

1000MW半转速核电高中压缸 加工技术研究（上）

东方汽轮机有限公司 （四川德阳 618000） 罗 霞 胡丽萍 邹伟文

核能发电作为一种安全清洁的新能源已被世界许多国家所接受，它是继水、火电之后的一种技术最成熟、应用最广泛的新能源。许多发达国家已将核电作为本国的电力支柱之一，一些发展中国家也在积极发展核电。因此，发展核电对我国实施可持续发展战略，解决能源短缺和环境污染问题已成为刻不容缓、势在必行的大事。

2005年5月东方电气集团公司与法国ALSTOM公司（核能发电占全国总发电79%）签订了1 000MW半转速核电汽轮机技术转让合同，东方汽轮机有限公司承担所有汽轮机部件的制造任务。100万等级半转速的汽轮机各个组成部件结构尺寸都较大，其中高中压缸的结构与常规火电及全转速核电高中压缸相差比较大，分为高中压外缸与中压排汽缸两段，最终接配在一起成为一个整体，这样增加了汽缸的制造难度。针对半转速核电高中压缸制造难度大、加工精度高的特点公司成立了专项科研课题组。

从2006年7月以来，在两年多的时间里，课题组通过对ALSTOM公司设计图样及相关技术文件的熟悉、研究，了解ALSTOM公司的设计要求、质量要求及制造规范，克服了制造过程中的种种困难，于2008年9月成功完成首台试制并一次性泵水成功。

1.半转速核电高中压缸加工工艺及技术路线

研究ALSTOM设计要求及制造规范，研究我公司常规火电机组汽轮机高中压外缸的加工工艺，研究我公司的设备及刀具情况，设计半转速核电高中

压缸工艺方案及数控程序。技术路线如图1所示。

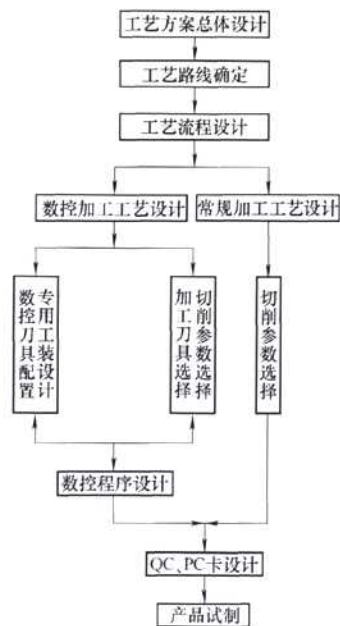


图 1

2.工艺方案总体设计

（1）高中压缸设计结构 如图2所示，半转速核电高中压外缸外形复杂、结构尺寸大、重量重，分为高中压前部与中压排汽部两段，两段缸最终通过密封焊永久连接。高压部分9级，中压部分4级。此缸为单缸结构，无内外缸之分，工作时高压部分通过饱和蒸汽，中压部分通过干蒸汽，而此缸采用CrMo铸钢件，所以在高中压前部缸内一些易于腐蚀的地方，如：内腔各隔板定位面、中分面、高压

排汽管及高排汽壳内表面大面积堆焊了不锈钢层,这也造成了汽缸加工周期长,加工难度大。



图2 汽缸三维模型

(2) 外形尺寸及重量 如表1、表2所示,整个高中压外缸外形尺寸:10 270 mm(长)×6 580 mm(宽)×6 950 mm(高)。整个高中压外缸总重242.5t。

表1 外形尺寸 (单位:mm)

项目	高中压缸前部 (长×宽×高)	中压排汽缸 (长×宽×高)	高中压外缸 (长×宽×高)
上半	7 180×4 840× 2 350	3 090×6 580× 3 380	10 270×6 580× 3 380
下半	6 680×4 840× 2 600	2 860×6 580× 3 570	9 540×6 580× 3 570

表2 重量(净重) (单位:t)

项目	高中压缸前部	中压排汽缸	高中压外缸
上半	71.1	52.8	123.9
下半	71.6	47	118.6

(3) 结构特点 ①此汽缸外形尺寸大,分为高中压前部与中压排汽部两段,最终通过内装式螺栓连接,并通过密封焊永久连接。②单缸结构,无内外缸之分,其隔板定位槽多。③为防饱和蒸汽腐蚀内部大面积堆焊了不锈钢层。④水平中分面连接孔多,共168个,且孔位相对于汽缸内外壁均有严格的尺寸要求。⑤由于此缸的设计结构限制,水平中分面螺孔分为上装式和下装式两种。⑥此缸顶开结构不是采用顶开螺孔结构而是在汽缸的上半部铣几个顶开用槽,液压千斤顶放入槽内,通过加压将缸顶开。

3. 机械加工工艺分析

半转速核电高中压缸属于薄壁件,刚性差,在机加工、水压试验、转运时容易产生变形,为达到汽缸加工时要求达到的各项技术指标,在反复研究

图样及技术文件后课题组着重以下几个方面对工艺方案进行考虑。

(1) 由于汽缸分为前后两部,汽缸的工作支撑分别在高中压外缸前部和中压排汽缸上,在加工过程中汽缸的负荷分配支撑与工作支撑不重合,由此汽缸在总装时可能发生扭曲变形。加工中合理选择负荷分配支撑点,严格控制前后部分别的负荷分配配重,为接配后整缸的负荷分配做到最好的保证。

(2) 此汽缸内部隔板定位槽多达7个,隔板定位面相对于水平中分面垂直度要求0.1mm,各定位面之间的平行度0.05mm,隔板槽定位面上下半轴向错位要求小于0.1mm,要保证这些技术指标其加工工艺方案就必须立足于数控设备。目前,公司只有22m数控龙门铣能满足加工设备要求。加工过程中汽缸的变形控制对定位面的保证尤为重要,所以加工中需要在汽缸的底部做辅助支撑消除由于自重等因素造成的工件变形,同时还需要在汽缸不同地方架表监测。

(3) 由于是单缸结构,运行时蒸汽直接通过外缸,所以水平中分面及垂直接配面的加工质量直接影响汽缸的密封性。设计要求其平面度0.05mm,表面粗糙度值 $R_a=1.6\mu\text{m}$,接刀痕小于 $5\mu\text{m}$ 。为满足图样要求,精铣两个面时需要选择高强度的数控面铣刀盘在松活的情况下进行,并且加工参数选择需要低转速、大进给、少吃刀量。

(4) 由于高中压缸前部与中压排汽缸为单独加工,最后接配在一起,需保证接配后垂直面无张口、间隙合格,加工方案考虑垂直接配面为上下半整体加工,并且水平中分面与垂直接配面的垂直度也需要控制,这样才能保证单独加工的两缸内腔各隔板定位槽互相平行,两端的汽封档同心,为最后的装配做保障。

(5) 此缸的一个很大的特点是内腔大面积堆焊了不锈钢层,如:水平中分面、隔板定位面、高排管口内壁都存在不锈钢堆焊层的加工,不锈钢层的切削性能差,加工过程中刀片容易磨损、坑蚀、崩刃,需要采购合适的硬质合金涂层刀片做大量的工艺试验来保证不锈钢加工面质量。

(6) 此汽缸水压试验腔室多分为6个,如采用常规的圆板形式的堵板,其刚性差且重量较重,容

易把汽缸压变形。采用封头式的堵板不仅刚性好，同样的压强所承受的压力最小，且重量轻。

(7) 对结构尺寸如此大、重量大的汽缸，其翻身起吊的安全性是不得不考虑的问题，采用如图3所示的汽缸横梁不仅对翻身过程的安全性是个保障而且对已精加工好的水平中分面也是一个保护。



图 3

以高中压外缸上半部分为例简介工艺流程（高中压外缸下半部、中压排汽缸上半部、中压排汽缸下半部略）：①来料、划线。②用22m数控龙门铣粗铣水平面、各定位环、汽封挡、垂直面，单边留余量1mm。③各不锈钢堆焊层进行着色、探伤、消缺、补焊、打磨。④用22m数控龙门铣床精铣水平面及隔板定位环。⑤合缸检查水平中分面间隙，隔板定位面轴向错位，合格后用万向钻床钻、扩、铰水平面销孔。⑥钳工装销。⑦各测点孔加工。⑧水压试验。

4. 加工主要技术难点及工艺措施

(1) 各管口加工 汽缸各进出汽管、抽汽管、疏水管多，仅高缸下半部就有13个，最大的管口直径1940mm，毛坯回公司后需要先加工管口坡口，然后焊不锈钢管接，再进行精加工。管口精加工形式如图4所示，管口外圆有一圆凸台，用于水压试验时装卡环，其端面相对于管口外圆有形位公差要求。

分析图样要求并结合公司实际机床资源情况

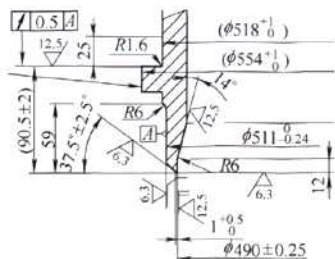


图 4

对管口加工方案考虑如下：①由于粗加工各管口坡口对加工面要求不高，如安排数控龙门粗加工管口会增加公司关键资源的生产压力，分析汽缸结构，垂直接配面直径达4600mm，汽缸长度6m多，根据汽缸重心位置计算可以将汽缸立放于 $\phi 200\text{mm}$ 镗床粗加工管口坡口，垂直接配面作为一个基准面，如图5所示，这种加工方式在首台试制中得以运用。②精加工管口时，为保证最终水压试验的密封性，需用数控机床加工。按圆凸台端面找正，保证圆凸台端面加工量均匀，使圆凸台承受水压试验压力不受影响。主轴装三面刃铣刀加工圆凸台端面，换立铣刀铣削管口外圆，通过数控机床及数控刀具精度保证圆凸台端面与管口外圆之间的形位公差要求。



图 5

(2) $\phi 100\text{mm}$ 深斜孔加工 高中压外缸汽封档内腔处有一处 $\phi 100\text{mm}$ 深斜孔，如图6所示。该孔与汽缸水平中分面铅垂线成 5.5° 斜度，孔深约950mm，孔另一端与汽缸毛坯底部贯穿，从图中可以看出孔斜度应该严格控制，斜度稍微偏差孔就有可能钻至汽缸侧壁。

为保证孔的要求，加工时采取以下加工方案：

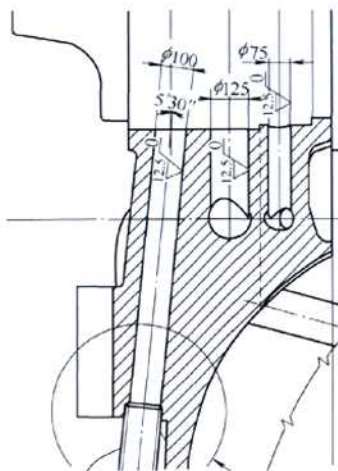


图 6

①采购KOMET公司特殊的加长复合钻在数控龙门铣上加工。②如图7所示,设计专用工装5.5°斜铁垫在汽缸两端的高压排汽管与S4抽汽管下面,斜铁的高度根据两管口的高度计算得出,通过垫斜汽缸保证孔的加工斜度。③汽缸垫斜后,按实际情况在水平中分面找两点,两点之间的距离大于5 000mm,通过数控机床测出两点的X与Y坐标,计算汽缸实际摆放斜度,控制在 $5.5^\circ \pm 2'$ 范围内,如超出此范围则在斜铁上垫铜皮调整汽缸斜度。

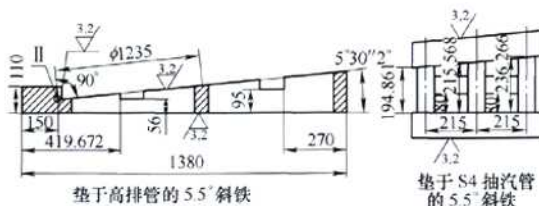


图 7

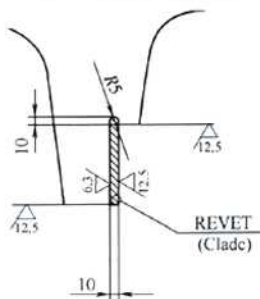
首台加工过程中遇到的问题及解决措施: ①斜铁为单独的个体,摆放汽缸的时候由于汽缸的冲击力斜铁会产生滑动。解决办法需要做一个底座,将四个单独的斜铁用螺栓把在底座上,防止汽缸摆放时它们之间发生相对移动。②由于孔太深,钻削到780mm左右深度时大量铁屑积在孔内无法排出,导致刀片损坏机床功率增加。解决办法需要复合钻外侧装CW29 34030.0884型号的点状刀片,断屑效果好,铁屑容易排出,刀片尖角 $R=0.8\text{mm}$,刀尖不易崩刃。钻孔遇机床功率突然增大时,立即退刀,用磁铁将孔内铁屑吸出,再次进刀时转速降低慢慢

切入孔内,待复合钻在孔内稳定后提高转速继续加工。

(3) 隔板定位面堆焊槽加工 隔板定位面堆焊槽如图8所示,槽宽度和深度均为10mm,底部为R5mm型线。此槽槽型较小,且加工中为满吃刀,较难加工。于是根据隔板槽深、槽型及机床附件订制专用 $\phi 580\text{mm} \times R5\text{mm}$ 成形槽铣刀(见图9)进行加工,通过试验及首台试制得出数控龙门铣最佳的切削参数:转速 $s=50\text{r/min}$,进给 $f=70\text{mm/min}$,切削过程较轻快,无需切削液。



图8 隔板定位面堆焊槽

图9 专用 $\phi 580\text{mm} \times R5\text{mm}$ 成形槽铣刀

(4) 水平中分面大螺孔加工 汽缸水平中分面孔数多达168个,且每个孔位相对于汽缸内外壁均有严格的尺寸要求,最大螺孔为M140,加工方案如下:

ALSTOM的孔位通过划线检查,但由于水平中分面孔数较多,仅靠人工划线容易出错且比较耽误时间,考虑汽缸有一次焊前加工,工艺安排焊前加工时由数控机床将孔位点出,再由操作工检查孔位是否符合要求,并记录于PC卡上,这样准确率高且效率较高。

水平中分面M52、M64、M72、M80四种规

格螺孔由浅孔钻直接钻出底孔，M100、M125、M140三种规格螺孔底孔先用KOMET标准模块式复合钻预钻，再用双刃镗刀镗准。螺纹由旋风铣床加工。螺纹铣削时用右图所示改造的专用带表内卡规直接测量螺纹中径，能比较准确的保证螺纹加工质量。

为防止最后装配时水平中分面大螺孔发生咬死现象，每个大螺孔在装配前用丝锥过一遍，再用设计的专用研磨工具进行研磨。

(5) 水平中分面沉孔加工 水平中分面沉孔要求：①相对于水平中分面平行度 $0.06 \sim 0.12 \text{ mm}/100 \text{ mm}$ 。②表面粗糙度值 $R_a=3.2 \mu \text{ m}$ 。③底部圆角为 $R5 \text{ mm}$ 。

汽缸水平中分面沉孔加工流程：①在数控龙门铣上用套料钻先将多余余量套料去除，沉孔深度留 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 余量。②待数控龙门铣将通孔钻通后，汽缸转钻床精刮沉孔，达到图样要求。

技术难点及工艺措施：由于此汽缸属于薄壁件，水平中分面法兰比较窄，这样套料的时候机床附件与汽缸壁容易发生干涉，所以订制非标加长套料钻进行套料，如图10所示，其长径比达两倍。通过首台试制，得出 $\phi 160 \text{ mm}$ 加长套料钻最佳切削参数：转速 $s=150 \sim 230 \text{ r/min}$ ，进给 $f=0.1 \sim 0.11 \text{ mm/r}$ 。这样的切削参数断屑较好，并且工件无明显颤动情况。加工过程中也遇到的问题：由于底部圆角为 $R5 \text{ mm}$ ，刀片也采用了 $R5 \text{ mm}$ 的成形刀片，但切削过程中刀片 R 处的切削是挤压切削，每次套料一个孔刀片就损坏，这样不仅增加了刀片的使用成本并且频繁的更换刀片也降低了加工效率。最后解决办法为先装尖角刀片进行套料，深度还剩 7 mm 的时候，换 R 刀片，这样大大降低了刀片的使用成本也提高了加工效率。



图 10

由于毛坯的问题，还是有些孔由于附件干涉无法套料，对于这些孔加工方案为：①先复合钻将通孔钻至漏水。②镗床铣削将通孔从背部镗开（注意镗孔的时候不能大于沉孔直径及深度）。③用订制的特殊加长刮刀杆与刀头在天桥铣上反刮面将沉孔加工出，深度方向留 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 余量。④钻床精刮沉孔。

(6) 不锈钢堆焊层加工 汽缸在水平中分面、隔板定位面、汽封档等地方大量的堆焊不锈钢层，这样加工中存在不锈钢与铸钢两种材料同时切削。为此研究小组根据材料加工性能订制了INGERSOLL的IN0560及IN6530涂层刀片，做了大量工艺试验并成功用于首台试制。切削过程中问题及分析：由于不锈钢为堆焊层，其表面形成了硬度很高的氧化层，所以在开始切削时转速不能太快；待氧化层去掉后，不锈钢材料材质较软，可以适当加大转速及进给。

实际运用：① $\phi 315 \text{ mm}$ 面铣刀精铣水平中分面，粗切刀片用IN6530涂层，精光刀片用IN0560涂层，最佳切削参数为切削深度 $0.03 \sim 0.05 \text{ mm}$ ； $S=160 \sim 170 \text{ r/min}$ ； $F=700 \text{ mm/min}$ 。② $\phi 650 \text{ mm}$ 槽铣刀精铣隔板定位面，粗切刀片用IN6530涂层，精光刀片用IN0560涂层，最佳切削参数为切削深度 $0.03 \sim 0.05 \text{ mm}$ ；转速 $s=25 \sim 30 \text{ r/min}$ ； $f=200 \sim 300 \text{ mm/min}$ 。

(7) 隔板定位面及定位槽加工 此汽缸内部有7个隔板定位槽，隔板定位面如图11所示 F_1 、 F_2 面，设计要求：①各定位面相对于水平中分面垂直度小于 0.1 mm 。②各定位面之间的平行度 0.05 mm 。③ F_1 定位基准面合缸后无轴向错位，其余 F_1 、 F_2 面轴向错位小于 0.1 mm 。④上半隔板槽宽 $163 \pm 0.5 \text{ mm}$ ，下半隔板槽宽 $160 \pm 0.05 \text{ mm}$ 。

课题组根据图样技术要求及上下半槽宽尺寸确定加工方案为：①先精铣上半各隔板定位槽，各定位面轴向尺寸按下差加工，槽宽 $163 \pm 0.5 \text{ mm}$ 按中差铣准。②再铣下半定位槽， F_1 基准面铣准， F_1 及 F_2 面留 0.5 mm 余量。③合缸检查轴向错位，记录错位量。④根据错位量精铣下半 F_1 及 F_2 面。⑤合缸检查错位量，合格后铣准下半 $160 \pm 0.05 \text{ mm}$ 槽宽。

MW（待续）（收稿日期：20110321）