

# 膜法分离技术组合在湿法磷酸净化中的应用进展

赵瑞祥, 李义海, 鲍文军

(秦皇岛华瀛磷酸有限公司, 河北 秦皇岛 066004)

**[摘要]** 重点介绍国内外膜法分离技术组合净化湿法磷酸的工业化应用及相关研究进展, 湿法磷酸净化中所涉及各类膜产品类别主要有碳化硅 (SiC) 陶瓷超滤膜、外管式超滤 (UF) 膜、扩散渗析 (DD) 膜、纳滤 (NF) 膜和反渗透 (RO) 膜等。并讨论膜法分离组合技术在湿法磷酸净化中的过程特点, 列举相关小试、中试及工业装置的运行数据和膜法分离技术组合的成本预期, 并对该技术的痛点和竞争力进行深入细致的分析。研究结果表明, 随着环保管控日趋严苛, 相关企业的研发投入增加, 以及国产膜不断升级迭代, 膜法分离组合技术因其投资相对较少、流程简单易复制、能耗低等特点, 会在湿法磷酸净化中发挥重要的作用。

**[关键词]** 超滤; 扩散渗析; 纳滤; 膜法分离技术组合; 湿法磷酸净化

**[中图分类号]** TQ028.8; TQ126.3\*5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 02-0035-06

## Application progress of membrane separation technology combination in WPA purification

ZHAO Ruixiang, LI Yihai, BAO Wenjun

(Qinhuangdao Huaying Phosphoric Acid Co., Ltd., Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The progress of industrial application and related research on the combination of membrane separation technology for the purification of wet-process phosphoric acid (WPA) at home and abroad are introduced. The category of various membrane products involved in WPA purification mainly include silicon carbide (SiC) ceramic ultrafiltration membrane, external tubular ultrafiltration (UF) membrane, diffusion dialysis (DD) membrane, nanofiltration (NF) membrane, and reverse osmosis (RO) membrane. In-depth and detailed analysis of the process characteristics of the membrane separation technology combination in WPA purification, the operating parameters of relevant membrane units of small-scale, pilot and industrial scale, their cost expectation, the pain points and competitiveness of combinational membrane separation process technology are conducted accordingly. The research results show that with increasingly strict environmental control measures, increased R & D investment by relevant enterprises, and continuous upgrading and iteration of domestic membranes, due to its relatively low investment, simple and easy to replicate process, and low energy consumption, the membrane separation technology combination will play an important role in WPA purification.

**Key words:** ultrafiltration (UF); diffusion dialysis (DD); nano-filtration (NF); membrane separation technology combination; wet-process phosphoric acid (WPA) purification

## 0 引言

国内外高品质磷酸通常采用热法工艺生产, 因热法磷酸工艺能耗高、污染严重, 国内外企业特别是欧美企业逐步淘汰了热法磷酸生产, 国外企业相继开发出利用溶剂萃取法净化湿法磷酸工艺技术, 溶剂萃取法已成为国内外企业净化湿法磷酸的最有效方法之一, 许多企业通过溶剂萃取法生产工业级磷酸与食品级磷酸<sup>[1-2]</sup>。但是, 因溶剂萃取法

净化湿法磷酸工艺流程长、设备多、投资规模大、需要消耗有机溶剂, 以及有机溶剂涉及原料的储运、回收、安全、环保等问题和萃余酸的高值利用问题, 让一些中小型磷化工企业望而却步。

膜分离技术具有配置简单便捷、节能高效、易于操作等特点, 可以替代传统的浓缩、蒸发、萃取、结晶等分离方法。随着膜法分离技术不断进步, 国内外磷化工企业及研究机构尝试将不同类型

收稿日期: 2025-10-21

作者简介: 赵瑞祥 (1969—), 男, 河北唐海人, 正高级工程师, 长期从事磷酸、复肥及氟盐产品生产管理、工程项目管理和技术开发等工作。

的膜分离设备用于磷酸净化提质，主要的膜分离设备种类有微滤（MF）膜、超滤（UF）膜、扩散渗析（DD）膜、纳滤（NF）膜以及反渗透（RO）膜等，相继开发出膜法分离技术组合的净化湿法磷酸工艺，并有工业化应用的报道。

近年来，国内头部磷化工企业与特种分离膜制造企业相互配合，尝试利用各类膜分离组合技术，进行了湿法磷酸纯化、净化的小试和中试，积累了一定的研究数据，从而不断突破国外技术壁垒，实现膜法分离技术组合净化湿法磷酸的技术进步。

### 1 国外典型的膜法分离湿法磷酸净化工艺及研究

#### 1.1 美国 SIMPLOT 技术

1996年美国 SIMPLOT 公司在爱达荷州波卡特洛建成投产了一套 2 万 t/a 的磷酸净化装置，1999 年采用膜法分离技术将湿法磷酸净化为食品级磷酸

（该工艺技术申请了专利<sup>[3]</sup>）。在 SIMPLOT 公司膜法分离净化流程中（见图 1），先将  $w(P_2O_5)$  50% 的湿法磷酸经过 0.5  $\mu\text{m}$  超滤膜去除可视固体物，然后稀释至  $w(P_2O_5)$  20%，在 25  $^\circ\text{C}$  下再将其经高压泵送至聚酰胺纳滤膜分离装置。稀磷酸进料压力 6 MPa，进料量为 11.3  $\text{m}^3/\text{h}$ ，耐酸纳滤膜通量为 5  $\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。通过两道串联纳滤膜可以去除稀磷酸中大量的杂质，进入一道、二道纳滤前，以及二道纳滤后磷酸的杂质系数（MER 值= $w(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) / w(P_2O_5)$ ）分别为 5.7%、0.213%、0.017 5%。该膜法分离装置辅之以适当的预处理和后处理去除磷酸中夹带的氟和有机物，可以净化不同品质的磷酸，生产出接近食品级的磷酸。此种膜法分离净化工艺与溶剂萃取净化工艺有类似之处，即需要脱氟、浓缩和有机物去除的后处理等工序。



图 1 SIMPLOT 膜分离净化简易流程

Fig. 1 Simplified process flow of SIMPLOT membrane purification

#### 1.2 比利时 PRAYON 膜分离净化湿法磷酸工艺

比利时 PRAYON 公司先把浓磷酸稀释，通过化学沉淀法对原料湿法磷酸进行预处理，去除磷酸中的硫酸根及部分氟、砷、镉等杂质。预处理后的磷酸通过纳滤膜分离和离子交换树脂净化得到低浓度的净化磷酸，低浓度的磷酸经过蒸发浓缩去除残留的氟、氯等阴离子，浓缩后的净化磷酸有工业级磷酸和食品级磷酸两种产品（见图 2）。PRAYON 公司在保加利亚得温亚（Devnya）Technophos 工厂有一套 3 000 t/a 膜法分离组合净化磷酸装置。

#### 1.3 陶瓷超滤膜的应用

美国也有报道，某工厂溶剂萃取法湿法磷酸净化装置局部利用碳化硅（SiC）材料的陶瓷超滤膜净化处理溶剂萃取前的磷酸原料或含有有机溶剂的磷酸中间产品的工业应用案例。该类陶瓷超滤膜采用模块化撬装式设备布置，可根据磷酸原料的特性提供所需的定制服务。每个陶瓷超滤膜撬块可以独立运行，即使处于在线清洗或遇到意外挑战时也能确保分离的操作冗余，从而减少溶剂萃取法湿法磷酸净化装置的非计划停车时间。

#### 1.4 研究尝试

膜分离净化湿法磷酸的工业应用已落地，但相关研究持续推进，主要集中在膜分离过程与各类膜通量对比研究。

##### 1.4.1 北美科研人员的研究

GONZÁLEZ 等<sup>[4]</sup>对比 RO 膜与 NF 膜性能，NF 膜在高浓度磷酸（ $w(P_2O_5)$  33.4%）净化中更具优势，奥斯莫尼斯公司（OSMONICS INC）的 DS5DL 膜综合表现最佳。GERRALD BARGEMAN 团队<sup>[5-7]</sup>聚焦极端 pH 稳定型 NF 膜研发，通过界面聚合、逐层涂布等技术制备多种膜材料，虽部分膜兼具高渗透性与稳定性，但仍需优化以适配高压工况及更广 pH 范围。

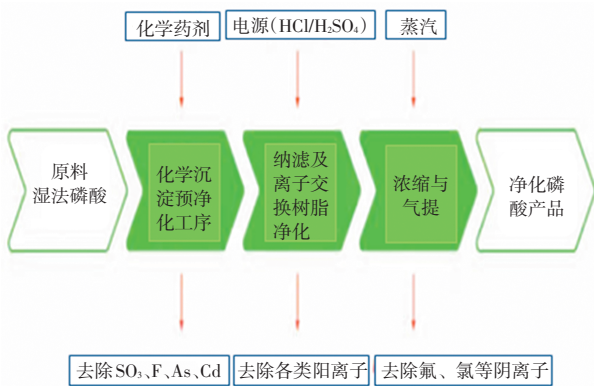


图 2 PRAYON 公司膜法组合净化湿法磷酸工艺流程

Fig. 2 Process flow of PRAYON's membrane purification for WPA

#### 1.4.2 摩洛哥OCP(磷酸盐)公司科研人员的研究

2022年KHALESS等<sup>[8]</sup>采用预改性聚乙烯亚胺纳滤膜(MPS36)净化湿法磷酸,经预处理后对镉、铝等阳离子及稀有金属去除率达94%以上,净化机制以静电排斥为主。目前相关技术已进入工业中试,膜通量160 L/h,净化后磷酸经浓缩可达到 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  54%,中试数据显示膜稳定性优于实验室水平。

#### 1.4.3 突尼斯GCT科研人员的研究

NASRI等<sup>[9]</sup>采用Nadir NP030纳滤膜对6种不同质量分数( $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  2.5%~25.0%)的湿法磷酸进行净化试验。结果表明,在2.0 MPa压力下处理 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  25%的磷酸时,杂质去除率良好, $\text{P}_2\text{O}_5$ 渗透率近98%,且高浓度进料更利于提升分离选择性,三价阳离子去除效果优于二价阳离子,后续需进一步研究磷酸成分的复杂影响机制。

#### 1.4.4 研究趋势与关键点

未来纳滤膜材料将向高性能、可持续方向发展,耐酸聚合物与纳米材料(如石墨烯氧化物)成为研发重点。纳滤膜最佳操作压力通常为1.0~7.0 MPa,具体需结合磷酸特性、膜材料等因素调整;高压下的膜稳定性是规模化应用的核心挑战,需通过模型建立及参数优化平衡分离效率、能耗与膜寿命。

## 2 国内相关研究进展

国内膜法分离技术组合净化湿法磷酸的研究起步较晚,多所院校和科研设计机构等都曾先后做过小试及中试实验<sup>[10-12]</sup>。四川大学开发的微滤-纳滤磷酸净化工艺可以在工业级磷酸基础上获得食品级甚至电子级磷酸,湿法磷酸中阳离子杂质去除率可达96%,而且不需要使用任何溶剂,从而有效避免了二次污染,此外,该工艺还可以根据产品需求进行调整,比如可以采用多级纳滤膜过滤,以获得更优质的磷酸。以下为国内相关企业进行的研究情况。

#### 2.1 超滤与纳滤分离组合技术制取食品级磷酸

贵州某企业提供了一种湿法磷酸制备食品级磷酸的方法,包括:(1)过滤,采用超滤膜对湿法磷酸进行过滤;(2)脱硫,将上述酸液与脱硫剂混合反应,采用超滤膜过滤;(3)膜分离净化,采用纳滤膜过滤上述酸;(4)一级浓缩与脱砷,将净化磷酸浓缩后与脱砷、脱重金属剂混合反应,用超滤膜过滤;(5)二级浓缩与脱硫化氢,向所述脱砷磷酸中连续通入空气,吹除硫化氢;(6)脱色与脱氟,将上述磷酸与过氧化氢混合,连续通入空气进行汽

提反应;(7)调节磷酸浓度,将脱氟、脱色磷酸与水混合,调节浓度,得到食品级磷酸<sup>[13]</sup>。

#### 2.2 扩散渗析膜分离净化磷酸

瓮福(集团)有限责任公司何兵兵等<sup>[14]</sup>使用板框式扩散渗析膜组件进行湿法磷酸的膜分离净化中试试验,发现这种方法能够有效去除湿法磷酸中大部分阳离子杂质,并且处理成本较低。这对于研究上下游产物,如水溶肥和工业级磷酸盐等有着重要的意义。由于在传统离子交换膜上的渗透系数低导致磷酸净化分离的 $\text{P}_2\text{O}_5$ 回收率低,进而限制了该技术的应用。为了将该技术应用于湿法磷酸中的杂质脱除,采用福建某公司生产的聚烯烃类超薄(厚度小于50  $\mu\text{m}$ )阴离子交换膜进行湿法磷酸净化试验,得出适宜的操作参数为:浓磷酸进料温度35  $^{\circ}\text{C}$ ,膜处理通量0.7 L/( $\text{m}^2\cdot\text{h}$ ),浓磷酸与水的体积流量比1:1。在优化条件下进行湿法磷酸除杂试验,湿法磷酸MER值从5.81%降至0.93%以下, $\text{P}_2\text{O}_5$ 回收率在53%以上。此外,浓磷酸经过脱硫预处理再进行膜分离时,磷酸杂质系数MER值从6.21%降至1.17%以下, $\text{P}_2\text{O}_5$ 回收率在55%左右。

#### 2.3 超滤和纳滤组合技术净化磷酸

郑秀军<sup>[15]</sup>采用膜分离装置对磷酸进行净化,进入前3组纳滤膜的磷酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 分别为36.12%、30.08%、28.18%,对应的磷酸MER值分别为2.28%、0.277%、0.193%;净化后磷酸中 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 这3种阳离子的去除率均超过90%,并去除导致磷酸变色的有机物。采用超滤和纳滤组合技术处理净化磷酸,可以将磷酸中的阳离子和有机物降至很低的水平,流程相对简单,装置运行自动化程度高,还可以进一步拓展。采用多级纳滤并联净化磷酸膜法分离技术具有良好的工业化前景。

#### 2.4 扩散渗析+纳滤膜组合净化磷酸

秦皇岛华瀛磷酸有限公司将聚烯烃类扩散渗析膜应用在湿法磷酸净化小试时,对MER值在5%~10%且未进行脱硫处理的 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  50%的磷酸,一道扩散渗析可去除磷酸中80%以上的阳离子杂质,净化后磷酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为25%~40%,MER值在0.5%~1.4%。因不同原料磷矿来源的磷酸杂质不同,净化后最优化的磷酸浓度需要通过小试或中试进行摸索。

利用国产HT纳滤膜对扩散渗析得到的磷酸进行深度净化测试:扩散渗析处理后的磷酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为26.8%,MER值在0.46%,利用一道纳滤膜可去除磷酸中90%以上的阳离子杂质,净化后磷酸

$w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为 24.1%，MER 值在 0.02%，净化磷酸收率 70%。

利用国产 HT 纳滤膜直接对未进行脱硫预处理的不同浓度磷酸进行纯化测试：进入纳滤膜的磷酸压力为 2 MPa，磷酸  $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为 26.1%，MER 值在 8.43%，利用一道纳滤膜可去除磷酸中 50% 以上的阳离子杂质，净化后磷酸  $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为 23.1%，MER 值在 3.70% ~ 3.98%，净化磷酸收率 55%。

利用国产普希特分纳滤膜对不同浓度的磷酸进行测试：进入纳滤膜的磷酸压力为 2 ~ 4 MPa，磷酸  $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为 25.29% ~ 51.13%，MER 值为 4.27% ~ 6.85%，利用一道纳滤膜可去除磷酸中 50% 以上的阳离子杂质，净化后磷酸  $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为 23.10% ~ 50.17%，MER 值在 2.56% ~ 3.98%，净化磷酸收率 70%。

### 3 净化磷酸用膜种类及关键技术指标

净化磷酸用膜种类主要有碳化硅 (SiC) 陶瓷超滤膜、外管式超滤 (UF) 膜、扩散渗析 (DD) 膜、纳滤 (NF) 膜和反渗透 (RO) 膜等。上述两种超滤膜在湿法磷酸过滤中均有工业应用案例，投资规模小，可以定期进行在线清洗，去除膜壁上的结巴或结垢，使用寿命通常可达 3 ~ 5 年，配套的动力设备耐酸泵出口压力在 1 MPa 以内，可以满足下游膜装置的配套需要。

扩散渗析 (DD) 膜利用浓度差扩散原理，通过阴离子交换膜的选择性透过特性，使目标磷酸组分沿浓度梯度方向定向迁移。这种基于物理扩散的分离过程无需外加能量输入，仅依靠磷酸溶液自身的浓度差驱动，从根本上简化了分离流程。目前，在对金属表面处理工序排出的磷酸废液处理领域实现了工业化应用，分离出清洗过程所产生的磷酸盐，高效回收磷酸，有效控制了清洗液中金属离子浓度。由于驱动力来自浓度差所产生的扩散移动，因此该系统的运行成本较低；由于回收有效磷酸并进行再次使用，可以降低磷酸废液中的重金属杂质和处理费用；由于膜分离装置结构简单，维修很方便；此类扩散渗析膜动力消耗低，能耗低。

关于国内外纳滤膜在湿法磷酸净化小试、中试及工业应用中的参数数据如表 1 所示。

从表 1 所列的几组国外和国产纳滤 (NF) 膜净化湿法磷酸的相关数据可以看出，国产膜所处理的磷酸杂质 MER 值偏高 (6.15 ~ 8.43)，与国外纳滤膜相比，国产膜的运行压力偏低。国产膜所处理磷酸  $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为 26.1% 至 50.17%，单独利用一级纳滤膜试验装置处理不同浓度的湿法磷酸可以去除 36% ~ 53% 的阳离子。与国外的纳滤膜对比，国内纳滤膜进酸压力偏低，对湿法磷酸中阳离子杂质的截留率相对较低，应该进一步优化膜的组装工艺提

表 1 国内外相关开发者所选用纳滤膜品牌材质及运行参数对比

Table 1 Comparison of NF membrane brands, materials of construction and operating parameters selected by domestic and foreign developers

开发者名称	选用纳滤膜品牌	纳滤膜材质	纳滤运行压力/MPa	纳滤运行温度/°C	进酸 $w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	进酸 MER 值/°C	膜通量/ $(\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	铁、铝、镁去除率/%
美国 Simplot 公司	Dupont Filmtec	聚酰胺	6	25	20	5.7	5	70
法国 VEOLIA 公司	美国 GE Duracid	聚酰胺	2.75 ~ 5.5	40 ~ 55	25	4	5	90~92 <sup>[16]</sup>
摩洛哥 OCP 公司	Koch MPS36 纳滤膜	预改性的聚乙烯亚胺	3~4	60	25.83	4.3	40	99
突尼斯 GCT 公司	Nadir NP030 膜	聚醚砜	2	25	25	3.65	0.55	87
安徽鑫克公司	美国 GE Duracid	聚酰胺	2	35.2	28.78 <sup>①</sup>	0.19	10.6	90
			3	39.8	28.78 <sup>①</sup>	0.19	34.2	95
			4	39.8	28.78 <sup>①</sup>	0.19	40.7	95
秦皇岛华瀛公司	HT 膜	PVDF 材质	2	35	26.8 <sup>②</sup>	0.46	9.2	90
			2	35	26.1	8.43	11	53
	普希特分膜	纳米复合薄膜(TFC)	3.1	23	27	6.15	14.56	36
			3	40	27	6.15	10.12	47
			3	30	26.03	6.53	7.75	45
		纳米复合薄膜(TFC)	3	35	26	6.85	17.74	39
		纳米复合薄膜(TFC)	5	30	48.02	6.72	2.12	50

注：①安徽鑫克公司利用萃取净化后的磷酸进行纳滤试验；②扩散渗析后的磷酸。

高膜的机械强度，在尝试增加运行压力的前提下，需对杂质的去除率以及在线周期和清洗方法等进行深入摸索并验证。

#### 4 膜法分离技术组合净化湿法磷酸技术的痛点及竞争力分析

##### 4.1 技术痛点

###### 4.1.1 原料磷酸品质差且呈下降趋势

国内不同区域磷矿资源禀赋大相径庭，所产出的磷酸品质，特别是磷酸中的阳离子杂质含量不同，故尝试利用膜法分离技术组合净化磷酸时，需要对该种磷酸进行小试和中试评估，摸清相关操作运行参数，以便于放大成工业装置节省总体投资。笔者建议国内有条件的磷化工企业，尝试采用超滤、扩散渗析和纳滤分离技术组合，在投入较少的情况下，先小试摸索出可以进行中试验证的运行参数，逐步放大，同时利用不同杂质含量的净化磷酸生产水溶肥或磷酸盐产品，逐步深入直至利用膜法分离技术生产出工业级、食品级磷酸。

###### 4.1.2 膜法分离技术组合的成本预期

采用膜法分离净化成本能否低于目前国内外通用的溶剂萃取法湿法磷酸净化工艺有待不断验证。采用超滤和扩散渗析组合运行成本可以控制在吨 $P_2O_5$  500元以内<sup>[17]</sup>。超滤和扩散渗析设备运行过程中会出现过滤能力下降，需要考虑定期在线清洗以延长使用寿命。

###### 4.1.3 国内净化磷酸收率高、截留效果好的高压耐酸纳滤膜需要有所突破

国内几款耐酸纳滤膜对经过扩散渗析获得的阳离子杂质低、品质较好的磷酸，具有相对可以接受的净化除杂效果，但仍需在试验室小试基础上进行中试，摸索出此类纳滤膜产品的在线使用寿命以及有效的再生清洗频次，方可模拟出拟建工业装置的运行成本。

现有的数据表明，若利用纳滤膜直接对经过超滤膜处理后的磷酸进行净化，国产耐酸纳滤膜在磷酸净化收率和除杂率及耐受运行压力等方面还需对标国际同行的耐酸纳滤膜产品，希望国内耐酸纳滤膜开发生产企业加大研发投入，不断生产出耐压且杂质截留率高的纳滤膜产品，满足磷酸净化行业的需要。国外同行将浓磷酸稀释后进行纳滤处理，纳滤膜的使用寿命为3~6个月（折合为在线时间2 100~4 200 h）。后续的开发验证，需结合现场中试实际运行数据，摸索出国产耐酸纳滤膜的在线时间。

##### 4.2 竞争力分析

目前，膜法分离组合技术在金属表面处理含磷酸液、半导体刻蚀废酸回收利用等方面已体现出环保和运行成本低的优势，基于文中的磷酸净化中试和工业运行数据测算，膜法分离组合工艺运行成本吨 $P_2O_5$ 可以控制在2 000元以内。随着磷化工企业不断对膜法分离技术进行跟进优化，势必会在利用膜法分离组合技术净化湿法磷酸领域，摸索出适合我国磷化工企业的净化路径。随着国家环保管控政策日趋严苛、相关磷化工企业研发投入增加以及国产膜不断升级迭代，各类膜产品制造成本降低，膜法分离组合技术因其投资相对较少、流程简单易复制、能耗低等特点，会在湿法磷酸净化中逐步发挥重要作用。

##### 5 结语

膜法分离组合湿法磷酸净化技术发展水平呈现区域差异化特征。北美和西欧地区在膜法组合磷酸净化技术创新和产业化应用方面处于全球领先地位，已经建立了工业装置并在有效运行。虽然膜法分离组合技术在磷酸净化领域展现出良好的应用前景，但要实现大规模工业化应用仍面临诸多挑战。目前膜法分离组合技术主要处于实验室研究和中试阶段，工业化应用案例相对较少，说明膜法分离组合技术成熟度与产业化需求之间具有一定的差距。

未来膜法分离组合净化湿法磷酸技术发展将重点关注以下几个方向：一是针对湿法磷酸原料中杂质分布的差异，尝试采用超滤+扩散渗析+纳滤组合，或采用超滤+两级纳滤组合，开发新型高效的膜法组合净化技术；二是开发新型高效的扩散渗析膜和耐酸膜材料，特别是含有特殊官能团（如三嗪环、磺酰胺基团）的聚合物材料和二维纳米材料；三是加强跨学科技术融合，通过材料科学、信息技术、生物技术等多学科交叉实现技术突破。

随着全球对高纯度磷酸需求增长和环保要求提高，磷酸净化作为膜法分离组合技术的重要应用领域，市场前景十分广阔。然而，要实现技术的产业化应用，笔者呼吁加强产学研合作，相关磷化工企业和耐酸特种膜生产企业在研发投入、人才培养、标准制定等方面持续发力，加强国际合作，学习借鉴国外先进技术和经验。政府部门制定支持政策，通过税收优惠、研发补贴等方式鼓励企业技术创新，加强环保监管，通过严格的排放标准推动企业采用先进技术；支持示范工程建设，为技术推广应用提供成功案例，在磷酸净化领域实现规模化应

用,为全球磷化工产业的可持续发展做出中国贡献。

#### [参考文献]

- [1] 钟本和,陈亮,李军,等.溶剂萃取法净化湿法磷酸国内近况[J]. 硫磷设计与粉体工程,2006(6):1-7.  
ZHONG B H, CHEN L, LI J, et al. Current Status of Purifying Wet-process Phosphoric Acid by Solvent Extraction Method in China[J]. S P & BMH Related Engineering, 2006(6):1-7.
- [2] 黄美英,杨三可,李军.溶剂萃取法净化湿法磷酸的工艺研究[J]. 磷肥与复肥, 2004, 19(4):9-11.  
HUANG M Y, YANG S K, LI J. Study on the Purification of Wet Process Phosphoric Acid by Solvent Extraction [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2004, 19(4):9-11.
- [3] SKIDMORE H J, HUTTER K J. Methods of purifying phosphoric acid: US5945000[P]. 1999-08-31.
- [4] GONZÁLEZ, M P, NAVARRO R, SAUCEDO I, et al. Purification of phosphoric acid solutions by reverse osmosis and nanofiltration [J]. Desalination, 2002, 147(1-3):315-320.
- [5] BARGEMAN G. Recent developments in the preparation of improved nanofiltration membranes for extreme pH conditions[J]. Separation and Purification Technology, 2021(279):119725.
- [6] SHIN M G, KWON S J, PARK H, et al. High-performance and acid-resistant nanofiltration membranes prepared by solvent activation on polyamide reverse osmosis membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2020, 599:117590.
- [7] PALTRINIERI L, REMMEN K, MÜLLER B, et al. Improved phosphoric acid recovery from sewage sludge ash using layer-by-layer modified membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 587:117162.
- [8] KHALESS K, CHANOURI H, AMALS, et al. Wet Process Phosphoric Acid Purification Using Functionalized Organic NF Membrane[J]. Separation, 2022, 9(4):11.
- [9] NASRI H, AMAR R B. Performances of nanofiltration on industrial phosphoric acid purification[J]. Journal of Advances in Chemistry, 2014, 10(2):2218-2229.
- [10] 刘代俊,李建明,张允湘,等.磷资源加工研究进展:4.湿法磷酸的膜分离净化与杂质捕集[J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(3):11-13.  
LIU D J, LI J M, ZHANG Y X, et al. Research progress of phosphate resource processing: 4. Removal of impurities from wet-process phosphoric acid by membrane separation[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2009, 24(3):11-13.
- [11] 殷宪国.电子级磷酸制备中杂质的吸附与膜分离技术进展[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2010(5):11-13.  
YIN X G. Progress in Impurity Adsorption and Membrane Separation Technology for Electronic Grade Phosphoric Acid Production [J]. S P & BMH Related Engineering, 2010(5):11-13.
- [12] 韩成,袁宸,梁济,等.对纳滤膜分离净化湿法磷酸溶液影响因素的研究[J]. 肥料与健康, 2021, 48(1):36-41.  
HAN C, YUAN C, LIANG J, et al. Study on the Influence Factors of Separation and Purification of Wet-Process Phosphoric Acid Solution by Nano-filtration Membrane [J]. Fertilizer & Health, 2021, 48(1):36-41.
- [13] 杨进锋,黄恒,马永强,等.一种湿法磷酸制备食品级磷酸的方法:CN 111268660B[J]. 2020-02-01.
- [14] 何兵兵,刘旭,谢娟,等.扩散渗析膜分离技术在湿法磷酸净化中的应用研究[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(4):22-26.  
HE B B, LIU X, XIE J, et al. Study on membrane separation technology by diffusion dialysis in purification of wet-process phosphoric acid [J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(4):22-26.
- [15] 郑秀军.膜分离技术在磷酸净化中的应用[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(3):22-24.  
ZHENG X J. Application of Membrane Separation Technology in WPA Purification [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(3):22-24.
- [16] BULLETIN. Phosphoric Acid Purification Using Duracid\* NF [EB/OL]. [2025-10-20]. [https://www.bing.com/ck/a?!&p=2fc0227736a5397adca60178d33e2ccc2967f85e9ab6a0ff346331b5226e8e30JmltdHM9MTc2MjEyODAwMA&ptn=3&ver=2&hsh=4&fclid=1a80ea91-f6f3-6f06-397c-fe80f7a36e0f&psq=construction+material+of++NF+membrane+in+ECOPHOS+PHOSPHORIC+ACID+PURIFICATION&u=a1aHR0cHM6Ly9wcmVwcm9kLndhdGVydGVjaG5vbG9naWVzLmNvbS9kb2N1bWVudC9kb2N1bWVudC9jb250ZW50ZG93bmxvYWQvanMvbWFnZS8\\_ZG9jdW1lbmRlbnRlZT1UQjEyMjVFTi5wZGYmbGFuZ3VhZ2U9RW5nbGlzaCZzZW50cm90eTI1QdWJsaWM](https://www.bing.com/ck/a?!&p=2fc0227736a5397adca60178d33e2ccc2967f85e9ab6a0ff346331b5226e8e30JmltdHM9MTc2MjEyODAwMA&ptn=3&ver=2&hsh=4&fclid=1a80ea91-f6f3-6f06-397c-fe80f7a36e0f&psq=construction+material+of++NF+membrane+in+ECOPHOS+PHOSPHORIC+ACID+PURIFICATION&u=a1aHR0cHM6Ly9wcmVwcm9kLndhdGVydGVjaG5vbG9naWVzLmNvbS9kb2N1bWVudC9kb2N1bWVudC9jb250ZW50ZG93bmxvYWQvanMvbWFnZS8_ZG9jdW1lbmRlbnRlZT1UQjEyMjVFTi5wZGYmbGFuZ3VhZ2U9RW5nbGlzaCZzZW50cm90eTI1QdWJsaWM).
- [17] 陈相,何兵兵,杨俊,等.膜分离低成本净化湿法磷酸中试试验研究[J]. 磷肥与复肥, 2022, 37(9):26-29.  
CHEN X, HE B B, YANG J, et al. Pilot study on low cost purification of WPA by membrane separation [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(9):26-29.