

# 600MW机组脱硫浆液循环泵振动问题的分析与处理

周剑锋 宋兆瑞 李学雷

内蒙古蒙东能源有限公司

**摘要:** 石灰石-石膏湿法脱硫工艺是烟气脱硫 (FGD) 工程中占主导地位脱硫技术, 系统运行能耗通常占发电量的1.0%~1.5%, 浆液循环泵则是FGD工艺中的主要耗能设备, 其能耗约占到系统运行总能耗的50%以上。控制烟气SO<sub>2</sub>排放对燃煤电厂有着举足轻重的意义, 而石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术由于其适用范围广、脱硫效率高、技术成熟等优点被广泛应用。但随着装机容量的不断增大, 脱硫整体配套的单体设备也在不断增大, 在控制烟气SO<sub>2</sub>排放达标的同时, 耗电量也在增加, 达整个厂用电的1%甚至更高, 因此, 脱硫设备的优化尤为重要。

**关键词:** 脱硫浆液循环泵; 振动; 处理

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6261.2022.02.081

## 前言

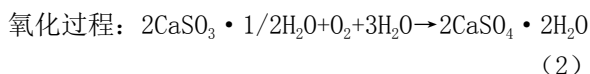
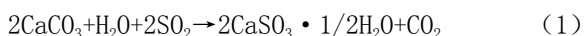
近年来, 随着环保力度的不断加大, 浆液泵作为核心脱硫设备之一, 在电力、石化、建材行业有着举足轻重的地位。区别于清水泵, 浆液泵能够对含有一定百分比的固态颗粒的浆液进行抽排。某发电厂烟气脱硫浆液循环泵机组及管线存在强烈的振动问题。其中, 浆液泵机组由A、B两泵并联构成, 作为炼油厂核心重催烟气脱硫装置的重要设备, 泵体及叶轮采用具有良好抗腐蚀、抗磨损性的Cr30A不锈钢制成。自2011年投产以来, 该浆液泵及其管线振动剧烈, 严重超标。笔者依据现场振动分析和流场模拟结果提出了综合解决方案。

## 一、石灰石-石膏湿法脱硫系统的工艺流程及技术优势

### (一) 工艺流程

石灰石-石膏湿法脱硫系统工艺流程为: 湿式制浆系统磨制的脱硫剂石灰石浆液储存在石灰石浆液箱每, 由供浆泵送入脱硫塔; 脱硫塔内, 脱硫剂浆液与烟气接触混合, 烟气中的SO<sub>2</sub>与脱硫剂浆液中的Ca<sup>2+</sup>及鼓入的空气进行氧化化学反应, 最终生成石膏, 脱去SO<sub>2</sub>。含有结晶水的石膏浆液经一级旋流器、真空胶带机脱水, 形成脱水石膏, 用作生产水泥的缓凝剂。湿法脱硫工艺主要化学反应式为:

吸收过程:



### (二) 技术优势

该湿法脱硫系统工艺布置紧凑, 占地面积小, 可靠性高, 影响因素少, 国内外多家企业均采用了该系统。该湿法脱硫系统的脱硫塔具有独特的喷淋层设计和管道布置, 能够保证除灰后的烟气与脱硫剂浆液充分混合和反应; 在喷淋层之上设计有除雾器, 可以降低炉后烟气

中的水分, 还可以降低炉后烟气中的粉尘含量。虽然石灰石-石膏湿法脱硫系统的初期建设成本较高, 但其先进的工艺设计为后续生产运行带来了极大便利。其特有的水循环系统, 即工艺水循环和废水回塔循环系统, 能够有效控制炉后烟气中的硫含量, 同时, 能够保证系统中不会产生其他有害附加产物。

## 二、浆液泵运行存在的问题

某发电厂装置烟气脱硫浆液循环泵是两端支撑式单级单吸陶瓷叶轮离心泵, 其基本参数如下: 流量1500m<sup>3</sup>/h输送介质浆液介质密度980kg/m<sup>3</sup>介质温度56℃必需汽蚀余量6m扬程106.7m效率72%入口压力0.1MPa出口压力1.2MPa叶轮直径830mm电机功率800kW额定转速990r/min该浆液泵的运行介质为脱硫浆液, 在介质的长期冲刷作用下, 其叶轮、耐磨板、壳体磨损严重, 在检修拆卸后发现存在叶轮表面汽蚀冲蚀严重、叶轮流道减薄的现象, 机组效率严重下滑。耐磨板密封腔内部台阶处, 冲蚀深度达15mm (总厚度25mm), 泵壳冲蚀造成表面分布大小不均的凹坑, 最大直径10mm左右, 出口流道处冲蚀深度最深达10mm。泵进出口管线振动烈度过大, 在对现场进行振动分析之后, 考虑到叶轮的过度汽蚀和流体长期偏离标准工况的湍流流动, 判断该设备振动问题使泵内流体存在不稳定的压力波动。测量结果表明: 入口管道振动烈度水平方向最大为16.5mm/s, 垂直方向最大为14.1mm/s, 出口管道振动烈度水平方向最大为12.5mm/s, 垂直方向最大为11.2mm/s, 泵体振动数据也超过了ISO10816所规定的标准, 振动烈度严重超标。由现场拆检情况可知, 泵体内部出现点形蜂窝坑状损伤, 运行时产生“噼啪”的噪音, 符合典型的汽蚀表征现象, 初步判定汽蚀是运行故障的主要原因。

## 三、汽蚀机理及故障原因分析

### (一) 汽蚀机理

在离心泵运行过程中, 通过叶轮传输臂之间的叶片

在离心力的作用下会做出一定的径向运行，同时会做出相应的圆周运动。当泵内的流体从叶轮位置转向泵壳时，在叶轮的进口位置会形成一个低压区，此时，入口处阀门的液体会在大气压的推动下经过吸入管吸入泵体中，只要叶轮持续工作，那么液体就会不断地被吸入管吸收后排出，从而达到液体运输的目的。在工作过程中，离心泵会产生振动与噪声，从而导致扬程、流量和工作效率的下降，在进行检修时，我们通常可以发现叶片的进口位置出现明显的损坏或出现麻点，这些均是由汽蚀现象造成的。泵内汽蚀发生与否取决于两个重要参数：有效汽蚀余量NPSHa和必需汽蚀余量NPSHr。其中有效汽蚀余量定义为单位质量流体经从管路入口至泵入口处超出饱和蒸汽压的富裕能量，计算表达式为：

$$NPSHa = (p_1 \rho g - H_g - h_w) - p_v \rho g \quad (1)$$

式中 $p_1$ ——吸入液面压力，Pa； $p_v$ ——输送温度下液体的饱和蒸气压，Pa； $\rho$ ——输送液体密度， $kg/m^3$ ； $H_g$ ——几何安装高度，m； $h_w$ ——吸入管路损失。由式

(1)知，有效汽蚀余量与吸入压力、吸入管道流动阻力、安装高度有关。且有效汽蚀余量越大，流体能量流经吸入管路损失越少，离心泵越不容易发生汽蚀，由于流体从吸入管路入口流过叶轮时流速不断增加，压力必然二次下降，通常将叶轮压力最低处设为K，把单位重量的液体从泵吸入口流至叶片进口压力最低处K点的压力降，称为必需汽蚀余量，其表达式为：

$$NPSHr = v_1^2 / 2g + \lambda w_1^2 / 2g \quad (2)$$

式中 $v_1$ ——叶片进口前绝对速度，m/s； $w_1$ ——叶片进口前相对速度m/s； $\lambda$ ——叶片进口压降系数。

由式(2)知，必需汽蚀余量与吸入室的结构、液体在叶轮进口处的流速等因素有关，且必需汽蚀余量越小，泵越不容易发生汽蚀。为了更好地说明有效汽蚀余量NPSHa、必需汽蚀余量NPSHr与泵内汽蚀间的关系，列出汽蚀余量与汽蚀区的关系。NPSHa=NPSHr为发生汽蚀临界界限，若要提高泵的抗汽蚀性能一方面可以提高NPSHa，一方面可以减小NPSHr。

#### (二) 故障原因分析

已知浆液泵吸入液面压力 $p_1=0.2MPa$ ，输送介质密度 $\rho=980kg/m^3$ ，输送液体温度为 $56^\circ C$ ，查表得输送温度下液体的饱和蒸气压 $p_v=17kPa$ ，由厂家提供的参数知该浆液泵的必需汽蚀余量NPSHr=6m，若要满足有效汽蚀余量比必需汽蚀余量大0.5m以上，即 $NPSHa \geq NPSHr + 0.5m$ 的要求。

由现场实地勘察情况可知，浆液泵的几何安装高度满足设计要求，故不做出调整。结合现场拆检及振动测试数据，引起振动的原因可能是浆液泵入口压力过小及

蜗壳内壁粗糙度导致的汽蚀现象和管路布置不合理，因此在后续改造措施中对上述问题做出优化。

### 四、振动优化措施

#### (一) 浆液泵优化措施

##### 1. 浆液泵入口改造

参考汽蚀机理，本次优化首先对浆液泵在额定入口压力( $p=0.1MPa$ )进行全流场空化数值模拟校核与压力分析，分析认为入口过滤器滤网目数偏高，使得过滤器压降损失过大，考虑到浆液组分和现场实际情况，决定减小滤网目数以减小过滤器压降损失，提高泵体入口压力改善吸入情况。从数值模拟结果可以看出，泵入口压力升高之后，泵内气相分布明显减少。因此对泵前过滤器进行改造，增大过滤器的孔径，使得浆液流经过滤器时阻力损失大幅降低，相较改进前，过滤器两侧压差变小，浆液泵入口压力变大，汽蚀情况好转，大幅改善了泵体吸入性能。

##### 2. 浆液泵蜗壳改造

对于蜗壳内壁的改造，先前是通过在内表面喷涂抗冲蚀材料，但涂层表面粗糙且喷涂不均匀，部分区域高矮不一。为验证蜗壳内壁粗糙度对汽蚀的影响，设计了粗糙度从 $3.2 \sim 1600 \mu m$ 的8组数值模拟。

随着蜗壳内壁粗糙度不断增大，泵壳内气体分布区域不断增大，在粗糙度大于 $100 \mu m$ 后，泵内气体分布面积几乎布满整个叶轮区域，气体密度也不断增大，汽蚀现象越严重。在实际工程应用中，由于气泡数量的增多，致使泵壳内不平衡低压区激增，气泡破裂时形成的冲击坑也越来越多，直接导致泵内粗糙度增加，又加重汽蚀现象，恶性循环使得离心泵不断偏离安全运行工况。故在二次改造时，蜗壳采用其他表面强化措施使得表面光洁度提高、内壁粗糙度减小，水力损失大幅降低，汽蚀区域明显减小。

#### (二) 浆液泵管路优化措施

##### 1. 入口管线改造

为了降低浆液泵的管道振动，对入口管道进行调整。在塔底垂直管段下弯头处设置一段较粗的横管，该横管能对入口管道内的流体激振起到缓冲作用；在横管侧面分别焊接向下倾斜 $5^\circ$ 和向下倾斜 $8^\circ$ 的A泵和B泵入口管道，利于气体的回流；石油化工金属管道布置设计规范中规定，当管道输送含有固体介质或浆液时，水平管段上的偏心异径管应底平安装，因此本次改造将原有入口管道的同心异径管更换为偏心异径管；电力行业管道布置设计规范中规定，对于水平吸入的离心泵，当进口管有变径时，偏心异径管与泵的进口间宜设置一段直管段，因此本次改造在原来的偏心异径管后增加一段直

管段然后进泵。

## 2. 出口管线改造

将贴于地面布置的水平管段整体抬高并将泵的两出口管道直接以45°水平斜接入该水平管道，消除管道的下U形结构，防止气体在下U形结构的上部产生积聚。由于出口管道配管方式发生改变，因此需要为管道重新设置支撑。

### (三) 优化循环浆液泵运行方式

优化前，两台锅炉的煤计量过程相同，硫含量相同。脱硫系统运行期间，机组同负荷情况下，1号锅炉需要4或5台石灰石浆液循环泵，2号锅炉需要3台石灰石浆液循环泵。由于两台锅炉的最大硫脱硫试验，两台锅炉在不同负荷下的脱硫效率存在差异。在相同条件下，1号锅炉的脱硫效率明显低于2号锅炉。当三台石灰石浆液循环泵1、4和5在每个负荷段运行时，2号锅炉的脱硫效率最高。根据调整采煤机给定煤量、切换制粉系统等操作措施，2019年8月，采用脱硫高效循环泵。在全工况下，石灰石浆液循环泵的数量从3台调整到5台，再调整到2台。最大限度地提高循环泵的效率。当烟气中的硫含量刚好接近启动循环泵的临界值时，可以通过适当调整供应给PH值得调整来减少浆液循环泵数量。2019年6月，当1号机组吸收塔的浆液循环泵进行切换时，1号炉脱硫系统中四台石灰石浆液循环泵的出口压力和电流波动较大，而吸收塔的液位稳定在12.8m，泥浆密度为1105kg/m<sup>3</sup>。2019年9月，1号机组停运期间，对吸收塔的喷淋层喷嘴进行了清理和疏通。共清理了196个喷嘴，疏通了126个喷头和分支管。喷嘴和分支清理后，每个石灰石浆液循环泵的出口压力从0.06MPa降至0.12MPa，最大下降31.5%，有效提高了脱硫系统的液气比。吸收塔适用于满负荷使用。硫含量必须从0.87%提高到1.24%。此时，三台石灰石浆液循环泵可以达到脱硫效果，煤的硫含量低于1.3%。

### (四) 脱硫系统参数设定

1) 浆液pH值pH值越高，脱硫效率就越高。然而，如果pH值过高，设备中的石膏浆液可能会增加。因此，确定石灰石浆液pH值为5.2-5.5，正常运行时的控制值为5.3。2) 浆液密度：如果浆液密度太低，石膏不容易结晶，就会失效。如果过高，会导致设备结垢，影响脱硫能力。根据以往的运行经验和相关数据分析，决定将浆液密度控制在1090-1120kg/m<sup>3</sup>。当浆液密度达到1120kg/m<sup>3</sup>时，启动石膏排放泵排放石膏。如果旋流器溢流，部分打开石膏排放泵的循环阀。3) 吸收塔浆液

液位高，造成溢流，提高了氧化风机的性能；过低会减少氧化反应空间，增加塔内泡沫，容易造成石灰石循环泵气蚀。根据以往的运行经验和相关数据分析，决定将吸收塔的液位控制在12.5-13.0m，吸收塔正常运行时的液位约为12.8m。4) 吸收塔的补水方式主要有三种：工艺补水、除雾器冲洗和管道冲洗。利用雾分离器的冲洗水，可以在雾分离器上形成水膜，以冲洗盐雾，降低雾分离器的压差，同时冲洗两次烟气。因此，决定优先使用除雾器冲洗液向吸收塔注水。

## 五、整改效果

为了检验改造效果，重新测量了改造后的出、入口管道振动测点，测量结果可见，改造后管道水平、垂直方向振动明显减小。整改后机组开机运行，减振效果明显，达到厂方要求，且至今运行良好。

### 结束语

结合现场拆检和振动测试诊断可知，造成发电厂脱硫装置烟气脱硫石灰石浆液循环泵振动的原因浆液泵汽蚀和管道布置不合理。通过增大该浆液泵泵前过滤器孔径、提高蜗壳内表面平整度、对进出口管路及管线布局进行改进，有效抑制了浆液泵管道的噪音与振动，该设备至今运行良好，这次改进不仅解决了电厂脱硫系统现场存在的问题，而且对于解决其他同类浆液泵机组振动较大问题也有着重要的指导作用。

### 参考文献

- [1] 谈鸣时. 浆液泵的设计和使用现状[J]. 煤矿机械, 2013(2): 25-28.
- [2] 王树东, 胡三高, 刘玲, 等. 600MW机组脱硫系统中循环浆液泵的运行优化与改造研究[J]. 中国电力, 2010, 43(11): 46-49.
- [3] 商丽, 牛英力, 毛玲, 等. 离心泵振动验收标准的选择与应用GB/T29531-2013和ISO10816-7[J]. 水泵技术, 2017(3): 26-28; 33.
- [4] 张娜, 郝慧娣, 吴煜斌, 等. 离心泵性能测试及汽蚀研究[J]. 化工机械, 2018, 45(6): 680-685; 712.
- [5] 王勇, 刘厚林, 谈明高. 泵汽蚀研究现状及展望[J]. 水泵技术, 2008(1): 1-4; 10.
- [6] 袁亚, 袁立志, 张元元. 多级离心泵气蚀、振动原因分析及改造[J]. 化工机械, 2013, 40(3): 403-405.
- [7] 张浩, 王建建. 离心泵汽蚀分析及优化措施[J]. 广州化工, 2013, 41(17): 169-171.