核热电站汽轮机的设计特点

林志鸿、王岱祥、罗春新

〔提要〕: 本文对核热电站用的工业抽汽凝汽式汽轮机的设计进行了探讨。目的 在于正确地处理核热电站热力系统对汽轮机所提出的各项要求, 并阐明该型汽轮机的设计特点以及需要仔细关注的有关问题。本文还指明, 该型汽轮机是与压水堆配合使用的饱和蒸汽轮机, 由于对它的供热要求更为突出, 使其成为“供热为主, 余汽发电”型的汽轮机。

主题词: 核电站 汽轮机设计

近年来, 由于能源短缺, 运输紧张和环保的规定等因素, 大大地促进了核热电站的开发与建设。我国从一九八二年开始对石化联合企业自备核热电站进行了可行性论证。为充实论证工作, 同时对核热电站用的汽轮机进行了方案设计, 并列出了相关的予研课题。本文就该型汽轮机设计中的几个特殊问题作些探讨。

一、核热电站热力系统对汽轮机组的特殊要求:

由于存在着放射性污染的可能性, 因而为确保向热用户提供绝对干净的蒸汽, 核热电站的热力系统需采用三回路方式。二回路中汽轮机的工业抽汽作为供热回路的热源。因此, 该型汽轮机的工业抽汽压力较高。调整范围需要宽些。同时汽轮机各非调整的回热抽汽不仅要用作机组凝水的加热, 而且有很大一部分要用作二、三回路蒸发器的补水和回水加热。整个热力系统的蒸汽均为饱和蒸汽, 因此汽轮机各段抽汽量都比同功率的常规供热汽轮机或核电站汽轮机大得多, 这给此类汽轮机结构与保护系统设计带来新课题。

因核热电站投资昂贵, 为达到最高投资效益, 应确保核热电站反应堆满负荷运行, 而汽轮机在诸常用工况下都应有较好的经济性。为此, 汽轮机组要适应在进汽参数基本

不变的前提下, 热负荷高效率转换。石化企业的供热可用度要求极高, 中断供汽将危及工艺流程。造成设备事故, 所以核热电站汽轮机不单要满足基本工况的要求, 还要适应一些特殊工况的要求。这就要求汽轮机组热力设计, 调控保护系统设计充实新的内容。

此外, 配压水堆的核电汽轮机上的各种要求, 对于核热电汽轮机同样存在, 而且因热力系统中增加了供热回路, 有些要求更加严格, 如汽轮机调控保护等。

二、汽轮机热力设计的特点:

核热电站汽轮机工况多, 在不同的工况下, 汽轮机同一段的蒸汽容积流量差异悬殊。在汽轮机设计中, 是以汽轮机各段的最大容积流量来确定相应各段的通流尺寸; 以汽轮机自身变工况特性来确定各工况时汽轮机各段的热力特性。同时应尽量提高主要工况的经济性指标。

核热电站汽轮机的最佳分缸压力的选取, 除参照核电站汽轮机中的推荐值外, 还要考虑到以下一些因素的影响。一是为供热的需要, 工业抽汽口多半设在汽轮机的高压缸, 这使得蒸汽膨胀过程线在焓熵图上右移; 二是工业调整抽汽量变化幅度大, 其分缸压力随工况变化的幅度也较大。因此核热电站汽轮机最佳分缸压力的选取, 需作多方案、

多工况的分析计算比较才能确定。一般说来,它取核电站汽轮机推荐值的下限或再稍低一些,这对提高运行的可靠性和经济性是有益的。

采用汽水分离再热器是核电汽轮机热力系统的一个特点。自备核热电站的规模比核电站要小得多,为了简化系统,提高装置的可靠性和电站的总效益,自备核热电站汽轮机采用一级新蒸汽再热较为适宜。

在饱和蒸汽轮机中,进口的蒸汽参数较低,进汽的容积流量很大,第一级动叶片较高。若汽轮机采用喷咀组配汽,则第一只喷咀阀开启时,蒸汽流速可达超音速,动叶片承受着巨大的弯曲应力乃至超出通常的规定值。同时,此处蒸汽膨胀过程正处于冷凝不稳定状态区。这种不稳定冷凝会对叶片产生很大的动应力。此外,喷咀室的结构也会造成级前水分局部聚集,其形成的水滴流将水蚀喷咀的出汽边,并对动叶片产生附加的脉动力,导致第一级叶片的疲劳损坏。在早期的核电站汽轮机中曾发生过这样的事故。鉴于核热电站用的反应堆基本上是连续满负荷运行的,汽轮机进口的蒸汽流量在正常运行过程中也基本恒定。为了保证汽轮机安全可靠地运行,汽轮机进汽通常采用节流配汽方式较为合适。在设计中,还应注重阀门小开度时的稳定性及阀门配汽机构的疏水和抗蚀结构设计。

工业调整抽汽处的配汽是核热电站汽轮机设计中的一个特殊问题。在常规电站汽轮机中,低压工业抽汽通常在 $15\sim 13$ 公斤力/厘米²。而在核热电站中,为了保证提供同样压力等级的干净蒸汽,就要求汽轮机抽汽压力为 $30\sim 24$ 公斤力/厘米²。这对于进口参数为 50 公斤力/厘米²左右的饱和蒸汽轮机而言,在 $24\sim 30$ 公斤力/厘米²的湿蒸汽中,蒸汽膨胀过程正处在威尔逊(Wi/SON)线附近,选用合适的配汽方式和合理的零部件结构以避免或减弱此处的隙缝腐蚀,同时又保

证汽轮机有良好的经济性。旋转PT板的配汽方式通常用于低压调整抽汽处,移用到此处尚需做些有关的工作。一般说来,采用节流配汽是简单可靠的配汽方式。然而在最大供热工况时,此处节流损失很大。采用喷咀组配汽时,调整抽汽后的第一级动叶片在一组喷咀工作时,将承受最大的弯曲应力,甚至达到影响安全的程度,此处尚有汽流不均匀所引起的扰动等。但在最大供热工况时经济性较高。某型核热电站汽轮机的方案设计表明:在最大供热工况,喷咀配汽可比节流配汽多供电约 4.5% 。选用喷咀组配汽方式时,要十分注意动叶的弯曲应力、蒸汽膨胀过程的稳定性,流道内疏水和汽流组织,以保证汽轮机的安全可靠性和良好的经济性。

在汽轮机设计和核热电站热力系统设计中都应尽力降低汽轮机的工业调整抽汽压力,并使此处的蒸汽膨胀过程处于稳定状态。这不仅有利于强化电站的回收因子,降低机组的热耗,而且便于选用高效率的工业调整抽汽处的配汽方式。

核热电站汽轮机和核电站汽轮机一样,当采用压水堆时,蒸汽发生器通常能提供 $50\sim 68$ 公斤力/厘米²的饱和蒸汽,汽轮机的排汽压力变化不大或略高些,因此,汽轮机总焓降比较小,末级排汽损失对整个机组的经济性影响远比常规热电机组突出(详见表1)。同时由于核热电站的某些特殊要求,汽轮机冷凝器的容量较大,结构和材质要求都比常规机组高得多。其冷凝器的造价相当昂贵,几乎相当于汽轮机本体的造价。所以,在核热电站汽轮机设计时,对于汽轮机最佳背压的选取要做充分的技术经济论证,主要从运行的经济性和一次性投资费用等方面考虑。

汽轮机的排汽压力与末级长叶片的通流能力,冷却循环水的温度,冷凝器冷却面积,循环水泵的耗功,低压汽轮机的结构等因素有关。

表 1 核热电站汽轮机与常规热电厂汽轮机配置焓降与末级损汽损失之比较

机 型	符号与单位	HC65-47.5/24	C50-90/13
新汽额定压力	P_0 公斤力/厘米 ²	47.5	90
新汽额定温度	t_0 °C	259.5	535
汽轮机额定电功率	N_e 千瓦	65000	50000
汽机最大供热负荷	Q_n 百万大卡/小时	300	166
排汽压力	P_k 公斤力/厘米 ²	0.07	0.04
机组配置焓降	H_0 大卡/公斤	222.7	341.3
配置焓降比	%	65	100
排汽焓损失	h_c 大卡/公斤	6.27	3.32
h_c/H_0	%	2.82	0.97

为缩短研制周期,降低成本并确保机组的可靠运行,通常选用几种成熟的末级长叶片作通流能力计算比较,从中选出最适应于系统最佳背压所要求的长叶片。

冷却水水温是受厂址周围环境条件制约,设计冷却水温的选取不仅直接影响冷凝器和汽轮机低压部分的设计,而且对电站和机组的投资及运行经济性具有重大影响。某型核热电站汽轮机组的方案设计表明,在冷凝器冷却面积不变的条件下,冷却水温由17℃上升到24℃,机组电功率减少约970KW因此,必须根据电厂所在地区历史水文气象的统计资料,合理确定基本冷却水温。国外有些厂家推荐这个基本冷却水温要高于60%全年时间的冷却水温。

核热电站和核电站一样,对给水品质要求严格。为了控制给水中的含盐量,要杜绝给水系统中的有害漏泄和可能的渗漏。对于用海水冷却的冷凝器,注重采用合理的管子与管板的连接方式和结构,同时十分注重用材的选择,目前常用钛材。钛材价格贵,冷却面积的大小对初投资影响大,方案计算表明:同一冷却水温下,冷却面积减少1%,冷凝器的一次投资就降低1%,机组的一次投资降低约0.3~0.4%。冷却面积的减少常引起汽轮机背压的提高,从而使发电量减少。因而,合理地压缩冷却面积是核热电站汽

轮机设计的一项重要工作。

三、汽轮机结构设计的特点

工业抽汽量变化大,压力调整范围宽,会产生附加的轴向推力,这是调整抽汽机组的特点之一。在核热电站汽轮机中,表现更为突出。某型核热电站汽轮机,高压缸的轴向推力达40~50吨。故在核热电站汽轮机设计中,应采取整个机组轴向推力的调整措施。在大型的核热电站汽轮机中,如苏联50万千瓦TK450/500—68型核热电站供暖汽轮机,所有的汽缸都做成双流式的,就是为了平衡抽汽引起的附加轴向推力。对于反应堆为45万千瓦级核热电站汽轮机,为了便于调整机组的轴向推力,可采用一个单流高压缸和一个单流低压缸沿轴线串联布置,高压缸与低压缸汽流流向相反,以便抵消部分轴向推力。

核热电站汽轮机的大部分汽轮机级在湿蒸汽条件下工作,将会碰到各种形式的侵蚀。为了防止侵蚀,除了要在高、低汽轮机之间设置汽水分离再热器外,在汽轮机的结构设计中,应减少汽缸和持环中的袋区和“死区”,因为这些地方易聚集水分。不可避免的袋区和“死区”要保证疏水畅通。在汽轮机的通流部分设置去湿槽道是必要的。结合回热抽汽,适当增加级的轴向间隙,可以强化除湿效果。在低压缸最后几级采用空心的静

叶进行水分分离也是一种常见的除湿措施。

在高压缸中要侧重防止各接合面上因两相流动而造成的缝隙腐蚀。这类腐蚀和蒸汽的温度、湿度，流速及零件表面外形有紧密的联系，且关系也很复杂。因此在高压汽轮机中明显增加了使用高铬不锈钢制造的零件。同时应简化高压缸各部件，大力采用整体结构或焊接联接，减少接缝数量。国外核电站汽轮机组运行经验表明：隔板与持环的接合处和支撑面，排汽道内的支撑管和肋板上都有被侵蚀的可能。对这些零件表面采取喷镀或其他工艺方法覆盖抗蚀材料是必要的。为了防止缝隙腐蚀和应力腐蚀，高压转子应设计为整锻转子，端汽封处可用镀铬或镀镍来保护。在工业抽汽口，应设置导流装置。以便组织气流，避免湿蒸汽对转子和其他部件的直接冲刷，并减少汽流损失。

在低压汽轮机中主要是对高湿度级中动叶片的抗蚀保护和提高过渡区的动叶片的耐振强度。核电站低压汽轮机的工作条件和常规机组类同，因此抗蚀措施可借鉴于大型火电机组的经验和成果。值得注意的是由于工况变动大核电站汽轮机内处于蒸汽过渡区范围的级数增加了。在这些级中由于蒸汽状态在饱和线上下波动，蒸汽中含有的各种盐类如氯化钠、硫酸钠、磷酸钠等就会在材料的表面发生沉积、溶解、再沉积、再溶解的反复过程，形成高浓度的盐溶液，从而对材料起严重的腐蚀作用。在工况频繁变动时，出现高浓度的盐溶液是间歇性的。有关材料试验证明间歇性的腐蚀对材料疲劳性能的影响比非间歇性的更为严重。因而对于核电站汽轮机过渡区内的动叶片耐振强度问题应予更多的关注。

对采用红套的低压转子应讲究叶轮的材质的选取及其热处理工艺，叶轮与转轴的配合结构与过盈度，避免或减弱应力集中。在冶炼和锻压允许的条件下，低压转子采用整锻转子更为恰当。

疏水系统是湿蒸汽汽轮机的一个重要热力系统，其功能是及时排除汽轮机内部各部件(如汽缸，连通管，分离器等)的凝结水，从而减少由于积水引起的汽轮机部件的损坏，并保证汽轮机内部除湿机构和分离器的除湿达到预定的效果。在结构设计时要周密地选取疏水口设置的部位和疏水管道的管径。为了防止停机期间湿蒸汽汽轮机内部各部件的锈蚀，还需要设置干燥系统，这也是核电站汽轮机的特点之一。

汽轮机组实现双缸单流形式是理想的，这可缩短机组和厂房的外形尺寸，改善每千瓦的重量指标，且节省投资。由于核电站汽轮机总级数不多。在高压缸除了有一个容积流量很大的调整抽汽口外，有时还要设置一个高压回热加热抽汽口，在低压缸也要设置二至三个回热加热抽汽口，通过它们的蒸汽流量都比其他类型的汽轮机组来得大。因此在汽缸的结构设计时，将要解决抽汽口的布置，抽汽腔室的汽流组织和汽缸刚度等问题。

核电站汽轮机的调控保护装置要做到热电联供，并实现“供热为主，以汽定电”的原则。还要对机组的纯冷凝工况，空负荷和带厂用电工况，应急排放工况等进行调控与保护。同时，它还要适应蒸汽发生器提供蒸汽参数的反滑特性。所以，核电站汽轮机的调控保护系统牵涉面广，要求性能高，技术难点多。

核电站汽轮机，当抛全负荷时，大尺寸或大容积的蒸汽管系，分离再热器和抽汽腔室中所积蓄的势能都会强化转子的超速飞升。为防止不允许的超速，在汽轮机设计时需要考虑通流元件表面可能的水膜厚度，蒸汽腔容积，转子质量，调节和保护系统的动作时间等因素，进行汽轮机的动态特性计算，确定超速比率。从而采取必要的安全保护措施。对于核电站汽轮机，通常在低压汽轮机的进口管道上安置速关蝶阀或超速保

对锅炉受压元件焊接接头 冷弯试验的分析

周 惠 林

〔摘要〕本文通过对炭素钢板20g材质的对接接头双面焊冷弯试验的分析,研究了焊接接头冷弯试件受拉表面的应力分布情况;同时还讨论了塑性冷弯过程中,弯曲伸长率与弯曲角度及弯轴直径之间的关系;载荷与弯曲角度之间的关系及弯曲角度与其缺陷之间的关系。试验结果表明,冷弯试验作为焊接结构件生产前的工艺鉴定试验是合适的,而且,对于炭素钢双面焊焊接接头冷弯试验,其弯曲角度 120° 为宜。

主题词: 压力容器 焊接接头试验

一、前 言

锅炉、压力容器,很多焊接结构是通过弯曲工艺制成并处于弯曲状态下工作的,所以通过冷弯试验测定焊接件在弯曲力矩作用下的工艺性能就显得非常必要。为了满足弯曲工艺的要求,《锅炉受压元件焊接技术条件》中规定,焊接接头需作冷弯试验。目前,世界各国对焊接接头冷弯试验标准及其相关要素尚未统一,如:西德是用弯曲角度和弯曲伸长率来表示冷弯变形性能,而美国则用导向弯曲试验法,使试件在凹模中经受弯曲;在判定冷弯试件是否合格的标准上,各国之间也有很大差异,在美国是规定冷弯试件外表面上无连续裂纹和整个断面裂纹,而日本则提出冷弯试件外表面上不可产生明显的裂纹,其合格标准参照标准图片,西德的评定标准是其长度为试样宽度的20%的裂纹才算作裂纹。总之,冷弯试验是否合格,它是没有很明确的数量指标的。尽管方法和标准不一,但是,冷弯试验是用于检验负荷垂直焊缝时,对接焊缝的变形性能及焊缝质量,在这一点上则是一致的,而且用弯曲角度和

护的旁通管系。实现对机组超速限制。

核热电站汽轮机在世界上只有美、苏等几个工业发达国家有生产制造的经验。其中采暖供热机组较多。中等功率,以供工业用热为主的机组尚不多见。因而有许多特殊的问题有待于进一步的研究。

参 考 文 献

〔1〕《HC65~47.5/24型汽轮机机组方案设计资料》703研究所 1984年

〔2〕核热电站热力系统设计初探《热能动力工程》1986年第一期

〔3〕《C50—90/13汽轮机热力计算书》上海汽轮机厂 1977年

〔4〕《辽化核热电站汽轮机方案设计资料》703研究所 1983年

〔5〕《抽汽式汽轮机译文集》上海汽轮机厂研究所情报室 1981年

〔6〕Теплофикационная паровая турбина типа ТК-450/500-68(60) для АТЭЦ
Водицев В. И 等《Теплоэнергетика》
1980. №5

〔7〕《原子能电站汽轮机》
Б.М.Трояновский 1973 2.

〔8〕Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators M. J. Moore C. H. Sieverding 1976.

NUCLEAR POWER STATION

4. Design features of nuclear thermal power station steam turbines
.....*Lin Zhihong, Wang Daixiang, Luo Chunxin*(21)

Synopsis

The purpose of this paper is to correctly deal with the various requirements set by nuclear power station thermal system to its steam turbines. The design features of this type of steam turbines and some relevant problems that deserve our close attention are also explained in the paper.

BOILER DESIGN AND RESEARCH

5. An analysis of cold bending tests of boiler pressure parts welded joints
.....*Zhou Huilin*(25)

Synopsis

The stress distribution of the tension surface of a welded joint cold bending test piece is studied through an analysis of the cold bending test of the carbon steel 20g plate material double-welded joint. In addition, the following subjects are also discussed: the variation of bending lengthening rate with bending angle and bending mandrel diameter during the plastic cold bending process, the relationship between loading and the bending angle, and also between bending angle and its defect incidence. Test results show that it is appropriate to perform a cold bending test as a technology appraisal test before the manufacture of the welded structural parts. It also shows that for cold bending test of carbon steel double-welded joints, the suitable bending angle is 120°.

6. Design and development of a modern straight tube water-tube boiler(30)
7. Two new fluidized-bed boilers start up on anthracite culm(34)
8. A new type boiler using oil as heat-transfer medium(35)

POWER TRANSMISSION PLANT

9. The design of amphibious hovercraft transmission plant
.....*Chen Puying, Xu Zhenzhong*(38)

Synopsis

A brief introduction is given of the use abroad of hovercrafts over the past decade and its development prospects in China. Several types of transmission systems of amphibious hovercraft are described in the paper with special emphasis on the transmission plant design considerations posed by amphibious hovercrafts. Several aspects that merit close study are presented from the testing view point.

DEVELOPMENT OF NEW PRODUCTS

10. Coloured stainless steel*Li Zhongxin*(43)

Synopsis

A comprehensive review is given in this paper of the general situation in China and abroad, development process and application scope of coloured stainless steels.

Product BRIEFS

11. 18-Mw Spey in the works with plans for 22-Mw ICR version(46)