。

由于实际过热器内的流动已进入第二自模区^[5]，为确保试验结果能反映实际运行工况，本文所有试验工况的 Re 为 $7.49 \times 10^5 \sim 8.65 \times 10^5$ ，均大于三通区域流动进入第二自模区的临界 Re ^[14]。根据误差传布原理^[15]，所有试验工况下欧拉数 Eu 的最大误差为4.35%。



冲击三通引入管正前方壁面后，少量从三通区域支管分流，绝大部分则回流，形成涡流，即二次涡流^[3]，如图5所示。由于涡流的影响，正母线、右下16°线和右下40°线上沿集箱轴向静压及其分布基本相同，即：三通引入管正对处附近静压最高，最高静压接近于入流气流的动压，往两侧静压急剧降低，静压最低点位于 $X/D=\pm 1.5$ 附近；侧母线上静压明显较低，不过，静压最高点依然位于三通引入管正对处附近，往两侧静压逐渐降低，静压最低点位于 $X/D=\pm 1.0$ 附近。当 $|X/D|>2.0$

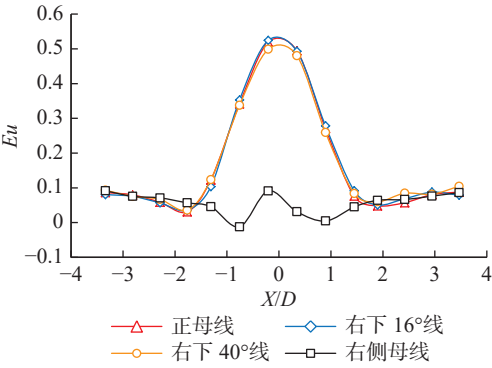


图 4 支管分流比 $\alpha=0.1366$ 、两侧分流比 $R=1:1$ 时三通区域及两侧集箱静压分布

Fig. 4 The static pressure distribution in the T-junction and the distribution header when R is 1:1 and α is 0.1366

时，正母线、右下 16°线、右下 40°线及侧母线上沿集箱轴向静压基本相同，且均随 $|X/D|$ 的增大而增大。上述表明，三通涡流区的影响范围约为 $-2.0 \leq X/D \leq 2.0$ ，此范围以外的静压分布符合轴向引入集箱时的静压分布规律。

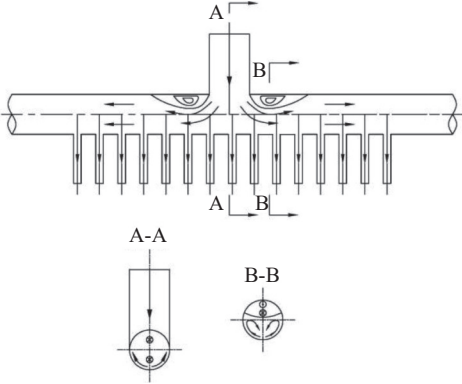


图 5 分配集箱三通区域流态示意图

Fig.5 Schematic of the flow pattern in the T-junction of the distribution header

3.2 三通两侧分流比对三通区域及两侧集箱静压分布的影响

图 6 为三通区域支管分流比 $\alpha=0.1366$ 、三通两侧分流比 R 分别为 1:1.25 和 1:1.5 时三通区域及两侧集箱静压分布，图 7 为支管分流比 $\alpha=0.1366$ 、三通两侧分流比 R 不同时三通区域及两侧集箱不同部位静压分布的比较。

由图 4、图 6、图 7 可以看出：在 $R=1:1$ 时，三通区域及两侧集箱静压分布基本对称(图中偏移主要是研究对象的结构不对称所致)。随着三通两侧分流比 R 的变化，三通区域及两侧集箱静压分布规律基本不变，但三通涡流区最低静压(位于侧母线上)有所降低，静压最低点出现在流量较大一侧，且该侧集箱内静压也有所降低，而在流

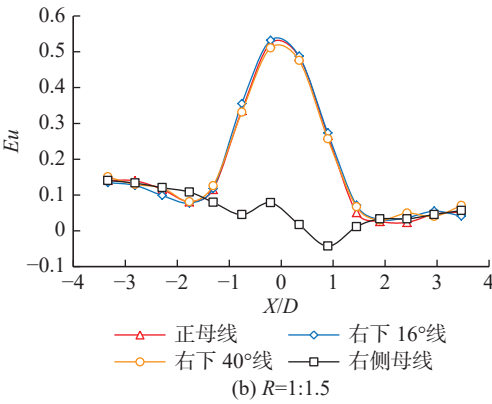
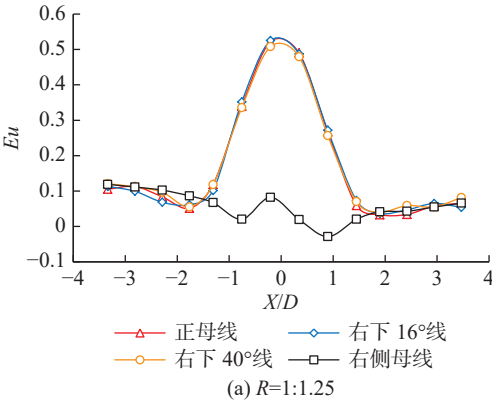


图 6 支管分流比 $\alpha=0.1366$ 、两侧分流比 R 不同时三通区域及两侧集箱静压分布

Fig. 6 The static pressure distribution in the T-junction and the distribution header at different flow rate ratio R when α is 0.1366

量较小一侧，涡流区最低静压(位于侧母线上)及集箱内静压均有所升高。上述表明，两侧分流比变化对侧母线上静压的影响相对较大，不过，对三通涡流区范围的影响不明显。

3.3 支管分流比对三通区域及两侧集箱静压分布的影响

图 8 为三通两侧分流比 $R=1:1$ 时，支管分流比 α 对三通区域及两侧集箱静压分布的影响。

从图 8 可以看出：支管分流比 α 变化对三通区域正母线、右下 16°线和右下 40°线上静压及其分布规律的影响不明显；随着支管分流比 α 的增大，侧母线上静压分布规律也没有变化，静压虽有所升高，但仍明显低于其他部位。上述表明，三通区域支管分流的抽吸作用会减弱三通区域二次涡流，但减弱程度有限。三通两侧集箱静压随着支管分流比 α 的增大而升高，但静压分布仍符合轴向引入时集箱的静压分布规律。

总体而言，支管分流比不同时支管三通区域的静压分布与无支管的^[3,4,14]基本相同。

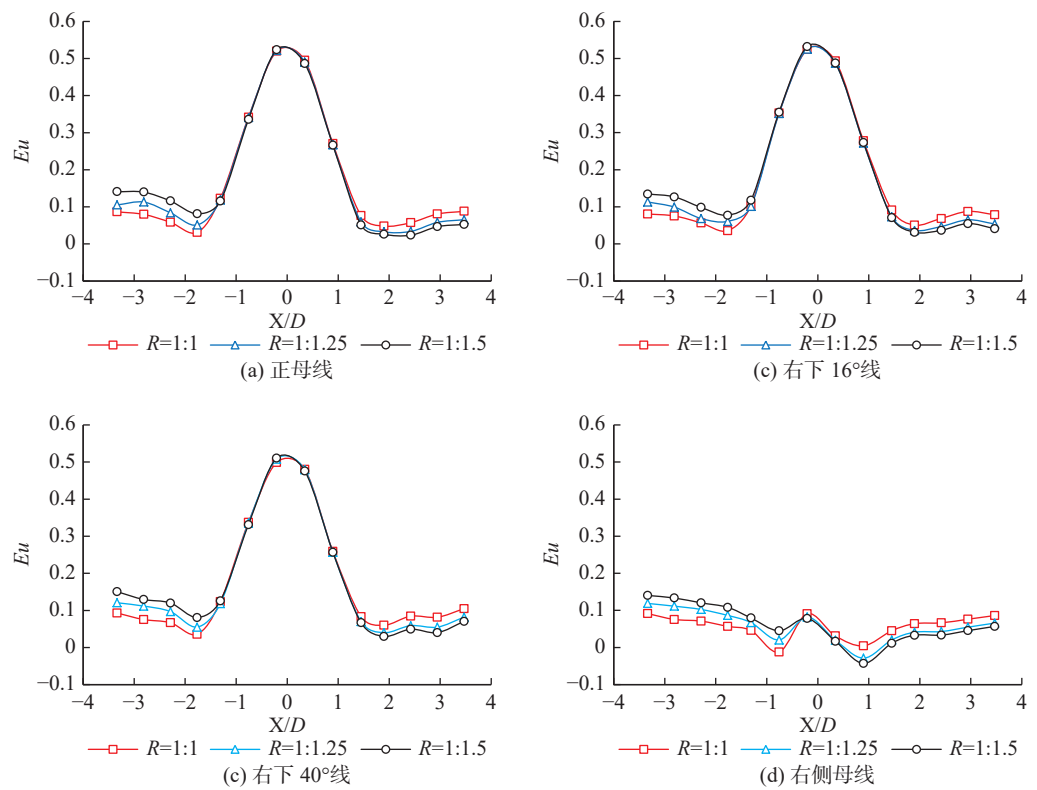


图 7 支管分流比 $\alpha=0.1366$ 、三通两侧分流比 R 不同时不同部位静压分布比较

Fig.7 Comparison of the static pressure distribution in the T-junction and the distribution header at different flow rate ratio R when α is 0.1366

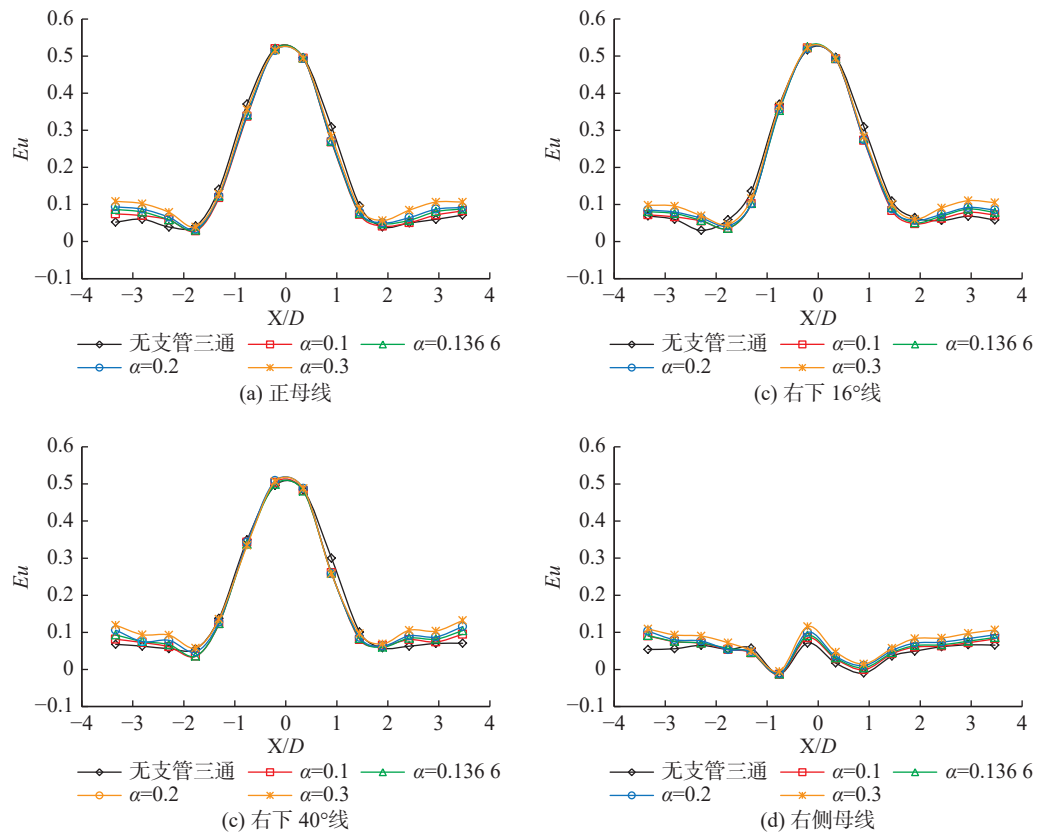


图 8 三通两侧分流比 $R=1:1$ 时，支管分流比 α 对三通区域及两侧集箱静压分布的影响

Fig.8 Effect of the flow rate ratio α on the static pressure distribution in the T-junction and the distribution header when R is 1:1

4 炉顶过热器爆管原因分析及对策

上述试验研究表明,由于分配集箱三通涡流区侧母线上及 $X/D=\pm 1.5$ 附近静压明显偏低,因此,当汇集集箱内工质静压及并联各管的阻力系数和吸热量基本相同时,分配集箱三通涡流区侧母线上及 $X/D=\pm 1.5$ 附近引出的管子流量将明显减小,导致其热偏差和汽温偏差偏大,严重时引起超温爆管。本文研究的炉顶过热器超温爆管应该与这些管子由三通区域 $X/D=\pm 1.5$ 附近引出有关。可见,尽管炉顶过热器的热负荷及工质温度相对较低,但仍需重视其进口三通对流量偏差的影响。

针对三通区域涡流导致的相关管圈流量偏小及超温爆管问题,部分学者提出了若干对策,如:罗永浩^[16]基于福州电厂350 MW机组锅炉二级再热器超温爆管原因分析,认为合理布置进、出口集箱上三通位置可减小屏间流量偏差;唐必光等^[17]为解决阳逻电厂1 025 t/h锅炉高温过热器进口集箱三通区域侧母线引出的两根管子的超温爆管问题,将这两根管的管径适当放大并改由进口集箱两端引出;王孟浩等^[18]通过在部分管圈加节流圈成功解决了北仑发电厂600 MW机组锅炉由于烟气侧热负荷偏差及三通区涡流叠加造成的高温再热器局部超温问题;韩建伟^[19]则建议受热面管子布置避开三通区域特定部位。上述措施中,进、出口集箱上三通位置的合理布置以及受热面管子布置避开三通区域特定部位只能在设计阶段实施,加装节流圈对新设计锅炉及实际超温爆管事故的处理兼可实现工质流量偏差的合理调节,但节流圈的计算很复杂^[18],与受热面管系结构及烟气侧热负荷分布有关。

为了解决本文研究的炉顶过热器超温爆管问题,根据上述试验结果及现场实际情况,采用如图9所示方案对炉顶过热器进行了改造,即:在分配集箱进口三通附近引出的15根受热面管子下游一定位置串联一混合集箱,以消除三通涡流区对流量分配的影响。改造后实际运行情况表明,此方案达到了预期的效果。

可见,为解决锅炉运行期间三通结构导致的过热器与再热器受热面超温爆管问题,在进口三通附近引出的部分受热面管子下游串联一混合集箱是比较方便且行之有效的措施;在设计阶段,则可根据结构布置情况,采用上述串联混合集箱

方案,或避免在三通区域特定位置布置受热面管,以消除三通区涡流对受热面流量偏差的影响。

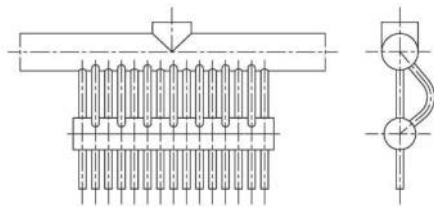


图9 炉顶过热器改造方案示意图

Fig.9 Schematic of the improved scheme of the roof superheater

5 结 论

针对某660 MW超临界锅炉炉顶过热器超温爆管问题,对该过热器分配集箱三通区域静压分布进行了试验研究,得到如下结论:

a. 三通涡流区影响范围约为 $-2.0 \leq X/D \leq 2.0$;在三通涡流区影响范围内,侧母线上静压明显较低,静压最低点位于 $X/D=\pm 1.0$ 附近,其他部位的静压最低点位于 $X/D=\pm 1.5$ 附近;在三通涡流区影响范围外静压分布符合轴向引入集箱时的静压分布规律。

b. 三通两侧分流比变化对三通涡流区影响范围、三通涡流区及两侧集箱静压分布规律基本没有影响,但三通涡流区最低静压及集箱静压在流量较大一侧均有所降低,在另一侧则有所升高;两侧分流比变化对侧母线上静压的影响相对较大。

c. 支管分流比变化对三通涡流区影响范围、三通涡流区静压分布规律的影响不明显;随着支管分流比增大,三通涡流区侧母线上及三通两侧集箱静压均有所升高,但侧母线上静压仍明显低于其他部位,集箱静压分布仍符合轴向引入时集箱静压分布规律。

d. 在设计时,应避免在三通涡流区影响范围的侧母线上及 $X/D=\pm 1.5$ 附近布置受热面管;或者,在此区域引出的管子下游一定位置串联一混合集箱可有效消除三通涡流区对流量分配的影响。

参考文献:

- [1] 张殿军,马宪国,陈之航,等.电站锅炉过热器阻力特性研究及布置优化[J].上海理工大学学报,1999,21(2): 117-122.
- [2] 王孟浩.大容量电站锅炉过热器再热器温度偏差原因及

防止对策[J]. 锅炉技术, 1992(3): 1-11.

[3] 王孟浩, 李道林, 陆方, 等. 大容量电站锅炉过热器再热器带三通集箱流量分布试验研究[J]. 电站辅机, 1996, 17(1): 37-43.

[4] 陆方, 王孟浩, 李道林, 等. 大容量电站锅炉过热器、再热器带三通集箱流量分布的试验研究[J]. 动力工程, 1996, 16(3): 13-19.

[5] 罗永浩, 杨世铭, 王孟浩. T型进口三通对分配集箱流量分配的影响[J]. 动力工程, 1998, 18(3): 29-33, 78.

[6] 卫飞飞, 缪正清, 黄荣国, 等. 带三通锅炉集箱的数值模拟和实验研究[J]. 锅炉技术, 2010, 41(6): 19-23.

[7] 匡江红, 刘平元, 陈朝松, 等. 电站锅炉过热器、再热器集箱静压分布的数值研究[J]. 动力工程, 2004, 24(2): 166-169.

[8] 刘进, 刘平元, 陈朝松, 等. 电站锅炉三通集箱系统流量分配的数值模拟[J]. 动力工程, 2009, 29(6): 528-533.

[9] 张润卿, 袁益超. 电站锅炉再热器带“三通”集箱静压分布的数值模拟及受热面热偏差计算[J]. 动力工程学报, 2011, 31(6): 403-409.

[10] 周云龙, 刘袖. 三通集箱过热器压力分布与流量分配的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2013, 33(1): 6-10.

[11] 王孟浩, 王衡, 郑民牛, 等. 超临界和超超临界锅炉运行中的几个问题[J]. 热力发电, 2010, 39(2): 14-17, 68.

[12] 王小华, 俞胜捷, 张文祥, 等. 660 MW 塔式燃煤锅炉高温再热器管壁超温诊断及运行优化[J]. 热能动力工程, 2020, 35(7): 102-108.

[13] 王林, 刘辉, 刘超, 等. 1000 MW 超超临界二次再热塔式锅炉过热器超温分析与对策[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 80-83, 87.

[14] 曾宪钰, 袁益超, 徐国鹏, 等. 电站锅炉过热器和再热器T型三通对集箱静压分布影响的试验研究[J]. 能源研究与信息, 2016, 32(2): 96-99.

[15] 叶大均. 热力机械测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.

[16] 罗永浩. 管组集箱采用三通结构引入引出对锅炉再热器热偏差的影响[J]. 锅炉技术, 1996(7): 12-15.

[17] 唐必光, 熊立红, 张新生. “三通效应”对高温过热器流量分配的影响及改进措施[J]. 电站系统工程, 1999, 15(5): 26-28.

[18] 王孟浩, 罗永浩, 张谦, 等. 北仑发电厂 600 MW 锅炉高温再热器超温问题原因分析及改造[J]. 中国电力, 1999, 32(9): 14-16.

[19] 韩建伟. 大型电站锅炉过热器、再热器超温问题原因分析及设计优化[J]. 电站系统工程, 2004, 20(3): 7-8, 10.

(编辑: 董 伟)



[上接第 237 页]

[29] 陈林, 肖文强, 严磊, 等. PVDF 基介电复合材料的研究进展[J]. 功能材料, 2018, 49(6): 6064-6072.

[30] NEESE B, CHU B J, LU S G, et al. Large electrocaloric effect in ferroelectric polymers near room temperature[J]. Science, 2008, 321(5890): 821-823.

[31] QIAN S X, NASUTA D, RHOADS A, et al. Not-in-kind cooling technologies: a quantitative comparison of refrigerants and system performance[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 62: 177-192.

[32] SEBALD G, SEVEYRAT L, CAPSAL J F, et al. Differential scanning calorimeter and infrared imaging for electrocaloric characterization of poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorofluoroethylene) terpolymer[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(2): 022907.

[33] 史美中, 王中铮. 热交换器原理与设计[M]. 4版. 南京: 东南大学出版社, 2009.

(编辑: 石 瑛)