

# 两级除氧器热力系统研究

胡宏伟<sup>✉</sup>, 邓成刚

(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:** [目的] 为了研究大容量机组宽负荷控制技术, 对两级除氧器热力系统进行了研究。[方法] 经过对比论证, 对其系统、布置、技术经济性做了分析。[结果] 研究表明: 两级除氧器热力系统在技术上是可行的, 以百万机组为例, 在不同工况下, 双机回热两级除氧器热力系统的热耗相比双机回热一级除氧系统平均低10 kJ/kWh~50 kJ/kWh, 节省标煤7 232 t/a, 投资增加约570万, 投资回收年限约2年。[结论] 该系统适用于高参数机组, 研究结果可为后续高参数机组采用两级除氧器热力系统提供依据。

**关键词:** 宽负荷; 两级除氧器; 热力系统; 双机回热; 技术经济比较

中图分类号: TM611; TQ53

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)04-0098-04

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Thermal System with Double-deaerator

HU Hongwei<sup>✉</sup>, DENG Chenggang

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

**Abstract:** [Introduction] The paper performs research on thermal system with double-deaerator in order to study the wide load technology of large capacity units. [Method] By using the comparative study, analyzed the system, plant layout and technique economics. [Result] The results show that the system is feasible in technology, for 1 000 MW unit, the heat rate of the double-turbine regeneration system with double-deaerator is lower 10 kJ/kWh~50 kJ/kWh than the double-turbine regeneration system with one-deaerator under different loads, saved 7 232 tons of coal per year, investment increased by 5.7 million yuan, the investment recovery period is about 2 years. [Conclusion] The system is suitable for high parameter units, this work provides some guidance for using the thermal system with double-deaerator in high parameter units.

**Key words:** wide load; double deaerator; thermal system; double-turbine regeneration system; comparison of technical economy

基于新能源发电比例迅速提高、传统燃煤电厂年运行小时数逐渐降低的发展趋势, 燃煤电厂宽负荷调峰已成常态<sup>[1]</sup>, 这样机组的实际运行煤耗偏离设计煤耗, 业主对机组低负荷下运行的经济性越来越重视, 机组宽负荷高效技术势必成为今后煤电产业技术的重点发展方向。因此当前电厂设计有必要考虑低负荷下机组的热经济性和热效率。美日及欧洲相关企业和科研院作了很多研究工作及有益的实践, 目前国内各高校、电力设计院、主机厂也对此进行了大量的研究, 机组宽负荷高效技术主要包括汽轮机宽负荷高效技术、热力系统优化技术、辅机

技术和运行技术<sup>[1]</sup>。包括如补汽阀<sup>[2-3]</sup>、零号高加<sup>[3]</sup>、烟气余热回收<sup>[1]</sup>、回热系统配置<sup>[4]</sup>、混合式加热器<sup>[4]</sup>、分级抽汽配汽装置、蛇形管加热器<sup>[5]</sup>、变频调速、永磁调速、低负荷燃烧系统配置、锅炉燃烧优化控制<sup>[6]</sup>等。基于这种背景, 笔者所在设计院进行了“大容量机组宽负荷控制技术研究 and 应用”的科标研究, 科标对相关技术进行了研究, 包括主辅机设备全负荷下性能优化、机组低负荷安全和稳定运行、机组全程控制、燃烧控制优化<sup>[7]</sup>等方面的研究, 两级除氧器热力系统是其中的一个热力系统优化技术。本文对两级除氧器热力系统进行了研究, 提出其可行性、适用范围以及经济性, 两级除氧器热力系统适用于高参数机组, 本文研究成果可为后续高参数机组采用两级除氧器热力系统提

收稿日期: 2020-03-14 修回日期: 2020-06-22

基金项目: 中国能建广东院科技项目“大容量机组宽负荷控制技术研究 and 应用”(EV03141W)

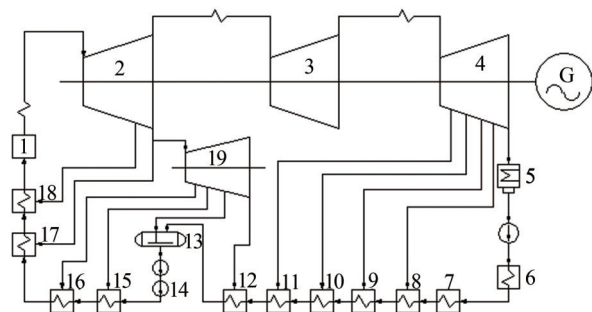
供依据, 以提高机组在宽负荷下的效率, 降低机组煤耗。

## 1 两级除氧器热力系统

### 1.1 系统组成

传统的热力系统一般是配有一级除氧器。除氧器的作用是凝结水打到除氧器后, 通过除氧器去除给水中的各种溶解气体。双机回热系统 (Echelon Cycle, EC) 带 BEST 透平 (Back Pressure Extraction Steam Turbine, BEST) [8-9] 是为 700 °C 高超超临界机组 (压力  $\geq 35$  MPa 和/或温度  $\geq 700$  °C) 开发的回热系统优化技术, 用新增的独立汽轮机代替中压缸的抽汽去加热给水, 它能够瓦解 700 °C 高超超临界机组 [10] 回热抽汽高温风险, 有效降低抽汽过热度, 减少加热器不可逆损失, 提高循环效率, 降低设备投资成本等多项优点。两级除氧器热力系统是在双机回热系统的基础上发展出来的, 适用于 600 °C 高超超临界机组及未来 700 °C 高超超临界机组。

在双机回热系统中, BEST 透平根据抽汽级数有多种配置方案, 以一次再热十级抽汽为例, BEST 的抽汽供给 #3~#8 加热器, BEST 排汽可排至低加或除氧器, 如 BEST 排汽至低加则是双机回热一级除氧热力系统, 系统组成见图 1, 回热系统组成为四高一除氧五低。



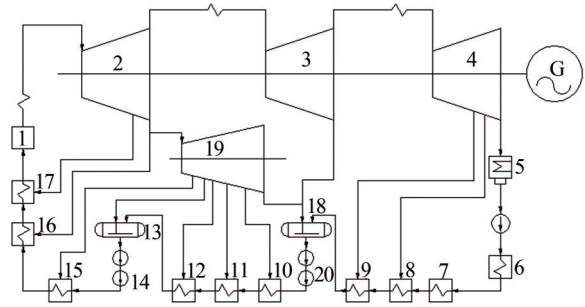
注: 1-锅炉;2-高压缸;3-中压缸;4-低压缸;5-凝汽器;6-轴封加热器;7-疏水冷却器;8~12-低压加热器;13-除氧器;14-给水泵;15~18-高压加热器;19-给水泵汽轮机。

图1 双机回热一级除氧热力系统图

Fig. 1 The double-turbine regeneration system with one-deaerator

如 BEST 排汽至除氧器, 则系统中有两级除氧器, 此系统即构成了双机回热两级除氧器热力系统, 系统组成见图 2, 回热系统加热器组成为三高两除氧五低, 凝结水通过凝结水泵打至 2 级低加后

进入一级低压除氧器, 然后通过新增中压给水泵打至 3 级低加后进入二级除氧器, 再通过高压给水泵打至 3 级高加后进入锅炉省煤器。两级除氧器热力系统相比于一级除氧热力系统, 主要是用一级除氧器替代了一级高压加热器。



注: 1-锅炉;2-高压缸;3-中压缸;4-低压缸;5-凝汽器;6-轴封加热器;7-疏水冷却器;8~12-低压加热器;13&18-除氧器;14-给水泵;15~17-高压加热器;19-给水泵汽轮机;20-中压给水泵。

图2 双机回热两级除氧器热力系统图

Fig. 2 The double-turbine regeneration system with double-deaerator

### 1.2 系统的影响

以主机参数 28 MPa/600 °C/620 °C 的一次再热百万机组为例, 两级除氧器热力系统相比于一级除氧热力系统, 系统配置对比如下:

1) 两级除氧器热力系统相比于一级除氧热力系统的主要差异是用一级除氧器替代了一级高压加热器。除氧器相比于高压加热器, 由于没有金属传热面, 结构简单, 在金属耗量、制造、投资上要低于高压加热器。

2) 两级除氧器热力系统, 由于多了一级低压除氧器, 除氧器的汽水系统要比高加的汽水系统复杂, 除氧器设备阀门的维护量增大。

3) 两级除氧器热力系统, 一级低压除氧器出口要增加一级中压给水泵配套系统。增加中压给水泵设备投资及设备维护。中压给水泵参数如下: 水泵流量 2 537 t/h, 扬程约 2.7 MPa。经咨询泵厂家, 苏尔寿泵选型为 HSB 轴向剖分单级双支撑泵, 泵的效率 85.5%, 电机功率 2.5 MW, 并需配套设前置泵。同时由于两级除氧器热力系统设置中压给水泵, 泵后的三级低加、中压给水管道及阀门压力比一级除氧系统提高, 此部分投资会增加。

4) 两级除氧器热力系统比, 一级除氧器替代了一级高压加热器。除氧器为混合式加热器, 高压

加热器为表面式加热器。由于混合式加热器中加蒸汽汽水和给水为直接接触传热,传热端差为零,能把给水加热到加热蒸汽压力下所对应的饱和温度,表面式加热器有传热端差,因此混合式加热器回热经济性要高于有端差的表面式加热器<sup>[3]</sup>。所以从理论上分析,两级除氧器热力系统的机组热耗会低于一级除氧热力系统,热耗降低的具体情况见表1。

表1 机组热耗对比表  
Tab. 1 Heat rate comparison

项目	双机回热一级除氧热力系统	双机回热两级除氧器热力系统
机组容量/MW	1 000	1 000
机组型式	超超临界一次再热湿冷	超超临界一次再热湿冷
机组初参数(TMCR工况)/MPa/℃	28/600/620	28/600/620
凝汽器背压/kPa	4.8	4.8
THA工况热耗kJ/kWh	7 121	7 111
70%THA工况热耗kJ/kWh	7 261	7 220
50%THA工况热耗kJ/kWh	7 565	7 516
40%THA工况热耗kJ/kWh	7 822	7 801
按5 500年利用小时数的平均热耗kJ/kWh	7 372.6	7 338.9
按5 000年利用小时数的平均热耗kJ/kWh	7 429.5	7 390.9
按4 500年利用小时数的平均热耗kJ/kWh	7 486.5	7 442.8

## 2 两级除氧器热力系统技术经济比较

### 2.1 机组热耗

以主机参数28 MPa/600℃/620℃的一次再热百万机组、10级回热(不带外置式蒸汽冷却器)系统为例,双机回热一级除氧热力系统机组与两级除氧器热力系统机组热耗对比见表1,表中热耗数据为某主机厂为工程配合提供的数据。

由表1可见:

1) 不同工况下的热耗,两级除氧器热力系统的热耗比一级除氧热力系统低10 kJ/kWh~50 kJ/kWh。

2) 机组在中间负荷区域(75%~50%负荷),两级除氧器热力系统比一级除氧热力系统的热耗要低近40 kJ/kWh~50 kJ/kWh。机组在高负荷(75%负荷以上)和低负荷区(40%负荷以下),两级除

氧器热力系统比一级除氧热力系统的热耗降低的幅度变小。对当前机组低负荷运行时间长的现状,两级除氧器热力系统运行的经济性变得突出。

3) 机组不同年利用小时的平均热耗,两级除氧器热力系统比一级除氧热力系统低约40 kJ/kWh。

### 2.2 对布置的影响

两级除氧器热力系统中新增的一级低压除氧器和新增的中压给水泵可分别布置在一级除氧热力系统中的除氧间除氧器层和0 m层,不额外增加主厂房跨度。新增的一级低压除氧器和中压给水泵需增加设备基础。两级除氧器增的水汽管道布置略复杂,水汽管道有所增加。

### 2.3 初投资比较

按本文一次再热百万机组双机回热一级除氧热力系统机组与两级除氧器热力系统机组的初投资比较见表2(一台机组)。

表2 初投资比较表  
Tab. 2 Investment comparison 万元

项目	双机回热一级除氧热力系统	双机回热两级除氧器热力系统
高压加热器(系统按双列高加配置)	基准	-500
除氧器	基准	+330
中压给水泵	基准	+450
低压加热器	基准	+70
除氧器基础和给水泵基础	基准	+20
除氧器及中压给水相关管道及阀门	基准	+25
合计	基准	+570

由表2可见:采用两级除氧器热力系统方案,每台机组仅增加570万元初投资,初投资增加不多。

### 2.4 经济性比较

经济比较见表3(一台机组)。

由表3可见,双机回热两级除氧器热力系统,其收益非常可观,按年利用小时数4 500 h计算,每年可节省煤耗量7 232 t,2年内就可以收回投资,投资回收期短。

## 3 结论

两级除氧器热力系统在技术上是可行的。

技术方面,两级除氧器热力系统,由于多了一

表3 经济比较表

Tab. 3 Comprehensive comparison

项 目	双机回热一级	双机回热两级除
	除氧热力系统	氧器热力系统
初投资/万元	基准	570
年平均发电煤耗降低值/ [g·(kWh) <sup>-1</sup> ]	基准	1.607
年利用小时数/h	4 500	4 500
年耗煤量差/t	基准	7 232
标煤价/(元·t <sup>-1</sup> )	950	950
年运行费用节省/万元	基准	687
年维护费用/万元	基准	10
中压给水泵电耗/(kWh·年 <sup>-1</sup> )	基准	+11.25×10 <sup>6</sup>
厂用电成本/[元/(kWh) <sup>-1</sup> ]	0.27	0.27
年运行电耗成本/(万元·年 <sup>-1</sup> )	基准	+303.5
内部年收益率/%	6.5	6.5
回收年限/年	—	2
20年折现值/万元	—	4 226

级低压除氧器及中压给水泵,汽水系统要比一级除氧器热力系统复杂,除氧器、给水泵设备维护量增大。

经济性方面,两级除氧器热力系统的设备初投资比一级除氧热力系统多570万元,每年可节省煤耗量7 232 t,2年内就可以收回投资。对当前机组低负荷运行时间长的现状,两级除氧器热力系统运行的经济性变得突出。

#### 参考文献:

- [1] 马佳燕. 火电机组运行灵活性及高效宽负荷技术综述 [J]. 热力透平, 2017, 46(2): 108-110+116.  
MA J Y. A review of flexible operation and high efficiency technology with wide load in thermal power units [J]. Thermal Turbine, 2017, 46(2): 108-110+116.
- [2] 何海宇, 范世望, 彭泽瑛. 1 000 MW 高效宽负荷率超超临界机组设计点优化研究 [J]. 动力工程学报, 2018, 38(10): 800-806.  
HE H Y, FAN S W, PENG Z Y. Design point optimization of a 1 000 MW high-efficiency wide-load-range ultra-supercritical unit [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(10): 800-806.
- [3] 王林, 伍刚, 张亚夫, 等. 1 000 MW 深度调峰机组热力系统优化研究 [J]. 发电技术, 2019, 40(3): 265-269.  
WANG L, WU G, ZHANG Y F, et al. Thermodynamic system optimization research on 1 000 MW deep peak-regulating unit [J]. Power Generation Technology, 2019, 40(3): 265-269.
- [4] 王亚军, 朱佳琪, 李林, 等. 二次再热机组回热系统设计研究

[J]. 电力勘测设计, 2016(3): 16-24.

WANG Y J, ZHU J Q, LI L, et al. Design on regenerative system of double reheat unit [J]. Electric Power Survey&Design, 2016(3): 16-24.

- [5] 张荣发, 陈宝星. 蛇形管高压加热器在高效宽负荷机组中的应用 [J]. 电站辅机, 2017, 38(3): 5-7+20.

ZHANG R F, CHEN B X. Application of header-type high pressure heater in high efficiency wide load unit [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2017, 38(3): 5-7+20.

- [6] 刘成成, 姚汉飞, 陈志刚. 浅谈火电机组低负荷经济运行措施 [J]. 中国设备工程, 2019(19): 228-229.

LIU C C, YAO H F, CHEN Z G. Discussion about economic operation measures under lower load condition for coal-fired power plant [J]. China Plant Engineering, 2019(19): 228-229.

- [7] 裴顺, 杨桂. 燃煤机组低负荷工况下安全稳定运行研究 [J]. 南方能源建设, 2018, 5(增刊1): 19-24.

PEI S, YANG G. Research on safe and stable operation under lower load condition for coal-fired power plant [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(Supp. 1): 19-24.

- [8] 乔加飞, 张磊, 刘颖华, 等. 二次再热机组双机回热系统热力性能分析 [J]. 热力发电, 2017, 46(8): 59-63.

QIAO J F, ZHANG L, LIU Y H, et al. Study on thermal performance of double-turbine regeneration system in double-reheat unit [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 59-63.

- [9] 李冰天. 1 000 MW 超超临界 EC-BEST 二次再热机组经济性分析 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(11): 36-41+63.

LI B T. Economic analysis of 1 000 MW ultra supercritical EC-BEST secondary reheat unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(11): 36-41+63.

- [10] 蔡小燕, 张燕平, 李钰, 等. 700 °C 超超临界燃煤发电机组热力系统设计及分析 [J]. 动力工程学报, 2012, 32(12): 971-978.

CAI X Y, ZHANG Y P, LI Y, et al. Design and exergy analysis on thermodynamic system of a 700 °C ultra supercritical coal-fired power generating set [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(12): 971-978.

#### 作者简介:



胡宏伟

胡宏伟 (通信作者)

1979-, 女, 满族, 辽宁本溪人, 高级工程师, 硕士, 主要从事发电厂热机专业设计工作 (e-mail) huhongwei@gedi.com.cn.

(责任编辑 李辉)