

◆磷及关联产业工艺创新◆

湿法磷酸生产电池用磷酸一铵技术及产业化应用

杜建波, 龙文恒, 薛河南, 周 山, 李贵聪, 徐振玲, 徐成波

(云南云天化股份有限公司, 云南 昆明 650309)

[摘 要] 介绍云南某公司 50 kt/a 结晶型水溶性磷酸一铵装置生产工艺, 以及采用湿法磷酸为原料生产电池用磷酸一铵存在的技术问题。针对原装置存在的问题进行全面分析及技术攻关, 制定优化技术改造方案, 通过开展全流程评价实验确定方案的可行性后, 对原装置实施了技术改造, 并通过装置 72 h 性能考核, 验证和评价了实施技术改造后目标的实现情况和工艺指标的改善情况。结果表明, 湿法磷酸经预处理脱硫、脱砷、膜过滤、两段氨化及脱镁后, 可生产出满足电池用磷酸一铵管控指标要求的产品; 装置技改后, 产量达到设计产能, 工艺控制稳定; 以湿法磷酸为原料, 氨法净化除杂后生产电池用磷酸一铵经济效益显著。

[关键词] 电池用磷酸一铵; 评价实验; 技术改造; 性能考核

[中图分类号] TQ442.14; TQ126.3*5 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2025) 04-0033-07

Technology and industrial application of production of monoammonium phosphate for batteries from wet-process phosphoric acid

DU Jianbo, LONG Wenheng, XUE Henan, ZHOU Shan, LI Guicong, XU Zhenling, XU Chengbo
(Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming 650309, China)

Abstract: The process of a 50 kt/a crystalline water-soluble monoammonium phosphate plant in a company in Yunnan, as well as the technical issues of using wet-process phosphoric acid as raw material to produce monoammonium phosphate for batteries are introduced. A comprehensive analysis and technical breakthrough are conducted on the problems existing in the original equipment, and a process optimization technology transformation plan is formulated. After conducting a full process evaluation test to determine the feasibility of the plan, the original plant is subjected to technical transformation. Through 72 hours performance assessment of the plant, the achievement of the goals and improvement of the process indicators after the implementation of the technical transformation are verified and evaluated. The results indicate that wet-process phosphoric acid can be used to produce products that meet the control indicators of monoammonium phosphate for batteries after pretreatment for desulfurization, arsenic removal, membrane filtration, two-stage ammonification and magnesium removal; After the technological transformation of the device, the output reaches the design capacity, and the process control is stable; The economic benefits of producing monoammonium phosphate for batteries using wet-process phosphoric acid as raw material and ammonia purification for impurity removal are significant.

Key words: monoammonium phosphate for batteries; evaluation test; technological transformation; performance assessment

0 引言

云南某公司 100 kt/a 设施农业用水溶性磷酸一铵 (MAP) 装置依托原 220 kt/a 料浆法磷酸一铵^[1]装置进行技术改造, 装置在利旧原装置闲置中和反应系统、真空浓缩系统^[2]、喷雾干燥系统^[2]的基础上^[2], 于 2021 年 1 月建成了一套具有 50 kt/a 粉状水溶性磷酸一铵和 50 kt/a 结晶型水溶性磷酸一铵两个系列的生产装置, 装置建成后生产设施农业用水溶性磷酸一铵。

随着电池用磷酸铁/磷酸铁锂^[3]快速发展, 生产磷酸铁的原料优质结晶型磷酸一铵需求量增大。磷酸铁铵法工艺^[3]为大多数新能源厂家采用的主流工艺, 优质结晶型磷酸一铵^[4]作为磷酸铁生产的主要原料, 未来需求量大。

对照新能源电池厂家对电池用磷酸一铵原料质

[收稿日期] 2025-03-05

[作者简介] 杜建波(1983-), 男, 云南楚雄人, 高级工程师, 研究方向为磷复肥工艺、新能源材料。

量的指标要求，公司 50 kt/a 结晶型水溶性磷酸一铵装置所生产的产品镁、钠、钾、钙、硫均超标。结合装置现有工艺流程，制定 50 kt/a 结晶型水溶性磷酸一铵生产电池用磷酸二氢铵技术方案，并在实验室开展全流程评价实验，且在实验成功的基础上，对原结晶型水溶性磷酸一铵装置实施技术改造，对生产控制进行工艺优化，最终生产出满足磷酸铁生产要求的结晶型磷酸一铵产品。

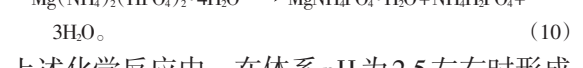
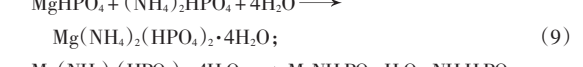
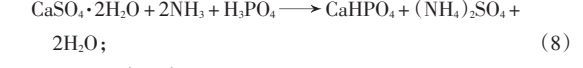
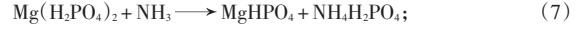
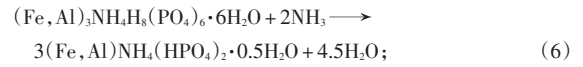
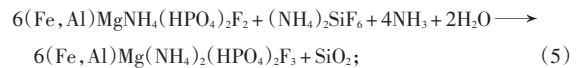
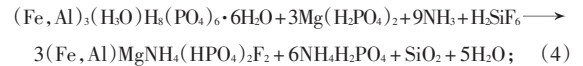
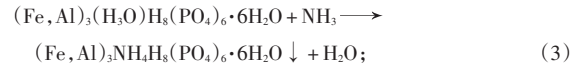
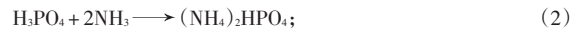
1 原装置工艺简述

结晶型水溶性磷酸一铵在农业上是高纯度的氮磷二元复合肥料，也是生产氮磷钾三元复合（混）肥^[5]的基础原料。由于其具有全水溶性，可用于生产滴灌肥、喷施肥，显著提高了水资源和化肥的利用率，减少了环境污染。

1.1 生产原理

原装置采用湿法磷酸氨中和直接净化法^[5]工艺生产水溶性磷酸一铵。先将湿法磷酸预净化，以脱硫、脱砷并除去悬浮物，再对预净化磷酸进行氨中和净化，脱除磷酸中的铁、铝、镁、氟和钙等杂质，分离杂质后即得磷酸一铵溶液。磷酸一铵溶液经两级浓缩后^[6]进行冷却结晶^[7]、离心分离晶体，晶体经流化床干燥后得到水溶性磷酸一铵产品。

水溶性磷酸一铵生产中发生的化学反应如下：



上述化学反应中，在体系 pH 为 2.5 左右时形成水溶性物质（如反应（1））和枸溶性物质（如反应（3）和（4））；当 pH 升到 4.35 时，则生成铁铝复合物^[8]（如反应（5）和（6）），同时析出磷酸氢钙和磷酸氢镁（如反应（7）和（8））；pH 进一步升高到 5.6 以上，会形成磷酸铵镁和磷酸氢钙。

1.2 工艺流程

结晶型水溶性磷酸一铵生产以湿法磷酸和液氨为主要原料，装置主要由预处理工序、氨化除杂^[8]工序、真空浓缩工序、蒸发结晶干燥工序组成，工艺流程如图 1 所示。

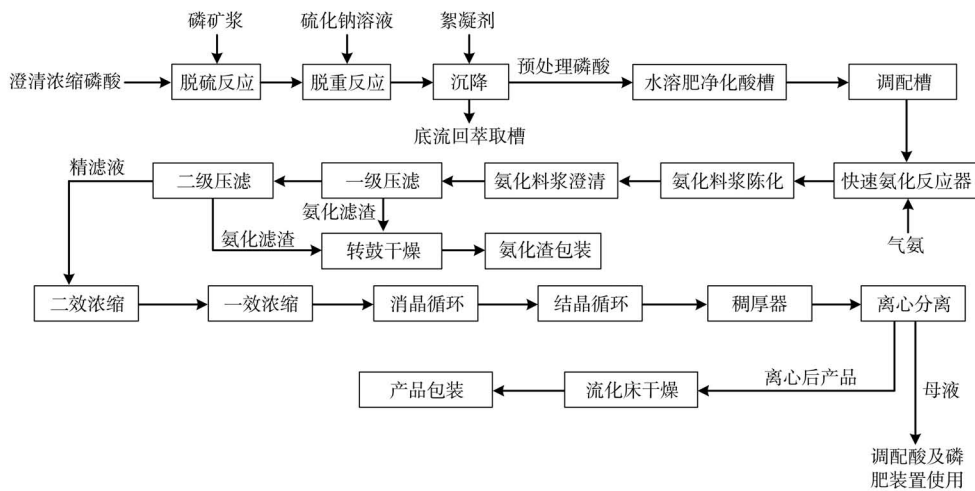


图 1 结晶型水溶性磷酸一铵生产工艺流程

Fig. 1 Process flow of crystalline water-soluble MAP

装置主要工艺流程为湿法磷酸用除杂剂脱硫脱重后，通入氨气进行中和反应，所得料浆经过两级压滤^[8]，滤液为磷酸一铵清液，进入 MAP 滤液槽，经浓缩、结晶、离心分离、干燥后形成产品；滤饼^[8]为水不溶的铁、铝、镁的磷酸盐，可直接

作为枸溶性磷肥。

2 原装置存在的问题及分析

该公司 50 kt/a 结晶型水溶性磷酸一铵装置生产的产品满足工业磷酸一铵 HG/T 4133—2021 的指标要求，但对标某新能源电池厂家的电池用磷酸一铵

原料质量指标,其金属杂质钙(Ca)、镁(Mg)、钠(Na)含量明显偏高(见表1)。

经对公司50 kt/a结晶型水溶性磷酸一铵装置生产原料、工艺指标及运行工况的调查,结合装置生产工艺进行分析后,得出磷酸一铵产品杂质主要是

原料湿法磷酸带入,装置现有除杂工序的除杂深度不能满足要求。

装置生产的磷酸一铵产品中Ca、Mg、Na含量指标,多组产品数据高于标杆值,且波动较大,具体情况见表2。

表1 现行产品与电池厂家要求的产品指标对比

Table 1 Comparison of current product index with product index required by battery manufacturers

项目	$w(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/\%$	pH(10 g/L 水溶液)	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$w(\text{F})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{As})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Ca})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Mg})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Na})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{K})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Mn})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
HG/T 5742—2020 《电池用磷酸二氢铵》要求	≥99.0	4.2~4.8	≤0.2	15	2	20	10	50	50	5
电池厂家指标要求	≥98.0	4.2~4.8	≤0.5	≤200	≤20	≤100	≤500	≤200	≤3 500	≤500
公司产品实测值	100.6	4.8	未检出	30	4.81	450	660	250	700	420

表2 结晶型磷酸一铵产品质量

Table 2 Product quality of crystalline MAP

项目	$w(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	$w(\text{F})/\%$	$w(\text{As})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Mn})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Mg})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Ca})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Na})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{K})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
标杆值	≥98.0	≥60.5	≤0.02	≤20	≤500	≤500	≤100	≤200	≤3 500
磷酸一铵 产品	98.32	60.63	0.016 2	0.78	252.5	384.7	223.8	159.4	702.2
	98.62	60.82	0.012 7	0.54	259.9	393.8	218.5	172.9	783.8
	98.25	60.59	0.018 1	0.04	222.5	364.8	218.8	158.5	810.2
	98.65	60.83	0.017 4	0.19	292.1	453.5	311.2	222.2	1 010.0
	98.42	60.69	0.018 9	0.42	201.6	484.2	337.7	150.2	665.9
	98.74	60.89	0.015 6	1.06	256.9	488.3	432.5	193.5	854.8
	98.72	60.88	0.017 2	0.67	350.8	608.5	802.5	257.4	987.4
	98.74	60.89	0.018 2	0.26	470.6	755.2	1 209.0	374.6	1 165.0
	98.85	60.96	0.017 0	0.54	456.2	689.7	1 219.0	344.6	1 160.0
	99.03	61.07	0.017 7	0.41	351.7	611.7	721.5	271.4	1 007.0

通常,降低结晶型磷酸一铵产品中金属杂质从两方面入手,一是提高金属杂质的脱除深度,降低金属杂质含量,对于湿法磷酸氨化除杂工艺而言,需通过提高预处理酸质量,以及优化氨化除杂工艺,提高对金属杂质的脱除率^[9];二是应从结晶入手,改善磷酸一铵产品结晶,力争得到较为粗大、均匀的结晶,从而降低结晶表面夹带的母液量,进而降低产品金属杂质含量。

因此,为了在50 kt/a结晶型水溶性磷酸一铵装置上以湿法磷酸为原料生产出满足磷酸铁生产要求的结晶型磷酸一铵产品,需要从原料湿法磷酸预处理工序^[10]进行调整,主要是对脱硫、脱砷等工艺指标进行优化,合理控制预处理酸中钙含量指标;另外目前装置氨化除杂不彻底且无深度脱镁工序,针对装置存在缺陷的实际,有针对性地制定水溶性磷酸一铵装置生产电池用磷酸一铵技术方案,对原料磷酸预处理工序、氨化除杂^[11]等工序进行改造

及工艺优化。

根据制定的50 kt/a结晶型水溶性磷酸一铵装置生产电池用磷酸一铵技术方案,开展了湿法磷酸制备电池用磷酸一铵评价实验,通过对原料磷酸预处理、氨化反应、深度除杂、母液处理等工序进行评价验证,为后续装置技术改造及工业试生产提供理论支持及技术依据。

3 工艺优化及技术改造

通过开展电池用磷酸一铵评价实验,主要对预处理、氨化反应、除杂工艺、母液处理工艺^[10]进行了实验评价,基于评价结论确定了各主要工序的较优工艺及条件,所得磷酸一铵产品达到电池厂家对原料的指标要求,为后续装置技术改造及工业试生产成功奠定基础。

3.1 预处理工序优化及技改

电池用磷酸一铵生产工艺优化,主要对装置预处理工序、氨化反应工序等进行了工艺优化,结合

评价实验结论，对电池用磷酸一铵工业试生产做出技术要求。

3.1.1 工艺优化

1) 工艺流程简述

以 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 47%澄清浓缩磷酸^[7]为原料，首先加入磷矿浆进行脱硫反应，再加入硫化钠溶液进行

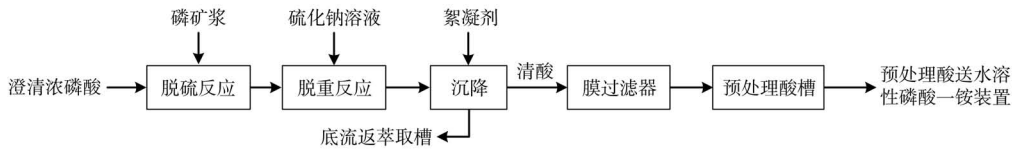


图2 预处理工序工艺流程

Fig. 2 Process flow of pretreatment process

2) 工艺管控要点

脱硫反应磷矿浆加入量按酸矿体积比(10~20):1加入，反应时间2~8 h，温度一般控制在80℃以内；净化原料磷酸一般建议 $w(\text{P}_2\text{O}_5) \geq 47.0\%$ ， $w(\text{SO}_4^{2-}) < 30\%$ ， $w(\text{As}) < 30 \times 10^{-6}$ ， $w(\text{固}) \leq 0.6\%$ 。脱重反应加入硫化钠溶液，反应温度和反应时长与脱硫反应相似。

3.1.2 技术改造

增加膜过滤工序：启用精密过滤器^[13](膜过滤器)，增加了初级净化酸膜过滤工艺^[13]，并对酸质指标进行优化，将脱硫脱砷的预处理酸送至原酸罐区的2台膜过滤器进行过滤，过滤后的酸去水溶性磷酸一铵装置，在原有工艺管道的基础上只对部分工艺管线进行碰口搭接即可完成改造。

脱砷反应，反应完毕后所得反应料浆与絮凝剂^[7]溶液混合后，送入沉降槽进行自然沉降^[12]，沉降所得清酸经泵送入膜过滤器^[13]过滤后，所得清酸经中间槽泵送入预处理酸槽，然后送往水溶性磷酸一铵装置使用。

工艺流程如图2所示。

3.2 氨化反应工序优化及技改

通过优化氨化反应工艺，将原单段氨化反应工艺改为两段氨化反应工艺，并引入氟化铵溶液，提升现有快速氨化器的反应能力，并提高对金属杂质的除杂效果。

3.2.1 工艺优化

1) 工艺流程简述

预处理酸先与水经混合器进行混合，然后进入调酸槽与来自母液槽的部分母液进行混合后，送入快速氨化反应器，与氨气进行一段氨化反应，然后送入二段氨化反应器，与氨气进行二段氨化反应，同时向二段氨化反应器中加入氟化铵溶液，经陈化，所得中和料浆送入压滤工序。

工艺流程如图3所示。

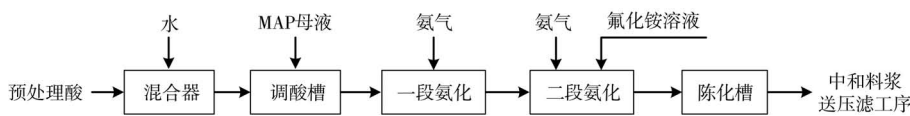


图3 氨化反应工序工艺流程

Fig. 3 Process flow of the ammonia reaction process

2) 工艺管控要点

配酸时母液的加入量做好调控，一般建议回用60%左右；调配酸相对密度一般控制在1.10~1.25；一段氨化和二段氨化的通氨量占比在5:3左右；氟化铵溶液根据实际生产调配浓度，一般 $w(\text{NH}_4\text{F})$ 在10%~20%，一段、二段氨化反应器液位均保持高位操作。

3.2.2 技术改造

1) 新增混酸器

调酸槽增加混酸器，膜过滤酸先进入混酸器与水混合后再进入调酸槽，再与结晶母液混合调酸，调配后的混酸再进入快速氨化反应器进行氨化反

应，此工段只新增一组混酸器。

2) 新增二段氨化反应器

增加二段氨化反应工序，即将原快速氨化反应器作为一段氨化反应器，利用原陈化槽，新增气氨输送管线和调节系统成为二段氨化反应器，从而延长反应时间，增强除杂能力和改善料浆过滤性能；在陈化槽新增气氨管线及计量控制器，满足二段氨化反应的工艺要求。

3) 新增深度除杂系统

针对电池原料指标要求，增加脱镁工序及氟化铵溶解添加系统，向二段氨化反应器中添加 $w(\text{NH}_4\text{F})$ 20%的氟化铵溶液，在原装置的基础上利用现有空地

新增氟化铵溶解槽、氟化铵料液输送泵及计量控制器。

3.3 结晶离心工序

为控制好产品质量，除了预处理工序、氨化反应工序之外，还需做好产品结晶控制，力争得到粒度较为粗大、均匀的磷酸一铵结晶，对结晶过程及离心分离操作优化如下：(1) 结晶器中 $w(\text{固})$ 15%~30%，结晶温度 50~60℃；(2) 离心分离过程引入少量冷凝水对结晶进行洗涤，洗涤水量控制为 0.2~0.5 m³/h，洗涤水以雾化方式喷淋于离心机转鼓内晶体表面，操作方式为连续冲洗，减少晶体表面对于母液的夹带。

3.4 母液处理工序

为了提高氨化除杂过程中对于钙、镁杂质的脱除率，特别是钙的脱除率，采用对部分母液进行处理，即将部分母液先与工艺水混合后，调节相对密度为 1.17~1.19，通入氨气进行反应，控制 pH 至 6.5~7.0，反应完毕后，所得料浆经母液处理泵送入二段氨化反应器。

4 产业化应用及性能考核情况

该公司对 50 kt/a 结晶型水溶性磷酸一铵装置实施技术改造后，装置运行工况及产品质量稳定，随后对装置开展了 50 kt/a 结晶型水溶性磷酸一铵装置生产电池用磷酸一铵性能考核，对装置生产能力、产品质量、生产消耗、过程控制、装置运行及安全

环保等方面进行验证。72 h 性能考核结果表明，装置产能达到设计值，产品各项质量指标达到预期目标，装置生产消耗、制造成本、产品质量等均能达到预期目标。

4.1 生产能力

考核期间共生产结晶型磷酸一铵（包装量）505.8 t，生产负荷达到 50 kt/a 磷酸一铵装置设计能力^[13]的 101.26%，小时生产负荷基本维持在 6.00~7.10 t/h，按有效运行 72 h 的开车时间计算平均为 7.03 t/h（见表 3）。

表 3 性能考核期间产量

Table 3 Output during the performance assessment period

项目	72 h 产量/t	日生产能力/(t·d ⁻¹)	小时产量/(t·h ⁻¹)
目标值	499.50	166.50	6.93
实际值	505.80	168.60	7.03

本次性能考核期间共产生副产品氨化渣^[14] 354 t（折干基），副产品（湿基）中 $w(\text{总养分})$ 37.38%， $w(\text{总氮})$ 6.23%， $w(\text{有效磷})$ 31.15%， $w(\text{水})$ 32.01%。

4.2 产品主要原料及公用工程消耗

本次装置性能考核期间主要原料及公用工程的消耗达到设计值（见表 4），电耗稍有增加的原因主要是新增部分用电设备。

表 4 原料及公用工程消耗

Table 4 Raw materials and utilities consumption

项目	$m(\text{氨})(\text{以 } w(\text{NH}_3))$ 100%计)/kg	$m(\text{磷酸})(\text{以 } \text{P}_2\text{O}_5 \text{ 计})/\text{kg}$	$V(\text{工艺水})/$ m ³	电量/ (kW·h)	蒸汽量/ t	仪表空气量/ m ³	包装线量/ kg	包装袋量/ 条	
72 h 消耗量	115 400	751 000	720	106 051	952	3 773			
吨产品 消耗量	实际值	228	1 040.94	1.42	209.66	1.89	7.45	0.024	40.03
	设计值	≤260	≤1 050	≤5	≤205	≤2	≤2.16	≤0.025	≤40.05

4.3 工艺指标管控及杂质去除比对

装置 72 h 性能考核期间主要工艺指标均控制在目标管控范围内，较为稳定（见表 5），尤其是一段、二段氨化反应控制系统在优化改造后，氨化料

浆^[13] pH 能够精确控制，料浆的过滤性能得到稳定控制和改善，为装置满负荷完成考核提供了条件基础。

技改前后系统中杂质去除情况对比见表 6。

表 5 性能考核期间工艺指标

Table 5 Process index during the performance assessment period

项目	调酸 相对密度	调酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	一段氨化 反应 pH	二段氨化 反应 pH	滤布洗水 温度/℃	I 效浓缩 相对密度	育晶器 温度/℃	流化床干燥 温度/℃	气氨缓冲罐 压力/MPa	进翅片换热器 蒸汽压力/MPa	结晶液密度/ (g·cm ⁻³)	结晶器 温度/℃
控制指标	1.10~1.25	15~25	2.0~3.5	3.8~4.5	≥65	1.28~1.45	100~115	80~120	0.8~1.0	0.35~0.70	1.28~1.45	50~60
72 h 平均值	1.180	18.85	2.5	4.2	73.2	1.35	105.6	105	0.85	0.40	1.35	51.2

表6 技改前后系统中主要杂质平均含量变化

Table 6 Changes in the average content of major impurities in the system before and after the technical transformation

介质	$w(\text{固})/\%$		$w(\text{Ca})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$		$w(\text{Mg})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	
	技改前	技改后	技改前	技改后	技改前	技改后
净化酸	1.54	0.253				
调配酸			850	360		
精滤液			1 500	266	4 560	989
结晶母液				805	13 100	2 939

从表6中可看出, 由于增加了膜过滤, 净化酸中的 $w(\text{固})$ 从1.54%下降到0.253%, 极大地降低了

带入的钙和金属杂质的总量, 同时降低了立式压滤机过滤负荷。

由于增加了二段氨化反应, 并添加了氟化铵溶液, 使精滤液和结晶母液^[15]中 $w(\text{Mg})$ 降低为原来的1/5左右, 使结晶工况大大改善。

4.4 产品质量

性能考核期间, 初级净化酸经膜过滤后 $w(\text{固})$ ^[11]由改造前的1.54%降到0.253%, $w(\text{SO}_4^{2-})$ 由原来的1.43%上升到2.16%, 降低了酸中的CaO含量(见表7); 产品中的 $w(\text{As})$ 只有9.17 mg/kg(见表8)。因此, 本次技术改造, 对最终产品的各项指标达标有较好的平衡作用。

表7 考核期间主要原料及公用工程质量

Table 7 Main raw materials and public engineering quality during the assessment period

项目	合成氨	膜过滤磷酸						低压蒸汽	压缩空气	工艺水
	$w(\text{NH}_3)/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	$w(\text{SO}_4^{2-})/\%$	$w(\text{F})/\%$	$w(\text{As})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{固})/\%$	压力/MPa	压力/MPa	压力/MPa
指标值	≥99.6	≥45	2.0~2.5		20~25		≤0.5	≥0.5	≥0.5	≥0.4
考核结果										
最大值		45.96	2.22	1.05	31.71	0.050	0.300	0.47	0.50	0.42
最小值		45.40	2.10	0.81	24.52	0.040	0.200	0.30	0.47	0.40
平均值	99.7	45.76	2.16	0.92	27.86	0.043	0.253	0.42	0.49	0.40

表8 考核期间产品质量分析结果

Table 8 Statistical results of product quality analysis during the assessment period

项目	$w(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	$w(\text{N})/\%$	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$w(\text{F})/\%$	$w(\text{As})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Mn})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Mg})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Ca})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{Na})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w(\text{K})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
考核目标	≥98.0	≥60.5	≥11.0	≤0.5	≤0.02	≤20	≤500	≤500	≤100	≤200	≤3 500
考核结果											
最大值	99.8	61.6	12.1	0.10	0.000 6	10.20	286.0	219.0	35.9	63.7	592
最小值	99.6	61.4	11.9	0.06	0.000 4	7.56	53.4	76.8	17.6	36.8	553
平均值	99.7	61.5	12.0	0.08	0.000 5	9.17	180.0	150.0	28.0	51.8	580
判定	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格

考核目标值是按电池厂家的指标要求制定, 从表8中可看出, 产品的各项指标均优于电池厂家要求指标, 指标考核合格率为100%。

5 工艺优化及技术改造后产生的效益

5.1 间接经济效益

装置生产工况及产品质量稳定, 产能达到且超过设计产能, 由设计产能的6.93 t/h提升至7.42 t/h, 产能提升7%。

产品质量, 经过改造及工艺优化, 产品中砷、镁、锰、钙、钠、钾等杂质含量得到有效降低, 达到电池厂家的产品质量要求。装置在满足农用水溶性磷酸一铵^[10]使用要求的基础上, 又为新能源行业提供原料, 拓宽了公司产品的使用范围, 提高了公司产品的市场竞争力。

同时系统操作稳定, 优化了工艺管控, 培养了

精细控制的大化工操作人员和深耕精细磷化工的工程技术团队人才。

5.2 直接经济效益

技术改造及工艺优化、系统工况稳定后, 生产电池级磷酸一铵产品质量控制稳定, 产量得到了提高; 因常规电池厂家使用结晶型磷酸一铵磷源主要为精制磷酸, 所以成本原则上不和农用结晶型水溶性磷酸一铵成本进行比对。采用精制磷酸生产, 吨产品消耗 P_2O_5 0.615 t, 折 $w(\text{H}_3\text{PO}_4)$ 100%的磷酸为0.848 t, 磷源成本基本上就是85%的精制磷酸^[14]吨产品价格; 吨产品氮源消耗为0.12 t, 折氨0.145 8 t; 按当期财务成本核算, 吨产品成本费用在6 470.28元。采用湿法磷酸净化生产时产品成本在4 637.14元/t, 成本降低明显。

若以每年生产时间300 d、每小时产量7 t计,

年产5.04万t,按当期财务预算,本项目投入生产运行后,产生以下直接经济效益。

因采用湿法磷酸代替精制磷酸为原料生产节约的成本:

每年节约成本=(6 470.28-4 637.14)×50 000元=91 657 000元。

因此,本项目投入生产运行后,年产生直接经济效益为9 165.7万元。

5.3 社会效益

装置改造及工艺优化后,生产电池级磷酸一铵在不消耗精制磷酸的前提下,采用湿法磷酸脱硫、脱砷、净化磷酸膜过滤后,再进行氨化除杂、结晶;该生产工艺对低质湿法磷酸的适应性增强,为磷资源的高效合理利用提供了新的思路。

6 结论

通过性能考核及效益分析,可对公司50 kt/a结晶型水溶性磷酸一铵装置生产电池用磷酸一铵技术改造得出如下结论:

(1) 湿法磷酸经原料预处理脱硫、脱砷、膜过滤、两段氨化及脱镁后,可生产出满足电池用磷酸一铵管控指标要求的产品;(2) 装置技改后,产量达到设计产能,工艺控制稳定;(3) 以湿法磷酸为原料,氨法净化除杂后生产电池用磷酸一铵经济效益显著。

[参考文献]

[1] 陈五平.无机化工工艺学[M].3版.北京:化学工业出版社,1999:250-255.

[2] 姚永发,方天翰.磷酸 磷铵 重钙技术设计手册[M].北京:化学工业出版社,1997:430-433.

[3] 王东,陈宇珊,黄金,等.电池级磷酸铁晶体生长的温度依赖性机理研究[J].山西化工,2025,45(1):37-39.
WANG D, CHEN Y S, HUANG J, et al. Study on the Temperature Dependent Mechanism of Battery Grade Iron Phosphate Crystal Growth[J]. Shanxi Chemical Industry, 2025, 45(1): 37-39.

[4] 胡敏.我国磷化工产业发展现状及趋势[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(1):1-7.
HU M. Development status and trends of phosphorus chemical industry in China [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(1): 1-7.

[5] 周晶晶,苏小林,徐志强,等.水溶性磷酸一铵制备工艺研究[J].磷肥与复肥,2022,37(11):14-16.
ZHOU J J, SU X L, XU Z Q, et al. Study on preparation of water-soluble monoammonium phosphate [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(11): 14-16.

[6] 彭宝林,项双龙.肥料级湿法磷酸直接生产工业级磷酸一铵工业化技术研究[J].当代化工,2017,37(7):152-155.
PENG B L, XIANG S L. Study on industrial technology of

fertilizer grade wet-process phosphoric acid to produce industrial MAP[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(7): 152-155.

[7] 雷云,马健.湿法磷酸中和法与萃取法制工业磷酸一铵工艺比较[J].磷肥与复肥,2020,35(9):24-26.
LEI Y, MA J. Comparison between neutralization process and extraction process of industrial MAP production from WPA [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(9): 24-26.

[8] 荣圆,梅明.工业级磷酸一铵废渣的预处理[J].广东化工,2018,45(7):34-35,47.
RONG Y, MEI M. Pretreatment of Industrial Grade Ammonium Phosphate Waste Residue [J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(7): 34-35, 47.

[9] 李荐,陶东升.肥料级磷酸一铵料浆提纯制备电池级磷酸一铵研究[J].磷肥与复肥,2017,32(9):26-28.
LI J, TAO D S. Study on preparation of MAP for battery by purifying slurry of fertilizer MAP [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017, 32(9): 26-28.

[10] 陈铭,姜伦武,卓知杰,等.湿法磷酸净化生产工业级磷酸一铵的工艺现状[J].化肥工业,2019,46(1):5-7,38.
CHEN M, LOU L W, ZHUO Z J, et al. Current Status of Process Technology for Production of Industrial Grade Monoammonium Phosphate by Wet Phosphoric Acid Purification [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2019, 46(1): 5-7, 38.

[11] 赵鹏,马晓博,刘锐剑.基于湿法磷酸氨化淤渣去除的水溶性MAP制备研究[J].化学与粘附,2025,47(1):14-18.
ZHAO P, MA X B, LIU R J. Research on the Preparation of Water-soluble MAP Based on Wet process Phosphoric Acid Ammonification Sludge Removal [J]. Chemistry and Adhesion, 2025, 47(1): 14-18.

[12] 徐魁,项双龙,廖吉星.湿法磷酸两步法生产工业级磷酸一铵工艺[J].磷肥与复肥,2014,29(4):41-43,58.
XU K, XIANG S L, LIAO J X. Production process of industrial grade MAP with WPA by two-step method [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2014, 29(4): 41-43, 58.

[13] 周贵云,陈仕刚,蒲秋岑.湿法磷酸净化生产工业级磷酸一铵的技术现状及关键技术的工业应用[J].磷肥与复肥,2015,30(3):31-33.
ZHOU G Y, CHEN S G, PU Q C. Technical status of industrial grade monoammonium phosphate production by WPA purification method and industrial application of its key technology [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2015, 30(3): 31-33.

[14] 舒艺周,马航,张恒,等.工业磷酸一铵滤渣综合利用技术研究现状与建议[J].磷肥与复肥,2023,38(2):34-37.
SHU Y Z, MA H, ZHANG H, et al. Research status and suggestions for comprehensive utilization technology of industrial MAP filter residue [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(2): 34-37.

[15] 刘娜,王宝安.湿法磷酸制备多元螯合水溶性磷酸一铵工艺研究[J].磷肥与复肥,2020,35(12):20-21,26.
LIU N, WANG B A. Study on preparation of multicomponent chelated water-soluble MAP from WPA [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(12): 20-21, 26.