

# 接收侧向排汽凝汽器的技术特点及研制

徐 岩

(哈尔滨·第七 三所研究, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘 要:**介绍了我国首台接收侧向排汽凝汽器的技术特点及研制情况,重点分析了凝汽器在接收侧向排汽时的受力状况及热膨胀变化,并提出了解决问题的方法与途径。利用最新的凝汽器数值模拟软件对该凝汽器的汽相流场进行了分析计算,选取了合理的管束布置型式,从而优化了凝汽器的热力性能。

**关 键 词:**接收侧向排汽;凝汽器;侧向推力;管束排列;流场分析

中图分类号:TK223 文献标识码:A

## 1 引 言

哈尔滨·第七 三研究所为某燃机电厂 41 MW 蒸燃联合循环的侧排汽轮机(从 GET alsthom 引进)配套研制了接收侧向排汽凝汽器,其凝汽器主要技术参数见表 1。

表 1 凝汽器主要技术参数

型式	主要设计特性	
	双通道、双流程、接收侧向排汽	
凝汽器背压(绝压)/MPa	0.006 2	
凝结蒸汽量/ $t \cdot h^{-1}$	130. 8	
冷却水温度/ $^{\circ}C$	22. 7	
冷却水流量/ $t \cdot h^{-1}$	7 300	
冷却面积/ $m^2$	2 940	
冷却管长度/m	7. 152	

这是一台单壳、单压、对分制、双流程的表面式凝汽器,也是我国首次推出的、自行设计建造的第一台接收侧向排汽凝汽器。在研制过程中,通过先进的设计、计算手段,解决了由于汽轮机侧向排汽带来的一系列技术难题,为用户提供了满意的配套设备。到目前为止,该凝汽器已安全稳定运行了 5 年,各项技术性能指标达到或超过了设计要求。

## 2 研制接收侧向排汽凝汽器的几项关键技术

我国火电凝汽式汽轮机中汽轮机几乎全部是向下排汽,即汽轮机和凝汽器双层布置。对于下排结构,我国已有非常成熟的设计、运行经验,而对于侧排结构(即汽轮机和凝汽器在同一水平面内布置)我们还相当陌生,国内也没有现成的结构可供参考和借鉴。与下排结构相比,由于汽轮机排汽方向的改变,给凝汽器的研制提出了许多新课题,增加了设计难度。首先,在下排情况下,由于机组运行时产生的真空,凝汽器在外压下会受到一个向上的推力,这个推力小于凝汽器运行时自重,不会对凝汽器的安全造成影响,因此在设计时无需考虑这个推力的存在。而在侧排情况下,凝汽器受到一个与排汽方向相反的侧向推力的作用,这个推力相当于喉部排汽口的截面积  $S$  与凝汽器内外压差  $P$  的乘积。这个力是相当大的,如不采取措施加以控制,将对凝汽器的安全运行造成很大危险。其次,在侧排情况下,汽轮机和凝汽器均产生垂直和水平两个方向热膨胀,这就涉及到侧向排汽汽轮机和凝汽器的连接问题以及汽轮机和凝汽器如何定位的问题,这些问题是必须解决的技术关键。此外,在侧排条件下,还要考虑排汽方向的改变对蒸汽流场分布、阻力及热力性能带来的影响。对此,需要深入研究,多方论证,合理安排管束排列,以期得到最佳换热效果。

## 3 思路和途径

### 3.1 关于侧向推力的控制

本台凝汽器背压(绝压)为 0.006 2 MPa,排汽口面积约为  $8 m^2$  左右,凝汽器和汽轮机所承受的侧向

推力约为 750 kN, 这样大的侧向推力加于支座死点上会对凝汽器的安全造成很大危险, 因此需采取适当措施对侧向推力加以控制或尽可能消除其影响。通常解决此问题有两种方案:

方案一: 汽轮机与凝汽器在各自的支座上, 分别设立死点。

汽轮机的死点在汽轮机低压侧, 凝汽器的死点在设备中心, 汽轮机和凝汽器在垂直和水平方向上的热膨胀差均由喉部的膨胀节吸收, 补偿装置不承受外压产生的推力。

方案二: 汽轮机低压侧设置死点, 凝汽器不设死点, 可以自由移动。

在这种情形下, 喉部的补偿装置只补偿垂直方向热膨胀差, 凝汽器安装于活动支座上, 汽轮机和凝汽器在水平方向上的热膨胀差可以通过活动支座的自由滑动实现无死点膨胀。凝汽器在真空外压下, 承受的水平推力通过刚性补偿装置传递给汽轮机, 与汽轮机低压壳体的外压力相互抵消。这样机组承受水平力的问题就可以解决了。

分析对比上述两种方案发现, 如采用方案一, 凝汽器将承受很大的侧向力作用, 对凝汽器的安全非常不利, 必须采取措施, 对凝汽器的壳体、支座和基础进行加强, 以承受由推力引起的剪切力和颠覆力矩的作用。方案二侧向推力通过刚性补偿装置传到汽轮机, 与汽轮机低压侧的外压相互抵消, 凝汽器不需要对壳体、支座和基础进行特殊加强。因此, 从整个机组的经济性和安全性出发, 本次设计采用方案二较为适合。

无死点膨胀方案的顺利实施必须具备两个条件: 一是要求喉部的补偿装置应同时具备柔性和刚性, 即要求补偿装置既能够吸收垂直方向热膨胀量, 同时又可以有足够的刚度来传递侧向力, 因此补偿装置要采用特殊形式。二要使凝汽器自由移动, 必须采用磨擦系数相当小的活动支座, 以减少热膨胀位移时磨擦力的作用。

### 3.2 特殊结构的刚性补偿装置

采用两组不锈钢波纹管作为补偿元件, 两组波纹管之间安装数个足够强度的拉杆, 在两端设置磨擦系数很小且能承受较大压力的滑动板, 以保证结构既可以传递侧向力又可以补偿垂直热位移, 由于拉杆的存在, 此结构不能补偿水平方向热位移, 水平方向热位移的补偿由凝汽器在活动支座的水平移动来实现, 刚性补偿装置的结构简图见图 1。

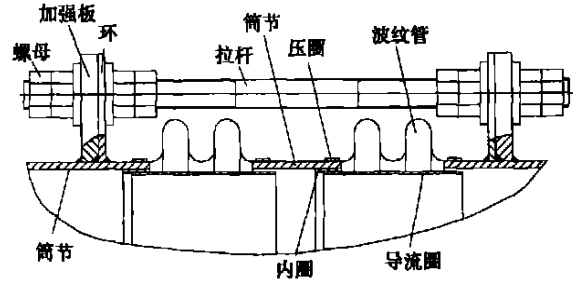


图 1 刚性补偿装置的结构简图

### 3.3 凝汽器的活动支座

一般大型电站凝汽器体积大、质量大, 因此在运行时要使凝汽器自由移动所要克服的磨擦阻力也很大, 而 GET alsthom 公司要求凝汽器膨胀移动时产生磨擦作用力小于 36 kN, 这就要求支座磨擦系数不大于 0.04。由于凝汽器膨胀方向是两向的, 不能采用滚动支座, 只能研制磨擦系数极低的滑动支座。为使这个磨擦阻力尽可能减小, 设计接触面时就应考虑采用磨擦系数小的材料或用特别处理的表面以达到减小磨擦阻力的目的。常用的滑动支座多采用钢板与钢板磨擦, 其磨擦系数为 0.2; 钢板与铜板磨擦, 其磨擦系数为 0.15; 采用聚四氟乙烯板, 磨擦系数为 0.12。国内外最新研究表明, 采用镜面不锈钢与聚四氟乙烯板接触可进一步减小磨擦阻力, 其磨擦系数只有 0.08。在此基础上, 我们研制了一种润滑剂涂抹在滑动板表面, 其磨擦系数可减小至 0.04, 此润滑剂物理、化学性能非常稳定, 可长期存留在滑动表面。经样件试验测试, 此结构的磨擦系数可达到 0.04, 满足设计要求。

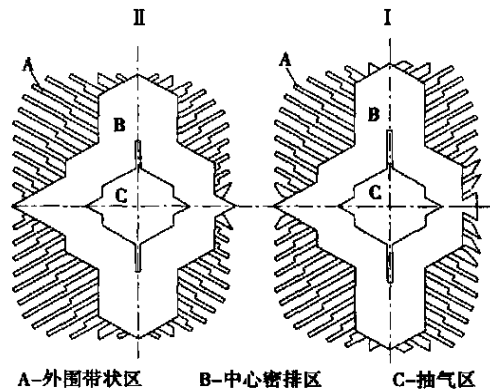


图 2 半边管束排列方案图

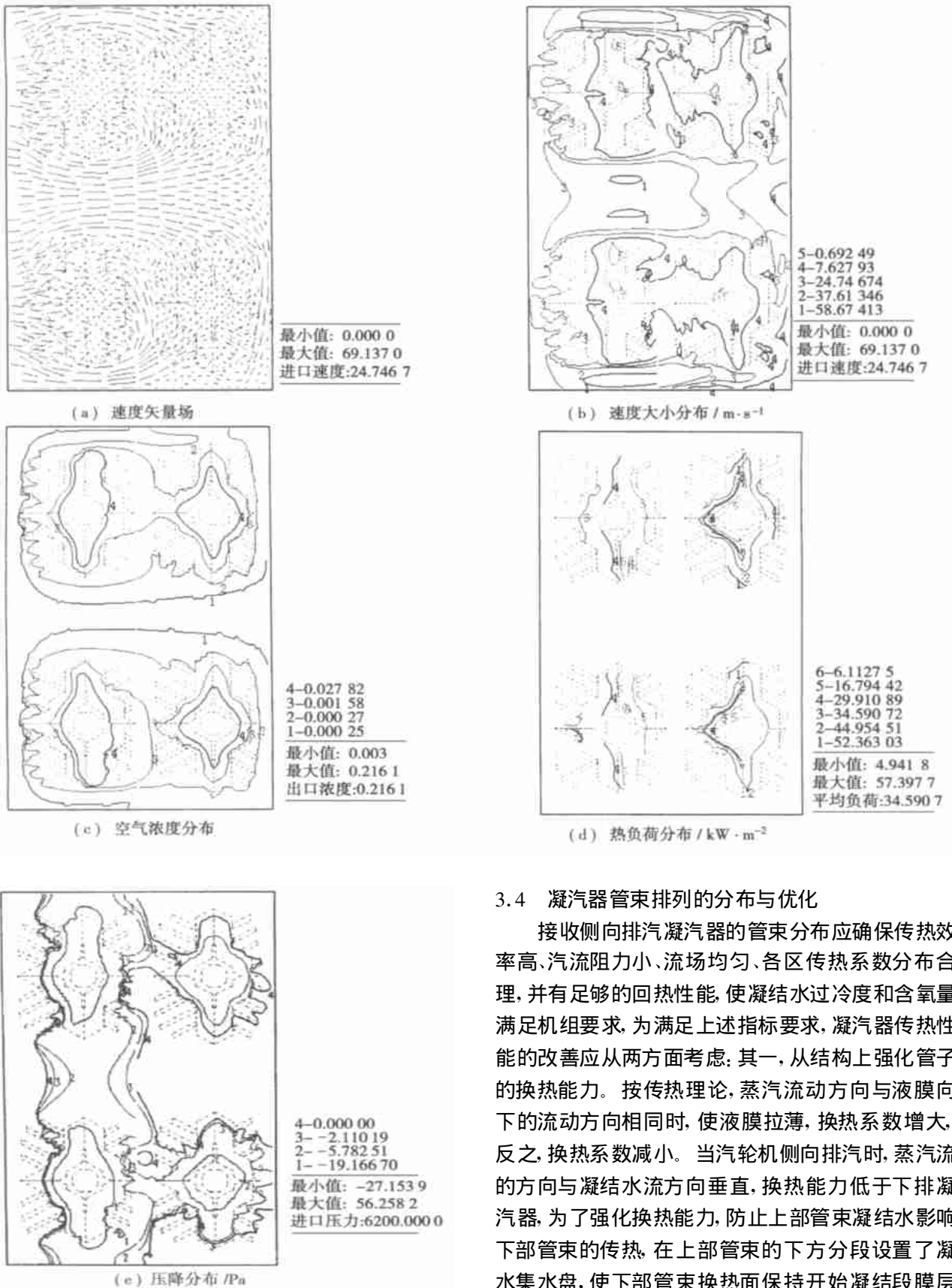


图 3 管束流场数值计算结果

### 3.4 凝汽器管束排列的分布与优化

接收侧向排汽凝汽器的管束分布应确保传热效率高、汽流阻力小、流场均匀、各区传热系数分布合理,并有足够的回热性能,使凝结水过冷度和含氧量满足机组要求,为满足上述指标要求,凝汽器传热性能的改善应从两方面考虑:其一,从结构上强化管子的换热能力。按传热理论,蒸汽流动方向与液膜向下的流动方向相同时,使液膜拉薄,换热系数增大,反之,换热系数减小。当汽轮机侧向排汽时,蒸汽流的方向与凝结水流方向垂直,换热能力低于下排凝汽器,为了强化换热能力,防止上部管束凝结水影响下部管束的传热,在上部管束的下方分段设置了凝水集水盘,使下部管束换热面保持开始凝结段膜层较薄的条件,从而有效地提高换热能力。其二,采用合理的管束排列方式。经流场分析和热力性能计

算,并参照国内外大型凝汽器管束布置,确定第 I 流程管束和第 II 流程管束均采用中间抽气的形式,见图 2。

冷却管为三角形排列,抽气管布置在管束中部,这种均匀向心式外围管束可以使蒸汽从管束外围沿数量相当多的进汽通道进入管束,一部分蒸汽在管束外围条带内先行凝结,然后与另一部分新蒸汽一起进入管束密排区,剩余的汽气混合物在管束中部空气冷却区进一步凝结,携带少量蒸汽的空气汇集并流入抽气管排出凝汽器。考虑到侧向排汽机组高度空间较为紧张,设计热井时在凝汽器下部管子和热井水面间留有适当的高度,保证一部分蒸汽可直接到达热井表面,从而使热井中的凝水得到良好的回热,改善除氧效果。为了获得管束排列的最佳方案,我们利用与某大学联合开发的流场计算软件对该侧排凝汽器管束排列方案进行反复计算和分析,调整各参数使管束排列具有理想的流场分布,图 3 为最终确定的管束流场数值计算结果。

图 3(a)和图 3(b)分别为壳侧蒸汽速度矢量场和速度大小分布等值线图。由图 3(a)可见,除一部分汽流从蒸汽入口直接进入两组第 I 管束区外,绝大部分汽流以较高的流速沿中间通道和上、下侧进入各向心管束的外围和密排区,蒸汽流速也从外围带状管束向各中心密排区递减,在抽气口附近汽流速度降至最低,说明大部分蒸汽在密排区已得到完全有效的凝结,没有凝结的气体汇集于空冷区。由图 3(b)可见,最大蒸汽流速出现在中间通道内为 69 m/s,最小蒸汽流速在抽气口附近。

图 3(c)为空气浓度分布等值线,不难看出从每个管束的外围到中心空气浓度逐渐升高,越接近抽气口空气浓度越高,在各抽气口附近空气浓度可以达到较大值(最大值为 21.6%),在管束其它区域空气浓度维持在较低的水平,一般不超过 3%。

图 3(d)为凝汽器热负荷分布等值线,由图可见,每个管束区的热负荷由外围到内侧逐渐降低,抽

气区附近热负荷已降至  $6.1 \text{ kW/m}^2$ ,第 I 流程管束的热负荷平均值高于第 II 流程管束,热负荷在第 I 流程管束的计算值分布范围为  $15 \sim 57 \text{ kW/m}^2$ ,在第 II 流程管束的计算值分布范围为  $4.9 \sim 35 \text{ kW/m}^2$ ,最大热负荷点( $57.3 \text{ kW/m}^2$ )出现在第 I 流程管束区的上部边缘,第 I 流程管束密排区的外侧保持有较高的热负荷水平。以上数据说明汽轮机低压缸排汽大部分是在管束的主凝结区凝结,并且第 I 管束区的蒸汽凝结量远大于第 II 管束区的凝结量。

图 3(e)为壳侧流场相对于入口压力的压降分布等值线,参考压力为入口截面的中间点,某点的实际压力为该点压降加上参考压力。由图可见,凝汽器汽阻水平在 30 Pa 以下,不会使凝结水产生很大的过冷度。

以上各数值计算结果表明,该凝汽器的管束排列方案具有汽侧流场均匀,热负荷分配合理,凝结较充分和汽阻较小等特点。

## 4 结 论

本设备自投入使用以来,已安全、可靠全负荷运行了近 5 年,经实际考核,机组的结构可靠,凝汽器的 3 个主要性能指标均达到或超过原设计给定值。由于设备真空度好,过冷度小(实际为 0,设计规定值为 0.5),凝水含氧量低(实际为  $10 \mu\text{g/L}$ ,设计规定值为  $15 \mu\text{g/L}$ ),提高了设备出力,节约了能耗,为电厂带来了可观的经济效益。

## 参考文献:

- [1] 张卓澄.大型电站凝汽器[M].北京:机械工业出版社,1993.
- [2] 齐复东.电站凝汽设备和冷却系统[M].北京:水利电力出版社,1995.
- [3] 杨世铭.传热学[M].北京:高等教育出版社,1991.
- [4] 彭虎劳.200MW空冷汽轮机凝汽器管束布置优化设计[J].热力发电,1995,24(6):26-30.

(渠 源 编辑)

增压锅炉自动燃烧调节系统燃油滑阀组的特性研究 = **An Investigation of the Characteristics of the Fuel-oil Slide-valve Group Installed in the Combustion Auto-regulation System of a Supercharged Boiler** [刊, 汉] / ZHOU Guo-yi, WANG Jian-ping (Institute of Power Engineering under the Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 189 ~ 192

With the fuel-oil slide-valve group used in the combustion auto-regulation system of a supercharged boiler serving as an object of investigation a preliminary exploratory study was conducted of the operating characteristics of the valve group through a theoretical analysis as well as a review of the development and tests, that resulted in the successful domestic production of its components. The results of the study indicate that the fuel oil flow rate of the slide valve after regulation exhibits a single-valued character and is suitable for proportional regulation. This means that when the pressure difference  $\Delta P$  before and after the fuel-oil regulating slide valve is constant, the oil spray quantity  $B$  will vary directly as  $f$ . The results of the study can provide a basis for the further study of the system development and testing, operation management as well as the training of maintenance personnel, etc. **Key words:** marine supercharged boiler, combustion regulation, fuel oil valve group, characteristics

接收侧向排汽凝汽器的技术特点及研制 = **Technical Features and Development of a Steam Condenser with a Lateral Acceptance of Turbine Steam Exhaust** [刊, 汉] / XU Yan (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 193 ~ 196

The technical features and development status of the first condenser in China with a lateral acceptance of turbine steam exhaust is described with an emphasis on the analysis of its force-assuming condition and thermal expansion changes. In addition, some methods and approaches are proposed to resolve the pertinent problems. By using the newest numerical simulation software analyses and calculations were conducted concerning the steam-phase flow field of the condenser. A rational selection of tube bank layout modes has led to the achievement of an optimized thermodynamic performance for the condenser. **Key words:** lateral acceptance of turbine steam exhaust, steam condenser, lateral thrust, tube bank arrangement, flow field analysis

某电站亚临界直流炉改造前、后炉内燃烧的数值模拟及分析 = **Numerical Simulation and Analysis of the In-furnace Combustion of a Subcritical Once-through Boiler of a Power Station Prior to and After its Retrofitting** [刊, 汉] / ZHANG Bo, HUI Shi-en (Institute of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), WEN Jun, XU Dang-qi (Guodian Research Academy of Thermal Engineering, Xi'an, China, Post Code: 710032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 197 ~ 200

By using a numerical simulation method a study was conducted of the in-furnace combustion at 100% BMCR (boiler maximum continuous rating) for a power station boiler prior to and after its retrofitting. Through an analysis and a comparison of field velocity, temperature and oxygen content of the boiler in-furnace combustion prior to and after its retrofitting it has been ascertained that as a result of the boiler retrofitting the in-furnace combustion is stable, the slagging and high-temperature corrosion tendency of the water wall becomes weaker. An argumentation of the boiler retrofitting has confirmed the feasibility of the adopted version of retrofitting. Meanwhile, concerning the phenomenon of non-uniform distribution of flue gas temperature at the furnace outlet after boiler retrofitting, as discovered by relevant calculations, several proposals are put forward to cope with the situation. They consist in lowering the height of injection of zoned air supply and in increasing the zoned air velocity. **Key words:** boiler, combustion, numerical simulation