

# 凝汽器端差治理的几点措施

陆圣斌

(华能苏州热电有限责任公司, 江苏 苏州 215129)

**摘 要:** 华能苏州热电有限责任公司通过设备优化改造, 解决了凝汽器端差超标的问题, 凝汽器运行的经济性获得有效提高。

**关键词:** 凝汽器端差; 洁能管; 节能

凝汽器是汽轮机组的一个重要组成部分, 其作用是将汽轮机中做完功的排汽凝结成水, 在汽轮机的排汽口建立并保持真空, 并除去凝结水中的氧气和其他不凝结气体, 回收工质。若其不能正常运行, 将直接影响整个机组的安全和经济运行。本文对凝汽器的端差治理过程进行分析论述, 并提出了所采用的一些措施。

## 1 概述

华能苏州热电有限责任公司2×60MW汽轮机是C60-8.83/1.27型单缸、冲动、单抽汽、凝汽式汽轮机, 汽轮机及配套凝汽器为上海汽轮机有限公司生产制造。凝汽器是对分、双流程、淡水冷却带鼓泡除氧的N-3560-2型表面式凝汽器。凝汽器循环冷却水采用闭式冷却系统, 冷却设备为自然通风冷却塔。

两台机组自2006年投产以来, 凝汽器端差夏季达到10℃以上, 冬季22℃, 严重超标, 凝汽器真空值偏离设计值, 不符合华能节能标准中关于凝汽器端差标准值: 循环水入口温度小于或等于14℃, 端差≤7℃; 入口温度大于14℃并小于30℃, 端差≤5℃; 入口温度大于或等于30℃, 端差≤4℃。近几年治理凝结水端差超标问题重点在真空系统的泄漏处理、加强凝汽器清洗包括运行过程中的凝汽器半侧清洗、凝汽器雾化喷嘴改造、循泵电机高低速改造, 并将冷却塔塔芯材料更换为新型材料。经过历次检修和系统设备改造, 冷却塔冷却能力、真空系统严密性、凝结水溶氧均得到较大改善, 使之符合设备安全、经济运行标准要求, 但是凝汽器端差超标问题仍未得到根本解决。

为提高凝汽器运行效率, 在总结之前处理经验的基础上, 分析了影响凝汽器端差的诸多因素, 制

定了优化治理措施。2014年5月、10月, 分别在#2、#1机组C级检修期间, 对凝汽器进行了改造, 解决了两台凝汽器端差超标的难题。

## 2 原因分析

凝汽器端差为凝汽器压力下的饱和温度与凝汽器冷却水出口温度之差。对一定的凝汽器, 端差的大小与凝汽器冷却水入口温度、凝汽器单位面积蒸汽负荷、凝汽器铜管的表面洁净度、凝汽器内漏入空气量以及冷却水在管内的流速有关。

### 2.1 真空严密性

根据运行分析, 影响真空严密性的原因有: (1) 处在负压区运行的系统设备的焊缝、法兰结合面、阀门的密封性能; (2) 汽轮机乏汽、加热器排到凝汽器的疏水所释放的气体; (3) 进入凝汽器的除盐水释放的气体; (4) 低压缸的大气安全阀薄膜结合面漏气; (5) 凝汽器、加热器等容器的水位计漏空气; (6) 真空泵的空气系统及阀门漏空气。

### 2.2 凝汽器热负荷

凝汽器热负荷是指凝汽器内蒸汽和凝结水传给冷却水的总热量, 包括排汽、汽封漏汽、加热器疏水等热量。在冷却水流量、传热面积、循环水温度一定的情况下, 凝汽器热负荷增大, 会造成凝汽器端差增大, 凝汽器真空度降低。

我厂汽轮机组是热电联产机组, 每天的除盐水补水量较大(2000~3000吨/天), 主要补水方式为除盐水经凝汽器雾化喷嘴补水, 在凝汽器进行一级除氧, 经凝结水泵补水至除氧器进行二级高压除氧, 合格的给水经给水泵供给锅炉。2010年, 我厂对雾化喷嘴进行了更新改造, 采用了具有专利技术(专利号: 92230052.6)的WHD-3.0型雾化喷嘴,

WHD-3.0型雾化喷嘴（左）效果与原喷嘴雾化（右）效果如图1所示。

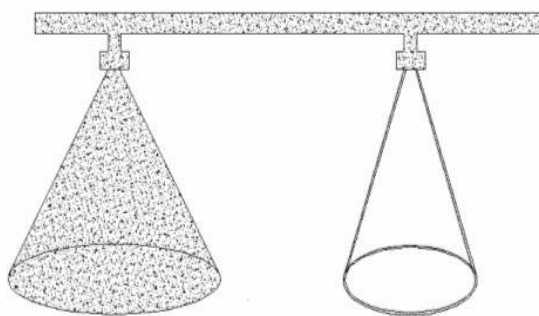


图1 WHD-3.0型雾化喷嘴

在保证正常补水压力、流量情况下，WHD-3.0型雾化喷嘴使除盐水在凝汽器喉部形成雾化带，达到除氧效果，同时通过接触式传热，吸收部分蒸汽凝结热，使部分补充的除盐水在凝汽器内形成一个混合式凝汽器，从而减轻表面式凝汽器的热负荷，强化排汽的冷却效果，回收冷源损失，提高真空，并能够满足各种负荷下的补水量。改造实施后，凝结水溶氧量在各种工况下均能维持在 $20\sim 35\mu\text{g/L}$ ，小于 $50\mu\text{g/L}$ 的国家标准，达到了预期效果。

### 2.3 循环水泵的经济调度

我厂两台机组配套三台循环水泵，两运一备，母管制运行。2010年，我厂完成三台循环水泵电机高低速改造。循环水泵可根据不同季节和机组功率的变化适时切换循环水泵运行方式，调节水量。实现凝汽器在经济真空下运行。

### 2.4 冷却塔

我厂双曲线自然通风冷却塔 $4000\text{m}^2$ ，槽式配水，喷溅装置为ABS材质的反射III型喷头，两机共用一塔。冷却塔于2012年改造后，达到了冷却性能的设计要求。但运行时发现，原设计时冷却塔塔边喷头开孔位置在水槽侧方，由于开孔位置较高，实际运行时水位不够导致侧方喷头无水，使得塔边约1m多的范围内基本无淋水，影响冷却效果。

### 2.5 胶球冲洗装置运行

胶球冲洗装置是保证凝汽器铜管清洁、降低端差，提高真空度的重要设备。我厂汽轮机设置安装的胶球系统为共用制系统，即凝汽器两侧收球网共用一台胶球泵和装球室，在胶球泵出口安装了分汇器。

自2006年投产以来，因收球率低，胶球冲洗装置未能正常投运。胶球系统收球不正常的原因有：

（1）活动式收球网与管壁不密合，引起“跑球”；（2）循环水压力低、水量小，胶球穿越铜管能量不足，堵在管口；（3）凝汽器进口水室存在涡流、死角，胶球聚集在水室中；（4）管板检修后涂保护层，使管口缩小，引起堵球；（5）新球较硬或过大，不易通过铜管；（6）胶球悬浮率差，停留在凝汽器水室及管道顶部，影响回收。经分析我厂胶球收球率低的主要原因是收球网与管壁不密合、收球网栅棒间距过大引起“跑球”。

### 2.6 凝汽器真空系统

我厂凝汽器真空系统主要有真空泵及其管道系统等组成，用以维持凝汽器系统真空。经分析，我厂凝汽器真空系统管道的低位布置方式，致使实际运行过程中，真空管路积水，使凝汽器内部不凝结气体聚集量增加，造成一方面气体传热系数较小，不凝结气体的增加将直接降低换热管的换热性能，另一方面不凝结气体份额的增加还会使气体分压力增大、而蒸汽分压力降低，从而导致蒸汽分压力下的饱和温度降低，表现为凝结水过冷度达到 $2^\circ\text{C}$ 左右。

### 2.7 凝汽器冷凝管

凝汽器的传热端差除与冷却水温度、凝汽器单位面积的蒸汽负荷、冷却水流速等有关外，主要还与凝汽器铜管内外表面清洁程度有关，因此尽可能保持凝汽器传热面的清洁，是提高换热系数，降低端差的关键因数。

我厂凝汽器凝结区冷凝管口径 $\phi 25.4\times 1\text{mm}$ 、材质为HSn70-1B；空冷区冷凝管口径 $\phi 25.4\times 0.6\text{mm}$ 、材质为TA2。根据2012年#1机B修、2013年#2机B修凝汽器铜管的抽管检查报告，凝汽器铜管存在沉积物腐蚀现象。结垢较多，造成凝汽器总体热阻增大、总体传热系数降低，端差增大。

## 3 治理措施

### 3.1 真空系统查漏、堵漏

（1）运行中对负压系统所有的阀门、管道以及低压加热器系统阀门管道和负压区仪表管路进行重点检查，排除漏点；（2）对低加疏水泵轴端密封件进行更换，调整轴端密封水，消除低加疏水泵轴封漏空影响；（3）根据负荷变化，及时调整汽轮机轴封，并对轴加水位严密监视，消除轴封调整引起的漏空；（4）利用机组停机检修的机会，对凝汽器喉

部以下汽侧和真空系统进行灌水查漏，重点检查凝结水泵本体接合面及进口管路法兰、阀门、仪表接头、取样管等附件，消除漏点，并用密封脂进行密封；（5）定期进行机组真空严密性试验，杜绝真空系统漏空。通过以上处理，#1、#2机组的真空严密性达到150Pa，符合标准要求。

### 3.2 冷却塔配水槽加装喷头

2013年5月，为消除因原布置方案水槽侧开孔位置太高，导致无水喷洒缺陷，在塔边水槽侧壁原安装喷头的下方开一个DN60的孔，拆除原有喷头并进行封堵（如图2所示），在新开孔位置通过法兰、壁管、弯头、喷头将水引出喷洒到塔边处1米范围内的填料上。方案实施后，塔边约一米范围布水正常、淋水均匀，提高了冷却塔运行效率。

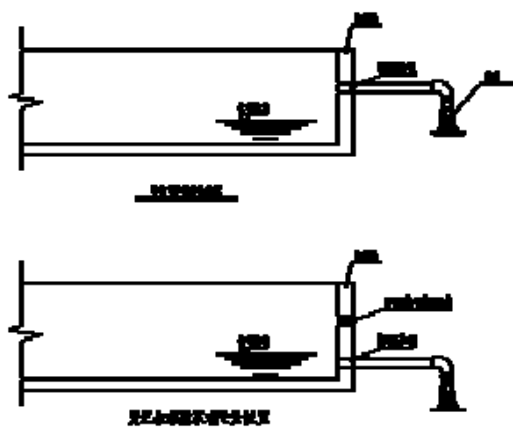


图2 冷却塔配水槽喷头位置

### 3.3 胶球清洗装置收球网改造

为提高胶球系统收球率，消除收球网跑球缺陷，对收球网进行改型改造。（1）增大收球网板于循环水管体内壁的夹角，使冷却水在出球口处不易形成涡流，胶球在水流带动下能顺利地进入出球管。在网板下部的出球口处设置网板，与壳体成圆弧形焊接，增大出球口空间，使收球更加顺畅；（2）收球活动网板的执行机构改为电动推杆加齿轮齿条传动机构，使活动网板不易脱离挡板，并保证收球网板关闭到位，避免出现“跑球”现象；（3）网板、传动轴等内部过流部件材质为316L不锈钢；（4）收球网栅棒间距5~7mm；（5）收球网为立式安装，进口循环水管有弯头，采用收球网操作轴与弯头中心线所在平面相垂直的布置方式。

2013年11月、2014年5月分别对#1机、#2机胶球收球网完成改造。经向凝汽器投入胶球进行胶球收

球率测试，收球率97%~98%，符合华能节能标准。

### 3.4 凝汽器真空系统管道改造

改变凝汽器真空管原设的低位布置方式，对凝汽器真空管进行悬空铺设，并对真空泵冷却器进行增容改造。消除了真空管路积水、凝汽器内部不凝结气体聚集。

### 3.5 凝汽器凝结区冷凝管更换为不锈钢洁能管

#### 3.5.1 凝汽器容量的定义

凝汽器的热负荷（传热量） $Q=k \times F \times \Delta T = C \times \Delta T$

其中 $C=k \times F$ 即为凝汽器容量，式中 $k$ -传热系数， $F$ -传热面积， $\Delta T$ -冷热流体的平均温差， $C$ -凝汽器容量。

#### 3.5.2 增加容量的意义

在凝汽器热负荷 $Q$ 不变时，增加凝汽器容量 $C$ 可以降低平均温差 $\Delta T$ ，因为 $\Delta T$ 降低，凝汽器端差也相应降低。

#### 3.5.3 增加容量的途径

从凝汽器的容量 $C=k \times F$ 可知，可通过增加传热系数 $k$ 、增加传热面积 $F$ 来增容。

增加传热系数 $k$ ，通常可采用采用表面具有强化传热特性的管子如洁能管（专利号：ZL 2012 2 0052808.0），在满足强度要求的前提下尽量减薄管子壁厚，采用更高的循环冷却水流速，等等；从凝汽器容量公式 $C=k \times F$ 可知，传热系数 $k$ 增加，在面积 $F$ 保持不变的情况下，凝汽器容量 $C$ 必然增加。该类改造已在徐州华润电力2×320MW机组凝汽器换管改造中获得成功。

增加传热面积 $F$ ，由于受到凝汽器空间、我厂汽机房现场位置紧凑、施工周期的限制等原因，不具备增加凝汽器管束的条件，故不可行。而且，采用增加传热面积的方式改造凝汽器后，虽然真空、端差有所改善，但由于面积增大、管径减小而产生的循环冷却水量增加、流动阻力增大易导致循环泵功耗增加，厂用电增大，使真空、端差改善产生的效益不足以弥补循环泵功耗的增加。

#### 3.5.4 洁能管

凝汽器的总体热阻由四大热阻构成：凝结热阻、导热热阻、污垢热阻、对流热阻。凝汽器的工作压力、温度取决于凝汽器的总体传热热阻，那么减小凝汽器的总体热阻就可以降低凝汽器的压力与温度。

#### （1）洁能管的技术原理

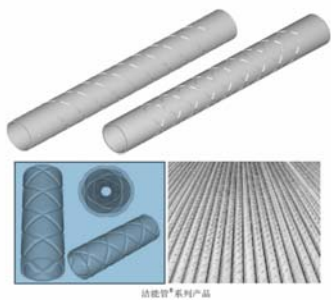


图3 洁能管

洁能管通过降低凝汽器凝结热阻、污垢热阻、对流热阻来大幅降低凝汽器的总体热阻。此外，洁能管在用于凝汽器换管改造降低凝汽器热阻的同时，还通过整体优化和参数匹配来降低凝汽器的循环水阻，达到减少厂用电的目的。简而言之，洁能管用于汽轮机冷端优化改造技术是通过减少热阻来多发电、减少水阻而少用电，以此来达到节能的目的，且洁能管采用低花纹管，不影响胶球清洗。

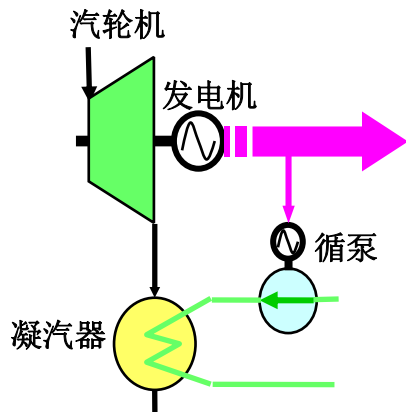


图4 凝汽器运行示意图

(2) 洁能管的关键技术

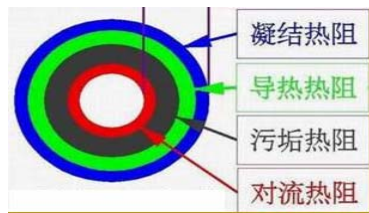


图5 凝汽器冷凝管热阻示意图

洁能管用于汽轮机冷端优化技术的核心在于洁能管技术参数的优化、应用于凝汽器整体技术方案的优化，将洁能管的热力特性数学模型化与凝汽器整体热力特性的数学模型化，并确定以凝汽器热阻降低带来的发电收益减去循环水泵耗电后的供电收益为目标函数的优化求解，使洁能管的换热特性与机组应用精密匹配，达到最佳换热效果、最小的系统阻力、最少的厂用电，使洁能管结构参数优化、

洁能管的整合应用优化与循泵功耗的整体优化有机结合。

(3) 不锈钢洁能管的特点

不锈钢洁能管耐冲刷腐蚀、耐氨腐蚀及其它常见腐蚀，可杜绝由于腐蚀导致的泄漏；不锈钢洁能管热膨胀率较铜管低，可以降低冷凝管与壳体之间的膨胀差导致的冷凝管松动泄漏等问题，此外洁能管的扰流结构能充分利用水流自身的冲蚀作用，使附着的污垢呈离散状态分布，在内壁形成众多的污垢冲蚀点，在水流的冲击下进行自动清除，具有自洁作用，清洗容易，既可以机械清洗（如在线胶球、高压水、塑胶子弹等），也可以采用化学清洗，运行维护简单。

3.5.5 凝汽器改造方案

(1) 预期目标

解决凝汽器端差大、传热系数低导致的问题，提高机组经济性；解决冷凝管结垢、腐蚀引起的安全问题，提高机组安全性和可靠性；适当增加凝汽器容量，以适应更高的热负荷。

(2) 方案措施

在胶球清洗装置收球网改造基础上，配合凝汽器真空系统管道改造同步实施凝汽器改造。采用不锈钢316L洁能管对凝汽器凝结区冷凝管直接换管，不改变凝汽器的原有结构，提高冷凝管的清洁系数，通过洁能管内壁的扰流参数匹配机组原来的流量-阻力曲线和流量-效率曲线，使循泵保持在原设计工况，在不增加循泵功耗的前提下改善机组真空和端差，从而提高机组经济性。

洁能管的化学成分（溶烧分析）见表1。不锈钢洁能管的力学性能见表2。不锈钢洁能管的规格、数量见表3。

表1 洁能管的化学成分（溶烧分析）								
材料TP316L	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
含量/%	0.03	1.0	2.0	0.045	0.03	10-14	16-18	2-3

表2 不锈钢洁能管的力学性能			
材料牌号	屈服强度σs /MPa	抗拉强度σb /MPa	(50mm)伸长率δ / %
TP316L	≥170	≥485	≥35

表3 不锈钢洁能管的规格、数量	
不锈钢洁能管	规格
不锈钢洁能管的外径及偏差	25.4+0 -0.25
不锈钢洁能管的壁厚及偏差	0.6±0.06
不锈钢洁能管的长度及偏差	7220+5 -0
不锈钢洁能管的数量	5610根

### 3.6 方案实施

2014年5月、10月,结合机组C级检修计划,按照改造方案对#2、#1机凝汽器真空系统管道、凝汽器凝结区冷凝管进行改造、更换,并试运成功、完成了项目验收工作。

## 4 运行效果

### 4.1 凝汽器改造试验数据

#2机凝汽器完成改造后,凝汽器压力降低3.04kPa,达到设计值。凝汽器端差下降了9.2℃,至4.21℃,达到了循环水入口温度大于14℃并小于30℃,端差≤5℃的华能节能标准。过冷度为0.5℃,达到≤1℃的华能节能标准;清洁系数提高0.5,达0.81。实测凝汽器A侧循环水阻力为18.16kPa,B侧循环水阻力为25.94kPa。比改造前降低25kPa。

#1机凝汽器完成改造后,凝汽器压力降低1.91kPa,达到设计值。凝汽器端差下降了6.5℃,至4.1℃,达到了循环水入口温度大于14℃并小于30℃,端差≤5℃的华能节能标准。过冷度为0.5℃,达到≤1℃的华能节能标准;清洁系数提高0.53,达0.93。实测凝汽器A侧循环水阻力为14.89kPa,B侧循环水阻力为21.24kPa。比改造前降低16kPa。

### 4.2 节能测算

(1) 通过凝汽器改造,在额定抽汽工况下,#2机改造后经修正后的凝汽器压力比改造前降低约3.04kPa,发电标准煤耗率下降约5.6g/(kWh)。年节约标煤2257.7t。

#1机改造后经修正后的凝汽器压力比改造前降低约1.91 kPa,发电标准煤耗率下降约3.0g/(kWh),年节约标煤约1212 t。

(2) 由于凝汽器改造性能提升,凝汽器水阻降低、端差降低,经运行实际试验,循环水泵可在循环水温度在25℃~32℃期间保持一低速、一高速并列运行,并可增加全年循环泵低速运行时间,减少高速运行时间。

1) 循环泵高低速运行小时统计:

2013年发电量8.1亿kWh、售汽量75.99万吨。

2014年发电量8.06亿kWh、售汽量92.77万吨。

2013年循环水泵低速累计运行7055.73 h、高速11020.38 h。

2014年循环水泵低速累计运行10947.81 h、高速6728.44 h。

2014年循环水泵耗电9210120kWh,环比2013年减少1994910kWh。

2) 凝汽器改造对循环泵耗电的影响:

凝汽器改造项目在2014年5~10月逐步落实完成,循环泵优化运行方式得以实现,7~12月循环泵耗电4704690 kWh,环比2013年同期减少1525980kWh。预计2015年循环泵耗电可控制在900万kWh左右,对比2013年循环泵耗电量可减少220万kWh。

按上网电价0.509kWh/元,标煤价730元/t计,可节约标煤:

$$2200000 \times 0.509 \div 730 = 1533.97t。$$

(3) 累计节能量: 1212 + 2257.7 + 1533.97=5003.67t

## 5 结束语

凝汽器端差治理涉及汽轮机冷端系统的各个组成部分,包括汽轮机低压缸末级组、凝汽器、冷却塔、循环水泵、循环供水系统、真空系统等。限于我厂设备系统实际情况,结合设备运行分析、影响凝汽器端差变化的主要因素分析,我厂凝汽器端差治理措施侧重于凝汽器、胶球清洗装置、冷却塔、真空系统的运行性能治理,并结合循环水泵、循环供水系统的优化运行,进行逐步、分阶段综合治理。

本次#1、#2机凝汽器端差治理主要方向是凝汽器真空系统管道改造、凝汽器凝结区冷凝管直接更换为不锈钢316L洁能管。改造后各项指标达到设计值、中国华能集团公司节能监督技术标准要求,设备运行效率、可靠性获得有效提高,节能效果显著,全年可节约发电标煤5003.67t。

### 参考文献:

- [1] 姚立人,凌云.汽轮机凝汽器传热分析与节能途径[J].热力发电,2003(7):52-54.
- [2] 武汉长河节能环保高科技有限公.华能苏州热电有限责任公司60MW机组凝汽器改造方案[Z]. 2013.
- [3] 西安热工研究院有限公司.华能苏州热电有限责任公司2号机凝汽器改造前后性能试验报告[R]. 2014.
- [4] 西安热工研究院有限公司.华能苏州热电有限责任公司1号机凝汽器改造前后性能试验报告[R].2014.