

600MW 机组高中压缸通流部分检修质量优化

王双立 张黎莉

摘要：针对当前汽轮机检修对节能降耗的要求比以往任何时候都高这一现状，通过大修对汽缸的揭缸检修和改造，提出机组在检修过程中如何准确通过测量和计算判断汽缸是否形变，通流部分间隙是否合适。本文给出间隙调整的具体步骤以确保通流部分的检修质量，从而给 600MW 超临界机组高中压缸检修提出指导性意见。

关键词：汽轮机；高中压缸；间隙调整；汽封

针对当前对能耗指标的管控，热耗值成为企业在行业竞争内的一个硬性指标。对于 600MW 超临界机组高中压缸部分，由于本身进汽压力和温度高，通流部分控制不好损耗将相当大。在大修中提高高中压缸的检修质量，判断是否发生形变，通流部分间隙是否适当等，成为汽机本体节能降耗的重点工作。

为了减小漏气损失目前检修调整汽封时普遍适当减小了径向间隙，那么很自然运行中汽封齿碰磨的几率就会增加。如果我们希望即通过减小汽封间隙提高汽轮机效率，又要避免运行中发生碰磨，除了汽封间隙的选择恰当外，还需要保证汽封间隙调整的准确性，以及持环或隔板与转子的同心度。在机组检修中会发现汽缸变形量大的问题极为普遍，这就给我们的调整工作增加了难度，所以在进行调整之前必须先判断汽缸是否变形。

本文讨论的问题就是在检修首先从如何判断汽缸变形，再到调整隔板中心和汽封间隙优化，通过装假轴、粘胶带等方法进行测量，并逐步计算。本文以东汽 600MW 超临界机组高中压缸为重点，对其检修过程方法进行详细阐述。

1. 变形量的修正与测量

1.1 汽轮机检修中心修正处理的必要性

汽轮机安装、大修，实际上就是调整动静中心的过程，特别是运行过的机组。在大修机组中，汽轮机转子中心合格后，应进行静止部分（持环、隔板套、隔板、轴封套等）以转子为中找动静中心，测量中普遍是以下半实缸动静中心为准。实际上，运行过的机组外缸存在很大的变形量，因此，在一般的情况下，下半实缸的动静洼窝中心与全实缸下的动静洼窝中心存在差距。若不考虑全实缸下的动静同心度，大修后的机组往往在开机后有动静摩擦声，无法顺利达到满速。而通过一段时间的摩擦磨合后，机组达到了满速，但由于摩擦导致间隙的增大，导致带负荷效率（热耗、汽耗、煤耗）没有明显的提高，甚至低于大修前。

因而在大修过程中，要把全实缸下的实际动静洼窝中心修正到半实缸动静洼窝中心上，

再进行汽封间隙调整。经过这样的洼窝中心修正后，汽封间隙调整合格后，开机过程一定能顺利进行，基本不存在动静摩擦声，带负荷效率将会大大提高。

1.2 通流部分中心的测量

中心测量步骤：

1.2.1 测量前应在每个洼窝的测量点（测量3点，即左a、右b和下部c）上做好标记，以便每一次都在同一个位置上进行测量，以提高测量的准确性；

1.2.2 扣上半持环隔板、内缸，复测自然状态下汽缸平面间隙。如果是首次检修建议在拧紧螺栓前在这个状态下再测量一次各部位洼窝中心，仍旧测量下三点。因为半缸状态下，汽缸的刚度要比全缸低，在上半持环、内层缸吊入后，在其上半部件重量作用下，汽缸将向下变形。这个数字应当是一个衡量，测量结果对于以后的检修一直可以借鉴。根据平面间隙分布情况紧1/3螺栓，螺栓拧紧后法兰平面最大间隙应小于0.05mm。如间隙超标应拧紧全部螺栓，如拧紧全部螺栓后间隙仍超标热紧螺栓，直至法兰平面最大间隙应小于0.05mm。测量持环、内层缸在紧螺栓后的洼窝中心，这个状态下应测量上、下、左、右四点。

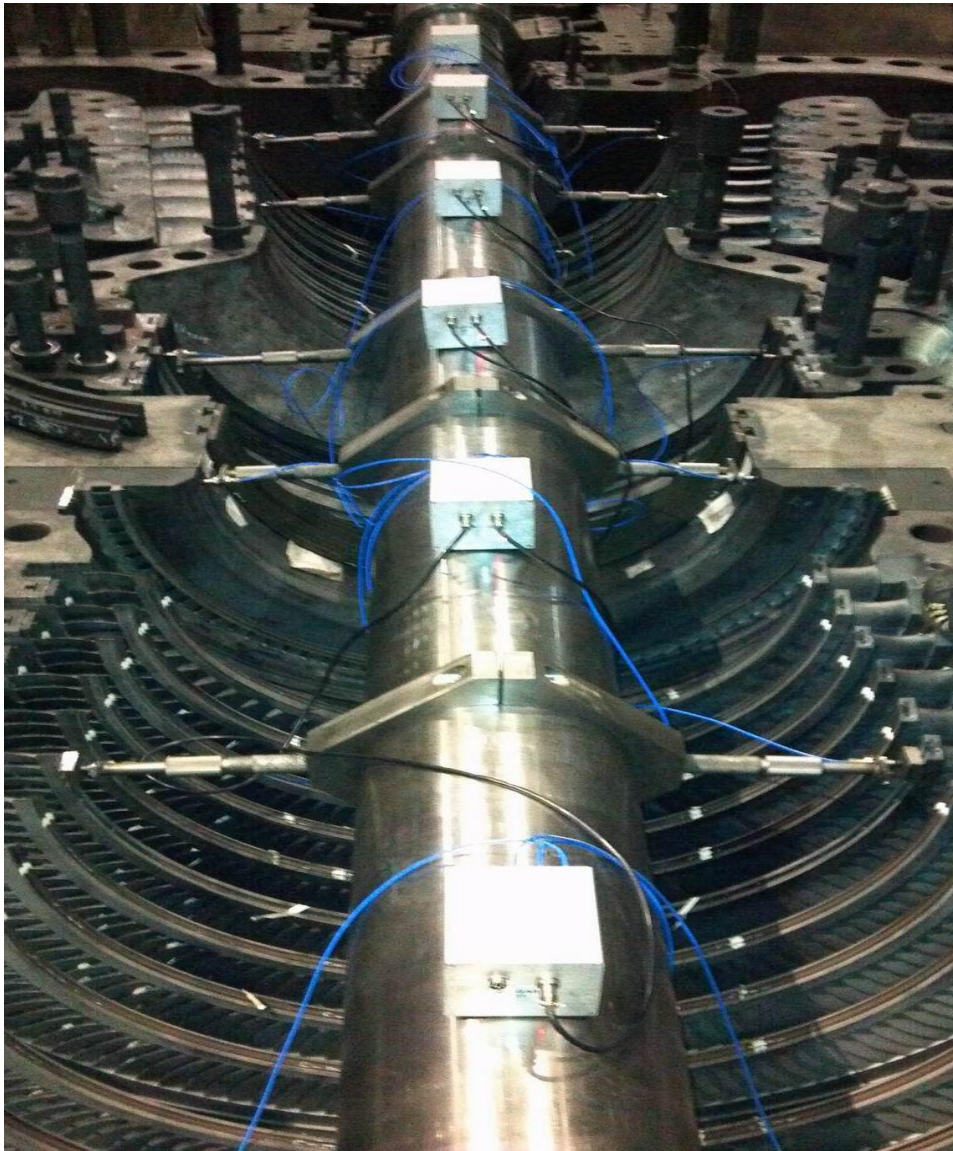
1.2.3 内缸测好后，扣上外层缸，要求与内层缸要求相同。待扣好外层缸后，再次用上、下、左、右四点测量各洼窝中心。这时内、外层缸洼窝中心还将变化，内层缸的变化是由于外层缸法兰存在张口及紧螺栓后汽缸刚度增强垂弧减小造成持环、内层缸挂耳支点处标高变化引起的。这次测量的结果才是汽缸各级持环、隔板的真实洼窝中心。与前面一样，还需测量外层缸扣上后，未紧靠法兰螺栓前，在外缸的自重作用下持环、内缸洼窝中心有多少变化。

1.2.4 开缸后复测量各汽封洼窝中心，与上次同样状态下的测量结果进行比较，应基本不变，否则应查明原因，以确保测量结果可靠。

1.2.5 对测量结果进行比较，计算出汽缸螺栓拧紧后各汽封洼窝中心的变化量。在开缸状态下，根据实际偏差和变化量对持环、隔板洼窝中心进行调整，使其在合缸后处于与转子同心的位置上。即保证全实缸状态下的洼窝左等于右，上等于下。

1.3 实例分析：长沙电厂#1 机组高中压缸变形量测量记录

图 1. 现场变形量测量图



如上图测量工具采用安装假轴的方法，利用三点测量法，通过端部数据传输，判断各个变形量。

测量注意事项：

- 1.3.1 数据单位，毫米(mm)，小于 0.05mm 的变形量数据未显示；
- 1.3.2 表中仅显示了“相对于半缸”，显示数据均为相对于半缸的变形量；
- 1.3.3 变形量数值，正数代表间隙会变大，负值代表间隙会减少；
- 1.3.4 未测量位置的数据可以利用同一部套其它位置数据进行推算。例如：若隔板 2-6 位于同一部套，测量点选择在隔板 3 与隔板 5，则可根据隔板 3 与隔板 5 的变形量推算隔板 2、4、6 的变形量。

表 1、内缸上缸落下后洼窝中心变化记录

内缸上缸落下后	测点读数值			相对于半缸数值变化量		
位置名称	左 a	右 b	下 c	左变形	右变形	下变形
高隔 7	-0.445	-0.569	-0.038	/	/	0.151
高隔 5	0.314	0.368	0.325	/	/	0.146
高隔 3	0.333	0.392	0.379	/	/	0.126
喷嘴	-0.253	0.664	0.646	-0.173	0.33	0.379
过桥 2.5	0.475	0.7	0.963	/	-0.069	0.288
中隔 1	0.369	0.352	1.209	-0.102	-0.084	0.676
中隔 3	0.188	0.382	0.912	/	0.068	0.475
中隔 5	-0.553	-0.435	-0.235	/	0.058	0.113

表 2、热紧内缸后洼窝中心变化记录

热紧内缸	测点读数值			相对于半缸数值变化量		
位置名称	左 a	右 b	下 c	左变形	右变形	下变形
高隔 7	-0.418	-0.604	-0.184	0.058	/	/
高隔 5	0.458	0.224	0.176	0.142	-0.119	/
高隔 3	0.398	0.286	0.094	0.067	-0.06	-0.159
喷嘴	-0.327	0.673	0.328	-0.247	0.339	0.061
过桥 2.5	0.473	0.664	0.706	/	-0.105	/
中隔 1	0.319	0.423	1.137	-0.152	/	0.604
中隔 3	0.162	0.439	0.996	/	0.125	0.559
中隔 5	-0.553	-0.409	-0.333	/	0.084	/

表 3、热紧外缸冷却 3.5 小时后洼窝中心变化记录

热紧外缸冷却 3.5 小时后	测点读数值			相对于半缸数值变化量		
位 置 名 称	左 a	右 b	下 c	左变形	右变形	下变形
高隔 7	-0.352	-0.644	0.1	0.124	-0.083	0.289
高隔 5	0.602	0.158	0.55	0.286	-0.185	0.371
高隔 3	0.487	0.279	0.485	0.156	-0.067	0.232
喷嘴	-0.156	0.619	0.777	-0.076	0.285	0.51
过桥 2.5	0.668	0.571	1.241	0.188	-0.198	0.566
中隔 1	0.496	0.344	1.777	/	-0.092	1.244
中隔 3	0.37	0.425	1.74	0.226	0.111	1.303
中隔 5	-0.466	-0.468	0.096	0.119	/	0.444

水平方向正数表示向 A 排调整，负数表示向 B 排调整；垂直方向正数表示向上调整。

从记录中可以看出，在未紧汽缸螺栓前，各汽封洼窝中心垂直方向向上变化，水平方向高压缸无变化，中压缸变化量不大。全实缸后，垂直方向下变形量变化大，水平方向上整体向 B 排移动。汽封洼窝中心水平方向偏移，应与基础沉降有关。该机组锅炉在 B 排侧，因锅炉重量很大造成汽轮机基础向 B 排倾斜，因而持环、汽封洼窝中心全部偏向 B 排，与汽缸扬度变化情况相符。这是一个有共性的，较普遍的现象。

在确认汽缸变形量测量数据准确无误后，开始调整通流部分洼窝中心，根据表三全实缸冷却 3.5 小时后的数值变形量进行调整。洼窝中心的调整工作应尽力精益求精，因动静叶同心度偏差大，不但会影响级效率还会影响到汽封间隙调整的准确性。

从数据表明不测量汽缸变形量就进行汽封间隙的调整将造成误差，直接影响汽封间隙的优化调整。

2. 汽封间隙的调整

由于调整隔板及汽封体洼窝中心的最终目的是为保证汽封间隙，而测量汽封间隙时，是使用转子测量。我们分析汽封间隙与洼窝中心的区别，即洼窝中心是没有安装汽封块与汽封齿的情况下静子与转子间的径向间隙，汽封间隙是安装上汽封块和汽封齿的情况下静子与转子间的径向间隙。按照理想情况，汽封块与汽封齿的弧段每一处断面上的厚度应该相等，所以只要洼窝中心调整完成后，汽封间隙应该在沿转子圆周方向各点相等。在实际操作中，

调整汽封间隙的工作相当于通流部分中心数据的精细调整。

2.1 汽封间隙的测量

汽封测量方法，一般采用压胶带、压铅丝、压肥皂盒橡皮泥等传统方法，目前我们运用的最广泛的为压胶带的方法。通常测量其封间隙采用压胶布和塞尺测量结合的方式。为了确保测量数据的准确，在汽封测量中应注意以下几个方面：

2.1.1 汽封块的固定：测量汽封间隙时汽封块的背部的弹簧一定要全部安装到位，将汽封块背部用木块塞紧，防止汽封块压缩退让产生测量误差。

2.1.2 粘贴胶布的要求：一般每层胶布厚度为 0.25mm，最好做成阶梯型，每层胶布错口 2mm 左右，根据汽封间隙的大小来决定胶布的层数，同时，加入厚度 0.05mm 的透明胶布提高测量精确度，必须按转子的转动方向增加胶布的层数，防止胶布卷起被刮掉。在贴胶布前各汽封块应清理干净，保证胶布粘贴牢固。

2.1.3 测量读数的要求：根据胶布接触红丹粉压缩痕迹判断汽封间隙数值时，关键要判断接触虚实。同时用塞尺检查下缸两侧间隙与胶布痕迹进行对比，为判断汽封间隙数值提供依据。

表 4、胶布痕迹情况对应间隙值

胶布接触情况	间隙值
使用胶布实际检验单层厚度为 0.25 mm，单层透明胶布 0.05 mm	
3 层胶布未接触	>0.75mm
3 层胶布刚见红色	0.75mm
3 层胶布有较深红色	0.65-0.70mm
3 层胶布表面被压光，颜色变紫	0.55-0.60mm
3 层胶布表面磨光呈现出黑色，2 层胶布刚见红色	0.45-0.50mm
其它根据不同层数胶布接触判断间隙以此标准	

2.2 汽封间隙标准值

东汽 600MW 超临界机组设计值，在进行分析后，为了保证节能效果，在进行中心修正后，采用按照设计值最小值的方案进行回装，具体数据要求如下表：

表 5、高中压缸汽封间隙参数

高中压缸径向汽封间隙，单位 mm								
位置	上	下	左	右	上	下	左	右
	设计值				回装要求			
高压调节级叶顶	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	0.8	0.8	0.65-0.7	0.65-0.7
高压叶顶第 2-7 级	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	0.8	0.8	0.65-0.7	0.65-0.7
高压叶顶第 8 级（大径）	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	$1.3^{+0.5}_{-0.25}$	0.8	0.8	0.65-0.7	0.65-0.7
高压叶顶第 8 级（小径）	2.6	2.6	2.6	2.6	1.2	1.2	0.8	0.8
高压隔板第 2-8 级	1.0 ± 0.13	1.0 ± 0.13	0.38 ± 0.13	0.38 ± 0.13	0.87	0.87	0.4-0.5	0.4-0.5
中压叶顶第 1-5 级	$1.5^{+0.5}_{-0.25}$	$1.5^{+0.5}_{-0.25}$	$1.5^{+0.5}_{-0.25}$	$1.5^{+0.5}_{-0.25}$	0.9	0.9	0.65-0.7	0.65-0.7
中压叶顶第 6 级（大径）	$1.5^{+0.5}_{-0.25}$	$1.5^{+0.5}_{-0.25}$	$1.5^{+0.5}_{-0.25}$	$1.5^{+0.5}_{-0.25}$	0.9	0.9	0.65-0.7	0.65-0.7
中压叶顶第 6 级（小径）	2.3	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	0.75	0.75
中压隔板第 1-6 级	1.0 ± 0.13	1.0 ± 0.13	0.64 ± 0.13	0.64 ± 0.13	0.87	0.87	0.45-0.5	0.45-0.5

2.3 汽封间隙调整方法

2.3.1 径向间隙过小的调整：最合理的方法是加工修正汽封齿，但这种方法加工精度要求高，施工难度大，耗费时间长。检修现场常用大的比较简单、有效的方法是捻汽封定位内弧。用游标卡尺测量汽封定位内弧与圆弧面之间的距离，然后用样冲在定位面内弧侧面捻出一个小凸起点，测量凸起与圆弧面之间的数值，两次测量值之差就是汽封间隙在此点的增大值，间隙变化值如果和理想变化值不符，在进行调整。若间隙值过大，可用锉刀将凸起搓掉一点，若间隙过小，在将凸起点捻大一点，直到汽封间隙合格。

2.3.2 径向间隙过大的调整：由于汽封齿损坏或严重磨损变形引起汽封间隙严重超标时应更换新汽封块，若汽封间隙超出标准值不是很大时，一般采用加工汽封定位内弧的方法。对于可调汽封块，汽封径向间隙大于标准值多少，就在汽封体与调整块之间增加调整垫片。

2.3.3 轴向间隙的调整：可采用轴向移动汽封套或汽封环的方法，也可以采用局部补焊和加销钉的方法。对于隔板汽封，一般不允许用改变隔板套轴向为位置的方法调整，以保持隔板与叶轮的轴向位置。当隔板汽封轴向间隙与隔板通流间隙调整方向一致时擦能改变隔板的轴向位置。

2.3.4 叶顶汽封径向间隙的调整。目前汽轮机也定汽封主要有：可调式蜂窝汽封、可调式梳齿汽封，镶片式汽封。可调式的汽封与上述汽封调整方法相同，镶片式汽封叶顶汽封的径向间隙调整比较麻烦，需要将间隙超标的叶顶车掉，重新镶汽封片进行加工。

2.3.5 汽封块间周向膨胀间隙调整，采用在隔板中分面单侧靠平，另一侧用精度 0.02mm 的深度尺测量调整总间隙的方法进行调整，调整数值按设计下限标准进行控制。

3. 优化改造

由于东汽 600MW 超临界机组由于设计问题，在运行过程中发现过桥汽封存在串气情况，采用更换成高低齿铁素体汽封方式进行优化调整。通过现场实际情况分析，对轴封、调节级叶顶和叶根阻汽片、隔板汽封、低压缸部分汽封等进行了相适应的调整和改造，具体情况如下表：

表 6、汽轮机本体检修主要技术改造

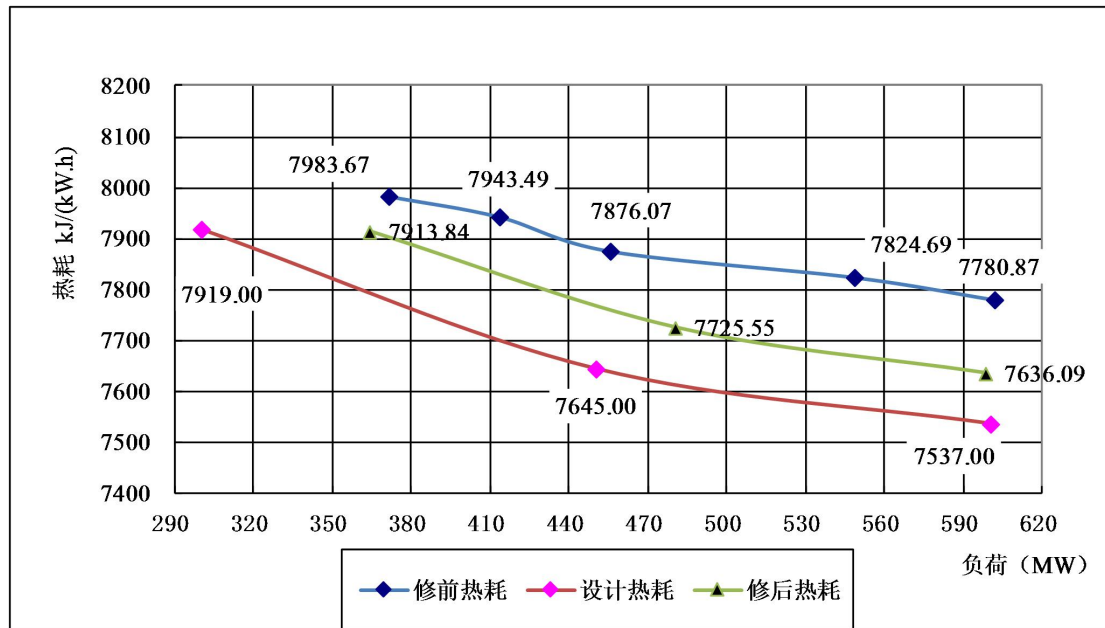
序号	汽封名称	施工情况
1	调节级叶顶及叶根阻片	重新镶嵌
2	高压 2-8 级隔板汽封	更换蜂窝式汽封
3	#1 高压端轴封	内 2 圈更换成高低齿铁素体汽封
4	#2 过桥汽封	更换成高低齿铁素体汽封
5	中压 10-14 级隔板汽封	更换成蜂窝式汽封
6	#3 轴封	内 2 圈更换成铁素体汽封
7	高中压叶顶阻汽片	重新镶嵌
8	低压部分隔板汽封	对汽封间隙作调整，使用旧汽封
9	低压部分叶顶阻汽片	重新镶嵌正反前 3 级
10	#6、#7 轴封汽封 #4、#5 轴封汽封	更换 4 圈触及环
11	小机轴封	对汽封间隙作调整，使用旧汽封

4. 结论

经过热力实验后，600MW 工况平均高压缸效率为 84.99%，比修前 600MW 工况高压缸效率 82.36%提高 2.63 个百分点，比设计值 86.26%低 1.27 个百分点；中压缸效率为 92.04%，比修前 600MW 工况中压缸效率 94.43%降低了 2.38 个百分点，比设计值 92.56%低 0.51 个百分点。

600MW 修正后平均热耗率为 7630.81kJ/(kW·h)，比修前 600MW 工况热耗 7780.87kJ/(kW·h)降低了 150.06 kJ/(kW·h)，比设计热耗率 7537kJ/(kW·h)高出 93.81kJ/(kW·h)。对比东汽同类型超临界机组大修改造效果，处于领先地位。

图 2、主要工况热耗试验结果对比



实验结果可知，汽轮机径向通流间隙的大小对机组的安全、经济运行起着关键的作用，若间隙调大了，漏汽大、通流效率低；间隙调小了，机组启动时易碰磨。因此在检修时为了达到节能降耗这一目的，正确合理地控制检修工艺，精确调整通流汽封间隙值，对汽轮机优化改造，提高发电效率起到至关重要的作用。

参考文献：

- [1] 刘建华, 600WM 机组汽轮机汽封改造及效益分析, 沈阳工程学院学报, 2013 (4) :300-304
- [2] 方光俊, 隔板及汽封体洼窝中心调整的新工艺探讨, 理论广角
- [3] 瞿玉琛, 许世诚, 关于提高汽轮机通流部分检修质量的探讨, 热力透平, 2011 (4) :271-273