

基于催化烟机结垢预防性检修的几点总结

对催化烟汽轮机进行预防性检修，防止催化剂沉积结垢造成停机——催化烟汽轮机运行工况恶劣，影响其长周期运行的最常见问题是催化剂沉积结垢造成轴系振动上升机壳烈度增大，严重的会造成动叶片疲劳断裂引发恶性事故。文章以两台烟机的运行为分析样本，分析基于稳定工艺环境下以平均故障间隔时间为基本运行周期，结合状态监测进行预防性检修，达到机组运行安全兼顾节能经济效益的目的。

文 / 丁一刚

PROCESS-Tip

* 更多信息请扫描二维码:



chem.vogel.com.cn

* 反馈编码: A220428

烟气轮机(下文简称烟机)是催化装置最主要的能量回收设备,其运行工况的好坏和运行周期的长短,对催化装置长周期稳定运行、降低装置能耗有重要影响。它属于关键大机组,又明显区别于常规的离心机组,其介质为600℃以上的高温烟气,含有催化剂粉尘,容易沉积结垢,还具有一定冲蚀性和腐蚀性。

归纳烟机因结垢停机的主要表现为:动叶片结垢后在运行中脱落,造成动平衡破坏,振动陡增。围带结垢摩擦动叶片,造成动叶片疲劳断裂。在静叶部位结垢会影响烟气流场,造成烟机效率下降,降低能量回收率,严重时会造成碰磨,垢脱落击打动叶

片。在实践中探索出“平均无故障周期+特征频谱”的方式,确定预防性检修周期,开展预防性工作。

烟机结垢机理

当前对烟机结垢的研究有很多,相关文献也很多,结垢机理

明确:主要原因在于三旋出口烟气中含有较高浓度粒径 $<2\mu\text{m}$ 的超细粉催化剂颗粒,大量催化剂细粉特别是其中的Ca、Fe、Na和Ni等金属在600℃左右的高温环境中易形成低熔物,在烟机低速区沉积、粘结,形成垢,再通过烧焙作用逐渐增厚。两组

表1 两台烟机组相关参数

项目	装置	1 ^号 催化装置	2 ^号 催化装置
烟机型号		YL4000K (单级)	YL II 10000 (双级)
额定功率 (kW)		3 200	9 600
投运时间		2008 年	2005 年
主风机型号		D800 (沈鼓)	AV50-13 (陕鼓)
主电动机功率 (kW)		3 200	6 700
再生器型式		一再烟气进烟机	所有烟气进烟机
催化剂牌号		CDOS	COKC-1
平均剂单耗 (kg/t)		0.6~0.65	0.65~0.7
三旋型式		VS (立式单管)	PSC-300 (立式单管)

本文作者供职于中韩武汉石化有限公司。

烟机相关参数见表1,容易结垢的部位为动静叶片叶身和围带,图1中所示的烟机转子及静叶组件部位是常见结垢的部位。

烟机平均结垢间隔时间

评价烟机运行优良的标准

评价烟机运行优良的标准应从安全和经济效益两个方面考量。在运行方面,不超设计值,不发生轴系大幅度波动,处于优良运行指标范围内。在能量回收方面,保持双动滑阀开度 $\leq 1\%$,确保烟机负荷率和能量回收率都保持较高水平。如果因为振动高等问题长期处于低负荷状态运行,对能量回收效益影响大,也增加了安全风险。

从检修时机、角度看,要确保烟机部件不发生损伤。常见的损伤有因动叶片“削顶”判废,增加了维修费用,即使经过检测可以使用,也会造成叶顶到围带的间隙过大,降低烟机能量回收能力,这种动静碰磨会引发叶片断裂事故,属严禁运行工况。

校正运行时长

图2、图3为两台烟机从2012年以来的运行时间统计,除了2016年因大修检修停机以外,停机原因都是结垢导致振动上升。每次检修未必都是最好的时机,以1#催化烟机2017年和2021年的两次检修情况为例,图4、图5为运行366天动叶片削顶形貌(沟槽深3~5mm),叶片报废。图6、图7为运行313天动叶片情况,顶部有轻微划痕,可认为这次的停机时机更加合适。通过这样的判断,统计出1#催化烟机2012~2016年生产周期的历史平均故障间隔时间为235~255天。对运行505天的烟机动叶片出现了

明显的“削顶”进行校正,参照2021年的检修情况保守核减为310天,重新核算该生产周期历史平均故障间隔时间为255~275天。

2#催化烟机运行时长变化最为显著,从第一个生产周期的96天增加到第二个生产周期的305天。分析历史

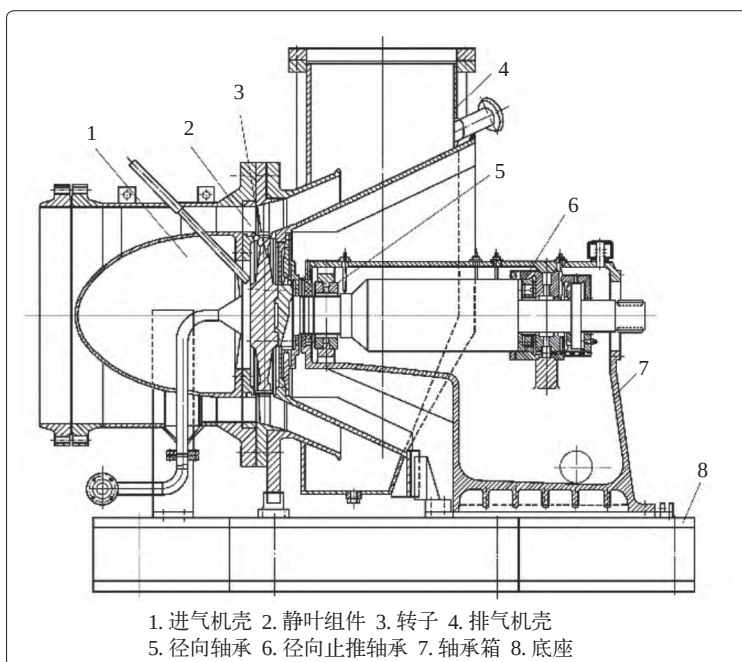


图1 YL型烟机结构

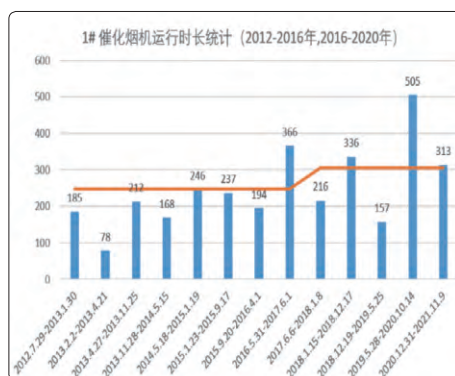


图2 1#催化烟机运行时间统计

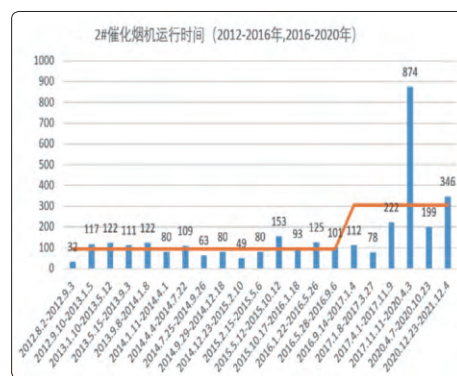


图3 2#催化烟机运行时间统计



图4 1#催化烟机运行366天 (2017年6月检修)



图5 1#催化烟机运行366天 (2021年6月检修)



图6 1#催化烟机运行313天情况1 (2021年11月检修)



图7 1#催化烟机运行313天情况2 (2021年11月检修)

运行情况,从2010年大检修后便出现因结垢导致频繁的问题,2010年9月12日动叶片与围带结垢发生碰磨,造成疲劳断裂,打坏其他叶片。在2016年大检修后连续进行了3次开盖检查,运行时长都较短,均未出现结硬垢的情况,只在动叶片叶身有较薄一层软垢。分析认为主要受到上一运行周期惯性影响,当烟机发生振动波动以后,及时进行停机检查,可以判断的是2[#]催化烟机已经不结硬垢。在运行874天和199天(到199天时进入装置停工检修)时进行的开盖检修同样没有发生结硬垢现象,依然在动叶片叶身附着一层软垢,拆检情况如图8~11所示。因此保守推测,按847天运行时长并留有10%的余量,2[#]催化烟机历史无故障运行间隔周期校正为740~760天较合理。烟机结硬垢问题发生根本性改善的原因在于2016年大检修对三旋进行设计核算整体更新,提高了三旋的旋分效果,改造后也对三旋旋分效果进行了在线采样标定,结果合格。

综上:在一个生产周期内,如果没有发生重大工艺变更和烟机改造,那么对每次烟机因结垢停机的检查情况进行判断梳理,进而确定合理的平均故障间隔时间,作为预防性维修周期的基本依据,这个周期的确定应该进行动态更新。

烟机运行环境分析

结垢根本原因

进入烟机烟气中催化剂粉尘过多是结垢的根本原因。初步调研烟气粉尘的监测情况,在线激光监测仪的监测效果较差属于行



图8 2[#]催化烟机运行199天情况1 (2017年11月检修)



图10 2[#]催化烟机运行874天情况1 (2020年4月检修)



图9 2[#]催化烟机运行199天情况2 (2017年11月检修)

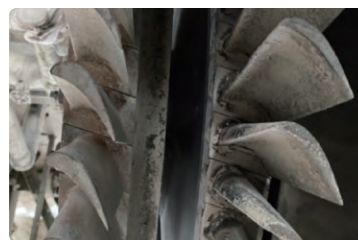


图11 2[#]催化烟机运行874天情况2 (2020年4月检修)

业难点,两套催化也存在同样的情况。通过人工在线采样分析是最可靠的手段,但烟气温度高又含有一氧化碳和二氧化硫等有害成分,人工在线采样分析安全风险大,同时实际操作中还会遇到采样口被催化剂堵死等采集失败的情况。

影响烟气中催化剂细粉增多的因素

1. 工艺操作

催化烟气是催化剂烧焦再生过程中产生的,主风不仅用作再生器烧焦风,还起到流化作用。两套催化主风量满负荷生产时均为 $1 \times \text{Nm}^3/\text{h}$ 左右,其中1[#]催化只有一再烟 $0.5 \times \text{Nm}^3/\text{h}$ 左右进入烟机,2[#]催化全部进入烟机做功。催化剂粒径为几微米到几十微米,烟气中难免携带催化剂细粉,再生烟气通过再生器稀相沉降段和再生器内第一、二级旋风分离器后,其中大部分催化剂已经被分离。烟气继续进入三级旋风分离器以去除其中的细粉,进入烟机烟气要求为粉尘浓度 $\leq 150 \text{mg}/\text{m}^3$,

小于 $3 \mu\text{m}$ 催化剂细粉 $\leq 10\%$ (质量分数)。对主风量、催化剂循环量调整要保持小幅度平稳操作原则,监控平衡剂采样分析结果,对三旋细粉定期进行放空,减少蒸汽造成的催化剂热崩等等,这些日常调整和定时性工作都作为减少催化剂损耗的必要手段。

2. 旋风效率及催化剂

旋风分离器高效工作的条件主要有入口粉尘浓度、入口线速度和进出口压差。对三旋而言,入口浓度太大会导致旋风器操作弹性降低;入口线速度实际上也可以反映三旋负荷是否符合设计值;进出口压差也是保证旋分效率的重要指标。2020年大检修期间,对两套催化各旋分器进行检查,未发现明显缺陷。从两套催化使用的催化剂来看,品牌厂家不同,总体性能基本一致,即使存在球形度抗磨损度等指标的差异,并不会对形成的细粉量造成显著影响。

两套装置比较

单套装置纵向比较,1[#]催化

两个运行周期的平均结垢周期变化不大,说明连续两个周期的工艺操作与设备运行的变化不大。2[#]催化因更换三旋使烟机运行时长变化显著。两套装

置横向比较,从工艺操作方面并没有明显的差异,目前看三旋的投用年限和型式是存在的主要不同,1[#]催化三旋投用已超过3个生产周期,存在产生微观磨损等原因导致旋分效率不高,同时采用的VS型单管与2[#]催化改进后的PSC-300型单管在旋分性能上存在较大差距。因此,认为三旋的分离效率是两台烟机运行差距的关键因素。

综上,造成催化剂细粉增多的原因,主要从以上工艺操作方面进行排查与分析,如果发生反再系统的主风中断等大幅度波动,或者三旋系统堵塞等问题,都会造成烟气细粉增多,烟机结垢的速度加快。但只要影响时间不长,按装置生产周期为分析时间的跨度时,可视为工艺的影响是均匀作用于每个烟机运行周期。对运行环境的监控可以基于实时监控系统进行进一步积累和量化分析,在工艺运行环境上不断给烟机运行创造更好的条件。

结垢的特征频谱分析

振动趋势特征

在结垢初期,垢逐渐且均匀附着在动叶片上,转子动平衡没有受到破坏。随着运行周期延长,通过烧焙作用垢会逐渐增厚,当

增加到一定厚度时(经验判断叶身为3mm以上),受到负荷冲击会发生局部脱落,同时也会发生自然的局部脱落,当超过转子允许最大残余不平衡量时,会造成转子动不平衡,引发轴系振动增大,振动能量传递到机壳,烈度同步增大。特别是1[#]催化,烟机转子质量相对于2[#]催化轻,对动不平衡量更加敏感,这种振动变化很明显以“阶跃式”跳变为特征,发生突发不平衡。随机抽取两次停机前振动趋势为例,图12、图13为1[#]催化两次运行末期的振动突变趋势,将时间细分,可发现这种突变是在一瞬间发生的。2020年大检修时在2[#]催化烟机机壳增设了烈度在线监测,能够解决高温部位不方便监测的问题,

对系统性监测做了补充。此外,不难推断,如果烟机结硬垢,在恶化后很难通过在线除垢等方式进行调整,同时进行这样的“脱垢”处理存在很大的安全风险。

轴心轨迹特征

由于S8000系统未接入键相信号,不能正确反映进动情况,只能显示轴心轨迹的形状。以2021年11月份的运行周期进行分析,图14、图15为轴心轨迹,烟机轮盘侧轴承的轨迹由“8”形畸变为带有明显尖角的形状,并持续带有这种特征运行,发生畸变过程的时间点与图12振动发生阶跃式跳变的过程吻合,结合图6、图7拆检后动叶片叶顶的情况看,已经发生轻微的初步碰磨,可见,轴心轨迹对烟机结垢的反映也比



图12 1[#]催化烟机运行336天轴系振动趋势(2018年12月检修)

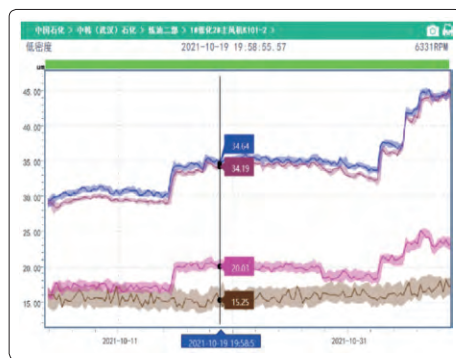


图13 1[#]催化烟机运行313天轴系振动趋势(2021年11月检修)

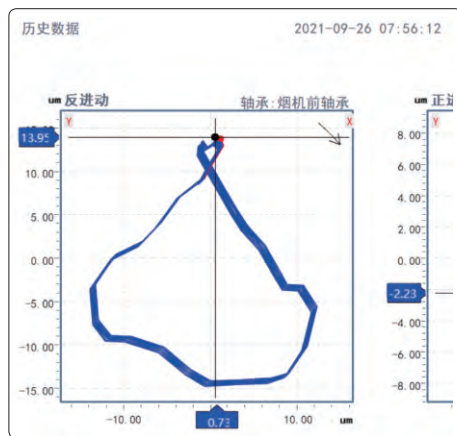


图14 1[#]催化烟机运行313天轴系振动趋势(2018年12月检修)

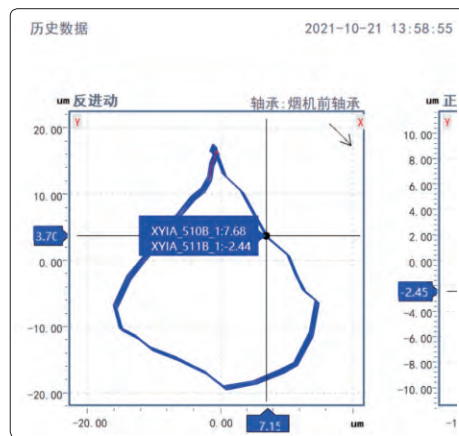
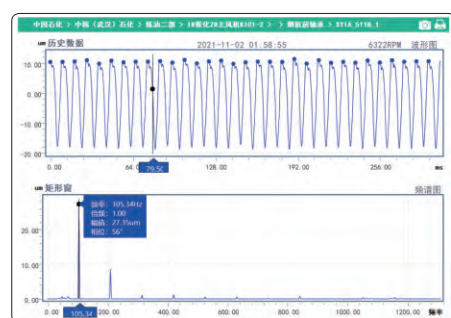
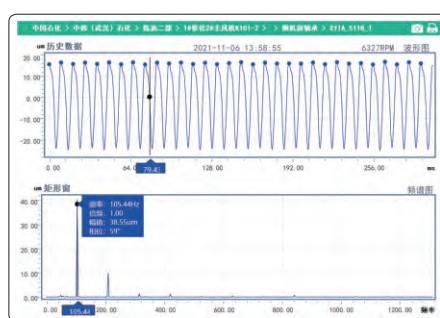


图15 2[#]催化烟机运行313天轴系振动趋势(2018年12月检修)

图 16 1[#] 催化烟机运行 336 天振动突变频谱图 17 1[#] 催化烟机运行 336 天振动突变频谱

较敏感。

频域变化特征

通过比较振动趋势发生突变前后频域值的变化可见,一倍频幅值从 $27\mu\text{m}$ 突增到 $40\mu\text{m}$, 明细增大。如图 16、17 所示二倍频及其他谐波成分基本稳定,这说明机组的动平衡发生了恶化,符合烟机动叶片结垢并脱落的特征。

综上,烟机结垢的特征频谱较为明显,将频谱分析方法作为辅助判断烟机运行状况的手段,主要还是依靠运行周期合理控制检修时机(运行周期当中包括综合工艺运行环境的判断),达到防止机组发生动静碰磨等工况出现的目的。从两台烟机多次检修上得到了充分验证。

烟机检修对经济效益的影响

1[#] 催化的主风备机与烟机组主风机处理量相同,不存在切备机装置降量的问题。我们以 2[#] 催化装置烟机为例进行效益核算,如果开启备机进行检修,要损失高温烟气能量,装置降低处理量造成加工损失等。直接效益损失:切换到备用风机运行 $5\,500\text{ kW}$, 减去烟机实际运行时的电动机功率 $2\,200\text{ kW}$, 则因检修烟机多消耗电动机功率为 $3\,300\text{ kW}$, 按 $0.65\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算,烟机抢修 96 h , 则期间消耗电费为 20.6 万元。烟

机抢修一次费用为 15 万元,合计 35 万元。间接效益损失:按加工量 125 t/h 计算,切换至备机降低到 100 t/h , 按外购蜡油加工计算盈利为 $600\text{ 元}/\text{天}$ 左右,合计加工利润损失为 144 万元。进行主风机切换过程中必然会造成一定量催化剂的跑损,备机切进切出系统按跑速 3 t 催化剂计算,共 6 万元。

烟机清垢小修一次合计产生损失为 184.6 万元,大修一次烟机损失 313.5 万元(7 天)。一旦烟机因结构碰磨等问题造成叶片断裂等问题,所造成损失将更大。

烟机长周期运行措施

1. 减少烟机入口烟气细粉含量是解决烟机结垢的根本手段,对反再系统和烟机运行工艺环境加强平稳性操作,不超工艺卡片。对新鲜剂、平衡剂加强粒径等监控,防止产生过多催化剂细粉。

2. 旋风分离器本身状况和运行工况都对过滤催化剂有显著影响,在日常操作中应精细操作,使之运行在最佳在状态。应统筹考虑评估设备寿命,进行优化改造投资,尤其是不断提高三旋效率。

3. 烟机是在高温烟气环境下运行的大机组,当前以运用数

据监控系统对主要受热部件动静叶片开展运行时长累计管理。同样将开展对其他重要部件的寿命管理,对入口烟机温度进行定量监测,以提高机组整体运行可靠性。

4. 烟机最常见的停机原因为结垢,其中碰磨容易导致叶片在高应力下发生疲劳断裂,同时在结垢后期也会造成振动高回收、效率严重下降的问题,应积极开展预防性检修工作。根据每台烟机运行情况,针对催化剂结垢引起的振动故障,梳理出平均故障间隔时间,结合状态监测频谱辅助分析,能够实现较准确的停机时间,指导烟机的预防性检修工作。

5. 优化烟机操作,尽量减少轮盘蒸汽注入量(控制轮盘温度在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上限),同时确保注入蒸汽的品质。在结垢后期应避免烟机负荷的频繁波动,会增大垢脱落导致烟机缩短运行时间的几率。

结语

针对催化剂结垢引起的振动故障,梳理出平均故障间隔时间,结合状态监测频谱辅助分析,能够实现较准确的停机时间,指导烟机的预防性检修工作。

对烟气中催化剂监测存在开展不全面的问题,对烟机运行环境监控可以形成量化方式建立与结垢速度的联系,有利于预判烟机结垢的速度。但例如烟机组键相监控等设施没有完备的情况需要提高管理,2[#] 催化机壳烈度监测探头应用较好,值得推广。同时,烟机长周期运行更重要的是工艺运行环境,减少催化剂细粉是根本途径。