

汽轮机通流部分汽封改造

朱志坚

（江苏利港电力有限公司，江苏 江阴 214444）

**摘 要：**针对国产引进型 300MW 汽轮机经济性能未达设计要求，高压缸效率低的问题，提出了对通流部分汽封进行改进和更换新型调节级喷嘴的建议。经改造后测定，调节级效率大幅提高，高中压缸效率明显改善，机组的热耗率显著降低。

**关键词：**汽轮机；汽封；热耗；效率

1 问题的提出

N300-16.7/538/538 型汽轮机是上海汽轮机有限公司引进美国西屋公司技术制造的亚临界、中间再热式、高中压合缸、双缸双排汽单轴凝汽式汽轮机，机组整个通流部分共 35 级叶片，其中高压缸由 10 级反动级加 1 级调节级，中压 9 级，低压共 14 级。调节级动叶片为铆接围带结构，动叶片除低压缸末 3 级为扭转叶片,其余均为等截面叶片。高、中、低压缸隔板静叶均为扭叶片。

该机组投产后，主要存在的问题是各项经济指标未能达到预期的设计性能,汽轮机出力存在不足。引进型 300MW 汽轮机采用现代化的设计、加工技

术，高压缸效率却常常达不到 80%。近年来，制造厂对这类型汽轮机进行了通流部分叶栅的改型设计，设法提高汽缸效率，如 F156、H156 型等。再加上对结构采用一些完善措施。试验表明，投运后的汽轮机高压缸效率在 6 阀全开时也只能达到 79%~81%。参阅西安热工院对投运机组多次的试验研究资料显示，高压缸效率低的问题，主要原因在于通流叶栅,而在很大程度上受汽轮机结构的影响。

为了准确掌握机组运行状况，机组大修前进行了性能试验，结果如表 1 所示。

表 1 汽轮机组大修前性能试验主要计算结果

工 况	设计额定负荷	300MW	6vwo	5vwo1	5vwo2	5vniso	300MW2	6vwo2
负荷 MW	300.029	301.639	304.951	282.737	280.227	280.375	301.0868	301.166
凝汽器压力/kpa	4.9	12.396	12.736	11.159	11.067	11.152	11.546	11.869
主蒸汽压力/MPa	16.67	16.465	16.26	16.833	16.598	16.627	16.594	16.131
主蒸汽温度/℃	538	535.6	535.5	527.8	533.8	534.7	534.5	531.1
高压缸排汽压力/MPa	3.57	3.852	3.899	3.491	3.45	3.451	3.819	3.837
高压缸排汽温度/℃	317.6	336.7	338.3	316.9	322	323.3	334.4	334.1
中压缸进汽压力/MPa	3.21	3.633	3.676	3.323	3.279	3.282	3.601	3.619
中压缸进汽温度/℃	538	536	536.9	516.5	521.2	522.4	531.7	528
高压缸效率/%	86.32	79.82	80.66	79.47	79.71	79.29	79.47	80.47
调节级效率* /%	71.64	40.17	38.68	44.10	45.13	43.55	39.55	37.73
中压缸效率（名义）/%	92.24	87.69	87.77	86.43	87.47	87.22	87.89	87.76
最终给水温度/℃	273.8	265.1	265.9	279.9	279.2	279.5	267	267.2
计算主汽流量/(t/h)	907.03	1051.57	1058.85	1040.80	1022.26	1021.42	1050.86	1057.19
试验热耗率/(kJ/kWh)	1917.00	9182.19	9138.09	9237.82	9231.45	9210.79	9114.93	9125.82
修正后热耗率/(kJ/kWh)	7918.50	8707.55	8646.91	8776.7	8789.66	8771.33	8678.78	8644.78

注：含主汽门、调速汽门节流损失；vwo 为阀门全开工况，vniso 为阀门全开非隔离工况。

针对试验结果和机组的实际情况提出以下分析意见：

（1）5 阀隔离工况与非隔离工况比较

因考虑外部泄漏无法测量，故 5 阀非隔离工况（5vniso）进行了外部隔离，如关闭连排门、定排门、除氧器排氧门等。而 5 阀隔离工况（5vwo）不

仅对外部泄漏进行隔绝,同时对内部泄漏进行隔离，如关闭疏水手动门等。从结果看，两工况的结果相差不大，说明内部泄漏隔离后，阀门仍在泄漏。

（2）汽轮机内效率

1）6 阀全开工况（6vwo），高压缸效率为 80.66%，中压缸名义效率为 87.77%；

2) 300MW 工况 (300MW), 高压缸效率为 79.82%, 中压缸名义效率为 87.69%;

3) 5 阀全开 1 工况 (5vwo1), 高压缸效率为 79.47%, 中压缸名义效率为 86.43%;

4) 5 阀全开 2 工况 (5vwo2), 高压缸效率为 79.71%, 中压缸名义效率为 87.47%;

5) 5 阀中压缸实际效率为 85.66%。

相对比较, 该汽轮机高中压缸效率在 5 阀全开工况 (5vwo) 时分别为 79.59% 和 86.95%, 6 阀全开工况 (6vwo) 时分别为 80.57% 和 87.77%, 高压缸效率处于较好的水平, 而中压缸效率较差。另外, 调节级效率太低, 实际为 45% 左右 (5vwo), 与设计值 (额定工况 71.64%) 相比低 26%, 是影响性能的主要原因之一。

### (3) 高中压平衡活塞漏汽

汽轮机中压平衡活塞汽封漏汽率偏高。实测漏汽率为 6.72%, 设计值为 1.4%, 流量 10.4 t/h, 超过设计值 5.32%。5 阀全开 1 工况 (5vwo1) 时再热蒸汽流量为 800.72 t/h, 漏汽量达 53.8 t/h, 比设计值增大 43.4 t/h。

## 2 汽封改造

### 2.1 布莱登汽封与蜂窝汽封及侧齿汽封的比较

布莱登汽封的技术特点是改进了传统汽封块背部采用板弹簧的退让结构, 由螺旋弹簧安装在两相邻汽封块垂直断面代替。在自由和空负荷工况下, 汽封块在螺旋弹簧的弹力作用下, 汽封块张开, 可退让径向间隙 1.5 mm 左右。随负荷增加, 汽封块在背弧承受蒸汽压力的作用下, 克服弹簧弹力, 各级逐渐关闭, 一般设计在 20% 负荷前, 各级汽封完全闭合, 设计闭合后的径向间隙为 0.25~0.50 mm, 达到最小径向间隙。若各级汽封都能按设计正常闭合, 其间隙值将小于现传统结构通流汽封 0.75 mm 的间隙值, 从而减少了汽封漏汽量; 若不能正常闭合, 其间隙值为退让间隙 1.5 mm 加闭合间隙 0.25~0.50 mm, 径向间隙总量为 1.75~2.00 mm, 将大于传统汽封 0.75 mm 的间隙值。布莱登汽封齿的结构, 仍采用传统汽封的直齿结构。密封效果主要是径向间隙缩小而体现。

另外, 由于布莱登汽封的结构特点, 在启动过程中, 可避免因汽封齿与轴动静碰摩而产生的振动。安装条件是汽封块前后必须有较大压差, 所以低压部分不能使用。

蜂窝汽封的结构特点是, 将传统汽封低齿车削, 由蜂窝状汽封取代。蜂窝是由内孔表面为蜂窝形状的六边形小孔组成。板厚 0.05mm, 芯格尺寸 0.8mm~6 mm, 深度 1.6 mm~6 mm。蜂窝带网格大小及高度的选取是有科学依据的。在不同的改造环境下, 不同的压力, 不同的轴径, 不同的转速, 气体的品质优劣, 其所选用的蜂窝带的规格是不相同的。蜂窝汽封退让仍采用传统汽封的背部板弹簧结构, 所以安装间隙一般取传统汽封径向间隙设计值的上限。与现传统高、低齿结构汽封相比, 由于该汽封具有高效阻透气效应及良好的气旋效应, 从而密封效果大大提高, 汽封由于仍采用原传统汽封退让结构, 在启动过程中可能会产生碰磨, 但由于蜂窝带采用的是一种镍基高温合金, 其室温抗拉强度  $\delta_b=755\text{MPa}$ , 延伸率 45%, 室温平均硬度 HB130, 固溶温度 1177℃。这样, 一旦轴与蜂窝接触, 蜂窝带快速磨掉, 而不会伤害轴。

侧齿汽封是在原高低齿汽封的基础上增加了侧齿, 使汽封的齿数进一步增加, 对漏汽的节流作用进一步增强, 有利于更好地减少汽封的漏汽量。

对于三种汽封: 1) 在于设备价格, 由于蜂窝汽封是第一台机组改进, 考虑加工工期的因素, 均采用新加工的汽封环, 与布莱登汽封价格相当。但是第二台机组可采用第一台更换的旧汽封进行改进, 两台机组的平均价格低于布莱登汽封 (布莱登汽封每台机组改进时均需更换新的汽封环), 而且更换下的旧汽封还能作为备件使用, 从而综合比较之下蜂窝汽封价格优势更明显。2) 布莱登汽封只能用于汽轮机通流高压差部分, 而蜂窝汽封不受压差限制。权衡各种利弊, 采用蜂窝汽封。其部位为: 高、中、低压缸通流及轴封, 两台小汽轮机通流及轴封。蜂窝、布莱登、侧齿汽封最终实施方案见表 2。

表 2 蜂窝、布莱登、侧齿汽封实施方案

名称	高压缸	中压缸	低压缸	小汽轮机×2
隔板汽封	—	8	14	6
叶顶汽封	11	9	10	—
高压排汽平衡盘	3 (布莱登)	—	—	—
高压进汽平衡盘	5 (布莱登)	—	—	—
中压进汽平衡盘	—	2 (布莱登)	—	—
轴封	4 (1 道布莱登, 3 道侧齿)	4 (1 道布莱登, 3 道侧齿)	8 (侧齿)	30 (侧齿)
合计	23	23	32	36

注: 未标明汽封形式的部位均为蜂窝汽封。

### 2.2 调节级汽封改造

调节级整级差压大, 其级功率占高压缸总功率

的 20.8%左右。额定工况下调节级设计效率为 71.64%(含汽门节流损失), 实际机组运行通常只能达到 50%左右(含汽门节流损失), 影响功率 5.3MW 左右。其原因一方面是调门节流大, 另一方面调节级动叶叶顶及叶根汽封径向间隙设计偏大和汽封结构不合理, 设计间隙为 2.5mm, 按调节级叶顶直径计算, 相当于 1 根 DN110 的管道漏汽面积, 且采用单齿镶嵌式结构, 阻汽效果差。因调节级效率低影响高压缸效率 2%左右。

改造方案为, 调节级叶顶由原一道汽封改为四道汽封, 叶根汽封仍为两道, 汽封的镶嵌结构不变, 同时减小汽封间隙, 新汽封结构见图 1。该方案需要更换调节级喷嘴, 重新镶嵌并调整径向间隙至  $1.5\pm0.05\text{mm}$ 。

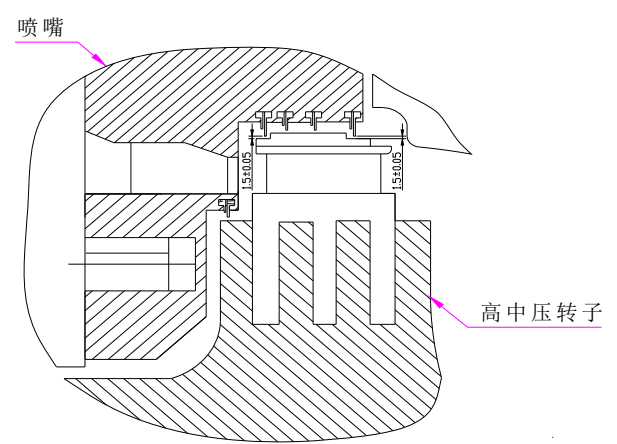


图 1 调节级叶顶汽封示意图

调节级汽封改进参数如表 3。

表 3 调节级汽封改进参数

汽封位置	叶顶	叶根
汽封形式	镶嵌式	镶嵌式
齿数/原齿数	4/1	2/2
原间隙/mm	$2.5\pm0.05$	$2.0\pm0.05$
新间隙/mm	$1.5\pm0.05$	$1.5\pm0.05$

2.3 高压内缸夹层安装汽封

采用持环加固定式, 阻汽片方案。在高压缸静叶持环下半挡汽环镶嵌一个阻汽片(L5mm 厚合金钢板), 阻汽片与外缸间隙调整为 2~3mm(原挡汽环间隙为 20mm)。

3 改造后基本效果

大修后进行了性能试验, 目的是鉴定机组在不同的工况下, 提高出力后, 汽轮发电机组和各辅机设备及系统运行的安全性及性能, 并兼顾进行了汽

轮机组的热力性能试验, 比较机组提高出力之后和完善改进后的效果及各项经济指标。试验工况为:

- 1) 5 阀全开预备性试验, 机组功率 300.95 MW;
- 2) 5 阀全开正式试验, 机组功率 305.17 MW;
- 3) 额定背压出力能力试验, 机组功率 330.19 MW
- 4) 夏季背压出力能力试验, 机组功率 319.88 MW
- 5) 夏季背压额定功率试验, 机组功率 302.32 MW;
- 6) 五阀全开, 中压缸平衡活塞漏汽率试验;
- 7) 正常运行方式, 连续 72 h 机组功率 325MW 试验。

(1) 改进前、后比较

以五阀工况为基准, 相对比较改进前、后的性能变化, 对比是在相同的初、终参数条件下, 均以改进前、后, 各两次五阀工况的平均值对比, 其结果见表 4。

表 4 机组汽封改进前后五阀工况对照表

项目	额定负荷 (设计值)	改进前	改进后	改进前后 相对变化/%
阀位	—	5VWO	5VWO	—
修正后电功率/MW	300.03	294.30	306.95	+4.28
高压缸效率/%	86.33	79.58	84.90	+6.67
调节级效率/%	71.48	44.34	72.29	+63.00
中压缸效率(名义)/%	92.24	86.95	92.35	+6.10
中压缸效率(实际)/%	—	85.66	91.50	+6.82
中压平衡活塞漏汽率/%	1.4	6.72	2.5	-62.8
修正后热耗率/(kJ/kWh)	7921	8783.18	8221	-6.40

(2) 不同工况下的机组热力性能

表 5 汇总了不同工况下, 设计与试验结果。机组 330MW 工况热耗率较 300MW 工况低 39 kJ/(kWh), 折合煤耗约 1.4 g/kWh; 模拟夏季工况 320MW 工况热耗率较 300MW 工况低 14 kJ/(kWh), 折合煤耗约 0.6 g/kWh, 高负荷工况均优于 300MW 工况。

4 结论

试验表明, 汽轮机通流部分汽封改造以后, 其性能有显著提高, 特别是调节级效率提高的幅度比较大, 是高压缸效率提高的主要原因。改进后的性能尽管有显著提高, 但与设计值相比仍有一定差距, 进一步优化仍有潜力。

表5 机组设计值及试验结果汇总表

名称	设计值					试验值				
	额定 负荷	6VWO	6VWO +5%	夏季 3%补水	6VWO+5%超压 夏季 3%补水	5VWO 300MW 工况 1	5VWO 300MW 工况 2	6VWO	6VWO 夏季工况	6VWO 夏季工况
发电机功率/MW	300.029	319.05	333.26	302.35	316.54	300.95	305.17	330.19	319.88	302.3
主蒸汽压力/MPa	16.7	16.7	17.5	16.7	17.5	16.64	16.61	16.918	17.164	16.098
主蒸汽温度/℃	538	538	538	538	538	544.93	545.9	542.67	541.04	545.17
调节级压力/MPa	11.6		13.1			12.29	12.26	13.44	13.64	12.74
调节级温度/℃	484.9		494.2			499.76	500.86	506.29	504.45	508.11
高压排汽压力/MPa	3.57	3.82	3.99	3.79	3.96	3.647	3.66	3.958	3.967	3.794
高压排汽温度/℃	317.6	324	322.9	323.1	322	328.25	330.25	332.13	327.84	336.62
再热汽压力/MPa	3.21	3.43	3.59	3.41	3.56	3.37	3.377	3.658	3.665	3.504
再热汽温度/℃	538	538	538	538	538	535.32	536.46	539.66	532.43	534.74
中压排汽压力/MPa	0.79	0.843	0.878	0.825	0.858	0.822	0.826	0.896	0.894	0.855
中压排汽温度/℃	335.1	334.6	334	333	332.2	331.91	333.94	336.64	329.67	332.06
凝汽器压力/kPa	4.9	4.9	4.9	11.8	11.8	7.05	5.18	4.96	10.36	10.26
主蒸汽流量/(t/h)	907.03	975.85	1024.96	795.91	1024.99	963.8	956.9	1049.2	1068.3	1000
调节级效率/%	71.64		73.77			72.67	71.9	78.93	80.63	79.8
高压缸效率/%	86.32	87.19	87.26	87.16	87.26	85.1	84.7	86.3	87	0.857
中压缸效率/%	92.24	92.26	92.18	92.12	92.21	92.5	92.2	92.1	92.3	0.922
试验热耗率/(kJ/kWh)						8329	8187	8149	8511	8531
修正后热耗率/(kJ/kWh)	7921	7907	7889	8346	8308	8235	8207	8182	8207**	8642**

注：\*按锅炉效率 92%、管道效率 99%计算；\*\*背压修正到 11.8kPa

## 参考文献：

- [1] 胡尊立.关于汽轮机出力概念的探讨[J].中国电力,1997,30(2):58-60.
- [2] 王兴平,张行政.上汽优化引进型 300MW 汽轮机热力性能分析及评价[J].动力工程,1998, 18(3):9-16.
- [3] 高登攀等.靖远第二发电有限公司 5、6 号机组出力能力试验报告[R].西安:西安热工研究院有限公司,2004.

- [4] 朱小令等.国产引进型 300MW 机组运行情况及存在问题的调查报告[R].西安:国家电力热工研究院,1998.

## 作者简介：

朱志坚（1968-），男，江苏江阴人，高级工程师、高级技师，从事汽轮机设备管理与技术改造工作，E-mail: zhuzhj@jlepc.com.cn。