

国产 UP 直流炉水冷壁改造方案分析

唐人虎, 胡志宏, 陈听宽, 罗毓珊

(西安交通大学 多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对姚孟电厂 300 MW 直流锅炉改造方案进行了水动力分析, 对比了改造前后锅炉水冷壁的负流量响应特性和正流量响应特性, 指出该炉垂直管圈炉膛水冷壁水动力特性不佳, 低负荷运行造成水冷壁超温及管间流体和金属温差大爆管的主要原因是高质量流速设计及其产生的负流量响应特性, 给类似锅炉改造提供了借鉴经验。

关键词: 水冷壁; 负流量响应特性; 水动力计算; 质量流速; 直流锅炉

中图分类号: TK314 文献标识码: A

1 前言

蒸汽锅炉及其水冷壁热水动力方案设计对现代火力发电站的性能具有决定性的作用。姚孟电厂 1 号炉是上海锅炉厂生产的第一台 UP 型燃煤直流锅炉, 为 SG-935-570 型, 双炉膛, 四角切圆燃烧。它的额定蒸发量为 935 t/h, 额定蒸汽压力为 16.67 MPa, 额定蒸汽温度 570 °C。随着电力市场结构的变化和机组的老化, 为了适应现代电厂的要求, 1 号机组进行了全面性的重大技术改造, 改造的关键内容就是水冷壁。改造后的机组要适应变压运行, 能够进行低疲劳启动和 70%~100% 的迅速的负荷变化调峰能力的要求, 并保证水冷壁安全运行, 机组效率要有较大幅度的提高^[1]。因此改造前后 1 号炉垂直管圈水冷壁的水动力特性就是改造是否成功的主要内容。本文在水冷壁改造方案基础上主要分析了对于 1 号炉来说影响水动力特性主要因素和改进措施。

2 改造方案

2.1 方案分析

在改造前 1 号炉调峰能力很差, 在变压运行

70%BMCR 时就不能稳定运行。这是由于水冷壁水动力特性很差, 在低负荷时水冷壁管壁温度很高, 这对锅炉来说是很危险的。从经济器来的水先进入分隔墙水冷壁, 这时的质量流速为 1 900 kg/(m²·s), 然后进入前后墙水冷壁, 在这里质量流速为 1 800 kg/(m²·s), 如图 1(a)所示。这样的设计是为了以高的质量流速防止传热恶化, 确保垂直管圈水冷壁的冷却。但事实是并不适合当前对 1 号炉的要求, 特别是在低负荷条件下。本文认为高的质量流速是导致 1 号炉在低负荷时水动力特性不佳的主要原因。

垂直管圈水冷壁受热面的压降由摩擦压降、重位压降和加速度压降等部分组成, 通常加速度压降很小忽略不计。水冷壁流量特性取决于摩擦压降与重位压降之比。当某根管子吸热偏多时, 由于汽水混合物的比容增大, 管内摩擦压降会显著增大。由于水冷壁受热面所有的平行管的压降都相等, 导致受热偏多的管内流量会减少, 以便使压降平衡。这种特性就是负流量响应特性或直流特性。反之, 在受热偏多的垂直管内, 水和蒸汽的重量压降会降低, 当质量流速低而使摩擦压降小时, 流过受热偏高的管子的流量会增加, 直到该管内静压降与所有平行管额定压降平衡时为止, 这种效应就是正流量响应特性或自然循环特性^[2]。

姚孟电厂 1 号炉的直流系统中, 摩擦压降份额在总压降中占主要部分。因此, 水冷壁系统呈负流动特性, 个别管子受热偏高反而流量减少引起恶性循环, 从而使水冷壁出口焓和温度增加过高, 甚至引起爆管。在给定热负荷下, 每根管子的几何结构都有一个确定的质量流速, 当低于这个质量流速时, 负流动特性就会向正流动特性转变, 受热偏高的个别管内流量会增加, 并由此而减少水冷壁出口焓的升高, 也减少温度的升高。改造方案中水冷壁的设计就是基于以上的事实, 即由于质量流速的大幅下降,

收稿日期: 2001-12-28; 修订日期: 2002-06-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G1999022308)

作者简介: 唐人虎(1974-)男, 四川自贡人, 西安交通大学博士研究生。

管子受热偏高时,摩擦压降份额的变化要小于重力压降份额的变化。

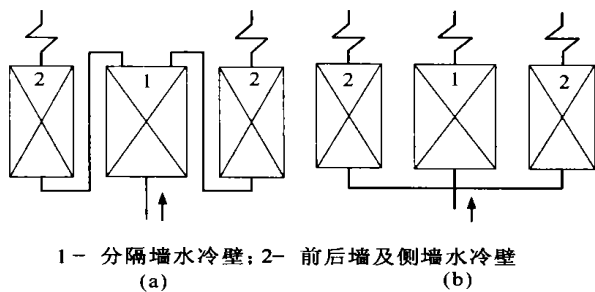


图 1 改造前后 1 号炉水冷壁流程图

2.2 方案介绍

水冷壁的改造是整个改造方案的重点,为了改善水力特性对于姚孟电厂 1 号炉的改造有几种方案,例如,自然循环汽包锅炉(加汽包);螺旋管圈水冷壁和垂直管圈水冷壁。改造方案必须满足为以下的要求:

- (1) 正流量特性;
- (2) 炉膛的压降低,负荷达到 1 000 t/h;
- (3) 减少水冷壁出口管间的热偏差;
- (4) 从部分负荷到满负荷运行能自如的调节。

再考虑到经济性,低质量流速的垂直内螺纹管圈水冷壁是最适合 1 号炉的方案,加大水冷壁管的直径,改变流程。改造前后水冷壁的流程结构如图 1(a)、(b)。

2.3 改造前后流量特性分析

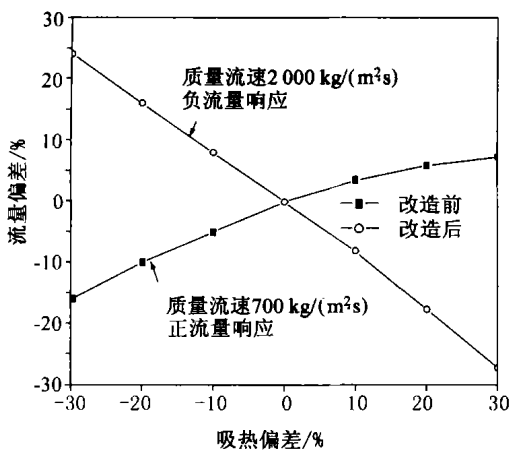


图 2 水冷壁流量特性曲线

改造前的 1 号炉水冷壁管的质量流速高,系统呈负流量相应特性,见图 2。当发生吸热偏差时,吸热最多的管子反而流量最小,这就很容易发生传热

恶化使管子温度和热应力增加。改造后的水冷壁系统质量流速大大降低,呈正流量响应特性,吸热最多的管子其相应管中流量也最大,这样就不易发生传热恶化。

3 对于改造方案的 DNB 计算

根据改造方案给定的参数条件和内螺纹管的压降特性,参考我国电站锅炉水力计算方法^[3],计算得到不同负荷下水冷壁偏差管出口的干度见表 1~表 3。

表 1 100% BMCR $Q=183.304 \text{ kW}$, $G=687 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,
 $h=1390 \text{ kJ}/\text{kg}$

吸热偏差	质量流速 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	质量流量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	最大热负荷 / $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$	最大热负荷时的干度
0.6	0.140	556	169	-0.033
0.7	0.151	600	197	0.022 5
0.8	0.160	635	225	0.081
0.9	0.166	659	253	0.148
1.0	0.173	687	281	0.205
1.1	0.175 6	697	309	0.282
1.2	0.177 0	703	337	0.362
1.3	0.176 5	701	365	0.457

表 2 75% BMCR $Q=136.19 \text{ kW}$, $G=460 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,
 $h=1320 \text{ kJ}/\text{kg}$

吸热偏差	质量流速 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	质量流量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	最大热负荷 / $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$	最大热负荷时的干度
0.6	0.087	345	120	0.166
0.7	0.096	381	140	0.196
0.8	0.104	413	160	0.225
0.9	0.110	437	180	0.258
1.0	0.116	460	201	0.291
1.1	0.121	480	221	0.326
1.2	0.126	500	241	0.356
1.3	0.129	512	261	0.396

表 3 40% BMCR $Q=89.833 \text{ kW}$, $G=274 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,
 $h=1254 \text{ kJ}/\text{kg}$

吸热偏差	质量流速 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	质量流量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	最大热负荷 / $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$	最大热负荷时的干度
0.6	0.049 0	195	90	0.229
0.7	0.054 9	218	105	0.245
0.8	0.060 0	238	120	0.262
0.9	0.064 9	258	136	0.278
1.0	0.069 0	274	151	0.297
1.1	0.072 8	289	166	0.315
1.2	0.076 2	303	181	0.334
1.3	0.079 4	315	196	0.354

我们知道内螺纹管在 20 MPa 下即使在低质量流速下也有良好的传热特性, 前人对于不同内径不同螺纹结构的内螺纹管做过大量传热和压降特性试验, 有大量的实验数据。由上表中得到的参数, 根据文献[3]中方法计算出此时内螺纹管发生传热恶化时的干度为 0.7, 而表中显示即使是最恶劣的工况下水冷壁管也是安全的, 可以认为不发生传热恶化。

4 结论

(1) 姚孟电厂 1 号炉改造方案特点是留用流量分配的自然循环特性, 采用较低的满负荷质量流速内螺纹管垂直管圈炉膛水冷壁。这种炉膛设计支吊结构简单; 制造和安装费用低; 正流动特性使水冷壁出口的温度偏差减小, 机组运行中间负荷时避免频

繁启停, 适应现代电厂机组调峰的要求。

(2) 姚孟电厂 1 号炉改造已顺利完成, 现已通过 168 h 试验, 锅炉运行效果良好。100% 负荷运行时水冷壁质量流速为 $690 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 40% 负荷运行时水冷壁质量流速 $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 均达到改造设计要求。

参考文献:

- [1] WENJIAN LI HONG YUAN HUA. Design of 600 MW supercritical variable pressure operation boiler with vertical water wall[J]. **Joint Power Generation Conference, ASME**, 1999, 2: 299—306.
- [2] FRANKE J, COSSMANN R, HUSCHAUER H. Benson steam generator with vertically-tubed furnace[J]. **VGB Kraftwerkstechnik**, 1995, (4): 20—24.
- [3] JB/Z 201—83, 电站锅炉水动力计算方法[S].

(何静芳 编辑)

《热能动力工程》征订启事

《热能动力工程》是学术性与技术性综合的技术刊物。本刊报导内容力求结合我国实际, 具有很强的针对性和实用性, 本刊为国内外公开发刊, 覆盖面大。该刊多次分别荣获国防科工委、中国船舶工业总公司、黑龙江省、第二届全国优秀科技期刊奖和荣获船舶总公司科技进步三等奖。本刊还被定为国家核心期刊, 中国科学引文数据库来源期刊, 编入光盘期刊。被录入美国工程索引数据库(EI), 并被俄罗斯文摘期刊录用。

《热能动力工程》刊载的主要内容: 国内外蒸汽轮机、燃气轮机的研究成果及发展状况; 国内外电站及各种锅炉的设计和试验研究; 传动装置设计和试验研究; 热能工程、能源开发利用和节能技术研究与设计运行经验; 新技术转让消息和新产品介绍等。

读者对象: 热能动力工程领域的科研单位的研究人员; 大专院校的师生; 工矿企业动力部门的工程技术人员及运行、维护人员。

刊号 ISSN 1001—2060 双月刊 A4 版。 邮局代号 14—158
CN23—1176/TK

本刊既有理论性, 也有实用性, 对科研设计, 使用单位有较大参考价值, 有需要者请按下列办法订阅:

(1) 邮局汇款: 请将订阅杂志款汇至: 150036 哈尔滨市香坊区红旗大街 108 号。每期 12 元, 全年定价 72 元。编辑部现有部分过刊, 可以订阅。

(2) 银行汇款: 中国船舶工业总公司第七研究院第七〇三研究所; 开户银行: 哈尔滨工商银行中山支行; 帐号: 3500060109004607048 邮编: 150036;

注: 汇款时注明您的详细地址, 以便我们及时邮寄收据和杂志。

high-moisture fuels are burned, the heat quantity needed for water evaporation-related heat absorption is relatively great. In view of this, the latter should be taken into account in the thermal energy balance for the flue gases of a fluidized bed.

Key words: high moisture fuel, thermal energy balance equation, fluidized bed boiler

通道形面对PSR性能影响的分析= **An Analysis of the Effect of Plate Corrugation on the Performance of a Primary Surface Recuperator (PSR)** [刊, 汉] / ZHANG Zhi-jun, CHENG Hui-er (Power Engineering Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), WEN Xue-you, XIAO Dong-ming (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 638 ~ 640

With respect to an innovative type of compact heat exchanger, the so-called primary surface recuperator (PSR), newly emerging in the international arena, analyzed is the effect of plate corrugation formed respectively by elliptic, sinusoid and parabola curves on exchanger core performance. In connection with the design of a PSR sample unit used as the recuperator of a gas turbine the authors have given the main performance of three types of PSR core, based on three plate corrugation configurations. The superior performance of the PSR core can be demonstrated through its comparison with the core performance of plate-fin heat exchangers. **Key words:** primary surface recuperator, plate corrugation, core performance

国产UP直流炉水冷壁改造方案分析= **An Analysis of the Water Wall Modification Scheme for a Chinese-made Once-through Boiler** [刊, 汉] / TANG Ren-hu, HU Zhi-hong, CHEN Ting-kuan, et al (National Key Laboratory of Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 641 ~ 643

A hydrodynamic analysis was conducted in connection with the modification scheme of a 300MW once-through boiler at Yaomeng Power Plant. On the basis of a comparison of the boiler water-wall negative and positive flow-rate response characteristics existing prior to and after the modification the authors noted the poor hydrodynamic characteristics of the furnace water-wall composed of vertical tube coils. An excessively high water-wall temperature and the big difference in metal and inter-tube fluid temperatures leading to tube explosion can mainly be attributed to the high mass flow speed and the resulting negative flow rate response characteristics. The above discovery may provide a helpful guide during the modification of analogous boilers. **Key words:** boiler water wall, negative-flow response characteristics, hydrodynamic calculation, mass flow rate, once-through boiler

40 t/h 燃气锅炉过热器爆管原因分析= **An Analysis of the Cause of a Superheater Tube Explosion Occurring in a 40 t/h Gas-fired Boiler** [刊, 汉] / FAN Wei-dong, ZHANG Ming-chuan (School of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240), HONG Mei (Shanghai Boiler Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 644 ~ 647

The tube explosion occurring in a low-temperature stage superheater of a gas-fired industrial boiler was analyzed from various aspects, such as boiler design, superheater structure and layout, etc. With the cause of explosion being identified some effective measures were proposed to solve the problem. **Key words:** industrial boiler, superheater, tube explosion

锅炉多管除尘器改进= **The Improvement of a Multi-tube Dust Separator for a Boiler** [刊, 汉] / LIU Bao-jun, WANG Tie-yan (Harbin Hongqi Boiler Works, Harbin, China, Post Code: 150080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 647 ~ 649

A high-efficiency multi-tube dust separator is described. After a modification its use on 1 - 75 t/h boilers for space heating during the winter has played a significant role in the protection of environment. **Key words:** multi-tube dust separator, cyclone, flow resistance, role of negative pressure