

略论秦山核电厂凝汽器的研制

沈杏初 张卓澄

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔提要〕 本文主要从火电核电技术比较、国外有关公司技术方案比较、国内外技术水平比较的角度,围绕滨海核电站凝汽器“大型化”、“采用海水冷却”、“配套于核动力装置”三个特点,分题简要论述浙江秦山核电厂 3×10^5 千瓦机组凝汽器研究、试验、设计、供材、制造、运输、安装、调试、运行管理等方面的主要问题。在总结经验的基础上对拟议中的秦山核电厂二期工程两套 6×10^5 千瓦机组凝汽器的研制技术路线提出看法。

主题词 核电站 凝汽器 研制

滨海压水堆核电站凝汽器具有如下三个特点:

1. 大型化——随着电厂容量及机组单机功率的不断增大,火电凝汽器大型化早已是事实,而在单机功率相同的条件下,核电凝汽器比火电凝汽器几乎大一倍,因此大型化带来的特点、矛盾和困难,对核电凝汽器更为突出;

2. 采用海水冷却——滨海火电凝汽器因冷却海水侧零部件腐蚀已经给电厂安全运行带来许多麻烦,而核电厂对凝水给水含盐量的苛刻要求,迫使核电凝汽器设计师更应谨慎行事;

3. 配套于核动力装置——由于临界、超临界参数和中间再热方式的采用以及直流锅炉的广泛发展,火电厂对凝汽器接收旁路排放蒸汽、凝汽器除氧已有特殊的要求,而对于核电凝汽器,为了确保一回路设备在运行和停堆时的安全,除了这些更高的要求外,还要满足核动力装置另外的一些特殊要求。

围绕上列三个特点,核电凝汽器的研制必须解决一系列技术问题。由哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所承担研究试验设计任务的秦山核电厂 3×10^5 千瓦机组凝汽器,比较成功、顺利地解决了这些技术问题,目前已制造完毕,正在电厂工地安装。

一、凝汽器的本体布置

本机组凝汽器采取了汽侧凝水侧各自相通且为刚性连接的双壳体、横向布置、双流程、单背压型式,这主要基于下述两点:

1. 设计院确定二回路系统采用我国现有 6×10^5 千瓦火电机组的基础型式,两台低压汽轮机之间设有中间基础隔墙;

※ 本文收到日期:1987年12月7日

2. 机组扩初设计期间曾一度明确凝汽器采用国产无缝钛冷却管, 要求设计者将冷却管有效长度控制在10米左右。

如若机组基础能够重新设计, 取消中间隔墙, 而且钛冷却管长度不受限制, 则凝汽器也可以设计成单壳体、纵向布置单流程型式, 日本日立公司关于本机组的报价设计方案就采取了这种型式。

考虑到本机组凝汽器采取直流式海水冷却, 设计水温仅为18℃, 经分析论证表明, 采取单背压式凝汽器设计方案是合理的。

西德 KWU 按我国提供的机组条件(设有中间基础隔墙)所提交的凝汽器报价设计方案, 其本体布置型式与本设计方案完全类同。

事实上, 大型电站凝汽器本体布置方案的“可塑性”很大, 可以依据机组设备布置、基础设计型式、管道布置、冷却水流量和冷却管长度的限制、制造厂发货运输条件等确定。

二、喉部膨胀节

对于大型电站凝汽器, 为保证垂向自由热膨胀, 是采取在喉部装设膨胀节, 还是在壳体底部装设弹簧, 这在国外不同的制造厂有不同的选择。就我国而言, 鉴于大规格弹簧材料落实困难, 以采取在喉部装设膨胀节为宜。从目前国外发展趋势看来, 橡胶膨胀节明显地优于金属膨胀节。

国内一些厂家曾经在大型凝汽器上采用过喉部橡胶膨胀节, 但都是天然橡胶膨胀节。对于本机组凝汽器, 参照美国 ASTM D-20 的 ZBE515EA14C12, 在国内一橡胶厂的协作下, 成功地试制了适于经受核动力装置旁路排放蒸汽作用的哑铃形截面、周长达28米的氯丁橡胶膨胀节, 还对该膨胀节实物段进行了详细的受力与变形规律试验以及合理的装配工艺探索。试制、试验和探索结果表明, 该膨胀节达到了从日本引进的陡河电厂凝汽器和法国 9×10^5 千瓦机组凝汽器的喉部橡胶膨胀节的性能水平。这种膨胀节可靠、简易、便宜。

三、凝汽器的死点

本机组两台低压汽轮机的死点已确定在中间基础隔墙的中部位置上。那末, 喉部装设了橡胶膨胀节的凝汽器的双壳体之间的连接刚性多大为宜, 双壳体凝汽器的死点应置于何处, 死点确定后如何限制凝汽器纵向横向的膨胀方向等等, 在缺乏国内经验的情况下, 通过多方调研分析和详细论证计算予以解决了。

四、主要设计参数的优化论证

对于本机组凝汽器的设计压力、设计水温、冷却倍率(冷却海水流量)等热力设计主要参数的最佳值(优化值), 在上海有关制造厂、设计院配合下, 利用计算机做过多

方案比较计算和分析论证,取得了各方都较为满意的结果。但是,鉴于我国许多经济因素,诸如电价、设备折旧率、投资回收年限、维修费用等不那么确定,因此,这些优化论证工作的实际意义还毕竟有限。

五、冷却管束的型式及冷却管排列方式

为了从根本上确保与改善凝汽器的热力性能,国外有关大公司都有自己“水模型试验——实物工业性试验——预编程序的详细热力计算”一整套研究试验设计计算系统,借此形成自己一套独特的、不断更新与完善的冷却管束型式及冷却管排列方式。但是由于经费和进度上的原因,本机组凝汽器只能象我国所有凝汽器设计那样,从现有国外模式中探求选择一种参考模式,并根据已有的经验进行设计。只要在设计中谨慎分析比较,特别注意进排汽道、抽气通道和抽气集管的设计细节,还是可以保证基本性能要求的。

六、钛冷却管与管板的订购

冷却管是凝汽器的关键材料。同国外情况一样,凝汽器采用钛制冷却管与管板是滨海核电站的重要标志之一。本机组凝汽器所需要的 100 吨钛冷却管从日本进口。与日本两家公司最终商定的钛冷却管技术条件,稍高于通用技术条件(如美国 ASTM, 日本 JIS, 德国 DIN, 法国 Vallourec 等),就管材的质量和先进性而言,达到了法国核电凝汽器实际用管的水平。成交价格为每吨 1 万 7 千美元。几乎同一时期,另一厂家向日本订购火电凝汽器用钛冷却管,按 JIS 技术条件交货,每吨 2 万 2 千美元。

必须强调指出,对于象钛管这样新型、昂贵的材料,如同普通诸如碳素钢那样,照搬某一技术条件文本去订购是不妥的。消极地降低技术条件去迎合供方愿望,当然有害;盲目地抬高某些技术指标也是不明智的。如果换了用途,换了凝汽器,换公司,或者换成国内订货,则技术条件的某些内容细节也应适当变化,做到质量、用途、价格合理的统一。大型电站凝汽器钛冷却管用量如此之巨大,一个微小的技术措施,很可能会带来很大的经济效益。

本机组凝汽器钛管板的订购经验与钛冷却管类似。

七、冷却管振动

大型凝汽器冷却管振动是个特别引人关注的安全可靠性问题。哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所基于过去军品研制经验和现有的试验条件,参照法国和日本对核电凝汽器钛管振动进行大规模试验研究的方法,对本机组凝汽器进行了实际管长(10米多)多跨钛管固有频率、振型的测试和管段气流激振试验研究。根据多方案试验结果的分析,对从日本引进的宝钢自备电厂钛管凝汽器的避振原则和设计方法作了重要补充和修正,得出较为稳妥的设计方法和结构措施。

八、确保冷却水侧密封性的技术措施

按照日本、西德、英国公司的看法,火电凝汽器的普通管板结构也能满足核电凝汽器的冷却水侧密封性要求。哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所根据过去核动力装置凝汽器采用双管板板架结构的研制经验,认为还是法国、美国核电凝汽器设计师的关于必须采取具有双层密封的管板结构的观点较为稳妥。这种双层密封管板结构的根本特征(优点)是万一冷却管与管板连接发生泄漏时冷却水也不会漏向凝汽器壳侧污染冷凝水。

九、钛冷却管与钛管板的密封连接

对于介质压力不高的电厂凝汽器的冷却管与管板的密封连接,究竟是单纯胀接还是胀接加封焊为好,这是国内外工程技术界一直在探讨、争论的问题。著名的 BBC 公司不仅不主张采用双管板和双层密封结构的管板,而且也反对采用封焊,认为只需在单管板上胀接即可,甚至对核电凝汽器也是如此。法国头一批核电凝汽器采用单纯胀接的方法,后来大约在1977年已决定采取胀接加封焊。日本也一直推崇胀接加封焊的方法。实际上封焊简易、可靠,只要注意操作条件并无副作用。于是哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所确定把胀接加封焊作为确保本机组凝汽器密封性的重要措施,认真地完成了胀接与封焊的科研试验,根据科研试验结果,产品制造厂还顺利地进行了生产性工艺试验。

十、旁路排汽减压减温装置

在本机组方案设计阶段,我们曾试图采用我国船用及火电凝汽器历来沿用的多级(5~7级)减压减温箱来处理流量比设计工况大40%左右的旁路排放蒸汽,这种减压减温箱尺寸重量相当大,空间布置矛盾突出。后来考察了从若干国家进口的大型火电机组凝汽器,均已采用少数几级(1~3级)膨胀原理研制的小孔集管式加减温水喷嘴雾化的旁路排汽减压减温装置,便决定改变方案,而且不是简单地参照宝钢自备电厂凝汽器的减压减温装置进行设计(该装置接收的旁路排汽量较小,过剩的减温水量大),而是根据 BBC 公司和 EPRI 研究报告提供的信息和线索,建立科研试验课题,完成了小孔集管式两级减压装置的原理性吹风试验和减温水喷嘴雾化试验,在取得试验研究成果的基础上,又进行了结构布置的多方案计算比较,设计并制造成功国内新型旁路排汽减压减温装置。

十一、喉部的特殊设计

本机组凝汽器喉部内装有通过吹风试验筛选出来的一系列所谓导流元件,它们是适应核电凝汽器接收旁路蒸汽量和确保凝汽器管束前汽流均匀、避免冷却管等零部件遭受冲击侵蚀所必需的。其实,日本、法国都有这方面的大量报导,明确对于核电凝汽器

的喉部, 必须针对每一种型式进行试验, 并按所得的结果进行设计。

十二、热井除氧

核机组对凝汽器本身的除氧能力有比较严格的要求, 并且是通过除氧式热井来实现的。但是本机组凝汽器热井的设计几乎完全参照了宝钢自备电厂凝汽器, 这是考虑了下列四个因素:

1. 本机组凝汽器冷却管采取了纯向心式排列, 热井冷凝水表面不会有过冷现象。
2. 本机组预定在电网带基本负荷, 因此可能导至冷凝水含氧量升高的启动、低负荷运行时间较短;
3. 本机组系统设有除氧器;
4. 宝钢自备电厂凝汽器运行经验表明, 热井冷凝水含氧量较低, 可以满足秦山核电厂二回路系统设计部门的要求。

十三、水室型线

按照近代大型凝汽器发展趋势, 冷却水室应通过试验选取不同曲率的圆弧段组成。考虑到本机组凝汽器不是批量产品, 又采用了耐高速水流侵蚀的钛冷却管和钛管板, 因此设计了简单的箱形进口水室和圆锥台形进出口水室。值得一提的是, 该水室制造完毕后水压试验一次成功(不漏), 创造了国内大型凝汽器水室水压试验最顺利的纪录。

十四、高能流体的排入

本机组凝汽器除了冷凝来自汽轮机的排汽外, 凝汽器还必须接收许多种高能流体(流量较大、参数较高的水和蒸汽)的排入, 这是压水堆核机组的重要特征。本机组的系统、汽轮机本体、高压给水加热器、汽水分离再热器等, 在各种工况(包括可能出现的多种事故工况的组合)下有相当大量的高参数疏水排入凝汽器。哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所根据过去在压力容器、换热器方面的研制经验, 参考进口火电机组资料, 通过几十个方案的计算和分析比较, 成功地设计了一台直径为 2.8 米、长 10 多米的独立的高压疏水扩容器, 加上附设在凝汽器壳体上的专门设计的两个“背包式扩容器”, 顺利地解决了这一难题, 满足了系统设计要求。

十五、冷却水反冲洗装置

在本机组凝汽器设计中, 确定采用迄今为止进口机组凝汽器中性能最良好、达到当今世界先进水平的反冲洗装置, 它由直径为 1300 mm 及 1400 mm 的耐海水腐蚀的电动蝶阀和蝶阀开闭的程序控制机构组成。对于这种电动蝶阀, 已按哈尔滨船舶锅炉涡轮

机研究所拟制的技术规范从国外进口。程序控制机构也根据哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所确定的技术条件在上海配套解决。

哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所从1982年起,充分利用军品核动力装置凝汽器研制经验,发挥了试验研究、设计技术上的优势,取得了本机组凝汽器研究试验设计的圆满成功。本机组凝汽器(不包括高压疏水扩容器)干重约800吨,长15米,宽18米,高16米。这是我国自行研制建造的第一座核电站的凝汽器,也是我国首台尺寸重量最大的全钛凝汽器。这台凝汽器经制造厂近二年的努力已生产完毕,正发往秦山核电厂工地安装。本机组凝汽器(包括高压疏水扩容器)正式施工设计图折A₄约2500张,正式技术文件约200页,专用技术规范书和技术条件十多份,科研试验报告十多份。本机组凝汽器自行研制的成功,显示了军转民、军民结合、以民为主的广阔前景,开创了我国核电设备国产化的良好先例。

通过秦山核电厂凝汽器的研制所取得的主要经验有两条。

1. 核电凝汽器国产化的巨大经济意义

本机组凝汽器实际造价未超过1700万元人民币,而几乎同一时期宝钢自备电厂从日本引进的1号、2号机组共两台凝汽器与本机组凝汽器相比,尺寸重量相近,性能指标差不多,结构与配套情况也类似,却花了约1300万美元。包括哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所在内的国内有关单位对我国未来 6×10^5 千瓦、 9×10^5 千瓦压水堆核电站钛管凝汽器造价估计和预计的结果,也得出了类似的结果,如下表所列。

压水堆核电站 机组的功率(千瓦)	凝汽器的国内 造价(人民币,万元)	凝汽器的引进 价格(美元,万元)
30万	1700	1300
60万	4000	2500
90万	6000	3500

另一方面必须指出,一般采用黄铜管的火电机组凝汽器,其造价仅约为所配套的汽轮机造价的1/4,而采用钛管的核电机组凝汽器,其造价约为所配套的汽轮机造价的2/5。根据国内对大

型压水堆核电站八大设备(压力壳,堆内构件,蒸汽发生器,稳压器,核岛主泵电机,发电机,汽轮机,凝汽器)方案估价结果表明,钛管凝汽器的造价大约与堆内构件并列第三,高于压力壳、蒸汽发生器、稳压器及核岛主泵电机,而仅低于汽轮机及发电机。

鉴于我国拟议中2000年前建造的大型核电厂均位于滨海,势必都采用钛管凝汽器,可见凝汽器国产化的巨大经济意义。

2. 消化吸收国外先进技术,紧跟世界发展先进水平

本机组凝汽器的研制成功的一个重要条件是坚持不懈地通过多种渠道和方式收集国外凝汽器技术资料及情报信息,比较全面地了解、掌握国外凝汽器特别是核动力装置凝汽器、钛管凝汽器的研制动态和发展水平。从七十年代初起,哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所抓住钛管凝汽器的发展苗头和方向,在经费十分困难的情况下,千方百计创造条件、化整为零开展钛管凝汽器的试验研究和工程预研工作。这是该所承接本机组凝汽器研究试验设计任务的重要基础,此外,通过详细调研从日本、法国、意大利、苏联等引进的大型凝汽器技术资料和运行经验,为顺利完成本机组凝汽器研究试验设计任务创造了重要条件。

现已清楚,法国阿尔斯通——大西洋公司从七十年代初大搞核电设备研制一开始,就一反重主轻辅的普遍倾向,投入巨大的人力财力从事凝汽器的大量试验和设计研究工作,取得了当今世界领先的地位。我国在大型核电凝汽器研制中虽然取得了一定成绩,但是必须清醒地意识到,我国整个科技、加工工艺较落后,原材料的质量、品种一直难于满足要求,我们的试验台、试验设备、测试与计算手段都较陈旧,有待逐步完善和补充。消化吸收国外先进技术,紧跟世界发展先进水平,是我国今后的长期任务。

通过本机组凝汽器的研制,我国依靠自己的力量走过了大型核电凝汽器研制的全过程,摸清了研制过程的主要技术问题,其中大多数还取得了满意的解决,通过研制还具体地找到了同国外先进水平的差距。因此可以认为,立足于国内研制拟议中的秦山核电厂二期工程两套 6×10^5 千瓦机组凝汽器,是完全有把握的。此外,关于这两套机组凝汽器的研制,还有两个有利条件:一个是凝汽器本体及机组的布置型式不再受凝汽器钛冷却管供货长度的限制;另一个是凝汽器的大部分科研课题均可在 3×10^5 千瓦核电机组凝汽器研制成果和经验的基础上进行推广、补充,通过改进性试验研究予以解决。对于冷却水室型线吹风试验研究以及冷却管束水模型和除氧式热井的试验研究,是否有必要进行,是否可以缩小试验规模,均可根据用户和工程总体部门的具体要求通过论证酌情确定。在 3×10^5 千瓦核电机组凝汽器研制中尚依赖进口的一些阀门、附件,在未来 6×10^5 千瓦核电机组凝汽器研制中完全有可能创造条件实现国产化。至于钛冷却管能否实现国内供货,取决于冶金部门焊接钛管自动化生产线的建造能否赶上工程要求的供货进度。我们还建议通过国内设计、试制与配套,将国外现代化凝汽器正逐步推广应用的诸如冷凝水水质自动化监测、冷却管在役无损探伤、冷却管与管板密封接头在役检漏、利用微机监督凝汽器运行性能等新技术应用于未来 6×10^5 千瓦核电机组凝汽器。

简 讯

LH—X 型全自动供水设备通过省级技术鉴定

由哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所、黑龙江省民族经济开发总公司和哈尔滨龙华给水设备厂共同研制的“LH—X型全自动供水设备”于1988年8月26日通过技术鉴定。鉴定会由中国船舶工业总公司和黑龙江省建设委员会主持。鉴定委员会由中科院工程热物理所、哈工大、哈建工、省建委、国家建设部科技司、有关的省、市建筑设计院、劳动局、计量局、卫生防疫站等单位的25名研究教授、教授,高级工程师和工程师组成。委员会通过资料审查和生产现场及设备应用现场的实地考察、测试,一致认为:该设备工艺先进,设计合理,功能比较齐全。特点是采用双泵最佳控制程序,减小罐体尺寸;管理方便,运行安全可靠;水质清洁卫生;旁路供水方式,减少水头损失,节省能源;采用隔振降噪装置,保证噪声低于国家规定标准。各项技术、性能指标达到或超过了“《全自动气压给水装置》(DB/2301 J 1904—87)哈尔滨市地方标准”的要求。产品达到国内先进水平。该设备不需专人管理,可实现连续供水,保证水量、水压,可代替变位水箱和水塔,是高层建筑、工矿企业和城乡居民饮水,喷灌等专用供水设备。鉴定委员会还认为,该产品可投入批量生产,在工程中推广应用。

——编辑部——