

秦山三期工程728MW汽轮机设备及安装特点

The 728MW Steam Turbine Plants and Installation Characteristics for Qinshan Phase III CANDU Project

许峰

(浙江省火电建设公司, 杭州 310016)

摘要: 简要介绍了秦山三期项目中日立公司生产的728 MW汽轮机本体设备特点, 现场安装特点及新工艺, 通过有效的实施, 保证了汽轮机的安装质量。

关键词: 秦山三期 汽轮机 设备 安装 坎杜

Abstract: This article briefly introduces the 728 MW steam turbine manufactured by Hitachi for Qinshan Phase III CANDU nuclear power plant project, in respect to the main equipments, characteristics, on-site installation and new processes used, and the effective implementation to ensure the installation quality of turbine.

Key words: Qinshan Phase III project Steam turbine Equipment Installation CANDU

秦山三期项目总装机容量为 2×728 MW。汽轮机由日本日立公司供货。该汽轮机组为冲动式三缸双流中间再热凝汽式饱和蒸汽汽轮机。它由一只高压缸、两只低压缸组成, 高、低压转子通过刚性联轴器联接为一个轴系, 机组的旋转方向为逆时针方向(从汽机侧看)。由于核电蒸汽系统参数值低, 新蒸汽为低参数饱和蒸汽, 所以该机组设计为低转速(1500 rpm)、大容量形式, 是目前国内第一台低转速大容量机组。

1 设备特点

由于重水堆核电厂二回路新蒸汽(汽机新蒸汽)参数取决于一回路的温度, 而一回路温度又取决于一回路压力, 一回路压力的提高又受到反应堆压力壳的结构及安全措施的限制; 因此, 重水堆核电厂汽轮机的新蒸汽为低参数的饱和蒸汽。

对于饱和蒸汽汽轮机, 其理想焓降比高参数火电机组汽轮机焓降约小一半。因此, 在同等功率下核电汽轮机的容积流量比高参数火电机组汽轮机约大60%-90%。由于这一点使得核电汽轮机在结构上有以下特点:

- (1) 进汽机构的尺寸增大;
- (2) 功率大于500 MW的汽轮机高压缸做成双分流的;
- (3) 因为低压缸通流量大, 所以需要增大分流数目, 采用低转速。

秦山CANDU项目728 MW汽轮机组在设备设计上充分体现了核电汽轮机特点及设计理念。

1.1 高压缸

高压缸为内、外缸同缸的双缸结构, 以猫爪垫块支撑在1、2号轴承座上。上缸和下缸各有两个蒸汽

综 述
核 电 设 计
工 程 管 理
工 程 建 造
运 行 维 护
核 安 全
核 电 前 期
核 电 论 坛
核 电 经 济
核 电 国 产 化
质 量 保 证
核 电 信 息

入口，这样对汽缸加热比较均匀，可以减小变形。高压上缸外形尺寸为 $8.54 \times 3.96 \times 2.8$ (m)，重48 t，高压下缸外形尺寸为 $7.9 \times 4.0 \times 2.2$ (m)，重50 t。高压缸设计为双流对称型，中间为喷嘴环，两侧各有9级隔板。当运行温度变化时，机组能自由膨胀和收缩，热应力相对较小。

1.2 低压缸

低压缸为内外缸装配结构。外缸为上下四半拼装结构，内缸为上下两半缸组装结构。外下缸外形尺寸为 $10.3 \times 10.2 \times 4.2$ (m)，重192 t；外上缸外形尺寸为 $9.862 \times 10.4 \times 3.969$ (m)，重97 t。内下缸外形尺寸为 $5.3 \times 6.4 \times 3.3$ (m)，重64 t；内上缸外形尺寸为 $6.97 \times 5.126 \times 3.994$ (m)，重50 t。低压缸设计也为双流对称型，内缸中间为进汽导流环，两侧各有6级隔板。在内、外缸纵横中心均设有纵横销，以确保内缸位置。低压外缸直接就位于基础台板上，在横向中心处设横销，确保外缸轴向位置，在两低压缸间纵向中心处设纵销，确保了外缸横向位置。

1.3 高、低压转子

高、低压转子由单一包括叶轮在内整体合金锻件车削而成，额定转速偏离临界转速较大时，也能保证机组正常运行。转子汽轮和叶片上均有径向小槽，当缸内湿度增大时，通过小槽排出积在叶片上的水滴，减小了因水膜汽化而引起的转速飞升问题。高低压转子均无中心孔，三只转子对轮为刚性联接，转子间设垫片。转子叶顶围带部位、低压转子两端轴封套部位、以及缸内隔板汽封部位在转子上均镶装了阻汽片。高压转子外形尺寸为 $10.427 \times 2.2 \times 2.2$ (m)，重72 t，低压转子外形尺寸为 $11.684 \times 5.392 \times 5.392$ (m)，重192 t，末级叶片直径达5.392 m。

1.4 轴承座与轴承

汽轮机本体部分有1—6号共6个轴承座。其中1、2号轴承座为独立结构，安装在基础台板上。1号轴承座与台板间设有纵销，轴承座在台板上可前后移动，保证缸体自由膨胀，2号轴承座与台板间设有纵横销，台板两侧有锚固销纵横定位，整个汽机轴系的死点即在此。而3—6号轴承为支持轴承，它们是椭圆、上击型、水平中分、球面座的自位式轴承，安装于低压缸上。整个轴系只有一个推力轴承安装在2号轴承座内。推力瓦的结构简单，由上下两半构成，推力瓦安装于推力盘与推力轴承间，承力面为锥面型，能够承受较高的轴向负荷，承力面间为油楔。

1.5 盘车装置

盘车装置位于低压缸与发电机之间，由液压盘车马达、超速离合器和盘车齿轮组成。盘车装置在启动后以2.5 rpm的速度驱动轮子，以平均加热转子，防止变形或用于检查时顶起转子。盘车齿轮包括电动马达和齿轮系，齿轮通过传动轴由马达驱动。齿轮箱内的一个可动副齿轮与低压转子联轴器上的盘式齿轮相啮合，当蒸汽进入汽轮机后，可动副齿与转子脱开。使盘车退出工作状态。当汽机-发电机轴承低油压时，压力开关就会阻止盘车齿轮运行。

1.6 汽缸的支撑型式与膨胀

高压缸以猫爪支撑在1、2号轴承座上，缸体前后导向装置的立键与轴承座的键槽相配合，保证汽缸的轴向中心定位。后猫爪为缸体轴向位置死点，缸体可以在不同运行条件下从此向前膨胀向后收缩，低压内缸由四块猫爪垫片支撑在外缸上，安装时用四颗猫爪螺栓调整固定，防止轴向和横向移动。低压外缸与凝汽器为挠性连接，热膨胀问题通过凝汽器橡皮膨胀节解决。低压缸蒸汽入口有一个波纹膨胀节，位于内外缸之间，允许内缸向外膨胀，同时阻止空气泄入凝汽器。

轴系转子以位于2号轴承座内的推力轴承为死点向前、后膨胀。

1.7 隔板与汽封（轴封）装置

汽机隔板由下隔板上的两侧挂耳支撑在内下缸上，轴向由内缸上的隔板槽限位，横向由安装于内下缸上的隔板底销定位。下隔板的上表面与内缸中分面在垂直方向留有0.08-0.21 mm的防跳间隙，隔板中心则由调整安装于内下缸上的挂耳垫片的高度来调整。

高压缸内汽封均为迷宫型汽封，低压缸内汽封为平齿汽封。轴封与隔板汽封均由弹簧片支撑着的分段式汽封块填压在汽封（轴封）槽内，用定位销固定。这种分段式的、有弹簧片支撑的汽封块，当转子在工况变化条件下膨胀时，可以提供足够膨胀间隙，汽封块各段在转子转过后都会由弹簧片弹回工作位置。这防止了汽封块对转子造成静摩擦，同时还可以减小由于局部发热对轴造成的损伤。

2 安装特点

2.1 汽轮机基础台板安装

基础台板采用砂浆垫块支撑形式，如果基础台板与砂浆垫块接触不良，会引起机组振动而影响正常运行，因此砂浆垫块的制作在机组安装过程中显得十分重要。制作砂浆块的材料我们采用上海麦斯特公司MF-870C流动水泥。砂浆块浇灌木模侧板比台板下表面低10 mm，在侧板上胶泡沫层，使台板能上下自由调整到设计标高及水平，泡沫层应有高出台板底面设计标高1~2 mm的余量，以便台板放下后有一定压缩量，以保证两侧的密封。前板应与基础呈30°角，以便于倒入的流动砂浆自流；后板比台板下表面略高5~6 mm，以防止流动砂浆漏出造成砂浆块缺角。砂浆块木模安装好后吊上台板，用调整栓将台板调整合格，尔后进行灌浆。此时应注意最佳环境温度应为15~25℃，温度偏高或偏低均会影响砂浆块质量。研磨砂浆块用基础平板整体研磨，对个别不合格的砂浆块不采用单块平板研磨，要求凿掉重做。砂浆垫块研磨完成后，安装基础台板。此时须用连通器以一块台板为基准测量所有台板的相对标高高差在±0.01 mm范围内，并用4 m大平尺及合像水平仪测量相邻台板水平度≤0.02 mm/m。这样可以保证缸体就位后基本不用再调整台板。

2.2 低压缸安装

2.2.1 低压外下缸拼装

将两半外下缸就位上台板上后，先用液压千斤顶顶正，再用垂直面螺栓将两半缸拉拢。测量台板与基座是否有间隙，间隙应为0.05 mm塞尺不入。将缸体吊起检查台板及基座接触面积应≥80%。在缸体两端拉琴钢丝（Φ=0.5 mm）量并调整缸体水平中分面水平度≤0.02 mm/m。（总长在0.125 m以内）。在缸体两端拉琴钢丝（Φ=0.5 mm），以3、4号瓦为基准，并参考油档值将外下缸初找正，在校合完缸体中分面水平合格后，最后拧紧垂直面拼缸螺栓。

2.2.2 低压内缸安装

低压外下缸拼装完成后，将低压内下缸安装在临时猫爪垫块上（保证接触面≥75%，且接合面0.03 mm塞尺不入）。以3、4号瓦为基准拉钢丝进行两只低压缸半缸找中心，测量并调整缸体水平中分面水平度≤0.02 mm/m，配好中心销、键。完成找中后安装1/2中分面螺栓，将内上缸沿导向杆吊至内下缸上。打入定位销，紧固1/2中分面螺栓，检查上下缸中分面应无间隙。

2.2.3 低压外上缸安装

低压内缸安装完毕后，将单片外上缸吊至下半缸上打入定位销，拧紧1/2中分面螺栓后检查中分面应无间隙，再吊上另一半上缸，打入定位销后用垂直接合面螺栓将两半拉拢，拧紧中分面及垂直面1/2螺栓，并检查中分面应无间隙。

2.2.4 缸体最终定位

低压外上缸拼装完毕后，同样以3、4号瓦为基准拉钢丝进行合缸找中心，达到要求后，缸体就可以配制各类销键定位。同时可进行凝汽器连缸工作，连缸前要求凝汽器上接颈橡胶膨胀节先不安装，连缸焊接采用四角对称退步焊，每焊完一层需等母材温度降至室温，并测量合缸中心数据变化量在0.10 mm以内后再行施焊。

2.2.5 低压内缸负荷分配及二次灌浆

低压内缸负荷分配时要求低压缸进汽管及抽汽管已完成。拆除中心键、推力键，在猫爪处架好百分表，读出原始数据。然后用100 t液压千斤顶在猫爪处将低压内缸缓缓顶起，直至可抽出猫爪垫片为止。缓缓将液压千斤顶卸压，到完全不受力时读出百分表读数，再计算出猫爪处下沉值。同法对左右猫爪进行测量，要求左右下降值之差≤0.125 mm。完成以上工作后对低压缸区域进行二次灌浆。

2.3 高压缸安装

2.3.1 1、2号轴承座安装

1、2号轴承座在安装时考虑到转子找中心，转子挠度及汽缸负荷的问题，其相应的标高应比设计值高出0.10~0.15 mm，轴承座的定位根据3、4号瓦为基准拉钢丝进行找正。配好台板与轴承座的键，将轴承座就位，调整轴承座使其中心与台板上标出的轴承中心一致，并确认前轴承座前后移动量合格。由于涉及到以后轴系中心调整，1、2号轴承座二浆灌浆放在靠背轮最终连接后进行。

2.3.2 高压缸定位

准备好安装垫片，推力键及中心键。拆去压紧螺栓，在轴承座上装上临时垫片。将高压下缸吊起就位。调整高压缸轴向位置，检查猫爪的配合间隙。检查键、猫爪支承面，临时垫片及键槽支承面的接触面积 $\geq 80\%$ 。调整高压缸下缸的水平度。以3、4号瓦为基准拉钢丝对高压缸进行半缸、合缸找中心，找中完毕后临时推力键定位。

2.3.3 高压缸负荷分配

高压缸负荷分配要求在半缸、合缸、缸体管路连接后三种状态下均做一次，作为缸体状态变化分析比较。做法与低压缸负荷分配做法一样，左右下降差值要求为 ≤ 0.075 mm。

2.4 半缸及合缸找中心

分别在半缸及合缸状态下按以下方法找中心，测量值按日立公司要求绘成图表进行分析，整条曲线均应要求范围内。

(1) 在前轴承座TB端和BLP缸GEN端拉好长钢丝($\Phi=0.5$ mm)对1—6号轴承注窝及猫爪部分进行找中，找中时应将钢丝挠度考虑进去。由于转子转动方向为逆时针方向，因此内缸应向转动方向偏移，根据日立公司的经验数据，中心向右偏移0.3 mm。

(2) 在低压缸和高压缸每两个轴承间拉短钢丝，然后同上进行缸体和前中轴承座的单体找中。找中结束后临时将轴向键、中心键、及推力键定位。

2.5 转子找中心

安装瓦枕及瓦，检查并调整球面间隙。1、2号机2号瓦球面间隙与工厂记录有较大出入，在现场重新做了球面力矩检查，合格后方才进行下步工作。转子找中测量后，吊起转子，调整轴承中心位置，然后重新放入转子找中，直到数据符合找中要求为止。由于汽轮机转速低(1500 rpm)，所以对轮找中心允许偏差较常规机组大，端面允许偏差 ± 0.025 mm，外圆允许偏差 ± 0.05 mm。因日立公司对油挡无要求，只作为转子找中的参考值，这与国内标准不同。1号机1号轴承在施工中升高0.40 mm，导致1号油挡对转子值为0.45 mm，但日立公司专家认可此状态。

2.6 通流间隙、推力间隙调整及转子定位

2.6.1 通流间隙的调整

在隔板拉钢丝找中心完成后，用压铅法测量径向通流间隙，吊入转子并盘动后利用楔形塞尺、塞尺等工具测量出日立公司要求的轴向通流间隙数据。如间隙偏小则对汽封或阻汽片进行修刮，修刮时对相邻部位按圆弧规则也要进行修刮，偏大则不做处理。但若间隙过大，则需修刮汽封块背部。

2.6.2 推力间隙的调整

在转子推力盘两侧架百分表，用10 t千斤顶分别向前、后顶动高压转子，通过转子移动量可得出推力间隙。该轴承在工作面与非工作面均加有调整垫片，具体厚度在测推力间隙后结合高压缸通流间隙确定。

2.6.3 转子定位

在高、低压缸体通流间隙和高压转子推力间隙确定后，从转子汽机侧、发电机侧分别引一点到缸体(或轴承座)上的一点，做好标记后用内径千分尺测出距离作为转子定位的K值。同时将靠背轮垫片厚度测出。

2.7 靠背轮连接

2.7.1 转子靠背轮找中心

在缸体扣缸工作完成后，将高压缸安装键转换为运行键。在靠背轮外圆和端面架表，盘动转子测出外圆和端面值。如有变化则通过调整瓦枕垫片使对轮中心在要求范围。

2.7.2 靠背轮连接

按转子定位K值将高低压转子定位，复测靠背轮间垫片厚度。加工日立工厂提供的靠背轮垫片毛坯。靠背轮螺栓及螺栓孔在工厂都已装配过，在现场正式连接靠背轮前先试装靠背轮螺栓，如遇到错位可用

专用磨具进行磨孔。将靠背轮垫片加入后用4颗对轮螺栓将对轮连接，测量对轮12等分晃动值并调整到要求范围内。用千斤顶将两半对轮顶到同心，拉拢两半对轮，拧紧4颗螺栓，松去千斤顶。在180°方向穿入并四角对称的拧紧剩余所有螺栓。在螺栓伸长量达到20%、50%、100%时分别测量对轮12等分外圆晃动值应在0.025 mm以内，而对轮间的12等分外圆晃动差值应在0.035 mm以内。同时将12等分外圆晃动差值以矢量合成法绘成图表。

螺栓的最终紧力为5760 kg·cm，螺栓紧力按螺栓伸长量来管理。

3 安装新工艺

本台机组为国内首台低转速大容量汽轮机组，在施工过程中为了能优质、高效地完成安装工作，我们针对遇到的问题采取了一些新的施工工艺，简介如下。

3.1 基础台板研磨砂浆垫块

在以往的砂浆垫块研磨施工中，一直采用加工单块小平板来研磨砂浆垫块的工艺。该工艺存在着一些明显的缺点。首先研磨出的砂浆垫块水平及接触受小平板自身水平度的因素影响，单块平板加工精度不高，且由于本身厚度薄（一般 $\delta=30-40$ mm）在使用中容易变形，造成研磨出的砂浆垫块与台板接触面积差；第二，单块平板研磨时需2个施工人员协作，一次只能研磨一块砂浆块，人员需求多，工作效率低下；第三，由于是单块研磨，相对标高及水平无法保证。造成后继台板的正式就位调整工作量增大。为解决上述问题，我们研究制定了采用整块基础台板直接研磨砂浆垫块的工艺。利用小龙门吊将台板吊上对应砂浆块（5-6块），由2个施工人员左右撬动台板进行研磨，每天可完成4-6块台板下的基础砂浆块研磨，大大提高了工作效率，减少了施工人员配备。同时由于是基础台板本身研磨，就保证了台板与砂浆块的接触，也减少了台板调整时的工作量。

在开发出整块台板研磨工艺后，1号机砂浆块的研磨速度明显加快（基础台板整块研磨量占总研磨量的65%），在人工数不变的情况下，施工工期只占总工期的30%（1号机研磨总工期为60天）。2号机组砂浆垫块研磨在消化吸收了该成果的基础上进行了推广实施，使2号机研磨工期缩短到27天，施工人员由10人减为6人。该项工艺的开发与应用，不仅提高了砂浆垫块研磨工艺质量，减少了人工数，增加了经济效益。而且大大提高了施工效益，缩短了施工工期，为秦山三期汽机安装打开了良好的局面。

3.2 半缸-合缸拉钢丝找中心

拉钢丝找中心在以往汽机施工中只作为缸体的初找正，而精找正是以转子找中心来确定的。但在坎杜项目如果同样施工就会面临很多问题。首先，转子的体积和重量都很庞大，而厂房的空間又小，汽机两侧安装有汽水分离器和中联门，转子只能从发电机上方吊至缸内。转子的吊装难度大，危险期系数高。其次，吊装一次转子至少需5-6小时，而厂房内只有一部行车，由于整个项目施工工期紧，各工种都需要行车配合，这对频繁吊装转子找中心的工艺来说是不现实的，为此，我们与日立公司研究后对缸体进行半缸-合缸拉钢丝找中心工艺，按转子挠度绘制曲线表并定出找中心要求值，找中心偏差范围控制在 ± 0.01 mm内。缸体的定位就以找中心值定。在半缸-合缸找中心完成后，我们进行了转子找中心，高-低压转子外圆左右达到要求，上下与要求值偏差0.09 mm，端面开口左右偏差0.03 mm，上下偏差0.035 mm，低压转子之间外圆左右达到要求，开口左右达到要求。外圆上下偏差0.04 mm，端面上下开口偏差0.08 mm（端面允许偏差 ± 0.025 mm，外圆允许偏差 ± 0.05 mm）。我们随后只进行了两次转子吊装调整就最终达到了转子找中心要求。这样不仅提前完成了工程三级进度目标，而且节省了大量的行车使用台板，给其它工种的顺利施工创造了条件。

4 结束语

目前，1号机组已顺利并网发电。2号机组靠背轮已连接完毕，在准备油冲洗阶段。在已完成的安装工作中，所有质检项目均通过火电质检、监造质检（CMT）、业主质检（TONPC）及日立公司现场专家的联合验收，优良率达到100%。我们的安装工艺及质量受到了业主和日立公司专家的一致认可。