# 湿法磷酸萃取尾气洗涤系统硅胶后移的解决措施

刘志平，严世科

（云南三环中化化肥有限公司 生产维保部，云南 昆明 650113）

［摘 要］结合大型湿法磷酸装置普遍存在的萃取槽尾气风机运行周期短，萃取槽尾气洗涤系统硅胶堵塞喷管、喷头，硅胶挂壁系统管道、设备，系统抽风机严重震动，叶轮松动后轴头腐蚀等问题，分析产生的原因。经分析研究发现抽风机叶轮失衡震动的主要原因是尾气洗涤系统硅胶后移到抽风机，硅胶后移的主要原因是洗涤效果差和洗涤下来的硅胶没有及时分离移除。对气相横管、管道洗涤器、喷头进行改造，在抽风机前有效分离并移除硅胶，改造后运行周期从3～7 d延长到2年左右。

［关键词］湿法磷酸；萃取槽；硅胶；分离；移除

［中图分类号］TQ126.3+5 ［文献标志码］B ［文章编号］ 2097-4566（2025）01-0096-05

## Solution to backward movement of silica gel in tail gas washing system of wet-process phosphoric acid extraction

LIU Zhiping, YAN Shike

(*Production and Maintenance Department, Yunnan Three Circles-Sinochem Fertilizers Co., Ltd., Kunming* 650113, *China*)

**Abstract:** Based on the common problems in large-scale wet-process phosphoric acid plants, such as the short operating cycle of the exhaust fan in the extraction tank, silica gel blockage of the spray nozzle and nozzle in the extraction tank exhaust washing system, silica gel wall hanging system pipeline and equipment, severe vibration of the system exhaust fan, and corrosion of the shaft head after impeller loosening, the causes of these problems are analyzed. After analysis and research, it is found that the main reason for the unbalanced vibration of the exhaust fan impeller is that the silica gel in the exhaust gas washing system moves back to the exhaust fan. The main reason for the silica gel moving back is poor washing effect and the silica gel washed down is not separated and removed in time. The gas-phase horizontal pipe, pipeline scrubber and nozzle are modified to effectively separate and remove silica gel before the exhaust fan. After the modification, the operating cycle is extended from 3-7 days to about 2 years.

**Key words:** wet-process phosphoric acid; extraction tank; silica gel; separation; remove

## 0 引言

2006年前后投产的大型湿法磷酸装置，普遍存在萃取槽尾气风机运行周期短，萃取槽尾气洗涤系统硅胶堵塞喷管、喷头，硅胶挂壁系统管道、设备等问题。经研究发现主要原因是尾气洗涤系统硅胶后移到抽风机，硅胶后移的主要原因是洗涤效果差和洗涤下来的硅胶没有及时分离移除。通过对气相横管、管道洗涤器、喷头进行改造，在抽风机前分离并移除硅胶，风机运行周期从3～7 d延长到2年左右。

## 1 萃取槽尾气洗涤系统存在的问题分析

### 1.1 管道、设备结垢堵塞，洗涤系统运行周期短

萃取槽尾气洗涤系统中气相横管、文丘里喷淋装置挂料特别严重，管道壁容易结垢[1]。第一洗涤塔喷头堵塞，进而导致喷淋管堵塞，萃取槽尾气洗涤装置的连续运行时间只有30 d左右，气相横管每周都要进行冲洗清理，整个尾气洗涤系统每月都需停车清理一次，严重影响装置长周期运行和产能发挥。

### 1.2 萃取槽尾气风机运行周期短

萃取槽尾气风机存在的主要问题为震动，进而

［收稿日期］2024-05-31

［作者简介］刘志平(1986-)，男，江西吉安人，工程师，公司生产维保部部长。

［通信作者］严世科(1965-)，男，云南永胜人，高级工程师，公司生产维保部专工。

导致风机轴承损坏、地脚螺栓拉断、叶轮衬胶（硫化胶）炸裂，叶轮松动后轴头腐蚀，风机机壳内、叶轮上挂满硅胶。一般运行3～5 d须停机进行清理风机叶轮、检修等。分析原因是硅胶富集在风机叶轮上，导致叶轮失衡，进而导致风机震动。为了解决该问题，首先在风机维护、检修、特别是整体找平找正上进行改进，对风机地脚、机壳进行加固；其次，在机壳上开一个300 mm×300 mm的检查冲洗孔、DN100排污口，规定每班接班定时用消防水人工冲洗风机叶轮，但收效甚微，所以直接在机壳上加叶轮冲洗水管，冲洗水管越加越多，虽然实现了连续性冲洗叶轮，但风机运行周期还是只有3～7 d。以上措施，不仅没有解决根本问题，而且导致机壳轴孔处、检查孔等部位漏料，衍生出现场环境问题。硅胶的特点是潮湿的时候非常滑，风干后随风形成风飘絮，硅胶絮随风飘飞，严重污染周围环境。

萃取槽尾气风机停机后，整个萃取槽各区严重冒烟，呛人的含氟、含硫气体在装置内烟雾缭绕，萃取槽被迫停止加料或者降负荷生产，严重影响装置产能的发挥。

## 2　尾气洗涤系统主要设备及流程

### 2.1　主要设备规格

文丘里洗涤器尺寸为$\phi$1 000 mm/$\phi$550 mm×4 210 mm，文丘里洗涤器配置3套喷淋装置，分别位于横管顶部、三通段和垂直段，洗涤水流量为130～150 m³/h。第一洗涤塔尺寸为$\phi$2 400 mm×16 250 mm，设计温度为85 ℃，操作温度为58.5 ℃；第一洗涤塔配置2层喷淋，每层6套环向均布，环管型号为DN150钢骨架复合管，喷淋装置型号为LY16-10-433 L:150-750，喷头型号为DN80，洗涤水流量为300 m³/h；第一洗涤循环泵流量为301 m³/h，扬程为41 m，功率为75 kW，用于供应第一洗涤塔两层喷淋。尾气风机型号为FY9-38-11 N011.2D左180°，进口最大流量为54 285 m³/h，标准流量为26 800 m³/h，进口压力为78 kPa，全压为5 121 Pa，出口压力为83 kPa，配电机型号为Y315M-4，$I_0$为240 A，功率为132 kW。

### 2.2　流程

在抽风机的抽吸作用下，来自萃取槽的含氟、含硫气体，经气相横管进入文丘里洗涤器，经过2次洗涤，然后进入第一洗涤塔，在第一洗涤塔内经过上下两层喷淋洗涤后，气体及气体夹带的固相物、洗涤液被尾气风机抽吸进入第二尾气洗涤塔继续洗涤，达标后排放[2]。萃取尾气洗涤工艺流程如图1所示。

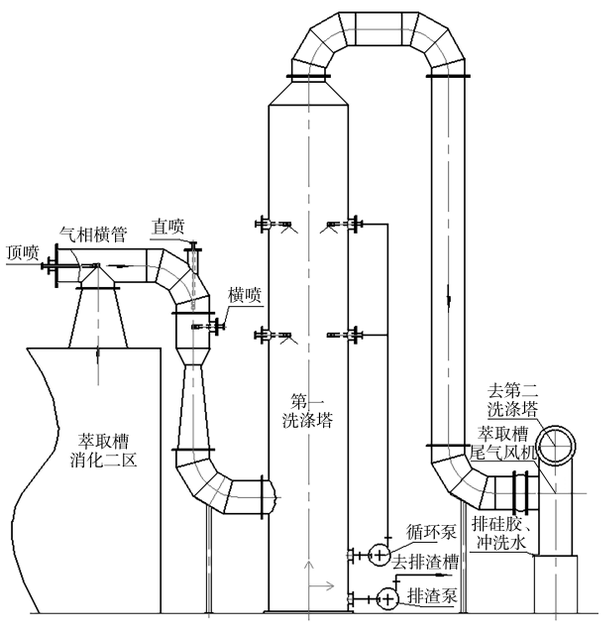


图1　萃取尾气洗涤工艺流程

Fig. 1　Washing process flow of extraction tail gas

## 3　存在问题的原因分析

萃取尾洗风机震动大、硅胶严重后移，根本原因还在文丘里洗涤器和第一洗涤塔，即本应在文丘里洗涤器和第一洗涤塔洗涤分离下来的硅胶因为没有分离移除，后移到尾气风机，尾气风机由抽吸气体变成了抽吸气胶混合物。

管道、设备结垢堵塞的具体原因如下：

（1）喷头设置不合理，如气相横管喷头设置为顶喷、直喷，从萃取槽抽吸出来的85 ℃左右的含氟、含硫气体从萃取槽出来就与30 ℃左右的洗涤水接触，迅速降温，大量硅胶迅速析出[3]，堵塞气相横管及喷头，影响洗涤效率，加之没有硅胶分离装置，导致硅胶后移。

（2）气体管道内衬8 mm厚的PO（聚烯烃），由于管道直径较大，当内衬PO层的厚度超过4 mm时，必须先点焊钢板网再衬PO，管道内壁点焊钢板网后平整度差，衬PO以后内部凸凹不平，成为结垢物的着床点，容易导致结垢物着床而导致管道堵塞，清理时无法清理干净，形成二次挂壁结垢的载体[4]。

（3）气相横管水平配置，管道内部的盲板、喷头组件每次冲洗后回装投入使用，造成管道底部有积水，管道底部积水与85 ℃左右含氟、含硫气体接触后加剧了硅胶析出，导致挂壁结垢。

（4）文丘里洗涤器所在的位置为第一洗涤塔与萃取槽消化二区之间[5]，从消化二区来的气体在文丘里洗涤器内喷淋洗涤，在喷淋洗涤过程中由于气体温度下降，硅胶等固相物快速析出，形成结晶并吸附在管道内壁、喷管及喷头上；另外，由于文丘里洗涤器特殊的变径结构[6]，高温气体在喉管部位由于流速较快，与洗涤液接触洗涤并迅速降温，硅胶结晶快速析出，导致文丘里喷淋装置挂料。

（5）第一洗涤塔使用的是 DN80 普通洗涤喷头，上下层各设置 6 只，共 12 只喷头，尾气洗涤水量不足，喷淋面积小，冲洗不到塔壁，尾气夹带的硅胶等物质在塔壁上形成结晶后得不到冲洗，最终越积越厚，越积越多。

（6）洗涤液循环使用，导致洗涤液浓度较高，饱和后失效，没有洗涤作用，表面上洗涤液在循环洗涤，实际没有起到洗涤作用，反而是洗涤液中的固相物一层又一层的包裹挂壁。

（7）由于第一、第二洗涤塔及尾气风机都是衬胶设备，清理时由于担心损坏内壁衬胶，不敢铲到底层；洗涤塔内清理需要搭设脚手架，由于塔比较高，搭设脚手架难度大，搭设时间长，在搭设脚手架过程中容易损坏衬胶，加之清理面积大、停车时间有限，导致每次都清理不彻底，在生产过程中塔壁上的大块结垢物脱落，导致喷淋洗涤系统堵塞。

（8）从气相横管、文丘里洗涤器洗涤下来的固相物，以及洗涤水随气体进入第一洗涤塔，在第一洗涤塔中实现气液和气固分离，第一洗涤塔顶部出口气体夹带的固相物和冷凝液直接进入尾气风机，在尾气风机前只设置有一次沉降分离装置，分离不彻底。

（9）该系统原使用的洗涤喷头直径为 DN80，喷头喷口处最小直径只有 DN30，很容易被脱落的大块物料堵塞，因为喷头直径小、流量小，洗涤液在塔底部停留时间长，硅胶等固体物质沉淀、沉积、结晶[7]，固相物进入喷淋系统后导致喷头和喷淋管堵塞。

## 4 解决措施

在整体工艺流程保持不变、主要设备不做大变更的前提下对气相横管、文丘里洗涤器、第一洗涤塔喷头、第一洗涤塔进出口管道、第一洗涤塔循环泵进行改造。

（1）将所有内衬 PO 气相管道改为衬高分子管。衬高分子管有以下 3 个优点：①高分子管的制造工艺决定了其内部特别光滑，气体在管道内摩擦力小，通过性好，气体中析出的固相物不容易挂壁，解决了 PO 管道内壁平整度、光洁度差，气体中析出的固相物容易挂壁结垢问题；②衬高分子管属于内套管，不像内衬 PO 和金属外管严密黏合，高分子管热胀冷缩量大，在热胀冷缩过程中由于高分子材料与结垢物的膨胀系数不一样，部分结垢物会自动脱落；③在湿法磷酸生产装置中绝大部分管道的法兰垫子都用橡胶垫，橡胶垫相对比较软，连接法兰紧固到一定程度后，橡胶垫受挤压变薄，内径变小，外径变大，每一道法兰就是一个气阻点，或者说每一道垫子就是一个气阻点，内衬高分子管在管道配置过程中所有法兰连接点都不需要密封垫（法兰垫子），内套管的翻边本身就是垫子，拆装方便，不容易泄漏，能有效降低气阻，保障流道畅通。

（2）将所有喷头改为 120°喷水的旋转式喷头，增加喷射角度，解决因喷水散不开、洗涤角度不够，冲洗不到塔壁、管道壁的问题。

（3）气相横管直径不变，取消顶喷喷头，解决从萃取槽出来的高温气体迅速降温的问题，气相横管沿气流方向倾斜 5°配置，解决气相横管底部积水，与萃取槽出来的 85 ℃左右含氟气体接触后加剧硅胶析出挂壁问题。

（4）把气相横管与文丘里洗涤器之间弯头处的垂直喷淋装置的长度从 2 000 mm 缩短为 1 000 mm，保证在洗涤尾气的同时，能冲洗到气相横管与文丘里之间弯头的内壁，阻止结晶附着管壁[8]。

（5）将文丘里洗涤器改成传统的通管洗涤器，直径增大至 1 000 mm，并增加管道洗涤器长度，增加洗涤器沉降段，直接放置于地面，集洗涤、沉降、支撑于一体；洗涤器直管段设置 2 套喷淋装置，形成三段洗涤，通过增大喷淋密度洗涤尾气的同时，起到冲洗管道内挂壁积料的作用。文丘里洗涤器的洗涤效果比普通的通管洗涤器效果好，但由于$\phi$1 000 mm 的文丘里洗涤器变径的最小直径只有 550 mm，这种特殊喉管结构，加剧了硅胶等固相物析出，导致喷管、喷头堵塞。通管洗涤器底部增加沉降段，沉降段有一定的液位，气体夹带的固相物在直管段有垂直向前的惯性，当固相物接触液面时即被捕着，将通管洗涤器洗涤下来的大部分固相物与气体分离，通管洗涤器沉降段的洗涤液通过排渣泵打入渣槽，解决在图 1 中气相横管、文丘里洗涤器洗涤下来的固相物以及洗涤水随气体进入第一洗涤塔，为第一洗塔喷淋系统堵塞

把好第一道关口。

（6）将第一洗涤塔12套DN80的喷头改为6套DN150的喷头，按上下两层布置，层与层之间错角60°，每层3套环向120°均布，实现全平面喷淋洗涤；上层向上喷，让液体有个回落过程，一方面延长气体与液体的碰撞接触时间，提高洗涤效果，另一方面，部分液体回落在洗涤塔壁上，清理洗涤塔壁，减缓挂壁固相物包裹长大，避免喷头堵塞；下层3套向下喷淋，保证能冲洗到塔壁；增大单个喷头流量，减少喷头数量，增大喷淋密度，提升洗涤效率。第一洗涤塔原使用的DN80喷头内部通道最小处直径为30 mm，塔内硅胶结晶物通过性比较差。改用DN150喷头后最小通道处直径为65 mm，提高了颗粒物通过能力；DN150喷头喷淋覆盖范围更广，洗涤尾气的同时可以冲洗塔壁，减少塔壁上的积料和其他附着物。

（7）洗涤循环泵、排渣泵都改为低扬程、大流量泵，满足洗涤水量和系统水平衡。调整第一洗涤塔循环泵叶轮直径，将泵扬程降低至20 m，流量增加到400 $m^3$/h，增加洗涤水量，来提升洗涤效果；同时，因单位时间内的洗涤水量增加，循环洗涤速度增加。加之DN80的喷头改为DN150后，由于总的洗涤水量增加，缩短洗涤液在第一洗涤塔底部的停留时间和第一洗涤塔循环洗涤的时间，减少硅胶结晶、沉淀物析出板结或形成块料。

改进后的萃取尾气洗涤工艺流程见图2。

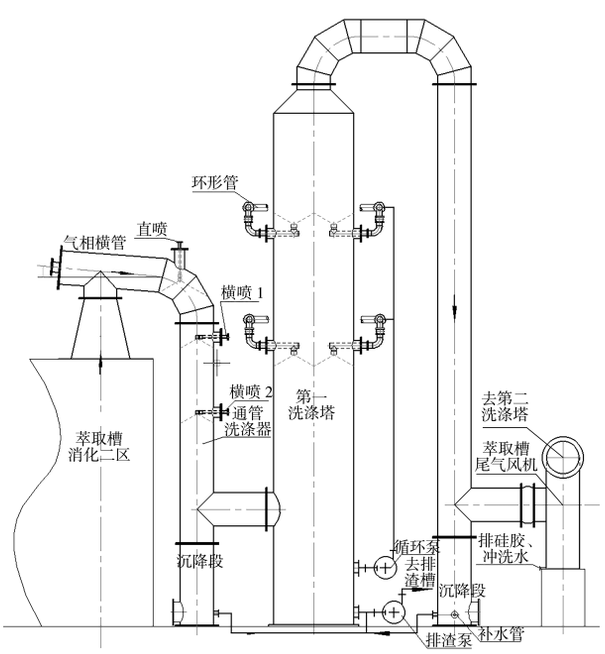


图2　改进后的萃取尾气洗涤工艺流程

Fig. 2　Improved washing process flow of extraction tail gas

第一洗涤塔顶部出口管垂直延伸到地面，但不配置洗涤喷头，避免气体带液，从而避免风机带液运行，该管道和通管洗涤器一样底部增加沉降段，沉降段也有一定的液位，气体夹带的固相物和洗涤液在直管段垂直向前流动过程中，利用气体、液体、固相物相对密度不同、惯性不同的特点，将固相物和气体夹带的洗涤液进行沉积分离[9]，在避免风机带液运行的同时，也降低了尾气风机的运行负荷。

将改造后的通管洗涤器沉降段、第一洗涤塔出口管沉降段与排渣泵接通，利用排渣泵将通管洗涤器、第一洗涤塔、第一洗涤塔出口管沉积下来的洗涤混合物送入排渣槽，最终实现气、液、固三次分离，同时降低尾气温度，降低循环洗涤液的浓度，减少循环洗涤液中固相物含量，彻底解决第一洗塔喷头、喷管、洗涤环管堵塞的问题。

选用DN200的高分子裸管作为第一洗涤塔洗涤环管，采用两个半圆连接的哈弗结构，两个哈弗之间用法兰连接。在喷管和环管之间设置DN200的橡胶膨胀节，解决因温度变化、管道震动等对喷淋系统的影响。

## 5　改造效果

改造后洗涤液基本都被排渣泵打走，在图2中气相横管、通管洗涤器洗涤下来的固相物、洗涤水在通管洗涤器下段，实现第一次分离，在第一洗涤塔中实现气液和气固第二次分离，第一洗涤塔顶部出口气体夹带的固相物和冷凝液在进入尾气风机前的直管底部实现第三次分离，彻底解决硅胶后移问题，尾气风机正常运行周期从3～7 d延长到2年左右；彻底解决了洗涤效率低，洗涤塔环管、喷管和喷头频繁堵塞，系统运行周期较短，清理费用高的问题。

从2016年实施改造后，初期还是每月短暂停车检查一次，后来发现整个尾气洗涤系统不存在喷头、管道堵塞，洗涤塔塔壁挂料等问题，检查周期从每月一次逐渐延长到2年停车检查一次喷头。因为喷头为PO材料，使用时间长后材料老化，焊缝会炸裂，所以2年必须检查、修补一次。

管道和塔壁实现了自动冲洗，加之正常运行周期延长，2年检查维护一次风机和喷头，降低了员工劳动强度，尾气洗涤系统清理费用、检修备件费用大幅度降低，具体见表1。

从表1可知，改造后每年可节省清理费和备件费23.28万元，因检修频次减少带来的产能提升效

表1 萃取槽尾气洗涤系统技改前后年清理检修费用对比

Table 1 Comparison of costs and benefits before and after technological transformation of extraction tail gas washing system

| 项目 | 清理频次 | 清理时间/h | 清理费/万元 | 备件费①/万元 | 产能提升效益②/万元 |
|---|---|---|---|---|---|
| 改造前 | 12.0 | 216 | 8.64 | 20 | |
| 改造后 | 0.5 | 9 | 0.36 | 5 | 360 |
| 较改造前减少 | 11.5 | 207 | 8.28 | 15 | |

注：①风机、循环泵的备件费；②增产约1.8万t，利润200元/t。

益显著，约360万元/a。

正常运行周期延长，检修次数、装置停车时间减少，装置每年增加正常生产时间200 h左右，增加产能约1.8万t，吨产品能耗降低。

改造从材料选用、设备管道结构、喷头形式、工艺平衡等方面统筹考虑[10]，彻底解决了萃取槽尾气洗涤系统硅胶后移的问题，同时消除了跑冒滴漏现象，装置实现无泄漏运行，自然解决了现场泄漏的稀硅胶湿滑、风干后形成风飘絮而严重污染周围环境的问题。

## 6 结语

通过本次改造，让我们充分认识到在设计洗涤系统时不能只考虑洗涤，还要考虑洗涤物的有效分离和有效移除。文丘里洗涤器虽然洗涤效果好、洗涤效率高，但文丘里洗涤器没有分离装置，也没有固相物移除装置，洗涤下来的固相物全部进入第一洗涤塔，加重了第一洗涤塔的负担，提高了第一洗塔循环洗涤液的浓度，自然降低了第一塔洗涤效果，特别是洗涤液达到饱和后，洗涤液失效，无法起到洗涤作用。在原流程中第一洗涤塔出来的气体通过一个90°的弯头直接进入尾气风机，气体夹带的固相物、洗涤液随气体进入尾气风机，尾气风机带液运行，叶轮与硅胶等固相物发生碰撞接触，必然产生结垢，导致风机动失衡。

改造后实现了固相物、洗涤液三级分离，尾气风机运行周期从3～7 d延长到2年，运行成本、运行周期、运行效能、环境保护等都实现了质的飞跃，依靠科技创新、管理创新提升了装置运行率和产能，降低了装置故障率和停机率。

## [参考文献]


[1] 和彦.大型湿法磷酸萃取尾气洗涤系统改造[J].磷肥与复肥，2015,30(9):28-30,48.
HE Y. Transformation of tail gas washing system in large-scale wet-process phosphoric acid plant[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2015, 30(9):28-30,48.

[2] 周凌翔，彭涛.130 kt/a磷酸装置萃取尾气洗涤技术改进[J].云南化工,2013,40(3):64-66.
ZHOU L X, PENG T. Improved extraction cleaning technology for tail gas in 130 kt/a phosphoric acid plant[J]. Yunnan Chemical Technology, 2013, 40(3):64-66.

[3] 陈玺.湿法磷酸生产过程中含氟废气吸收系统的改造[D].武汉：武汉工程大学,2018.

[4] 王跃林，廖吉星，吴有丽，等.湿法磷酸萃取尾气中氟硅资源回收利用工业化技术研究[J].磷肥与复肥,2017,32(10):31-33.
WANG Y L, LIAO J X, WU Y L, et al. Study on industrial technology of recovery and utilization of fluoride & silicon resources from tail gas of wet-process phosphoric acid extraction [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017,32(10):31-33.

[5] 张卫红，杨俊杰.萃取尾气洗涤吸收系统技改提高氟吸收率[J].硫磷设计与粉体工程,2011(2):44-45.
ZHANG W H, YANG J J. Technical innovation for extraction off-gas washing absorption system to increase absorption rate of fluorine [J]. Sulphur Phosphorus & Balk Materials Handling Related Engineering, 2011(2):44-45.

[6] 李忠，许文科.湿法磷酸生产反应尾气处理系统改造[J].磷肥与复肥,2010,25(5):28-31.
LI Z, XU W K. Transformation of tail gas washing system in WPA production[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2010, 25(5):28-31.

[7] 顾典华.湿法磷酸尾气洗涤系统改造实践[J].化工管理,2016(23):144.
GU D H. Practice of Wet Process Phosphoric Acid Tail Gas Washing System Renovation[J]. Chemical Management,2016(23):144.

[8] 张伟，黄京生.磷肥生产工[M].北京：化学工业出版社,2005.

[9] 江善襄.磷酸、磷肥和复混肥料[M].北京：化学工业出版社，1999.

[10] 陈五平.无机化工工艺学[M].北京：化学工业出版社,2001.