

◆设备、控制与安全生产◆

湿法磷酸装置带式过滤机技改

王敬东, 刘东伟, 刘大朝

(湖北省黄麦岭控股集团有限公司, 湖北 孝感 432305)

[摘要] 分析湿法磷酸装置过滤系统存在的主要问题, 从理论设计上计算带式过滤机及配套系统参数, 制定带式过滤机技改方案, 包括扩大皮带过滤孔、重新分配过滤区、增加抽液管数量、增大收液总分管径、更换下液管、增大真空气相管径、改造相应配套设备。优化改造后过滤系统不仅能达到预期的生产能力, 同时也能满足工艺控制要求, 滤饼磷石膏中水溶性 P_2O_5 质量分数下降了0.3~0.6百分点, 水质量分数下降了约5百分点, 提高了过滤系统 P_2O_5 洗涤效率, 减少了磷酸装置 P_2O_5 损失, 提升磷酸装置运行效益。

[关键词] 湿法磷酸装置; 带式过滤机; 技改; 效果

[中图分类号] TQ110.5; TQ126.3.5 [文献标志码] B [文章编号] 2097-4566 (2026) 03-0124-05

Technical modification for belt filter in wet-process phosphoric acid plant

WANG Jingdong, LIU Dongwei, LIU Dachao

(Hubei Huangmailing Holding Group Co., Ltd., Xiaogan 432305, China)

Abstract: The main issues in the filtration system of the phosphoric acid plant are analyzed, the parameters of the belt filter and its supporting systems are calculated from a theoretical design perspective, and a technical modification plan for the belt filter is developed, including expanding the filter holes on the belt, redistributing the filtration zones, increasing the number of suction pipes, enlarging the diameter of the liquid collection header, replacing the drainage pipe, increasing the diameter of the vacuum vapor pipe, and modifying the corresponding supporting equipment. After optimization and modification, the filtration system can not only meet the expected production capacity, but also comply with process control requirements. The mass fraction of water-soluble P_2O_5 in the phosphogypsum cake decreases by 0.3 to 0.6 percentage point, and the water mass fraction drops by approximately 5 percentage points. This enhances the P_2O_5 washing efficiency of the filtration system, reduces P_2O_5 losses in the phosphoric acid plant, and improves its operational efficiency.

Key words: wet-process phosphoric acid plant; belt filter; technical modification; effect

0 引言

湖北省黄麦岭控股集团有限公司9万t/a磷酸装置(以 P_2O_5 计)采用美国Jacobs单槽多桨二水工艺^[1], 由美国Jacobs公司提供基础设计、中国五环工程有限公司进行施工设计, 于1996年1月建成投产。2004年通过增设反应熟化槽等技改措施, 将 P_2O_5 产能增加至15万t/a, 磷酸装置投入运行后, 磷酸系统生产能力达到并超过了扩产计划, 但随着生产能力的提高, 生产中也暴露出一系列问题。针对磷酸反应温度超高、反应结晶质量差等实际情况^[2], 2018年6月又进行了增加反应料浆循环量、扩大反应槽中心室进出口、扩大反应真空冷却器料浆出

料管等技改^[3], 改造后彻底解决了磷酸反应系统存在的问题, 但磷酸过滤系统的瓶颈问题一直没有得到解决。2022年7月对磷酸装置过滤系统完成了技改。

1 过滤系统存在的主要问题

1.1 磷石膏中水溶 P_2O_5 含量异常偏高

技改前不同负荷下磷酸装置过滤石膏滤饼中水溶 P_2O_5 含量、过滤洗涤率如表1所示。

从表1可以看出, 技改前设计负荷(100%负荷)下过滤石膏滤饼中水溶 P_2O_5 含量相对较低, 过滤洗涤率较高; 技改前180%负荷下过滤石膏滤饼中水溶 P_2O_5 含量相对较高, 过滤洗涤率较低^[4]。

收稿日期: 2025-04-09

作者简介: 王敬东(1966—), 男, 湖北大悟人, 高级工程师, 湖北省黄麦岭控股集团有限公司总工程师, 长期从事磷化工生产技术研究及管理。

表 1 技改前不同年份及负荷下磷石膏中水溶性 P_2O_5 含量与
过滤洗涤率对比

Table 1 Comparison of water-soluble P_2O_5 content in
phosphogypsum and filtration washing rate under
different years and loads before technical modification

年份	负荷/%	w (水溶性 P_2O_5)/%	过滤洗涤率/%
2002	100	0.48	97.87
2003	100	0.39	98.28
2004	100	0.54	97.53
2005	180	1.01	95.35
2006	180	0.85	95.87
2022	180	1.16	95.11

1.2 过滤区滤饼吸不干

带式过滤机过滤区存在料浆积液，过滤机头部有漏料情况；滤饼进入洗涤区前 $w(H_2O)$ 达到 60% 以上，远高于设计要求的 50%，对洗涤区运行造成不利影响。

1.3 洗涤区经常溢流

由于进入带式过滤机洗涤段过滤滤饼水含量过高，导致 P_2O_5 洗涤后移，洗涤区下液速度较慢，形成大量积液，有时溢流至皮带裙边外。洗涤区的积液溢流，造成资源浪费，为避免这一现象发生，采取如下两项调节措施：一是少量二洗滤液走短路直接溢流至返酸室，不再进入一洗洗箱洗涤滤饼；二是将少量三洗滤液直接串入一洗洗箱进行洗涤。

1.4 管道堵塞严重

过滤真空盒软管频繁堵塞，3~4 d 需清理 1 次；过滤真空盒及收集总管结垢快，堵塞严重^[5]，清理周期达到 7~8 d；过滤气液分离器下酸管清理周期为 7~8 d。

1.5 磷酸装置水不平衡

由于磷酸装置过滤系统存在问题，导致洗涤后移，使石膏水溶性 P_2O_5 含量及水含量偏高，导致磷酸装置水不平衡^[6]。设计要求过滤石膏滤饼 $w(H_2O) \leq 24\%$ ，但实际 $w(H_2O)$ 达到 30% 左右，大量水进入石膏中。磷酸装置 180% 负荷下石膏产生量按 112.5 t/h 计，多带入石膏中的水量为 12.70 t/h；年开工时间按 300 d 计算，每年多带入石膏中的水量达 91 440 t。

2 过滤系统设计分析

2.1 过滤机理论计算基础

过滤系统设计计算内容包括：主过滤区及各洗涤区面积计算，皮带过滤孔气体流速与液体流速、抽液管液体流速与气体流速、收液总管气体流速与

液体流速、下液管液体流速、气相总管气体流速等核算以及真空泵配置。过滤系统的设计计算比较复杂，很多条件是相互影响的。为进行正常设计，需要固定某些条件，例如，主过滤区滤饼或各洗涤区滤饼固含量、主过滤区或各洗涤区过滤强度、主过滤区或各洗涤区过滤常数、过滤透气量、过滤操作压力等参数。而这些参数会随操作条件、过滤料浆性质及过滤效果而变化，同时也会影响主过滤区和各洗涤区过滤机面积计算以及各管路气体流速与液体流速核算^[7]。

2.1.1 过滤面积

主过滤区及各洗涤区过滤面积由式(1)计算：

$$A=q/q_0 \quad (1)$$

式中 A ——主过滤区或各洗涤区过滤面积， m^2 ；
 q_0 ——主过滤区或各洗涤区过滤滤液流量， m^3/h ；
 q ——主过滤区或各洗涤区过滤强度， $m^3/(m^2 \cdot h)$ 。

2.1.2 过滤强度

主过滤区和各洗涤区过滤强度 q 由过滤方程确定，见式(2)：

$$q^2 + 2q \cdot q_0 = K \cdot \theta \quad (2)$$

式中 q_0 ——主过滤区或各洗涤区滤布流体阻力的过滤常数， m^3/m^2 ；
 K ——考虑到主过滤区或各洗涤区过程的流体动力学条件和滤饼及滤液物理化学性质的过滤常数， m^2/h ；
 θ ——过滤时间，1 h。

2.1.3 过滤常数

二洗涤区、三洗涤区过滤常数由式(3)、(4)计算：

$$K_1 \times \mu_1 = K_2 \times \mu_2 \times 0.8; \quad (3)$$

$$K_2 \times \mu_2 = K_3 \times \mu_3 \times 0.8. \quad (4)$$

式中 K_1 、 K_2 、 K_3 ——一洗涤区、二洗涤区、三洗涤区的过滤常数， m^2/h ；

μ_1 、 μ_2 、 μ_3 ——一洗涤区、二洗涤区、三洗涤区过滤滤液的黏度， $mPa \cdot s$ ；

0.8——考虑到滤布上滤饼密实度的系数。

2.2 100% 负荷 (12.5 t/h P_2O_5) 下带式过滤机设计计算
公司磷酸装置过滤系统采用美国 EIMCO 带式过滤机，有效过滤面积 72.15 m^2 ，皮带过滤孔数 471 个，抽液管 23 根，采用 3 次逆流洗涤^[8]。

带式过滤机原始设计参数如表 2 所示。

由磷酸装置物料热量平衡计算，可得 100% 负荷下带式过滤机主过滤区及各洗涤区滤液流量，结果见表 3。根据实验数据可知主过滤区和各洗涤区滤布流体阻力的过滤常数 $q_0 = 0.94 m^3/m^2$ ，主过滤区的过滤常数 $K = 15.00 m^2/h$ ，一洗涤区过滤常数 $K_1 = 17.90 m^2/h$ ，一洗涤区过滤滤液的黏度 $\mu_1 = 4.379 mPa \cdot s$ ，二洗涤区过滤滤液的黏度 $\mu_2 = 3.200 mPa \cdot s$ ，三洗涤区过滤滤液的黏度 $\mu_3 = 3.139 mPa \cdot s$ 。

表2 带式过滤机原始设计参数

Table 2 Original design parameters of belt filter

序号	区域名称	过滤面积/m ²	皮带过滤孔数	抽液管参数		收液总管		下液管直径/mm	气相总管管径/mm	真空泵进口管管径/mm
				直径/mm	根数	直径/mm	根数			
1	主滤浑浊段	4.62	30	100	2	200	1	150	400	400
	主滤主滤区	13.68	89	100	5	300	1	200		
2	一洗	22.00	144	100	6	300	1	250		
3	二洗	10.55	69	100	4	300	1	250		
4	三洗	21.30	139	100	6	300	1	200		

注：①皮带中心孔径 20 mm；②真空盒长 24.05 mm；③总过滤面积 72.15 m²，皮带过滤孔数 471，抽液管共 23 根。

表3 100%负荷下带式过滤机设计计算结果

Table 3 Design calculation results of belt filter under 100% load

序号	区域名称	过滤常数/(m ² ·h ⁻¹)	过滤强度/(m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)	滤液流量/(m ³ ·h ⁻¹)	过滤面积/m ²			真空泵进口管管径/mm
					不考虑富余	考虑富余	调整后	
1	主滤浑浊段	15.00	3.05	11.22	3.68	4.60	4.60	400
	主滤主滤区	15.00	3.05	33.67	11.06	13.82	13.82	
2	一洗	17.90	3.39	64.04	18.87	23.60	20.22	
3	二洗	30.62	4.67	57.13	12.23	15.30	13.11	
4	三洗	39.01	5.38	52.12	9.69	12.10	20.40	

注：①皮带中心孔径 20 mm；②真空盒长 24.05 mm。

依据式（3）、（4），可分别计算出二洗涤区、三洗涤区过滤常数分别为 30.62、39.01 m²/h。

由式（2）可分别计算出主过滤区和各洗涤区过滤强度 q 。

由式（1）可分别计算出主过滤区和各洗涤区过滤面积 A 。经计算所需总过滤面积为 55.53 m²（不考虑富余），考虑富余 25% 时，所需总过滤面积为 69.42 m²。为了保证末级洗涤后石膏滤饼足够干，需对过滤面积进行调整，即增大三洗涤区面积（按设计总过滤面积 72.15 m² 调整）。

2.3 180% 负荷（22.5 t/h P₂O₅）下带式过滤机设计计算

由磷酸装置物料热量平衡计算可得 180% 负荷下带式过滤机计算结果见表 4。根据实验数据可知，主过滤区和各洗涤区滤布流体阻力的过滤常数 $q_c = 0.94 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ，主过滤区过程过滤常数 $K = 15.00 \text{ m}^2/\text{h}$ ，

一洗涤区过程的过滤常数 $K_1 = 17.90 \text{ m}^2/\text{h}$ ，一洗涤区过滤滤液的黏度 $\mu_1 = 4.692 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ，二洗涤区过滤滤液的黏度 $\mu_2 = 3.332 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ，三洗涤区过滤滤液的黏度 $\mu_3 = 3.187 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

由式（3）、（4）可分别计算出二洗涤区、三洗涤区过程的过滤常数分别为 31.51、41.17 m²/h。

由式（2）可分别计算出主过滤区和各洗涤区过滤强度 q 。

由式（1）可分别计算出主过滤区和各洗涤区过滤面积 A 。所需总过滤面积为 108.92 m²（不考虑富余）和 136.14 m²（考虑富余 25%），为了保证末级洗涤后石膏滤饼足够干，需对过滤面积进行调整，即增大三洗涤区面积（按设计总过滤面积 136.14 m² 调整）。

180% 负荷下带式过滤机辅助配管设计计算结果如表 5 所示。

表4 180%负荷下带式过滤机设计计算结果

Table 4 Design calculation results of belt filter under 180% load

序号	区域名称	过滤常数/(m ² ·h ⁻¹)	过滤强度/(m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)	滤液流量/(m ³ ·h ⁻¹)	过滤面积/m ²			真空泵进口管管径/mm
					不考虑富余	考虑富余	调整后	
1	主滤浑浊段	15.00	3.05	25.61	8.41	10.51	10.51	600
	主滤主滤区	15.00	3.05	102.45	33.64	42.05	42.05	
2	一洗	17.90	3.39	110.69	32.61	40.76	35.88	
3	二洗	31.51	4.75	91.78	19.32	24.15	21.25	
4	三洗	41.17	5.55	82.87	14.94	18.67	26.45	

注：①皮带中心孔径 20 mm；②真空盒长 24.05 mm。

表 5 180% 负荷下带式过滤机辅助配管设计参数

Table 5 Auxiliary piping design parameters of belt filter under 180% load

序	区域名称	皮带过滤孔数	抽液管参数		收液总管		下液管 直径/mm	气相总管 管径/mm	真空泵进口管 管径/mm
			直径/mm	根数	直径/mm	根数			
1	主滤浑浊段	47	100	2	200	1	200	600	500
	主滤主滤区	183	100	19	400	1	300		
2	一洗	156	100	12	350	1	300		
3	二洗	97	100	8	350	1	300		
4	三洗	115	100	9	350	1	250		

注：①皮带中心孔径 25 mm；②真空盒长 30.25 mm。

2.4 小结

从以上带式过滤机设计计算可以看出，现有带式过滤机配置情况与 100% 负荷下设计计算结果基本一致，过滤系统的实际运行情况也验证了这一点。但是现有带式过滤机配置情况不能满足 180% 负荷下磷酸装置经济、有效开车的需求，具体问题表现在：过滤面积偏小，过滤分区不合理的需求^[9]，皮带孔气速、液速较高，抽液管、收液总管、下液管气速、液速都偏高，气相总管气速也较高。

3 过滤系统改造方案

综合以上设计计算结果，在保证带式过滤机有效过滤面积 72.15 m² 不变情况下，通过优化调整过滤分区过滤面积、优化各段配管后，制定过滤系统改造方案如下。

3.1 扩大皮带过滤孔

带式过滤机设计皮带中心孔径为 20 mm，将其优化改造为 25 mm。改造后，皮带过滤孔气速控制在 20 m/s 以下，液速控制在 0.55 m/s 以下。

3.2 重新分配过滤分区

在保持总过滤面积不变的情况下，重新调整各区域过滤面积：保持过滤浑浊段过滤面积不变，主滤区面积增加 1.8 m²，一洗段面积减少 3.1 m²，二洗段面积增加 4.45 m²，三洗段面积减少 3.15 m²，过滤真空盒和洗水分配箱按面积分区做相应调整^[10]。

3.3 增设抽液管数量

保持过滤浑浊段抽液管数量不变，将主滤区抽液管增加 7 根，一洗区抽液管增加 4 根，二洗区抽液管增加 3 根，三洗区抽液管增加 5 根，总计增加 19 根。改造后，抽液管气速控制在 15 m/s 以下，液速控制在 0.50 m/s 以下。

3.4 增大收液总管管径

保持过滤浑浊段收液总管管径不变，将主滤区收液总管管径增大至 400 mm，一洗区收液总管管径增大至 350 mm，保持二洗区、三洗区收液总管管径不变。改造后，收液总管气速控制在 10 m/s 以下，液速控制在 0.40 m/s 以下。

3.5 更换下液管

过滤浑浊段下液管管径调整为 200 mm，主滤区、一洗区、二洗区下液管管径增大至 300 mm，三洗区下液管管径增大至 250 mm，改造后下液管液速控制在 0.50 m/s 以下。

3.6 增大真空气相管管径

真空气相总管管径增大至 500 mm，改造后真空气相总管气速控制在 20 m/s 以下^[11]。

3.7 改造相应配套设备

气液分离器和酸捕集器等也配套进行了改造，气液分离器和酸捕集器等设备容积扩大至 1.6 ~ 1.8 倍，保证各设备气速控制在 18 m/s 以下。

带式过滤机优化改造后参数如表 6 所示。

表 6 优化改造后带式过滤机参数

Table 6 Parameters of belt filter after technical renovation

序号	区域名称	过滤面积/m ²	皮带过滤孔数	抽液管参数		收液总管		下液管 直径/mm	气相总管 管径/mm	真空泵进口管 管径/mm
				直径/mm	根数	直径/mm	根数			
1	主滤浑浊段	4.62	30	100	2	200	1	200	500	400
	主滤主滤区	15.48	101	100	12	400	1	300		
2	一洗	18.90	123	100	10	350	1	300		
3	二洗	15.00	99	100	7	300	1	300		
4	三洗	18.15	118	100	11	300	1	250		

注：①皮带中心孔径 25 mm；②真空盒长 24.05 mm。

4 技改效益和效果对比

4.1 技改效果

磷酸装置过滤系统技改运行至今已有两年多的时间,总体运行效果较好。

具体表现为:带式过滤机过滤区滤饼距离过滤给料分布箱1 m左右的位置已无积液,进入洗涤区滤饼 $w(\text{H}_2\text{O})$ 降至50%以下;洗涤区明显无积液,各级洗涤不存在串洗现象,洗涤效果良好,滤饼末端石膏中水溶性 P_2O_5 含量及水含量大幅度下降, w (水溶性 P_2O_5)下降了0.3~0.6百分点, $w(\text{H}_2\text{O})$ 下降了约5百分点;技改后过滤真空盒软管清理周期由7~8 d延长1倍以上,过滤真空盒及收集总管清理频率达到15 d左右一次,过滤气液分离器下酸管15 d左右拆清一次。

4.2 运行效益

2023年及2024年两年共生产稀磷酸(以 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 100%计)22.6万t,副产磷石膏110万t,石膏中水溶性 P_2O_5 质量分数按下降0.4百分点计算,共回收水溶性 P_2O_5 4 400 t,共降低成本2 400余万元,节能降耗效果非常显著。

〔参考文献〕

- [1] 黄文雄,郭国清.湿法磷酸、磷酸二铵大型国产化装置综述[J].硫磷设计与粉体工程,2006(1):12-17.
HUANG W X, GUO G Q. Overview of large-sized domestic wet phosphoric acid and diammonium phosphate plants [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2006(1): 12-17.
- [2] 陈春.二水物湿法磷酸过滤工艺优化研究[J].硫磷设计与粉体工程,2024(5):31-34.
CHEN C. Optimization of dihydrate wet phosphoric acid filtration process [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2024(5): 31-34.
- [3] 王冲.二水湿法磷酸装置扩产改造[J].磷肥与复肥,2010,25(2):25-28.
WANG C. Expand production and transformation for dehydrated WPA plant[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2010, 25(2): 25-28.
- [4] 杨雪光,白付明.磷矿浆粒径对磷矿中 P_2O_5 萃取率和磷石膏中 P_2O_5 洗涤率的影响[J].肥料与健康,2021,48(3):27-28,55.
YANG X G, BAI F M. Effect of particle size of phosphate rock slurry on the extraction rate of P_2O_5 in phosphate rock and the washing rate of P_2O_5 in phosphogypsum [J]. Fertilizer & Health, 2021, 48(3): 27-28,55.
- [5] 邓金玉.二水湿法磷酸生产中减轻过滤系统堵塞的措施[J].磷肥与复肥,2007,22(5):44-45.
- [6] 唐晓林,易元志,邓强,等.川恒30 kt/a湿法磷酸装置水系统优化及实践[J].硫磷设计与粉体工程,2018(2):37-41.
TANG X L, YI Y Z, DENG Q, et al. Optimization and practice of water system in 30 kt/a wet-process phosphoric acid plant of Chanheng [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2018(2): 37-41.
- [7] 时钧.化学工程手册[M].2版.北京:化学工业出版社,1996:22-42.
- [8] 姚公弼,张志勇.滤饼洗涤效率曲线测定和多级逆流洗涤计算方法讨论[J].医药工程设计,1990(1):1-7.
- [9] 全国化工设备设计技术中心站机泵技术委员会.工业离心机和过滤机选用手册[M].北京:化学工业出版社,2014:249-252.
- [10] 竺基梅.提高过滤速度的因素和过滤参数的选择[J].化工与通用机械,1981(4):28-32.
- [11] 严世科.磷酸装置转盘式过滤机长周期稳定运行探讨[J].磷肥与复肥,2016,31(8):46-47.
YAN S K. Discussion on long period stable operation of rotating disc filter of phosphoric acid plant [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016, 31(8): 46-47.

2025年我国肥料进出口情况

出口情况:根据海关统计,2025年1—12月,我国累计出口各种肥料4 627万t,同比增幅为44%;累计出口金额137.55亿美元,同比增幅为57.9%。其中,尿素累计出口489万t,同比增幅为1 778.1%;硫酸铵累计出口2 136万t,同比增幅为24.7%;磷酸二铵累计出口348万t,同比降幅为23.8%;磷酸一铵累计出口188万t,同比降幅为6.3%。按养分折算,2025年1—12月我国累计出口的尿素、硫酸铵、磷酸铵折氮磷钾纯养分分别为1 009万t。

进口方面,2025年1—12月,我国累计进口氯化钾1 261万t,同比降幅为0.1%;氮磷钾三元复合肥累计进口117万t,同比降幅为4.5%。按养分折算,2025年1—12月,我国累计进口的氯化钾和三元复合肥折氮磷钾纯养分分别为812.8万t。

1—12月我国主要粮油类农产品(谷物、豆类和植物油)折算隐性进口化肥折纯养分828.5万t,同比降幅为8.8%。

(摘自烽火台公众号)