

汽轮机结垢原因分析及在线清洗案例

李 斌

中天合创能源有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要：中天合创化工分公司某装置二线工艺气压缩机组通过汽轮机作为驱动机，汽轮机高效稳定运行是保证装置安稳长满优运行的关键。作为汽轮机组，一旦出现蒸汽品质差，汽轮机通流部分结垢，流道面积减小，轮室压力增高，汽轮机无法维持额定转速，做功效率明显下降，解体除垢需要在装置停车后进行，会耗费大量检修时间及费用，同时停车检修，给公司带来巨额损失，本篇介绍了某装置二线K-3001汽轮机结垢原因及不停车在线清洗成功除垢的实例。

关键词：汽轮机；结垢；轮室压力；在线清洗

1 汽轮机型号及技术参数

某装置二线汽轮机由杭州汽轮机股份有限公司制造。汽轮机为抽汽凝汽式汽轮机（ENK50/45/50，空冷岛

冷凝），2016年10月投入运行。

汽轮机主要参数如下见表1：

表1 汽轮机相关参数

功率KW	8381
进汽压力MPaG	3.3
进汽温度℃	380
排汽压力MPaG	-0.06
进汽量t/h	116.4
抽汽量t/h	80
空冷岛冷凝量t/h	36

2 汽轮机结垢的原因分析

我公司此机组自2016年10月运行至机组在线清洗之前，运行状态持续变差，效率降低，不能满负荷运行，

主要存在的问题有：

2.1 汽轮机进汽量明显增加，能耗大幅度提高（分析数据见表2）

表2 相同工况下汽轮机相关参数对比分析

时间	2017年3月3日	2018年3月9日
进料生产负荷	236t/h/100%	241t/h/102%
转速	5985rpm	5942rpm
调速阀开度	63%	82.6%
中压蒸汽使用量	81t/h	123t/h
抽汽量	41t/h	97t/h
冷凝量	40t/h	26 t/h

以上机组条件：进汽压力3.3MPaG，进汽温度380℃，抽汽压力1.3MPaG，抽汽调节汽阀100%。相同工况下从表二得出，负荷基本相同情况下中压蒸汽使用量高出42t/h，能耗大幅度提高。

2.2 汽轮机轮室压力升高

汽轮机轮室压力逐步升高，轮室压力由2016年10月开车时的1.45MPaG上升至2018年8月6日的2.87MPaG。

2.3 汽轮机失去调节作用

汽轮机调速阀1742二次油逐步升高，由2016年10月开车时的0.28MPaG上升至2018年8月6日的0.45MPaG，调速阀全开100%全开，但转速最高只有6004rpm的瓶颈（额定转速60166rpm），失去调节作用。

2.4 空冷岛冷凝量持续下降

空冷岛凝汽量有持续降低趋势，在抽汽调节汽阀1743全开、排汽真空度相同的条件下，透平排汽冷凝量持续降低：2018年7月21日-7月30日降至平均22.4t/h（空冷岛冷

凝汽量额定36t/h) 计算方式为进汽量-抽汽量。

2.5 机组转速呈下降趋势

机组转速下降明显: 调速阀100%全开, 进汽压力、温度稳定的情况下, 6月30日6120rpm, 2018年8月6日5580rpm(平均转速)。平均约100转/周下降速度。

2.6 凝液数据分析超标

锅炉给水、中压蒸汽、透平凝液数据分析: 从外供蒸汽及自产蒸汽质量看, 蒸汽品质偏差且不稳定。锅炉给水及蒸汽凝液中的 Na^+ 、 SiO_2 , 及电导率都有不同程度长期超标现象。透平凝液在线电导率有间歇性超标现象。

由以上几点说明汽轮机通流部分, 流通不畅, 导致汽轮机转速下降做功能力随之下降, 使得机组不能满负荷运行。并且轮室压力呈上升趋势, 中压蒸汽参数一定的条件下, 一定的负荷对应一定的调节阀开度, 则蒸汽流量和轮室压力均是确定的。如果一定的蒸汽流量, 轮室压力升高, 就表示蒸汽流通阻力增加, 叶片结垢所致, 也就是流通面积变小了, 因此, 轮室压力升高是蒸汽品质不良的信号。故可判断机组汽轮机所用中压蒸汽品质不良, 导致汽轮机结垢。

3 汽轮机结垢机理及危害

3.1 汽轮机结垢机理

中压蒸汽品质如果长期不佳, 经常出现 NaCl (氯化钠)、 Na_2SO_4 (硫酸钠)、硅酸盐、磷酸根、 SiO_2 等超标现象。当过热蒸汽品质不良时, 蒸汽中易溶于水的钠的化合物和不溶于水或极难溶于水的化合物超标, 当蒸汽在通流部分膨胀做功时, 参数降低及汽流方向和流速不断改变, 蒸汽携带盐分的能力逐渐减弱, 在减压部位或流道变更部位被分离出来, 沉积在喷嘴、动叶、静叶和调节汽阀部件表面上, 形成积垢。^[1]此类积垢物长期在汽轮机叶轮等部件上积累, 从而导致汽轮机叶轮、静叶栅等部件上结垢。

3.2 汽轮机结垢的危害

3.2.1 结垢后使通流部分面积减少, 若保持主蒸汽参数不变, 则蒸汽流量将减少, 机组出力相应减少, 机组效率降低;

3.2.2 动静叶结垢, 使其表面粗糙, 增大了摩擦损失, 加之机组出力偏离设计工况运行, 致使汽轮机效率降低。实验表明, 结垢厚度每增加0.1mm, 将使级效率降低4~5%;

3.2.3 主汽门、调速汽门等部件结垢, 可引起阀门卡塞, 在事故状态下不能切断进汽从而导致机组超速, 造成意外事故;^[2]

3.2.4 结垢会使蒸汽流通面积减小, 流动阻力增大,

轴向推力增大, 带来转子轴向位移增大, 推力轴承过载而可能诱发跳车事故, 及转子动静摩擦等。

4 汽轮机在线清洗的主要内容

4.1 在线清洗的原理和方法

在线清洗原理: 主要是利用钠盐在湿蒸汽中的溶解度较大的特点, 将汽轮机进汽温度降低到稍高于其对应饱和温度, 做功后产生湿蒸汽, 冲刷结垢喷嘴、叶片、静叶, 将盐垢溶解。积盐被湿蒸汽中凝结水带走而得以清除, 而当溶于水的化合物被冲掉后, 不溶于水的 SiO_2 垢层会随之瓦解而被除去。

在线清洗方法: 进料生产负荷降低至164t/h, 二线K-3001机组联锁全部投用, 调节汽阀打在自动状态, 汽轮机转速保持不变, 汽轮机入口压力保持在3.5MPa, 同时打开上游装置温控阀门缓慢降温, 同时严格控制温度高于其对应的饱和温度约260℃-290℃, 同时紧盯温度变化, 根据温度变化调节减温减压器注水, 控制蒸汽温度。

注意: 蒸汽温度严禁低于其对应的饱和蒸汽温度(240℃), 在降温过程中蒸汽温度降至300℃时降温速率可快些, 300℃以下降温速率控制在<20℃/h, 现场打开中低压蒸汽所有导淋, 汽轮机排凝阀门打开, 专人监控导淋排水情况, 视导淋排水情况调节阀门开度, 以防止蒸汽带水严重造成管道水击和转子叶片损坏等事故。

4.2 清洗前准备工作

4.2.1 仪表中压蒸汽流量、温度、检查调试;

4.2.2 轮室压力现场表接远传表至中控;

4.2.3 检查所有中压蒸汽和中低压蒸汽导淋并现场挂牌做标记; 在蒸汽管线的胀弯处做好原始位置标记;

4.2.4 设备人员严密监测汽轮机猫爪位移量, 现场监测压力表各项参数, 如发现有异常情况及时用对讲机与中控联系暂停蒸汽降温;

4.2.5 K-3001汽轮机所有排凝点打开, 中压、中低压蒸汽所有用户检查, 做好蒸汽降温后的准备工作;

4.2.6 凝结水泵滤网提前检查清洗备用; 做好凝结水现场排放相关措施, 清洗开始后即开始现场排放;

4.2.7 分析检验中心确保分析仪器(Na 、 SiO_2 、电导率和磷酸根)分析正常, 人员到位;

4.2.8 K-3001汽轮机所有排凝点打开;

4.2.9 清洗前将生产进料负荷逐步降低至160t/h;

4.2.10 做好数据采集工作

4.3 在线清洗过程

相关准备工作到位后, 2018年8月11日下午汽轮机在线清洗按照方案开始实施。14:55中压蒸汽开始逐步降温, 18:53降至最低温度287℃, 19:10分清洗结束, 汽轮

机进汽阀由95%开度关小至44.5%，转速由5540rpm涨到5714rpm，轮室压力由2.87MPa降低至1.43MPa，进汽量由96t/h降低至84t/h。之后装置开始逐步提高负荷，23点30分装置负荷已提升至90%，监测机组各项参数正常。

K-3001汽轮机有三路可用汽源，；第一路：界区外管网补入：3.4MPaG，360℃，无降温措施，清洗时需

隔断；第二路减温减压器转化——减温减压后的中压蒸汽；第三路是上游装置反再系统自产的蒸汽，进入蒸汽管网。通过上游装置反再系统降温及控制减温减压器注水来满足蒸汽温度要求。

本次在线清洗具体过程如下：
清洗当天（8月11日）

		操作调整	备注
第一阶段 蒸汽预降温	14:55	1、上游装置反再系统操作人员缓慢同时打开温控阀门，控制反再系统产汽出口温度从400℃下降，同时操作人员控制高压减中压蒸汽的压力和温度不变。 2、中压蒸汽、中低压蒸汽排凝导淋稍开，机体排凝阀门打开，监控导淋排汽带水情况。 3、15:55产汽出口温度降低至350℃。	K-3001汽轮机入口蒸汽温度在14:55开始由390℃逐渐下降，维持操作，记录参数观察，现场采样分析
	15:55	4、装置操作人员继续打开温控阀门，同时操作人员控制高压减中压蒸汽的压力和温度不变。现场开大中压蒸汽和中低压蒸汽导淋。17:00上游装置反再系统产汽出口温度降低至245℃。	维持操作，记录参数观察，现场采样分析
第二阶段 汽轮机洗过程	17:53	5、上游装置反再系统产汽出口温度保持不变，逐步使用减温减压器注水调整汽轮机入口蒸汽温度，17:53蒸汽温度降至287℃ 6、16:48蒸汽温度降至315℃，调节汽阀开度78.5%，轮室压力2.5MPa。17:44蒸汽温度降至300℃时，调节汽阀开度53.8%，轮室压力1.59MPa。17:48蒸汽温度降至291℃时，调节汽阀开度44.5%，轮室压力1.55MPa。17:53蒸汽温度287℃，调节汽阀开度44.5%，轮室压力1.43MPa，汽轮机中压蒸汽温度由291℃降至287℃后，调节汽阀开度没有变化，轮室压力未见明显降低，说明结垢物被成功清出，标志着汽轮机在线清垢取得成功。	维持操作，记录参数观察，现场采样分析（实时分析凝结水钠离子浓度等数据。）
第三阶段 清洗结束	18:30	7、逐渐关小高压减中压蒸汽减温减压器降温水，最低温度达到320℃，经分析，效果明显清洗结束。之后减温后中压蒸汽温度逐渐提高至380℃。	
	19:10	8、汽轮机进汽温度恢复至384℃。	清洗结束，恢复正常

4.4 清洗结果分析

通过清洗期间汽轮机入口蒸汽温度、流量、汽轮机进汽阀开度的清洗前后运行参数对照，清洗后同负荷下耗气量从96t/h降低到84t/h，汽轮机主气门开度由95%降低到44.5%；汽轮机转速由5540r/min增长到5714r/min，汽轮机排气量由24t/h提高至37t/h，轮室压力明显下降由2.87MPaG将至1.43MPaG。

通过监控凝结水分析，清洗过程18:00时，凝结水钠离子最高为42000μg/L，标志着结垢物大量脱落，由湿蒸汽带走随凝结水排出，随后凝结水二氧化硅、磷酸根、钠离子含量开始大幅下降，标志着结垢物被成功清出。

5 清洗总结

本次汽轮机组在线清洗清洗效果较好，达到了预期的目的。清洗期间生产平稳，汽轮机振动、位移、轴承温度等都无明显变化，未造成生产波动和故障。清洗之前，汽轮机结垢后，汽轮机做功能力差，进汽阀门开度长期达到100%。清洗之后，汽轮机做功正常，生产负荷可达到270t/h，（极大地提高了装置大负荷生产的能力。

为其它汽轮机结垢处理提供了宝贵经验，为公司节省了检修费用及大幅度的降低了物耗。避免了公司因汽轮机结垢装置停车带来的巨额损失。

利用饱和温度以上湿蒸汽对汽轮机进行在线清洗，汽轮机恢复正常所用时间短，不影响装置的正常生产，可节约大量检修时间，且无需检修材料、费用等，方便实用。但结垢的根本问题还在于蒸汽品质变差，需要加强对锅炉系统水、汽质量的控制。在今后的生产过程中要对锅炉水汽系统的质量严密监控，保证蒸汽的品质，尽量杜绝类似事件的发生。

参考文献

[1]刘祥春.浅谈汽轮机结垢的分析及对策，石油化工设备技术,2010,31(2):46-49
[2]钟伟敬.汽轮机通流部分清洗方案研究及结垢厚度的理论分析[D].重庆,重庆大学,2003
[3]孟凡华,张祖刚.汽轮机运行效率下降的原因分析和处理[J].深冷技术,2010,(5):37-40