

一种汽轮机高效在线清洗方法的研究与论证

刘晓乐 刘红岩 吉 星

鄂托克旗建元煤化科技有限责任公司 内蒙古 鄂托克旗 016100

摘 要：本文简述了该套空分装置的构成和清洗前汽轮机的运行情况，详细介绍了一种汽轮机高效在线清洗操作方法和步骤，对汽轮机清洗数据进行了统计和清洗效果分析，并提出了操作注意事项和后续改进措施。

关键词：空分装置；汽轮机；结垢；在线清洗；高效方法

1 装置简介

鄂托克旗建元煤化科技有限责任公司空分装置，采用开封东京空分集团有限公司生产的型号为KDON-25000/10000的内压缩深冷空气分离技术，采用常温分子筛预净化、增压透平膨胀、全精馏及增效粗氩塔、液氧内压缩、同时提取低压氮气产品的工艺流程。

压缩机组采用汽轮机“一拖二”模式，驱动空压机和增压机运行，汽轮机是杭州汽轮机股份有限公司生产的ENKS40/56/50型抽凝式汽轮机，主蒸汽是外购蒸汽和干熄焦自产蒸汽3.8MPa、380℃的混合蒸汽。汽轮机自2020年8月份单体试车成功后至汽轮机结垢前，运行稳定，各项参数均正常。

2 运行情况

由于干熄焦主蒸汽品质不合格，蒸汽中二氧化硅含量严重超标，自2023年11月底空分装置开车以来，汽轮机的中抽汽压力、轮室压力、轴位移、止推瓦轴承温度、主汽门开度等运行参数缓慢上涨，运行到2024年5月份，汽轮机结垢严重，空分装置生产能力受限制，氧负荷逐渐降低，已无法满足后续装置的生产需求。为了消除汽轮机结垢对空分装置的影响，实现装置的安稳长满优运行，空分装置计划短期停车检修，对汽轮机进行在线清洗。

表1 主蒸汽和汽轮机运行数据

序号	日期	蒸汽二氧化硅 ug/l	中抽汽压力 MPa	轮室压力 MPa	轴位移 mm	推力瓦温度℃	主汽门开度%
1	2023.12.01	21	1.13	2.05	0.04	50	57
2	2023.12.15	1560	1.12	2.06	0.04	51	55
3	2023.12.30	6330	1.15	2.08	0.05	50	57
4	2024.1.15	2059	1.11	2.10	0.04	50	55
5	2024.1.30	2860	1.14	2.18	0.04	50	56
6	2024.2.15	3312	1.22	2.19	0.05	51	56
7	2024.2.29	290	1.20	2.20	0.02	51	57
8	2024.3.15	135	1.27	2.43	-0.01	50	60

续表：

序号	日期	蒸汽二氧化硅 ug/l	中抽汽压力 MPa	轮室压力 MPa	轴位移 mm	推力瓦温度℃	主汽门开度%
9	2024.3.30	117	1.26	2.52	-0.07	51	58
10	2024.4.15	24	1.26	2.80	-0.15	54	62
11	2024.4.30	17	1.29	2.95	-0.20	65	76
12	2024.5.14	13	1.32	3.10	-0.23	80	80

3 在线清洗方法和步骤

根据公司现有的设备设施和生产实际情况，经研究决定，在确保主蒸汽外管网正常运行的情况下，采用汽轮机主蒸汽内管网喷水降温，使用对应压力下过热20-30℃蒸汽对汽轮机进行在线清洗。

3.1 汽轮机在线清洗应具备的条件

3.1.1 空分装置停车，汽轮机中抽汽系统停运，空分主蒸汽内管网停运，汽轮机缸缸外壳温度降至80℃以下；

3.1.2 主蒸汽外管网降低压力至3.7MPa、温度370℃，并保持稳定；

3.1.3 汽轮机与空压机、汽轮机与增压机联轴器全部脱开；

3.1.4 质检人员做好对汽轮机冷凝液进行电导率分析准备工作；

3.1.5 完成主蒸汽内管网喷水降温的准备工作（搭脚手架、拆保温、加装管壁远传测温探头、喷水管制作连接等）；

3.1.6 机组油系统、汽轮机抽汽器、循环水系统、汽轮机冷凝液系统等具备投用条件；

3.1.7 已对岗位人员进行汽轮机在线清洗方案的培训学习，做到人人熟知。

3.2 汽轮机在线清洗操作步骤

3.2.1 汽轮机蒸汽隔离，缸体自然降温

（1）全关第一、二道蒸汽隔离阀及其旁通阀，全关第一道隔离阀前暖管放空阀，全关两道蒸汽隔离阀中间蒸汽导淋；

(2) 全开厂房二楼暖管放空阀, 全开厂房一楼主蒸汽导淋, 全开第二道蒸汽隔离阀后导淋;

(3) 关闭轴封蒸汽调节阀、前后截止阀及旁通阀。必要时拆除调节阀后截止阀, 防止因阀门内漏造成蒸汽窜入汽轮机内部;

(4) 确认盘车系统投用正常, 汽轮机缸体自然降温, 至气缸外壳温度降至80℃以内。降温期间, 控制润滑油温在34-36℃, 凝汽器循环水正常投用, 冷凝液泵正常运行。采取控制措施, 尽可能缩短汽轮机缸体降温时间。

3.2.2 主蒸汽暖内管

(1) 关小厂房二楼暖管放空阀、第二道蒸汽隔离阀后导淋、厂房一楼主蒸汽导淋至半圈以内;

(2) 微开第一、二道蒸汽隔离阀旁通阀, 开始暖内管。管内压力0.5MPa以下, 升温速率5-10℃/min, 暖管30min, 当管道温度达到150℃后, 可以按0.1-0.3MPa/min的速率提升管内压力, 升温速度控制在< 5℃/min;

(3) 内管温度达到150℃, 开始缓慢投用内管喷水降温管道, 对内管外壁进行喷水。中控做好内管温度监控, 与现场人员配合, 控制好暖管蒸汽量和管道喷水量, 缓慢匀速提升内管温度;

(4) 内管压力达到2.5-3.0MPa, 温度达到250-270℃为暖管合格, 压力低时可适当微开第一、二道蒸汽隔离阀。

3.3 启动汽轮机, 在线清洗

3.3.1 确认机组密封气系统、油系统运行正常, 确认汽轮机循环水系统、冷凝液系统投用正常。

3.3.2 按照机组开车执行表启动抽汽器抽真空。

3.3.3 按照机组开车执行表进行汽轮机启动前的检查确认, 打开开关阀;

3.3.4 中控点击启动按钮, 启动汽轮机, 目标转速500rpm, 倒计时120s, 转速显示正常, 手动升速至600rpm。

3.3.5 现场检查汽轮机运行情况, 振动、声音有无异常。确认无异常后, 关闭厂房二楼暖管放空阀、第二道蒸汽隔离阀后导淋、厂房一楼主蒸汽导淋。

3.3.6 600rpm暖机30分钟, 手动升速至1100rpm, 现场检查汽轮机运行情况, 振动、声音有无异常。

3.3.7 1100rpm暖机30分钟, 手动降速至600rpm, 现场检查汽轮机运行情况。升速、降速重复进行, 在线清洗3~4小时。

3.3.8 清洗结束后, 打闸停机, 按照机组停车执行表进行后续操作。

3.4 反复进行在线清洗

3.4.1 第一次在线清洗结束后, 重复上述3.2、3.3操作步骤进行第二次在线清洗。

3.4.2 第二次在线清洗结束后, 待汽轮机气缸外壳温度降至100℃以下, 回装联轴器, 恢复管道保温, 第三次在线清洗按照机组正常开车步骤进行。

4 操作注意事项

4.1 为保证汽轮机在线清洗效果, 清洗次数可根据实际情况灵活调整, 最后一次在线清洗要回装联轴器, 恢复管道保温, 按照机组正常开车步骤进行。

4.2 汽轮机在线清洗前要脱开联轴器, 脱开前打表测量对中数据, 联轴器恢复时再次打表复测数据, 进行前后数据对比, 保障联轴器安装质量。

4.3 由于主蒸汽外管网正常投运, 内管网温度控制难度较大, 暖管放空、蒸汽导淋开度应尽可能关小, 与内管喷水降温配合进行, 同时加强主蒸汽内管巡检, 发现异常及时处理;

4.4 主蒸汽内管喷水降温管道段应尽可能选择在室外, 低温冷却水与高温管道接触后会产生大量水蒸汽, 影响现场可见度, 不利于安全操作。

4.5 汽轮机启动前和启动后, 应严格控制主蒸汽内管网温度, 确保在对应压力下蒸汽温度过热20-30℃, 不宜控制过高或过低。温度过高, 形成的饱和蒸汽凝液较少, 在线清洗效果差; 温度过低, 凝液量过大, 可能造成汽轮机损坏。下表为蒸汽压力与饱和蒸汽温度对照表。

表2 蒸汽压力与饱和蒸汽温度对照表

蒸汽压力 (MPa)	饱和蒸汽温度 (℃)	蒸汽压力 (MPa)	饱和蒸汽温度 (℃)
2.5	224	3.3	239
2.6	226	3.4	241
2.7	228	3.5	243
2.8	230	3.6	244
2.9	232	3.7	246
3.0	234	3.8	247
3.1	236	3.9	249
3.2	237	4.0	250

4.6 汽轮机每次在线清洗进行前、中(每小时一次)应对冷凝液进行电导率取样分析, 作为在线清洗效果分析判断的依据;

4.7 在线清洗过程中发现汽轮机振动、声音异常, 立即打闸停机, 将原因排除后再继续在线清洗。

5 汽轮机在线清洗数据统计及清洗效果分析:

5.1 蒸汽冷凝液数据统计

表3 蒸汽冷凝液电导率

序号	项目	电导率us/cm				
		清洗前	清洗中1小时	清洗中2小时	清洗中3小时	清洗中4小时
1	第一次在线清洗	0.73	73.17	10.39	5.58	6.45
2	第二次在线清洗	6.13	136.2	12.33	4.83	/
3	第三次在线清洗	1.73	308	265.1	67.4	15.72

5.2 蒸汽冷凝液数据分析

5.2.1 汽轮机在线清洗的原理，一是利用部分汽轮机积垢溶于水的特性，采用过热20-30℃的蒸汽做功后，产生饱和水蒸汽溶解掉部分积垢；二是汽轮机升速时蒸汽对蓬松积垢的冲刷，冲掉一部分积垢。

5.2.2 从三次在线清洗数据统计上看，前两次清洗，蒸汽冷凝液中电导率在清洗中1小时上涨较高，第2小时下降较快，这两次清洗主要应用的是第一种原理，600至1100rpm的升降速基本无法大量冲刷掉积垢。

5.2.3 第三次清洗，采用两种原理相结合的方式，蒸汽冷凝液中电导率分析数值高持续时间长，本次清洗更侧重于第二种原理的应用，清洗效果显著。

5.3 在线清洗前后汽轮机运行数据对比

在线清洗前，由于汽轮机结垢，轮室压力、中抽压力逐渐升高，中抽汽安全阀接近启跳压力，采用尽可能降低空压机负荷的方式来维持装置运行，空压机导叶已关至最小，3台用于空压机补气的螺杆空压机已全部启动，轴位移高，推力瓦温度高，空分装置已达到运行极限。

在线清洗后，汽轮机各项参数基本恢复至未结垢前运行状态，空压机能够加至满负荷运行，3台用于空压机补气的螺杆空压机全部停运，主汽门开度只有55%，轴位移正常，推力瓦温度正常。清洗后，几乎观察不到汽轮机结垢造成的影响，在线清洗效果非常好。

表4 汽轮机在线清洗前后运行数据对比表

	汽轮机转速rpm	主汽门开度 %	轴封汽阀开度 %	轮室压力MPa	中抽汽压力MPaA	推力瓦温度 ℃
清洗前	5900	76.1	80.8	3.1	1.285	80.5
清洗后	5900	55.3	62.2	2.2	1.143	48.5
	轴位移A mm	轴位移B mm	空压机导叶开度 %	空压机负荷 %	主蒸汽压力MPa	氧负荷 %
清洗前	-0.229	-0.229	48	81.6	4.01	60
清洗后	-0.018	-0.029	85	94.3	3.88	70.4

6 结论及改进措施

6.1 汽轮机经过3次在线清洗，效果显著，清洗后能够实现空分装置高负荷运行，达到了预期效果，且检修耗时较少，费用较低，大大降低了公司的经济损失。

6.2 主蒸汽管道喷水降温，可能影响管道的安全运行，需要在装置大修时对管道进行详细的检测检查，消除隐患。

6.3 为避免汽轮机再次结垢，影响装置安全运行，应严格管控干熄焦操作运行，加强干熄焦蒸汽各项指标分析和监控。

6.4 虽然在线清洗效果非常好，短期内汽轮机运行较为稳定，但并不能将汽轮机内结垢完全清理干净，装置大修时需对汽轮机进行大修检查，检查汽轮机结垢情况

以及在线清洗是否对汽轮机内部部件造成损害，进一步完善在线清洗方案，并彻底清理结垢。

参考文献

[1]《汽轮机使用说明书》冯照和、刘白兰，杭州：杭汽工业透平研究院，2018.7

[2]《汽轮机技术问答（第二版）》张克舫、沈慧坊，北京：中国石化出版社，2006.6

[3]《化工原理》谭天恩、窦梅、周明华，北京：化学工业出版社，2005.7

[4]《新编制氧工问答》汤学忠、顾福民，北京：冶金工业出版社，2001.7

[5]《石油化工设备》张漪芳，上海：兰州石油机械研究所有限公司，2001.6