

600MW 超临界机组循环水泵出力下降的原因分析

朱晓飞¹，卢承斌²

(1.张家港沙洲电力有限公司，江苏 苏州 215600，2.江苏方天电力技术有限公司，江苏 南京 211102)

摘 要：600MW 机组#4 循环水泵频繁出现小端盖及机械密封漏水，进而发现小端盖螺栓剪断，且泵出力下降、出口压力晃动。分析后决定停泵解体大修，发现外筒体法兰出现张口泄漏、外筒体偏斜、叶轮与导叶体摩擦等问题。通过对螺栓材质、长江水腐蚀和基础沉降等几个方面进行分析，对循环水泵进行针对性修理，取了良好的效果。

关键词：循环水泵；螺栓断裂；沉降；材质

1 概况

张家港沙洲电力有限公司一期工程，建设 2×600MW 国产超临界燃煤发电机组，分别于 2006 年 3 月和 8 月投产。汽轮发电机组为上海汽轮机厂采用美国西屋公司技术生产的 N600-24.2/566/566 型凝汽式汽轮机，采用一次中间再热，单轴、三缸四排汽。

四台循环水泵采用上海 KSB 泵厂生产的 SEZ2200-1590/1400 型泵立式单级单吸导叶式、转子可抽式斜流泵，输送介质为淡水。该循环水泵采用立式、单基础层安装，吐出口在基础层之下，转子提升高度由轴端调整螺母的旋转来调节。设备规范及有关参数见表 1。

表 1 循环水泵设备参数

参数	数据
型号	SEZ2200-1590/1400
型式	湿井、固定叶片、转子可抽、立式混流泵
导向轴承型式	赛龙轴承
润滑方式	外接水
流量/(m ³ /s)	Q=10.0
扬程/m	H=15.5
效率/%	86.9
额定功率/kW	2150
出水口径	DN2200
转速/(r/min)	n=330
允许最小淹没深度/m	3.2（至进水喇叭处）
输送介质	淡水
介质温度/℃	≤40
转向	从上往下看，顺时针旋转

两台机循环水采用母管制运行，#1、#2 循泵出口一根母管供#1 机，#3、#4 循泵出口一根母管供#2 机，两根母管间有两只联络门联通，可实现母管制运行。

2 问题的发现

2015 年 6 月 4 日#4 循环水泵启动，运行后一直存在机械密封及小端盖漏水现象，多次紧螺栓处理。7 月 24 日停运#4 循环水泵处理漏水（图 1），发现泵轴小筒体偏移，小端盖螺栓断裂 8 根（图 2）。6 月开始，运行还发现两台机四台循泵运行，#2 机真空偏低 2kPa。接着发现#1、#2 机循环水联络管#2 机侧排空气门振动大，显示流量有较大波动。观察 #4 泵出口压力表波动频率高幅度大，但 DCS 显示的变送器压力无波动。



图 1 #4 循泵小端盖漏水情况

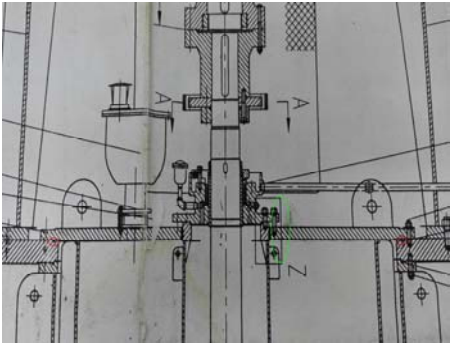


图 2 内筒体端盖螺栓断裂位置

2015年8月24日,因#1发电机组停运检修,切换#4循环水泵至#2循环水泵与#3循环水泵并列运行,开启循环水联络门。发现#2、#3循环水泵在开启循环水联络门的情况下比#3、4循环水泵在关闭循环水联络门的情况下, #2机组真空上升0.3kPa,排气温度下降,见表2。根据以上种种现象,结合2011年2月该厂曾经出现过#3循环水泵因外筒体脱落造成#3循环水泵上轴断裂的事故,判断#4循环水泵出力下降,外筒体可能脱落,经数据诊断和分析建议进行解体大修。

表2 不同循环泵组合凝汽器参数变化

项目	#2 机负 荷/MW	低压凝器 真空/kPa	高压凝器 真空/kPa	低压凝器 排汽温度 /℃	高压凝器 排汽温度 /℃
#3、4 循环泵运行	445	-93.4	-92.0	38.3	41.2
#2、3 循环泵运行	445	-93.7	-92.3	38.1	41.0

3 解体检查情况

#4循环水泵大修,联轴器解体后,转子未下落,因此转子提升量未测量;经敲击后,轴下落中心偏差太大,修前数据无法准确测量。设备解体情况如下:

1) 小端盖 O 型圈、导叶体与外筒体接触部分 O 型圈、B 筒体与出水弯管法兰 O 型圈消失不见;

2) B 筒体与出水弯管法兰螺栓断裂 80%, 出水口对侧法兰张口 65mm, O 型圈脱落;内筒体密封水室紧固螺栓全部断裂,见图3、图4;

3) 上轴套管一根螺栓、下轴套管三根螺栓、叶轮并帽一根螺栓断裂,见图5;

4) 导轴承(赛龙轴承)磨损、轴套磨损,见图6、图7;

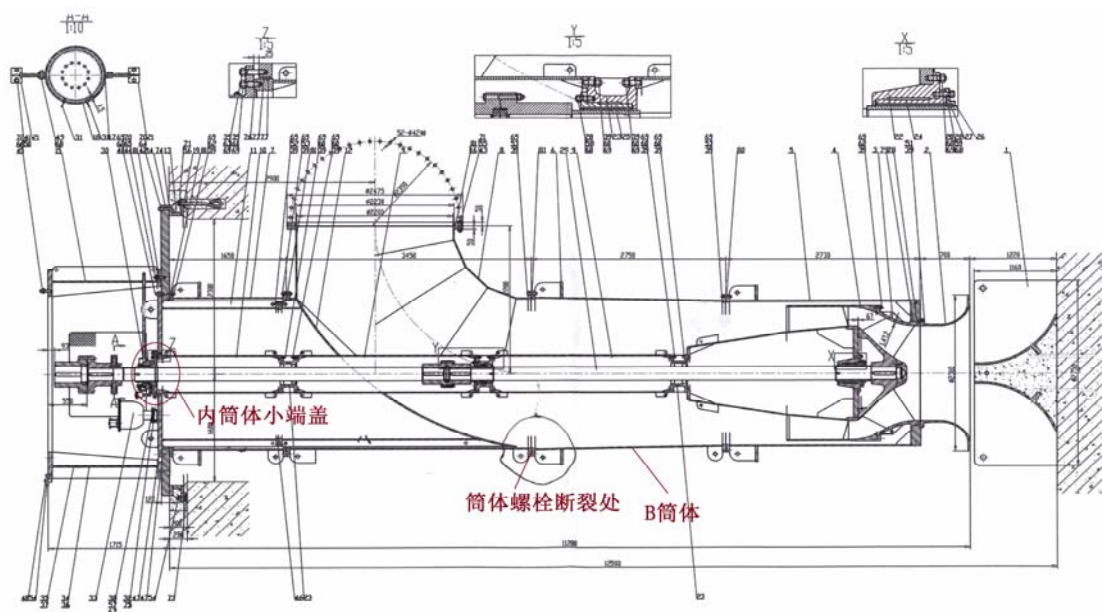


图3 循环水泵结构图



图4 B 筒体与出水弯管法兰张口



图5 断裂的轴套管螺栓



图 6 磨损的轴承套



图 7 磨损的导轴承

5) 叶轮汽蚀, 导叶体有明显摩擦及发热痕迹(图 8、9);



图 8 导叶体摩擦痕迹



图 9 导叶体和叶轮摩擦发热痕迹

6) 外筒体一侧(连同进口喇叭)倾斜, 落在进水导流锥体上, 见图 10;

7) 叶轮进行着色探伤, 检查出 3 处叶轮根部轻

微网状裂纹, 见图 11;



图 10 外筒体一侧落在进水导流锥上



图 11 叶轮着色探伤情况

8) 台板水平及筒体水平。循环水泵基础台板水平及筒体水平, 在张口法兰连接前检测一次, 连接张口法兰后复测一次, 四点测量最大值 0.2355mm/m , 筒体铅垂度(叶轮吸入口平面至垂线距离)最大误差 1mm , 数值正常;

9) 循环水泵上轴检测弯曲 0.1mm ; 下轴检测弯曲 0.18mm , 基本正常;

10) 金属专业检测完成工作: ①断裂螺栓进行强度, 硬度, 金相以及失效分析; ②上下轴超声波检测, 未超出裂纹; ③循环水泵叶轮根部裂纹着色检查;

11) 对断裂螺栓进行金属检测; 共使用有三种螺栓: $\text{M}24 \times 130$ 8.8 级, $\text{M}24 \times 130$ A2-70 (原厂设计所用螺栓), $\text{M}24 \times 130$ 未知不锈钢材质。三种螺栓中, 8.8 级 $\text{M}24 \times 130$, 腐蚀最为严重, A2-70 不锈钢螺栓, 螺栓方头处无 R 角过渡, 容易造成引力集中, 造成疲劳断裂。

4 原因分析

(1) 出力下降及压力波动: 循泵出力下降的原因是外筒体张口导致漏水, 在出水管前形成短路, 使得出水管流量下降。张口由初始泄漏而逐渐扩大, 同时受水流冲击, 漏流不稳定, 造成了泵出口压力波动。

(2) 小端盖螺栓断裂漏水: 外筒体螺栓断裂导致下部倾斜, 带动内筒体导叶体偏斜与叶轮摩擦, 导叶体上产生明显的摩擦发热痕迹。同时也使得转轴和轴承磨损。该泵体结构, 内筒体(带泵轴)与外筒体并无支架连接, 上端靠螺栓挂在小端盖上, 下端导叶体通过密封圈落在外筒体上。泵轴旋转过程中, 叶轮与导叶体碰撞摩擦, 对导叶体产生周期性交变周向切向力, 带动内筒体(与导叶体刚性连接)产生扭转力, 导致小端盖螺栓剪断, 密封破坏发生泄漏。

(3) 外筒体螺栓断裂。筒体螺栓断裂是导致泵故障的根本原因, 螺栓断裂的可能原因有: 基础沉降、振动碰摩、螺栓强度不足和螺栓腐蚀。

1) 基础沉降: 2011 年#3 循环水泵发生大轴断裂, 主要原因为循环水泵房基础沉降引起外筒体螺栓断裂。此后, 每年对循环水泵房基础沉降均有检测, 监测点位于泵房四角。2011 年至 2015 年监测的最大沉降量达 16.1mm, 四角相对沉降量最大偏差达 4.7mm(见表 2)。

表 2 循环水泵房基础沉降检测表

2012	03-30	0.0251	-2.6	-0.029	-159.1	-0.064
	06-11	0.0240	-1.1	-0.015	-160.2	-0.063
	09-12	0.0249	0.9	-0.010	-159.3	-0.060
	12-14	0.0242	-0.7	-0.008	-160.0	-0.058
2013	03-25	0.0223	-1.9	-0.019	-161.9	-0.057
	06-28	0.0206	-1.7	-0.018	-163.6	-0.056
	09-22	0.0202	-0.4	-0.005	-164.0	-0.054
	12-26	0.0207	0.5	0.005	-163.5	-0.052
2014	03-11	0.0186	-2.1	-0.028	-165.6	-0.054
	06-23	0.0184	-0.2	-0.002	-165.8	-0.052
	09-11	0.0185	0.1	0.001	-165.7	-0.052
	12-14	0.0171	-1.4	-0.015	-167.1	-0.052
2015		0.0165	-0.6	-0.006	-167.7	-0.052
说明 2011 年至 2015 年累计沉降-11.4mm						

2012	03-30	0.0248	-2.2	-0.024	-161.8	-0.065
	06-11	0.0232	-1.6	-0.022	-163.4	-0.064
	09-12	0.0245	1.3	0.014	-162.1	-0.061
	12-14	0.0235	-1.0	-0.011	-163.1	-0.059
2013	03-25	0.0210	-2.5	-0.025	-165.6	-0.058
	06-28	0.0202	-0.8	-0.008	-166.4	-0.057
	09-22	0.0202	0.0	0.000	-166.4	-0.055
	12-26	0.0202	0.0	0.000	-166.4	-0.053
2014	03-11	0.0177	-2.5	-0.033	-168.9	-0.055
	06-23	0.0178	0.1	0.001	-168.8	-0.053
	09-11	0.0181	0.3	0.004	-168.5	-0.053
	12-14	0.0182	0.1	0.001	-168.4	-0.052
2015		0.0154	-2.8	-0.030	-171.2	-0.053
说明 2011 年至 2015 年累计沉降-12.7mm						

循环泵房 XB7 沉降监测成果

年度	测量日期	高程 (m)	本次沉降		累计沉降	
			沉降量 (mm)	沉降率 (mm/d)	沉降量 (mm)	沉降率 (mm/d)
2013	03-25	0.1214	-1.7	-0.017	-153.8	-0.054
	06-28	0.1207	-0.7	-0.007	-154.5	-0.052
	09-22	0.1204	-0.3	-0.003	-154.8	-0.051
	12-26	0.1200	-0.4	-0.004	-155.2	-0.050
2014	03-11	0.1178	-2.2	-0.029	-157.4	-0.050
	06-23	0.1180	0.2	0.002	-157.2	-0.050
	09-11	0.1183	0.3	0.004	-156.9	-0.050
	12-14	0.1179	-0.4	-0.004	-157.3	-0.050
2015		0.1146	-3.3	-0.035	-160.6	-0.051
说明 2011 年至 2015 年累计沉降-16.1mm						

循环泵房 XB8 沉降监测成果

年度	测量日期	高程 (m)	本次沉降		累计沉降	
			沉降量 (mm)	沉降率 (mm/d)	沉降量 (mm)	沉降率 (mm/d)
2013	03-25	0.1215	-2.0	-0.020	-150.5	-0.053
	06-28	0.1211	-0.4	-0.004	-150.9	-0.051
	09-22	0.1208	-0.3	-0.003	-151.2	-0.050
	12-26	0.1207	-0.1	-0.001	-151.3	-0.048
2014	03-11	0.1178	-2.9	-0.039	-154.2	-0.048
	06-23	0.1185	0.7	0.007	-153.5	-0.048
	09-11	0.1185	0.0	0.000	-153.5	-0.047
	12-14	0.1179	-1.4	-0.015	-154.1	-0.047
2015		0.1146	-3.3	-0.035	-157.4	-0.047
说明 2011 年至 2015 年累计沉降-15.2mm						

2012 年对循环水泵的基础水平进行过重新处理, 但泵房的基础沉降有可能造成螺栓受力不均, 加速螺栓断裂。最新测量的循环水泵台板水平为 0.2355mm/m, 与 2012 年处理后的 0.21mm/m 相比

略有增大, 均超过标准 0.05mm/m。从这些数据分析, 泵房基础沉降有明显变化, 但造成的循环泵台板水平度变化不大, 对螺栓受力不均虽有一定影响, 但不是造成断裂的主要原因。

2) 碰摩振动: 现场检查, 叶轮碰摩的痕迹并不严重, 运行中也未发现振动超标, 由此可见, 循环水泵叶轮与外壳碰磨轻微, 不是造成此次筒体螺栓断裂的主要原因。

3) 螺栓强度和螺栓腐蚀: 本泵原厂设计使用 A2-70 不锈钢螺栓, 2011 年#3 循泵因泵房沉降发生筒体螺栓断裂和大轴断裂后, 部分更换成强度稍大的 8.8 级 M24×130 螺栓, 但耐腐蚀性下降。长时间的水流冲击和腐蚀造成螺栓锈蚀、强度降低。B 筒体和出水弯管法兰为整台泵受力最重的部位, 在循环水泵长期运行中, 由于混流泵出水弯管处管道存在振动, 造成 B 筒体和出水弯管法兰的腐蚀螺栓首先断裂脱落, 继而导致更多有腐蚀的螺栓相继断裂、脱落, 外筒体发生偏斜, 外筒体下部导叶体与叶轮碰撞摩擦, 造成内外筒体受力更大, 受螺栓腐蚀和应力的影响, 螺栓脱落更多, 筒体法兰张口更大。此外, 检查中还发现, 多数螺栓方头处缺少足够的 R 角过渡, 造成应力集中, 降低了螺栓的强度。金属分析螺栓断裂的主要原因也是腐蚀造成的强度下降。根据以上分析, 排除 1) 2) 项因素后, 筒体断裂的主要原因是螺栓强度及耐腐蚀性不够。

5 处理方案及效果

根据#4 循环水泵的解体情况, 结合金属专业的检测结果, 决定: 1) 连接法兰张口复测台板基础水平度和筒体铅垂度, 测量数值正常, 基础不做处理; 2) 更换外筒体全部法兰连接螺栓, 选用 A2-70,

M24×150 螺栓, 螺栓方头处有 R 角过渡。安装中清理螺栓与法兰结合面, 防止螺栓安装不平造成受力不均; 3) 循泵叶轮焊缝、上下轴台阶键槽处、轴头靠背轮连接处做探伤检查, 确认正常。叶轮裂纹打磨修补; 4) 更换全部导轴承及轴套, 密封水室螺栓及全部密封件; 5) 按循环水泵的安装工艺回装。

处理后, #4 循泵运行参数正常, 泵体及管道振动正常, 出水压力和流量正常, #2 机真空恢复正常。运行四个月未发生小端盖漏水及螺栓断裂现象, 泵出力恢复正常。

6 结论

#4 循泵出力下降的根本原因是外筒体螺栓断裂, 产生张口造成出水泄漏。螺栓断裂的主要原因, 是螺栓强度及耐腐蚀性不够, 螺栓选型有误。

循环水泵筒体螺栓的选用, 不仅要考虑足够的强度, 还应该考虑循泵运行的水质环境, 保证耐腐蚀性能满足长期运行的要求; 对循泵运行中出现的压力流量波动、管道振动等异常情况, 需引起足够重视; 关注循环水泵房基础沉降的影响; 大修中加强对筒体的全面检查。

作者简介:

朱晓飞 (1977-), 男, 张家港沙洲电力有限公司设备维护部汽机专工, 从事电厂汽机专业工作;

卢承斌 (1971-), 男, 江苏镇江人, 高级工程师, 主要从事汽轮机技术监督和节能相关工作。