

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.007

蛇形管高压加热器用于 1 000 MW 二次再热机组的可行性分析

邓成刚, 郑军, 邹罗明, 罗颖坚

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 随着 1 000 MW 二次再热机组设计参数越来越高、采用传统单列 U 形管高压加热器也越来越受到限制, 当前新上二次再热机组不得不采用双列 U 形管高压加热器, 从而使得主给水系统复杂、运行困难。结合 U 形管高压加热器, 对比分析了新型高压加热器(即蛇形管高加)技术特点及国产化现状, 指出在 1 000 MW 二次再热机组应用蛇形管高压加热器是可行的, 并具有结构及系统简单、热适应性好、可靠性高等优势, 推荐在同类工程中应用, 为适应未来更高参数超超临界机组的高压加热器制造技术发展打下基础。

关键词: 二次再热; 单列; 蛇形管; 高压加热器

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0044-05

Feasibility Analysis on the Application of High Pressure Serpentine Heater in 1 000 MW Coal-fired Power Plant with Double Re-heating Cycles

DENG Chengang, ZHENG Jun, ZOU Luoming, LUO Yingjian

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Due to the pursuit of higher design parameters in 1 000 MW power plants with double re-heating cycles, the traditional single row high pressure U-tube heater was strongly restricted since it could not meet such high parameters. As a result, the double row high pressure U-tube heater was introduced to newly constructed double re-heating units, which in turn leads to greater system complexity and operation difficulty regarding to the main feed water system. The present paper conducted the characteristic and localization domestication comparison between the new high pressure heaters (i. e. high pressure serpentine heater) and high pressure U-tube heater, results showed that: it is feasible to apply high pressure serpentine heater in 1 000 MW power plants with double re-heating cycles, considering its good system simplicity, excellent thermodynamic adaptability as well as high operation reliability. Moreover, it is recommended to apply the high pressure serpentine heater in similar engineering domains, as it will lay a firm foundation for manufacturing high pressure heaters in ultra-supercritical units with higher design parameters in the near future.

Key words: double re-heating cycles; single row; serpentine heater; high pressure heater

高压加热器(以下简称高加)是指热力发电机组给水回热系统中给水泵主泵出口至省煤器进口之间

的热交换器,其作用是利用抽汽对给水加热,提高锅炉给水温度,以达到提高机组效率的目的。随着机组容量及参数的提高,高加的设计参数也相应提高,要求的面积及尺寸也随之增大,从而使设计制造难度也越来越大。高加的选型已成为大容量机组辅机设计必须关注的主要问题之一,选择结果对主厂房布置有重大影响。

1 000 MW 二次再热相比一次再热的初参数更高,高加管侧的设计压力由 39 MPa 提升到了 44

收稿日期: 2016-07-01

基金项目: 中国能建广东院科技项目“压力管道规范动力管道实施指南”(ER01701W)

作者简介: 邓成刚(1974),男,广东韶关人,教授级高级工程师,学士,主要从事发电厂热机专业设计研究工作(e-mail) dengcheng-gang@gedi.com.cn。

MPa, 最高壳侧压力从 9.4 MPa 提升至 13.3 MPa, 温度最高的前置蒸汽冷却器壳侧设计温度从 490 °C 左右提升至 565 °C, 最高管侧设计温度从 350 °C 提升到 360 °C。目前关于 1 000 MW 二次再热超超临界机组高加系统的配置, 根据国内外调研结果^[1-5], 主要有双列、单列高加系统, 高加的型式有 U 型管高加、蛇形管高加。其中蛇形管高加在我国大容量机组上无应用业绩^[3-4], 因此, 对于国内大容量机组来说, 蛇形管高加是一种新型高加, 有必要对其进行可行性研究。

1 加热器结构对比分析^[1-7]

蛇形管高加技术源于德国 BD 公司 (Balcke-Dürr), 主要由进出口水室、管束(蛇形管、短接头等)、壳体、固定支座和滑动支座组成, 如图 1 所示。

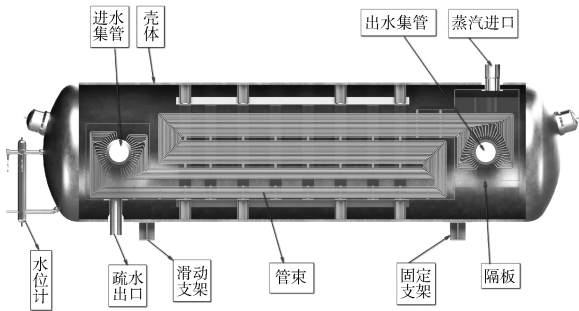


图 1 蛇形管高加结构图

Fig. 1 Structure diagram of high pressure serpentine heater

U 形管式高压加热器主要由水室、水室分程隔板、管束、壳体、固定支座和滑动支座等组成, 如图 2 所示。

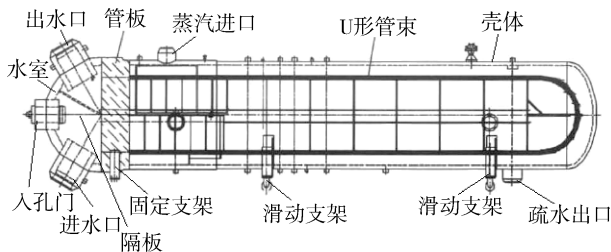


图 2 U 形管高加结构图

Fig. 2 Structure diagram of high pressure u-tube heater

以某正在设计的 1 000 MW 二次再热超超临界 (主参数 31 MPa/600 °C/620 °C/620 °C, 主蒸汽流量 2 761 t/h) 1 号高加为例, 蛇形管加热器与 U 形管加热器结构对比如表 1 所示。

表 1 U 形管加热器与蛇形管加热器结构对比表

Tab. 1 Structure comparison table of U-tube heater and high pressure serpentine heater

项目名称	U 形管式高加	蛇形管式高加
设计压力/MPa	44/11.1	44/11.1
设计温度/°C, 管侧/(壳侧过热段/壳侧冷凝段)	330/(440/320)	330/(440/320)
给水端差/°C	-1.7	-1.7
疏水端差/°C	5.6	5.6
有效表面积/m ²	4 073	4 130
加热器型式	卧式	卧式
加热器布置	单列	单列
加热器长度/m	12.7	14.76
抽芯长度/m	8.3	无需
壳体支撑	固定+滑动	固定+滑动
封头型式	椭圆形封头	椭圆形封头
水室封头材料	13MnNiMoR	15NiCuMoNb5-6-4 (或等同于)
水室内径/壁厚/mm	2 500/170	/
壳侧内径/壁厚/mm	2 500/80	3 400/100
管板(或集管)材料	20MnMoNb 锻件	15NiCuMoNb5-6-4 (或等同于)
管板(集管)厚度/mm	970	100
筒节材料	SA-387Gr11CL2	13MnNiMoR (或等同于)
筒节规格/mm	2 750 × 125	3 600 × 100
筒身材料	13MnNiMoR	13MnNiMoR (或等同于)
筒身规格/mm	2 660 × 80	3600 × 100
换热管材料	SA213T11	SA213T11
换热管规格/mm	16 × 2.5	25 × 4
管子与管板焊缝	胀接+角接	对接
疏冷段结构型式	通常为虹吸式疏冷段	一般为浸没式疏冷段
净重/kg	21 900	265 000
汽侧阻力	0.53	0.51
水侧阻力	0.89	0.78

从上面结构对比可以看出, 蛇形管高加与 U 形管高最大不同是进水集管取代了 U 形管高加的进水室及管板, 其厚度约为管板厚度的十分之一, 因此, 蛇形管高加更具有较好的抗热冲击性能、更高的温升速限制值以及更多的变工况运行次数, 主要的优缺点对比如表 2 所示。

表2 U形管加热器与蛇形管加热器优缺点对比表
Tab. 2 Advantages and disadvantages comparison table of U-tube heater and high pressure serpentine heater

项目名称	U形管式高加	蛇形管式高加
热应力适应性	管板较厚, 管板与壳体的连接处的热应力集中, 发生泄漏可能性较大	适应性好
温升速率限制/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	5~10	>25
钻孔难度	管板厚度大, 难度大, 需要专有技术及设备	集箱厚度小, 钻孔容易
管子与管板焊缝	受力情况差, 易出现缺陷, 仅能PT渗透检查	受力情况优, 不容易出现缺陷, 能RT射线检查。
换热管	U形管, 直径更小、壁厚更薄、热阻更小, 采用虹吸式疏冷段, 总换热面积小。	蛇形管, 直径大、壁厚厚、热阻大, 采用浸没式疏冷段, 无效换热面积大, 总换热面积大。
外形尺寸	布置紧凑, 外形更小, 换热面积更小, 设备总重更轻。	蛇形管高加采用3~4行程, 外形更大, 换热面积更大, 设备总重更重。
检修空间	一般需预留抽壳空间, 占地面积大	无
水位控制	U形管高压加热器采用虹吸式疏冷段, 对水位控制要求低。	蛇形管高压加热器采用浸没式疏冷段, 对水位控制要求高。
水侧阻力	有水室、管板等, 阻力较大	集管分配, 总阻力小
汽侧阻力	U形管加热器与蛇形管加热器差别很小	

2 蛇形管高加技术性能及必要性分析^[1-8]

近几年来, 随着国家对常规火电节能减排的要求以及项目审批的需要, 火电参数也随之越来越高, 以泰州二期及莱芜电厂为代表的二次再热机组越来越高, 以泰州二期及莱芜电厂为代表的二次再热机组越来越受到业主的重视, 其主蒸汽压力提高至31 MPa或更高。相应的U形管高加管侧设计压力由39 MPa提高到44 MPa以上。一些厂家根据二次再热机组的要求, 仍然开发了单列U形管高加, 但也存在以下问题^[3]:

1) 管板采用20MnMo或相当材料, 其厚度将超过800 mm, 超过GB150.2表9《碳素钢和低合金钢锻件许用应力》20MnMo钢最大公称厚度700 mm的要求, 许用应力取值无依据。

2) 厚管板在运行时温差应力大, 存在安全性风险。

尽管有些厂家通过如改用高等级材料、采用特

别结构降低设计温度等方法来改善上面问题, 但由于没有经过实际检验, 故不能打消业主、设计方等的顾虑。而对于蛇形管高加, 已经过实际检验, 故在投产业绩、可靠性等都具有比较高的优势。

2.1 运行业绩

据了解, 近10年以来, 国外大容量机组采用蛇形管集箱式高加占投运机组的60%以上。德国某蛇形管集箱式高加的主要制造商, 从1935年就开始投入生产, 至今已经有80年的历史, 已有超过1200台蛇形管高加投入运行。其在欧洲的使用情况如表3所示。

表3 使用蛇形管高加的德国和荷兰1000 MW级机组表

Tab. 3 High pressure serpentine heater applied in germany and netherland

德国电厂	机组容量/MW	投运时间
SCHWARZE PUMPE I	874	1997
SCHWARZE PUMPE II	874	1998
LIPPENDORF R/S	2×933	1999
BOXBERG	910	1999
NIEDERAUSSEM	1025	2002
BOXBACH II	750	2002
NEURATH F/G	1100	2010
DATTEIN	1100	2011
KARLSRUHE RDK8	912	2011
MOORBURG LOT A/B	820	2012
MANNHEIM 9	910	2013
GREIFSWALD I	800	2014
荷兰 MAASVLAKTE 3	1113	2012

蛇形管高加应用也存在问题, 如我国姚孟电厂为1985年全套引进法国阿尔斯通2×350 MW机组, 每台机组的高加系统由2台高加、1台高压蒸汽冷却器组成, 整体布置十分紧凑。性能满足要求, 目前一套高加在运行, 另一台机组高加已换成U形管式, 主要原因是2000年前后开始出现泄漏。存在的主要问题如下:

1) 破坏集中在集箱与浸没在疏水冷却段的换热管连接接头处。

2) 集箱内径小, 难以检修甚至逢检必修。

3) 水位控制要求较高。

2.2 可靠性

据有关资料^[3], 蛇形管高加每100万根管的损管率小于0.013%, 在过去40年中少于30根管子

损坏, 因此蛇形管集箱式高加可靠性极高。表 4 为 1999 年高压加热器的可靠性指标统计数据(按制造厂分类)如表 4 所示。

表 4 1999 年高压加热器(按制造厂)可靠性指标统计数据
Tab. 4 High pressure heater (the factory) reliability statistics in 1999

制造厂家	统计 台数/ 台	运行 系数/ %	可用 系数/ %	非计 划停 运率/ %	设备因 素非计 算停运 小时数/h	设备因 素非计 算停运 比例/%
上海电站辅机厂	329	71.75	92.083	0.631	25.26	65.07
东方锅炉厂	278	73.307	89.854	1.379	36.67	41.24
哈尔滨锅炉厂	202	66.603	91.723	1.137	24.32	36.58
前苏联	76	73.273	94.076	0.577	24.52	65.81
杭州锅炉厂	42	76.344	90.295	1.537	73.24	70.16
法国	39	64.232	91.719	0.380	20.60	95.98
福斯特·惠勒	30	48.108	92.398	0.330	10.96	83.72
美国	21	56.593	92.659	0.023	1.16	100.00
日本三菱	20	87.31	93.133	0.107	4.40	50.00
英国	16	66.21	89.998	8.465	435.19	83.25
波兰	6	83.705	93.722	0.075	4.51	81.80
罗马尼亚	6	56.461	82.838	5.871	215.53	69.86
日立	5	84.243	87.766	0.711	7.45	14.09

由表 4 可知蛇形管高加相比 U 形管高加的可靠性更高。虽然表中的数据不是最近年份的, 但由于发达国家材料、设备制造质量等都比较稳定, 对于国外机组, 高压加热器可靠性数据仍具有参考作用。

非计划停运率是辅机可靠性的关键指标, 非计划停运率越小, 辅机的可靠性越高, 从表中可以看出, 对于国内三大高压加热器制造厂, 非计划停运率相对其他发达国家的数据要高得多, 如美国、日本三菱、福斯特惠勒这些发达国家的高加, 其结构型式也同为 U 形管, 但是非计划停运率却比国内三大高加制造厂小很多, 这主要的原因因为发达国家 U 形管高压加热器制造经验比较丰富, 制造水平高、质量控制稳定。另外, 从数据上来看, 美国, 日本三菱, 福斯特惠勒的高压加热器非计划停运率很低, 也可以得出, 只要制造水平提高上去后, U 形管高压加热器本身的可靠性也可以高。

2.3 必要性

2010 年 7 月 23 日, 国家能源局宣布国家 700 °C 超超临界燃煤发电技术创新联盟成立, 我国下一代高参数机组的主参数压力将超过 35 MPa^[10], 从

而使高加的设计压力将继续提高, 单列高加的设计制造又将受到制约, 而采用蛇形管高加将彻底解决此类问题。现在设计制造蛇形管高加并投入运行, 有助于下一代高参数机组的辅机-高加设计制造积累经验, 打下良好的基础。

3 蛇形管高加国产化分析

目前国内主流的高加制造商上海动力设备有限公司(简称“上动”)、东方锅炉有限公司(简称“东锅”), 以及张家港化工机械股份有限公司(简称“张化机”)均提出了蛇形管式高加的解决方案。

3.1 上海动力设备有限公司

上动厂拟采用德国 BD 公司技术, 合作方案是: 第一台蛇形管高加由 BD 公司进行设计、监造及对性能进行保证, 上动厂仅进行制造。为保证质量, 高加核心部件如蛇形管、集箱采用进口。待技术引进消化后, 其高加的设计制造逐渐由上动厂负责。对于 1 000 MW 二次再热机组, 上动厂目前已初步给出设计方案, 但给出的报价较高、供货周期较长。

3.2 东方锅炉有限公司

东锅在 2003 年开始对蛇形管加热器进行技术储备, 对蛇形管加热器的一些关键设计问题如结构设计、传热计算、振动核算、阻力优化、水位控制等进行研究, 并于 2010 年和 2015 年分别对姚孟电厂蛇形管加热器实地调研。东锅认为蛇形管因国内合格的供应商数量少, 需进口, 存在价格高且采购周期长等缺点。现阶段来看, 除集箱与蛇形管的焊接需引进相应的的焊接工艺外, 其它都可以解决, 现已完成了初步设计。

3.3 张家港化工机械股份有限公司

张家港化工机械股份有限公司的全资子公司“杭州忠泽机械工程有限公司”, 有为欧洲索贝尔科公司制造加工蛇形管集箱式高压加热器的代工经验, 掌握了集箱与蛇形管的内孔焊接技术。在此基础上, 开发了适用 1 000 MW 超超临界蛇形管集箱式高压加热器, 并将该技术运用到北仑 1 000 MW 超超临界机组的外置式蒸发器改造中。

综上所述, 上动、东锅、张化机都提出了 1 000 MW 二次再热机组单列蛇形管高加的可行性设计方案。目前, 上动处于技术引进阶段, 东锅和张化机都是自主研发。

4 经济性分析

根据目前几大厂商的报价,蛇形管高加比U形管高加每台机(即4个高加及2个高加蒸汽冷却器)价格高约10%~50%,考虑到技术引进因素,其价格是合理的。

5 结论

单列新型高加即蛇形管高加在1 000 MW超超临界二次再热机组中是可行的,主要原因如下:

1)蛇形管高加具有热适应性好,可靠性高,且适应未来更高参数超超临界机组技术发展方向。

2)蛇形管高加国内已有三家具备加工制造能力,具备了推广应用条件,尽早在高参数机组上进行运用及积累经验,对于推动我国制造业高端化以及研发更高参数超超临界机组辅机技术具有较大的意义。

3)尽管蛇形管高加在二次再热机组上首次应用可能因引进技术或管束进口等原因价格高,首次应用可能还具备一些技术风险,但对于引进消化技术再创新的技术目标来说是完全值得的。

参考文献:

- [1] 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司. 二次再热机组高压加热器配置选型专题研究报告[R]. 广州:中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 2015.
- [2] 周锐. 1 000 MW超超临界机组高压加热器选型探讨[J]. 热机技术, 2007(1): 1-5.

ZHOU R. The selection of high pressure heater for 1 000 MW ultra supercritical unit [J]. Heat Power Technology, 2017(1): 1-5.

- [3] 凌峰. 蛇形管式高压加热器在大型火电机组中的应用[J]. 电站辅机, 2014, 35(3): 5-7.
- LING F. Application of Snake-tube Type HP in Units of Large-scale Fossil Power Plants [J]. Power Station Auxiliary Equipment 2014, 35(3): 5-7.
- [4] 东方电气集团东方锅炉股份有限公司. 蛇形管式高压加热器技术交流讨论稿[R]. 上海: 东方电气集团, 2015.
- [5] 杭州忠泽机械工程有限公司. 集箱式高压加热器介绍[R]. 杭州: 杭州忠泽机械工程有限公司, 2015.
- [6] 马永杰. 1 000 MW机组回热系统高压加热器选型分析[J]. 电力安全技术, 2016(11): 62-64.
- MA Y J. Selection of high pressure heater for 1 000 MW fossil fired unit with double reheat cycles [J]. Electric Safety Technology, 2016(11): 62-64.
- [7] 中国动力工程学会. 火力发电设备技术手册(第四卷 电站系统与辅机)[M]. 北京: 机械工业出版社 2002.
- [8] 上海电气集团股份有限公司. 蛇形管式高压加热器—产品介绍[R]. 上海: 上海电气集团股份有限公司, 2015.
- [9] 东方锅炉(集团)股份有限公司. 1 000 MW二次再热单列高压加热器可行性分析[R]. 东方锅炉(集团)股份有限公司, 2015.
- [10] 杨根盛. 700 °C先进超超临界发电技术的开发与进展[J]. 锅炉制造, 2013(4): 1-4 +7.
- YANG G S. 700 °C advanced ultra-supercritical power generation technology development and progress [J]. Boiler Manufacturing, 2013(4): 1-4 +7.
- [11] 中国电力企业联合会. 大中型火力发电厂设计规范: GB 50660—2011[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2011.

(责任编辑 高春萌)

(上接第43页 Continued from Page 43)

- [11] 俞逾, 杨晨, 范莉. 电厂SCR烟气脱硝系统流场的数值模拟[J]. 计算机仿真, 2007, 24(12): 222-225.
- YU Y, YANG C, FAN L. Numerical simulation of flow field for selective catalytic reduction system [J]. Computer Simulation, 2007, 24(12): 222-225.
- [12] 赵建忠, 李宝, 赵勇东, 等. SCR脱硝反应塔流场数值模拟研究[J]. 应用能源技术, 2014(4): 32-35.
- ZHAO J Z, LI B, ZHAO Y D, et al. SCR denitration reaction tower numerical simulation of flow field [J]. Applied Energy Technology, 2014(4): 32-35.
- [13] 李德波, 徐齐胜, 廖永进, 等. SCR脱硝系统导流板优化数值模拟[J]. 广东电力, 2014(7): 1-5.
- LI D B, XU Q S, LIAO Y J, et al. Numerical simulation on guide plate optimization for SCR denitration system [J]. Guangdong Electric Power, 2014(7): 1-5.

- [14] 杨松, 丁皓姝, 黄越. SCR脱硝系统流场数值模拟及优化[J]. 热力发电, 2014(9): 71-75.
- YANG S, DING H S, HUANG Y. Numerical simulation and optimization of flow field in an SCR system [J]. Thermal Power Generation, 2014(9): 71-75.
- [15] 张彦军, 高翔, 骆仲浚, 等. SCR脱硝系统入口烟道设计模拟研究[J]. 热力发电, 2007, 36(1): 15-17.
- ZHANG Y J, GAO X, LUO Z Y, et al. Simulation study on design of inlet flue duct for SCR denitration system [J]. Thermal Power Generation. 2007, 36(1): 15-17.
- [16] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 28-51.
- TAO W Q. Numerical heat transfer (Second Edition) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 28-51.

(责任编辑 黄肇和)