◆设备、控制与安全生产◆

湿法磷酸过滤真空泵尾气处理工艺设计与应用

解　秘，李建闻，侯屹东，杨文娟

（云南磷化集团有限公司，云南 昆明　650600）

［摘　要］针对二水湿法磷酸生产过程中，过滤真空泵排出尾气温度高（约70 ℃）、氟质量浓度高（50 mg/m³）、水蒸气量大导致的设备腐蚀、安全隐患及环境污染问题，设计并应用了一种尾气处理工艺。通过分析尾气特征，确定脱氟、降温、除沫为关键控制点。采用冷水作为洗涤液，按气液体积比400∶1确定循环量，尾气在喷淋冷凝器中停留时间不少于0.35 s，并增设U型缓冲器降低冲击力及折流板除沫器进行气液分离。该工艺在云南某工厂两台抽气量为17 000 m³/h的真空泵上工业应用后，尾气温度降至40 ℃，排气量减少50%，回收水量达13.44 m³/h，排放尾气氟质量浓度稳定控制在5 mg/m³以下。应用后未再出现设备腐蚀影响生产的情况，有效消除了安全与环保风险，实现了水资源回收，对湿法磷酸装置的稳定、清洁生产具有重要意义。

［关键词］湿法磷酸；真空泵尾气；氟化物；水回收；喷淋洗涤；除沫

［中图分类号］TQ126.3+5　　［文献标志码］B　　［文章编号］2097-4566（2026）06-0121-03

Design and application of exhaust treatment process of wet-process phosphoric acid filtration vacuum pump

XIE Mi, LI Jianwen, HOU Yidong, YANG Wenjuan

(*Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming* 650600, *China*)

Abstract: During the production of wet-process phosphoric acid by the dihydrate process, the exhaust discharged from the filtration vacuum pump has a high temperature (about 70 ℃), high fluoride content (50 mg/m³), and a large amount of water vapor, leading to equipment corrosion, safety hazards, and environmental pollution. The design and industrial application of a exhaust treatment process for the pump is introduced. Based on analysis of exhaust characteristics, defluorination, cooling, and demisting are identified as key treatment steps. Using cold water as scrubbing liquid, a gas-to-liquid volume ratio is 400∶1 and a residence time of the exhaust in the spray condenser is not less than 0.35 s, combine with a U-type buffer (to reduce impact force) and a chevron demister (for gas-liquid separation). After industrial application on two vacuum pumps (each with a capacity of 17 000 m³/h) at a factory in Yunnan province, the exhaust temperature is reduced to 40 ℃, the exhaust volume is cut by half, the recycled water flow rate reaches 13.44 m³/h, and the fluoride mass concentration in the exhaust gas is stably controlled below 5 mg/m³. After implementation, there are no further instances of equipment corrosion affecting production, safety and environmental risks are effectively eliminated. It achieves water resource recycling and play a significant role in the stable and clean operation of wet-process phosphoric acid plants.

Key words: wet-process phosphoric acid; vacuum pump exhaust; fluoride; water recovery; spray scrubbing; demisting

0　引言

目前湿法磷酸装置大多采用二水法工艺进行生产[1-2]，磷矿浆与硫酸反应后过滤得到稀磷酸。在二水法反应过程中，需控制反应温度在75～82 ℃[3]，因此反应料浆的温度在80 ℃左右。同时，磷矿中还含有一定量的氟化物和SiO_2，反应过程中氟化物与硫酸反应生成HF，HF进一步与活性SiO_2反应生成H_2SiF_6，H_2SiF_6在较高温度下易分解成SiF_4和HF

收稿日期：2024-01-19；　修回日期：2025-08-10

作者简介：解　秘（1999—　），男，云南宣威人，助理工程师，主要研究方向为磷化工。

基金项目：中央引导地方科技发展专项资金“贫杂磷矿高效生产高品质绿色饲料磷酸钙盐产业化技术开发与转化”（202207AC110017）

进入气相[4]。

磷酸料浆通常使用转盘式过滤机进行过滤，过滤过程采用真空泵抽气控制一定真空度，由于磷酸料浆温度较高，真空泵抽出的尾气温度较高，且含有大量水蒸气和部分氟化物。经检测，真空泵抽出的尾气温度达到70 ℃，尾气中ρ(F) 达到50 mg/m^3。这些尾气若未经处理直接排入大气，则会腐蚀周围厂房和设备设施，存在较大安全隐患，同时也造成环境污染。

本文对湿法磷酸过滤真空泵尾气处理工艺进行设计研究，并用于工业实践，以解决湿法磷酸真空泵排气口大量水蒸气浪费和氟化物污染的问题。

1　湿法磷酸过滤真空泵尾气处理工艺设计

1.1　真空泵排气口问题分析

在湿法磷酸料浆过滤过程中，由于料浆温度较高，真空泵抽出的气体温度达到70 ℃左右，在该温度条件下，水蒸气的饱和蒸气压较高，且氟硅酸较易分解、挥发，导致尾气中含有大量水蒸气和一定量氟化物，同时由于气流速度较快，且尾气未经除沫直接排放，造成尾气中夹带着大量冷凝水外排。因此，尾气脱氟、降温、除沫成为真空泵排气口设计的关键。

1.2　真空泵尾气处理工艺设计研究

1.2.1　优化真空泵尾气洗涤条件

1）洗涤液循环量探究

由于尾气中的氟化物大多以气相SiF_4和HF的形式存在，这些氟化物遇到冷水则形成H_2SiF_6[5]，因此采用冷水作为尾气脱氟洗涤液。该研究以1台抽气量为20 000 m^3/h的真空泵为例进行探究，确定洗涤液循环流量。将真空泵尾气通入内径为1 000 mm的喷淋冷凝器中，并保证足够的停留时间，分别设定喷淋液循环流量为20、30、40、50、60 m^3/h，排放尾气氟含量和温度随喷淋液循环量的变化如图1所示。

由图1可知，真空泵尾气氟含量和温度均随喷淋液循环量增大而降低，当喷淋液循环量为50 m^3/h时，真空泵排出尾气ρ(F) 为4 mg/m^3，尾气温度为38 ℃，接近室外温度。表明抽气量为20 000 m^3/h的真空泵，尾气洗涤液循环量为50 m^3/h较适宜，因此，真空泵排气口尾气洗涤循环液可按气液体积比400∶1进行设计。

2）尾气在喷淋器中的停留时间对洗涤效果的影响探究

在尾气洗涤过程中，气流速度对洗涤效果的影响较大，分别选用内径为400、500、600、700、800、900、1 000 mm，长5 m的喷淋冷凝器，在喷淋液循环量50 m^3/h下对抽气量20 000 m^3/h的真空泵尾气进行洗涤，尾气在喷淋器中的停留时间分别为0.11、0.18、0.25、0.35、0.45、0.57、0.71 s。研究结果显示，当尾气在喷淋器中的停留时间≥0.35 s时，尾气ρ(F) ≤6 mg/m^3，尾气温度≤39 ℃，达到尾气脱氟、降温效果。因此，尾气在喷淋冷凝器中的停留时间应不少于0.35 s。排放尾气氟含量和温度随停留时间的变化如图2所示。

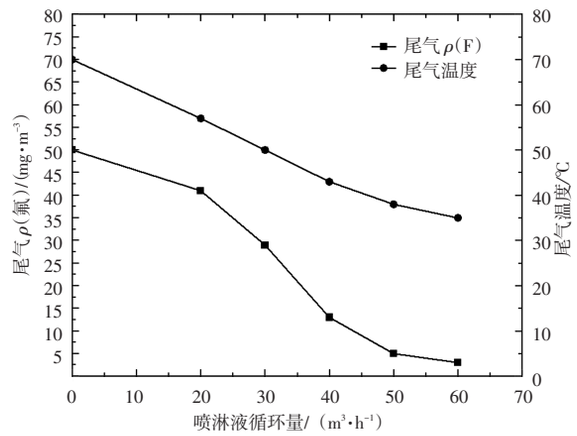

图1　排放尾气氟含量和温度随喷淋液循环量的变化

Fig. 1　Changes in fluoride content and temperature of exhaust emissions with the circulation of spray liquid

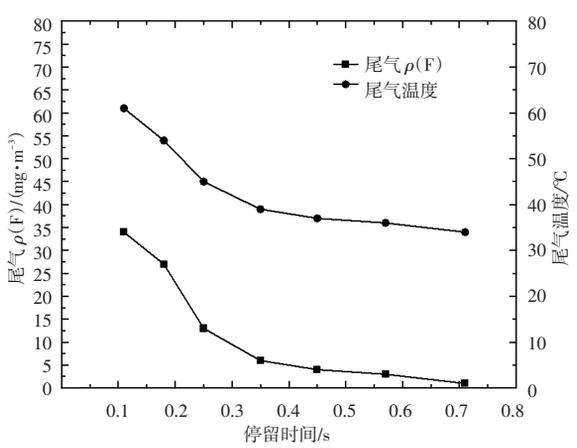

图2　排放尾气氟含量和温度随停留时间的变化

Fig. 2　Changes in fluoride content and temperature of exhaust emissions with residence time

1.2.2　降低真空泵尾气冲击力

在磷酸过滤过程中，为了保证过滤效果，需要控制真空度达40 kPa，因此真空泵的抽气速率较快，排放尾气冲击力较大，且夹带有大量冷凝水，若直接进入喷淋冷凝器，会造成喷头损坏。因此需

要在尾气进入喷淋冷凝器前设置缓冲器，使其压力降低，以降低尾气冲击力；缓冲器设计为U型结构、上进上出，通过离心力的作用脱除部分夹带水。

1.2.3　真空泵尾气除沫

真空泵尾气经过喷淋洗涤后，大部分水蒸气冷凝成水并通过除沫器进行气液分离，将冷凝水进行回收以提高水资源回收利用率，不凝性气体则通过烟囱排空。由于该除沫过程为简单的水和不凝性气体分离，因此采用折流板进行除沫即可。

1.3　湿法磷酸过滤真空泵尾气处理工艺设计

根据以上研究结果，湿法磷酸过滤真空泵尾气采用冷水作为洗涤液进行脱氟、降温处理，尾气进入喷淋冷凝器前通过U型结构缓冲器降低尾气压力，循环量按气液体积比400∶1进行设计，尾气在喷淋冷凝器中的停留时间不少于0.35 s，经过喷淋洗涤后，采用折流板除沫器进行除沫后排空。工艺流程如图3所示。

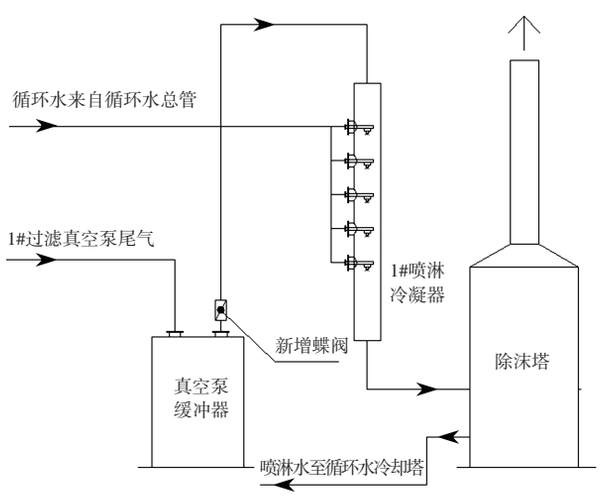

图3　湿法磷酸过滤真空泵尾气处理工艺流程

Fig. 3　Process flow of vacuum pump exhaust treatment of wet-process phosphoric acid filtration

2　湿法磷酸过滤真空泵尾气处理工艺工业应用

云南某工厂有2套湿法磷酸过滤装置，每套配备1台抽气量为17 000 m^3/h的真空泵，按照以上研究结果和工艺流程进行设计。

该工艺投入应用后，过滤装置的工艺参数控制平稳，装置稳定运行，未再出现设备腐蚀影响生产的情况；加装除沫器后，真空泵开、停车时，排放口大量的冲击水进除沫器后得到有效缓冲，排放管口飘液现象明显改善；真空泵排放口排出的尾气经冷凝器喷淋后，尾气温度降至40 ℃，排气量降至原来的1/2，回收水量达13.44 m^3/h，排放尾气ρ(F)稳定控制在5 mg/m^3以下。

3　结论

通过研究开发了磷酸过滤真空泵尾气处理工艺：尾气采用冷水作为洗涤液进行脱氟、降温处理，尾气进入喷淋冷凝器前通过缓冲器降低尾气压力，循环量按气液体积比400∶1进行设计，尾气在喷淋冷凝器中的停留时间不少于0.35 s，经过喷淋洗涤后，采用折流板除沫器进行除沫后排空。该工艺在2台抽气量为17 000 m^3/h的真空泵上工业应用的效果显示，尾气温度由70 ℃降至40 ℃，排气量降至原来的1/2，回收水量达13.44 m^3/h，排放尾气ρ(F)稳定控制在5 mg/m^3以下。该工艺的应用，不仅回收了大量水资源，还消除了尾气排放带来的安全和环保风险，对于湿法磷酸装置安全稳定生产和节约资源有较大意义。

［参考文献］

［1］ 彭灯平，喻军.不同湿法磷酸工艺副产的磷石膏特性研究[J]. 硫磷设计与粉体工程，2023(1)：32-36.
PENG D P，YU J.Study on the Characteristics of Phosphogypsum By-product of Different Wet-process Phosphoric Acid Processes [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering，2023(1)：32-36.

［2］ 杨培发，陈军民，陈志华.我国湿法磷酸生产技术对比[J].磷肥与复肥，2020，35(1)：24-26.
YANG P F，CHEN J M，CHEN Z H.Comparison of WPA production technology in China [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2020，35(1)：24-26.

［3］ 中国五环化学工程公司. 一种二水法湿法磷酸生产工艺方法：CN01138286.4[P]. 2002-08-14.

［4］ 张海燕，明大增，吉晓玲，等. 浅析湿法磷酸脱氟反应原理[J]. 无机盐工业，2015，47(1)：9-12.
ZHANG H Y，MING D Z，JI X L，et al. Analysis on de-fluorination reaction principle of wet process phosphoric acid [J]. Inorganic Chemicals Industry，2015，47(1)：9-12.

［5］ 王喜恒，孙文哲. 湿法磷酸过程氟回收技术研究进展 [J]. 无机盐工业，2020，52 (8)：25-29.
WANG X H，SUN W Z.Research progress on fluorine recovery technology in wet process phosphoric acid [J]. Inorganic Chemicals Industry，2020，52 (8)：25-29.