

引用本文: 刘逸天, 涂雅兰, 齐鑫钢, 王力, 徐林坡, 程满玉, 张宇, 段晓玲. 电渗析浓缩净化湿法磷酸研究 [J]. 离子交换与吸附, 2025, 41(4): 292-299.

Citation: LIU Yi-tian, TU Ya-lan, QI Xin-gang, WANG Li, XU Lin-po, CHENG Man-yu, ZHANG Yu, DUAN Xiao-ling. Study on Concentration and Purification of Wet Phosphoric Acid by Eletrodialysis [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2025, 41(4): 292-299.

· 研究论文 ·

文章编号: 1001-5493(2025)04-0292-08

DOI: 10.16026/j.cnki.iea.2025010045

## 电渗析浓缩净化湿法磷酸研究\*

刘逸天, 涂雅兰, 齐鑫钢, 王力, 徐林坡, 程满玉, 张宇, 段晓玲\*\*

(湖北第二师范学院化学与生命科学学院, 武汉 430205)

**摘要:** 湿法磷酸中含较多钙、镁、铁等金属离子杂质, 需通过净化才能生产出工业级以上的磷酸和磷酸盐产品。文章采用电渗析法一步浓缩和净化湿法磷酸, 对比5种不同的商业阴离子交换膜在电渗析净化湿法磷酸中的应用差异, 同时以膜堆的电压、阴阳极室磷酸的浓度、金属离子去除率、电流效率以及平均能耗为评价指标, 考察电渗析过程中电流密度和循环流速对电渗析性能的影响。研究结果显示, 使用膜AMI-7001, 电流密度为40 mA/cm<sup>2</sup>, 溶液流速为4.5 L/h时, 磷酸的金属离子去除率在70%以上, 能耗在3.3 kW·h/kg以下。表明电渗析是一种有效的浓缩和净化磷酸溶液的方法, 对环境没有污染, 且操作简单, 对浓缩和净化湿法磷酸具有重要的参考意义。

**关键词:** 电渗析, 阴离子交换膜, 湿法磷酸, 金属离子

**中图分类号:** O658.6<sup>8</sup>    **文献标志码:** A

## 1 前言

磷酸是化学工业中不可或缺的基础原料, 我国的磷矿以中低品位为主, 制备磷酸主要采用湿法磷酸法, 而湿法磷酸含有较多的金属离子杂质, 只能满足初级产品的生产要求, 去除杂质后才能应用于下游的中端市场<sup>[1-3]</sup>。目前, 湿法磷酸的净化方法包括沉淀法、结晶法、离子交换树脂法和溶剂萃取法等<sup>[2,4-6]</sup>。沉淀法和溶剂萃取法易于工业化, 但沉淀剂和溶剂消耗量大, 对环境有一定的污染; 而离子交换树脂法和结晶法成本高, 需重复进行, 只能与其他方法配合, 作为湿法磷酸净化全过程的一道辅助工序<sup>[7,8]</sup>。

电渗析是一种经济有效的化工分离技术, 已广泛应用于水处理<sup>[9]</sup>、酸和碱的浓缩<sup>[10-13]</sup>以及

盐的制备<sup>[14]</sup>。湿法磷酸电渗析净化过程是在直流电场作用下, 磷酸溶液中带负电的阴离子通过阴离子交换膜向阳极迁移, 带正电的阳离子受到阴离子交换膜的阻挡, 从而达到分离净化的目的<sup>[15]</sup>。电渗析技术可以同时净化和浓缩磷酸, 操作简单, 净化效果好, 金属离子去除率高, 无污染环境的副产物产生, 应大力发展<sup>[16]</sup>。Liu等<sup>[17,18]</sup>采用电渗析制电子级高纯磷酸试验装置制备高纯度磷酸, 其纯度达99.99%, 各项指标达到MOS级电子级磷酸标准要求。Ottosen等<sup>[19,20]</sup>采用电渗析技术对湿法工业磷酸进行处理, 得到了产率高、金属杂质浓度低的浓缩磷酸。课题组在前期的工作中也尝试采用自制的阴离子交换膜进行电渗析净化湿法磷酸, 金属离子去除率达60%以上<sup>[21-23]</sup>。

为了对电渗析净化和浓缩湿法磷酸工艺,

\* 收稿日期: 2024-09-23

基金项目: 湖北省教育厅科学研究项目 (项目号 B2023185); 新型反应器与绿色化学工艺湖北省重点实验室开放课题 (项目号 NG202310); 湖北省大学生创新创业计划训练项目 (项目号 202114099006); 湖北省大学生创新创业计划训练项目 (项目号 S202414099059)。

作者简介: 刘逸天 (2003—), 学士。

\*\*通信作者: 段晓玲, E-mail: xlduan@hue.edu.cn.

做更进一步的研究,文章对比5种不同的商业阴离子交换膜在电渗析净化湿法磷酸中的应用差异,考察电渗析过程中电流密度和循环流速对电渗析性能的影响,评价膜堆的电压、阴阳极室磷酸的浓度、金属离子去除率、电流效率以及平均能耗等指标。以期电渗析在湿法磷酸净化产业化应用提供一定的参考依据。

## 2 实验部分

### 2.1 试剂与膜材料

本实验所用的硫酸钠、硝酸银、铬酸钾、氯化钾、磷酸(85%)均为分析级,购自国药集

团化学试剂有限公司;模拟湿法磷酸溶液为自制,具体成分见表1;实验均使用去离子水。阴离子交换膜LE 1201、LE-AM-1、YAP、YAB和AMI-7001均为商业膜,其主要的性能指标见表2。

表1 模拟湿法磷酸溶液中的主要成分.

Table 1 The main composition of the simulated wet phosphoric acid solution.

组成	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Fe	Mg	Ca
浓度(mol/L)	0.52	0.02	0.03	0.01
质量分数(%)	5.00	0.11	0.07	0.04

表2 阴离子交换膜的主要性能参数.

Table 2 The main performance parameters of anion exchange membrane.

阴离子交换膜	生产厂家	厚度(μm)	离子交换容量(meq/g)	含水率(%)	膜面电阻(Ω·cm <sup>2</sup> )	迁移数(%)
YAP	Fumatech BWT GmbH	60~70	>1.4	12.8	<12	>92
YAB	Fumatech BWT GmbH	130~150	>1.3	13.7	<8	>92
LE-AM-1	杭州绿合	420	1.8	30~45	<13	>95
AMI-7001	Membranes International INC.	500~540	1.7	28	<13	>98
LE 1201	杭州绿合	240	1.9	31	2.4	>98

### 2.2 电渗析装置

电渗析装置由膜、电极、储罐、蠕动泵和直流电源组成(图1)。实验前将膜浸入0.52 mol/L纯磷酸溶液中48 h以达到平衡,采用钛涂钨电极,尺寸为7 cm×6 cm×2 mm。实验过程中阴极室加入0.52 mol/L的模拟湿法磷酸溶液,阳极室加入相同浓度的纯磷酸溶液,所有溶液的初始体积均为500 mL,溶液分别在两极室循环流动,流速为3~5 L/h。分别将5种不同的商业阴离子交换膜用10 mm厚的硅胶密封垫圈固定在两电极室之间,膜的有效使用面积为20 cm<sup>2</sup>。使用直流电源在系统中以电流密度10~50 mA/cm<sup>2</sup>施加恒定的电流,电压和电流可以直接从电源上记录。每隔一段时间从两电极室取一定量的溶液,分析其磷酸和金属离子的浓度,所有样品分别测试3次,取平均值。根据GB/T 2091-2008的标准,用酸碱滴定法测定磷酸的浓度,以酚酞为指示剂,用NaOH标准溶液滴定磷酸。根据GB/T 3049-2006的标准,用紫外分光光度法测定铁离子的浓度。根据GB 11905-1989的标准,用原子吸收光谱法测定镁离子和钙离子的浓度,电渗析过程的电流效率(η)、能量消耗(E)和金

属离子去除率(R<sub>m</sub>)由以下公式计算:

$$\eta = \frac{(C_f V_f - C_i V_i) F}{It} \times 100\% \quad (1)$$

$$E = \int_0^t \frac{UI dt}{(C_f V_f - C_i V_i) M} \quad (2)$$

$$R_m = \left( 1 - \frac{C_{mi}}{C_{mf}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: C<sub>i</sub>和C<sub>f</sub>分别为阳极室初始和实验终了的磷酸浓度(mol/L); V<sub>i</sub>和V<sub>f</sub>分别为阳极室初始和实验终了的体积(L); I、t和U分别为电流、操作时间和电压(A、s、V); M为磷酸的摩尔质量(g/mol); C<sub>mi</sub>和C<sub>mf</sub>分别为阴极室初始和阳极室实验终了的金属离子浓度(mol/L)。

## 3 结果与讨论

### 3.1 膜的种类对电渗析净化湿法磷酸的影响

分别将5种阴离子交换膜装入电渗析净化湿法磷酸装置中运行300 min,溶液流速为4.5 L/h,电流密度为40 mA/cm<sup>2</sup>。不同阴离子交换膜对电渗析的电压,阴、阳极室的磷酸浓度,电流效率,能量消耗和金属离子去除率的影响如图2所示。

电压是影响电渗析实验能耗和膜使用寿命的重要参数之一,相同条件下,电压越高,能量消

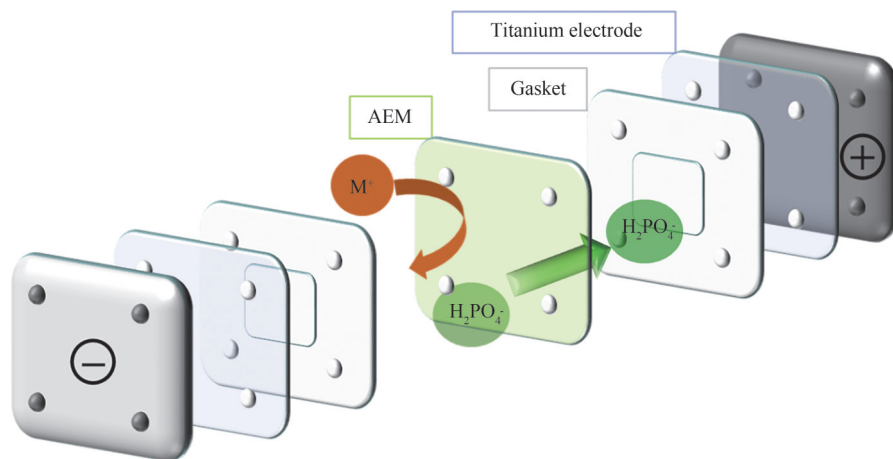


图1 电渗析装置示意图。

Figure 1 Schematic of the mode electro dialysis device.

耗越大,电渗析的操作费用越高,膜的使用寿命越短。由图2(a)可知,所有膜的电压均在电渗析开始时较高,然后迅速下降,最后趋于平缓。这主要是磷酸溶液的电阻较大,使开始运行时的电压较大,随着电渗析的进行,磷酸的一级电离加快,离子的迁移速度加快,溶液的电阻降低,电压迅速降低,当离子的迁移趋于稳定时,电压也基本稳定<sup>[24]</sup>。在实验结束时,YAP、YAB、LE

1201和LE-AM-1 4种膜的电压均保持在较低值。这主要是由于直流电的作用产生的热向容器扩散,使溶液的温度和一级电离均趋于动态平衡,离子的迁移趋于稳定,溶液的电导率保持不变,导致电压较低。而AMI-7001在电渗析进行到240 min时电压迅速上升,这主要是由于膜的迁移数较大,在240 min后阴极室的磷酸氢根离子全部进入阳极室,电流密度高于极限电流密度,

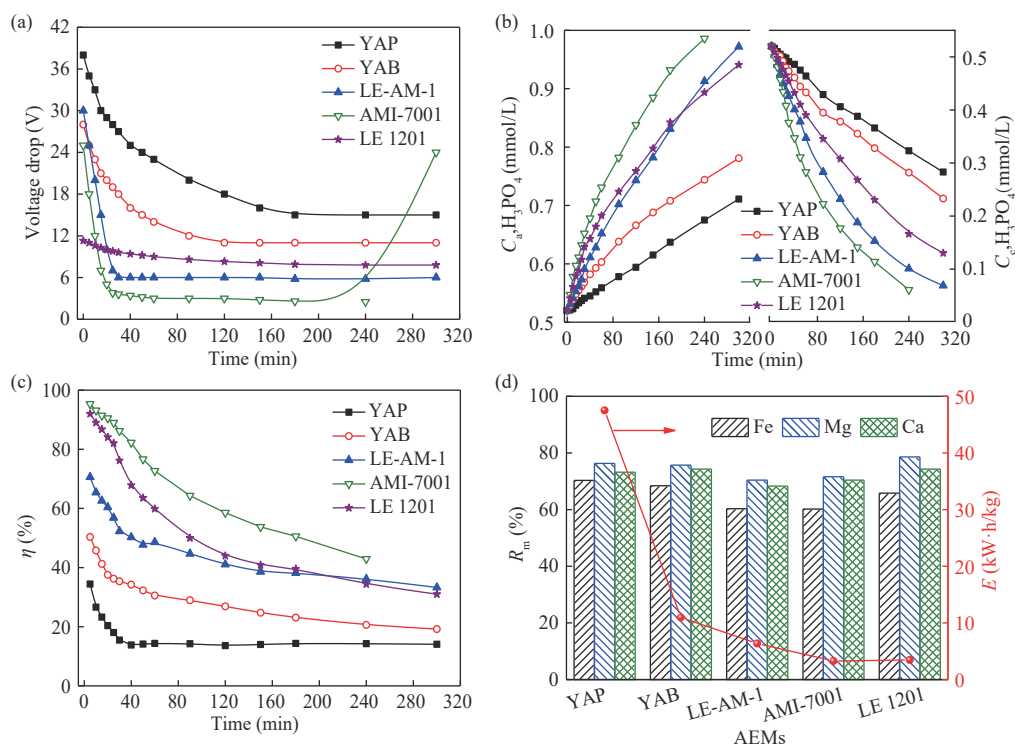


图2 膜的种类对电渗析性能的影响: (a) 电压; (b) 阴极室 ( $C_c$ ) 和阳极室 ( $C_a$ ) 磷酸浓度; (c) 电流效率; (d) 能量消耗和金属离子去除率。

Figure 2 Effect of membranes type on electro dialysis performance: (a) Voltage; (b) Phosphate concentration in the cathode chamber ( $C_c$ ) and anode chamber ( $C_a$ ); (c) Current efficiency; (d) Energy consumption and metal ion removal rate.

电渗析实验结束。AMI-7001在30~240 min之间的电压最低,其能量消耗和操作费用更低,在电渗析中的使用寿命更长。

图2(b)为不同膜在阴极室和阳极室的磷酸浓度随时间的变化曲线。随着电渗析的进行,磷酸氢根离子通过阴离子交换膜从阴极室向阳极室迁移,不同膜的磷酸浓度变化趋势基本一致,阳极室的磷酸浓度逐渐增大,阴极室的磷酸浓度逐渐降低。电渗析实验进行240 min后,阳极室内AMI-7001的磷酸浓度达到最大值,为0.99 mol/L,表明在相同的操作条件下,AMI-7001对磷酸的浓缩效果更好。这主要是由于AMI-7001的迁移数最大,膜内的活性功能基团更多,促进了反离子的迁移,磷酸氢根从阴极室向阳极室的迁移速率加快,在相同的时间内,阴极室向阳极室迁移的磷酸氢根数量增加。

图2(c)为电渗析过程中电流效率的变化曲线。随着电渗析的进行,电流效率逐渐降低,这主要是由于反应时间增加,质子泄漏(氢离子从阴极室向阳极室迁移)现象发生,使电流效率逐渐降低<sup>[25]</sup>。离子交换膜的含水率越大,质子泄漏越明显,电流效率下降越显著。因此,LE 1201、LE-AM-1和AMI-7001的电流效率下降更为明显,但整体来说,AMI-7001的电流效率仍最高。

图2(d)为电渗析过程中平均能量消耗的变化曲线。YAP的能量消耗远高于其他膜,这主要是由于其膜面电阻、操作电压以及质子的泄漏较大,导致能量消耗较大。AMI-7001的能量消耗最低,低的能量消耗可以延长膜在电渗析实验中的使用寿命<sup>[26]</sup>。图2(d)还显示了电渗析净化湿法磷酸溶液300 min后的金属离子去除率,磷酸溶液中3种金属离子的去除率均高于60%。LE-AM-1的金属离子去除率相对较低,这主要是由于膜的含水率较大,大量水填充到膜内,随着电渗析的进行,阴极室内磷酸浓度逐渐降低,促进了同离子在膜内的迁移,即金属离子从阴极室向阳极室迁移,应尽量避免此过程的发生<sup>[27]</sup>。铁离子的去除率低于钙离子和镁离子,主要是由于电渗析过程中铁离子会与磷酸氢根离子生成复合物,而复合物更容易通过阴离子交换膜,使铁离子比其他金属离子更难去除<sup>[5]</sup>。由图2综合考虑磷酸的浓缩、净化效果以及膜的使用寿命,选择AMI-7001膜作为后续电渗析工艺条件考察的膜。

### 3.2 电流密度对电渗析净化湿法磷酸的影响

在电渗析过程中,电流密度是决定电流效率和能耗等性能指标的重要因素之一<sup>[28]</sup>。因此,选择合适的电流密度是提高电渗析性能的关键。本实验选用AMI-7001阴离子交换膜,调节电流密度为10~50 mA/cm<sup>2</sup>,保持流速为4.5 L/h。电渗析的电压,阴、阳极室的磷酸浓度,电流效率,能量消耗和金属离子去除率的结果如图3所示。不同电流密度下膜堆的电压均在电渗析开始时迅速下降,然后趋于平缓(图3(a))。在电渗析实验中,电压主要与膜堆的电流和电阻有关,由于电阻在固定时间内相对恒定,故电压随电流密度的增大而逐渐增大<sup>[29]</sup>。当电流密度为50 mA/cm<sup>2</sup>时,在电渗析进行到180 min之后,电压迅速上升。这主要是由于电流密度增大,电渗析的推动力增大,单位时间内通过阴离子交换膜的磷酸氢根数量增多,在180 min后阴极室的磷酸氢根离子全部进入阳极室,电流密度高于极限电流密度,电渗析实验结束<sup>[30]</sup>。应注意操作电压不能过高,否则会对膜造成损害,降低膜的使用寿命。

如图3(b)所示,随着电流密度的增大,阳极室中磷酸浓度增大速率加快,阴极室中磷酸浓度减小速率也同样加快。电渗析净化湿法磷酸240 min后,电流密度为10 mA/cm<sup>2</sup>和40 mA/cm<sup>2</sup>的阳极室磷酸浓度分别为0.67 mol/L和0.99 mol/L,表明电流密度越大,驱动力越大,磷酸氢根从阴极室迁移到阳极室的速度越快。电流密度的增大加快了电渗析的实验进程,电流密度在10~30 mA/cm<sup>2</sup>时,阳极室浓度达到最大值所需时间更长,而电流密度在40 mA/cm<sup>2</sup>时只需240 min,50 mA/cm<sup>2</sup>时仅需180 min。

如图3(c)和图3(d)所示,随着电流密度的增加,电流效率和能耗逐渐增大,这主要是由于在高电流密度下,边界层浓差极化加剧,为了克服膜堆电阻,需要消耗更多的能量,从而导致高能耗<sup>[29]</sup>。随着实验的进行,质子泄漏现象明显,电流效率逐渐降低。电流密度也会影响回收室中金属杂质的含量,由图3(d)可知,金属离子去除率随着电流密度的增大而略有降低,这可以归因于在磷酸体系中,随着电流密度的增加,金属离子更易形成带电络合物,从而通过阴离子交换膜向阳极室迁移。因此,考

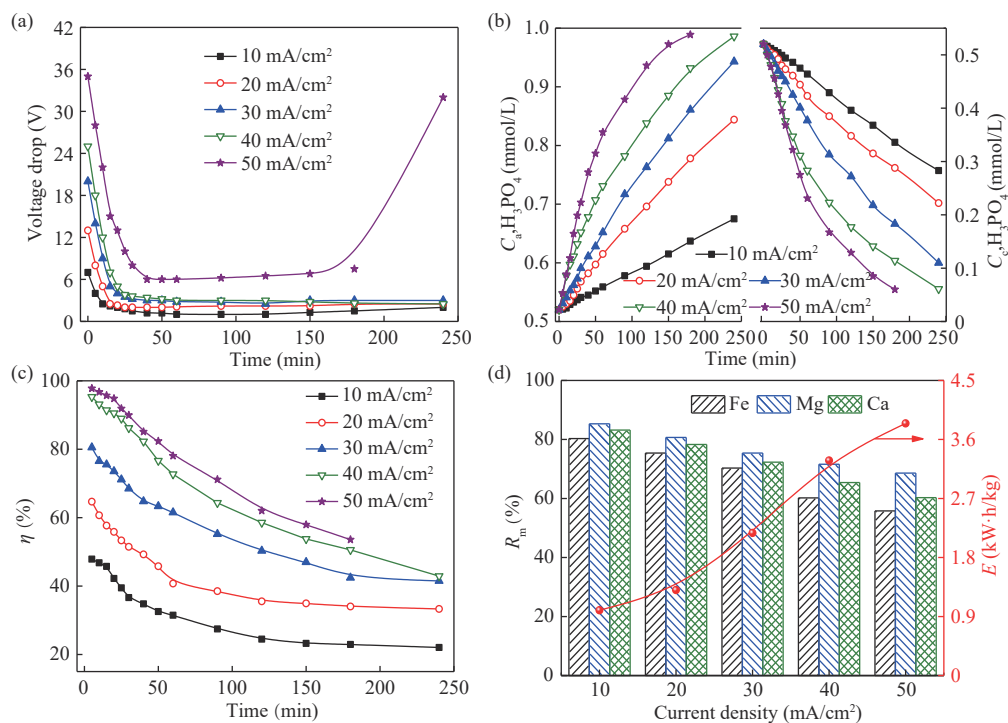


图3 电流密度对电渗析性能的影响: (a) 电压; (b) 阴极室 ( $C_c$ ) 和阳极室 ( $C_a$ ) 磷酸浓度; (c) 电流效率; (d) 能量消耗和金属离子去除率。

Figure 3 Effect of current density on electrodialysis performance: (a) Voltage; (b) Phosphate concentration in the cathode chamber ( $C_c$ ) and anode chamber ( $C_a$ ); (c) Current efficiency; (d) Energy consumption and metal ion removal rate.

考虑到金属离子去除率、能耗和电流效率，电流密度为  $40 \text{ mA/cm}^2$  是较好的选择。

### 3.3 溶液流速对电渗析净化湿法磷酸的影响

电渗析净化湿法磷酸采取连续操作的方式，湿法磷酸和纯磷酸溶液以一定的速率在阴极室和阳极室循环流动，因此，选择合适的溶液流速，使溶液处于较稳定的循环状态非常重要。将阴离子交换膜 AMI-7001 装入电渗析净化湿法磷酸装置中，调节溶液流速为  $3\sim 5 \text{ L/h}$ ，保持电流密度为  $40 \text{ mA/cm}^2$ 。不同的溶液流速对电渗析性能的影响如图 4 所示。

图 4(a) 显示了溶液流速对电压的影响，随着实验的进行，电压呈现先下降后稳定的趋势。最初的下降是磷酸通过阴离子交换膜引起的，约  $25 \text{ min}$  后，电渗析状态开始稳定，电压也达到稳定状态，随着溶液流速的增加，电压逐渐降低。图 4(b) 显示了溶液流速对磷酸浓度的影响，阳极室磷酸浓度随着时间的推移而增加，阴极室则相反，流速在  $4.5 \text{ L/h}$  时，阳极室磷酸浓度增至  $0.99 \text{ mol/L}$ ，而阴极室则降至  $0.06 \text{ mol/L}$ 。在电流密度相同的情况下，低流速

下的磷酸浓缩需要的时间更长，但流速在  $5 \text{ L/h}$  时磷酸的浓缩效果略有降低，可能是由于流速太大，在相应的时间里磷酸氢根离子还未来得及通过阴离子交换膜。图 4(c) 和图 4(d) 显示了不同流速下的电流效率和能耗。能耗随流速的增加而降低，这主要是由于在相同的电流密度下，大流速所需的反应时间更短。同时，溶液流速较低时，边界层增厚，浓差极化显著，使得迁移量下降。在溶液流速达到  $5 \text{ L/h}$  后能耗又开始略有上升，这可能是由于进料液的增加需要更多的能量来循环。相比之下，电流效率相对稳定，但整体电流效率随流速的增加而增大。此外，溶液流速过高会降低阴离子交换膜的使用寿命<sup>[31]</sup>。因此， $4.5 \text{ L/h}$  的溶液流速较为合适。

在电流密度为  $40 \text{ mA/cm}^2$ ，溶液流速为  $4.5 \text{ L/h}$  的条件下，采用 AMI-7001 阴离子交换膜对模拟湿法磷酸进行电渗析净化实验结果如表 3 所示，净化后湿法磷酸中各类杂质的含量显著降低，杂质的含量均达到 GB/T 2091-2008 的限值要求，产品纯度满足工业级应用标准。

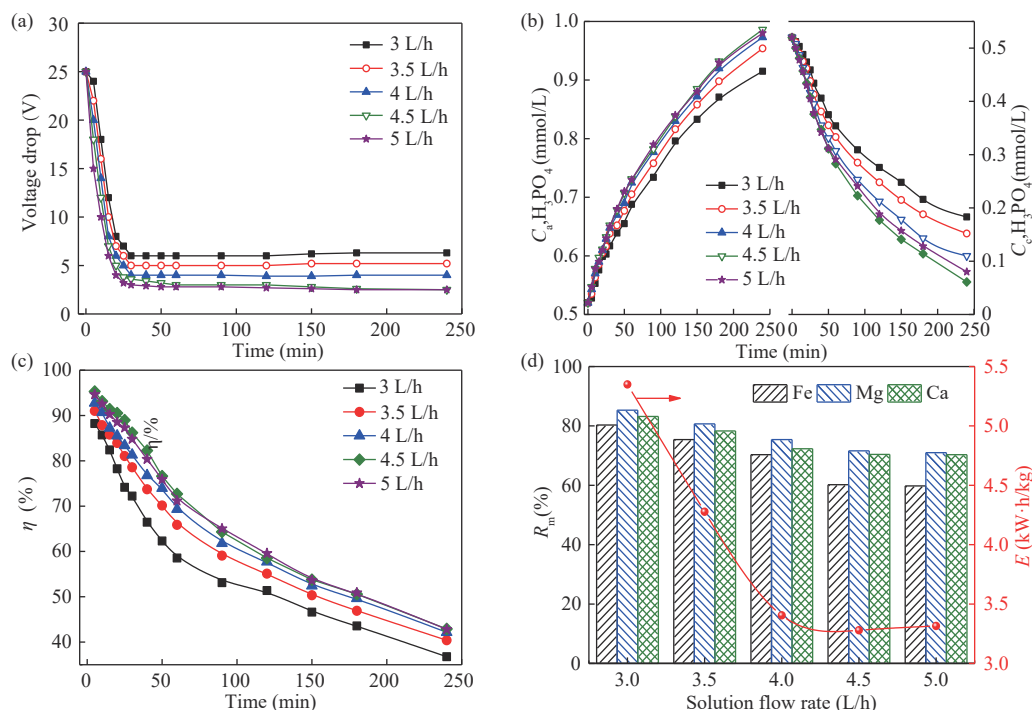


图4 溶液流速对电渗析性能的影响: (a) 电压; (b) 阴极室 ( $C_c$ ) 和阳极室 ( $C_a$ ) 磷酸浓度; (c) 电流效率; (d) 能量消耗和金属离子去除率。

Figure 4 Effect of solution velocity on electro dialysis performance: (a) Voltage; (b) Phosphate concentration in the cathode chamber ( $C_c$ ) and anode chamber ( $C_a$ ); (c) Current efficiency; (d) Energy consumption and metal ion removal rate.

表3 电渗析法净化模拟湿法磷酸的杂质含量。

Table 3 Impurity content in simulated wet phosphoric acid purified by electro dialysis.

杂质含量	Fe(mg/L)	Mg(mg/L)	Ca(mg/L)
GB	≤500	≤200	≤200
原料	1100	700	400
产品	280	115	88

## 4 结论

在电渗析浓缩净化湿法磷酸的基础上, 文章对比 5 种商业阴离子交换膜、电流密度和溶

液流速对电渗析净化湿法磷酸性能的影响。研究表明, 采用膜 AMI-7001 时, 湿法磷酸的浓缩和净化效果最佳; 电流密度和溶液流速对电渗析的性能影响较大, 提高电流密度和溶液流速可以缩短湿法磷酸的浓缩和净化时间。综合考虑能耗和金属离子去除率的影响, 使用膜 AMI-7001, 电流密度为  $40 \text{ mA/cm}^2$ , 溶液流速为  $4.5 \text{ L/h}$  时, 磷酸的金属离子去除率在  $70\%$  以上, 能耗在  $3.3 \text{ kW}\cdot\text{h/kg}$  以下。因此, 电渗析工艺在浓缩和净化湿法磷酸中的发展前景广阔。

## 参考文献

- 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, 62.
- Forouzesh M, Fatehifar E, Khoshbouy R, et al. Experimental investigation of iron removal from wet phosphoric acid through chemical precipitation process[J]. *Chem Eng Res Des*, **2023**, 189: 308-318.
- 张大洲, 龙辉, 卢文新, 等. 电子级磷酸研究现状及发展趋势分析[J]. 化肥设计, **2022**, 60(4): 1-4, 20.
- Wang J, Liu M, Feng Z, et al. Highly conductive anion exchange membrane with a stable double-sided anti-fouling structure for electro dialysis desalination of protein systems[J]. *Desalination*, **2023**, 545: 116167.
- Elleuch M B C, Amor M B, Pourcelly G. Phosphoric acid purification by a membrane process: Electrodeionization on ion-exchange textiles[J]. *Sep Purif Technol*, **2006**, 51: 285-290.

- 6 Liu G, Wang A, Ji W, et al. In-situ crosslinked, side chain polybenzimidazole-based anion exchange membranes for alkaline direct methanol fuel cells[J]. *Chem Eng J*, **2023**, 454:140046.
- 7 Lv L, Liao H, Zhang T, et al. Separation of calcium chloride from waste acidic raffinate in HCl wet process for phosphoric acid manufacture: Simulated and experimental study[J]. *J Environ Chem Eng*, **2022**, 10: 108076.
- 8 Oueriemi S, Ben Amor H, Hassen W, et al. Removal of organic matter from tunisian industrial phosphoric acid by adsorption onto purified natural illite/kaolinite clay: Kinetics, isothermal and thermodynamic studies[J]. *Materials*, **2023**, 16:6228.
- 9 周越, 陈乾, 葛亮, 等. 扩散渗析法回收钢铁酸洗废液中盐酸[J]. *离子交换与吸附*, **2023**, 39(5): 409-418.
- 10 Sow P K, Shukla A. Electro-electrodialysis for concentration of hydroiodic acid[J]. *Int J Hydrogen Energy*, **2012**, 37: 3931-3937.
- 11 Zouhri N, Habzize S, Amrani M E, et al. Generation of sulfuric acid and sodium hydroxide from the sodium sulphate salt by electro-electrodialysis (EED) [J]. *Am J Appl Chem*, **2013**, 1: 75-78.
- 12 Cattoir S, Smets D, Rahier A. The use of electro-electrodialysis for the removal of sulphuric acid from decontamination effluents[J]. *Desalination*, **1999**, 121: 123-130.
- 13 Yan H, Wu C, Wu Y. Optimized process for separating NaOH from sodium aluminate solution: Coupling of electrodialysis and electro-electrodialysis[J]. *Ind Eng Chem Res*, **2015**, 54: 1876-1886.
- 14 卫新来, 李旭, 吴克, 等. 复分解电渗析绿色高效制备醋酸锂[J]. *膜科学与技术*, **2024**, 44(3): 115-123.
- 15 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.
- 16 Bahsaine K, Mekhzoum M E M, Benzeid H, et al. Recent progress in heavy metals extraction from phosphoric acid: A short review[J]. *J Ind Eng Chem*, **2022**, 115: 120-134.
- 17 Liu D. Purification of phosphoric acid by electrodialysis[J]. *J Shenyang Inst Chem Technol*, **1990**, 4: 81-90.
- 18 Touaibia D, Kerdjoudj H. Concentration and purification of wet industrial phosphoric acid by electro-electrodialysis[J]. *J Appl Electrochem*, **1996**, 26: 1071-1073.
- 19 Machorro J J, Olvera J C, Larios A, et al. Electrodialysis of phosphates in industrial-grade phosphoric acid[J]. *ISRN Electrochem*, **2013**, 2013: 1-13.
- 20 Ottosen L M, Jensen P E, Kirkelund G M. Electrodialytic separation of phosphorus and heavy metals from two types of sewage sludge ash[J]. *Sep Sci Technol*, **2014**, 49: 1910-1920.
- 21 Duan X, Wang C, Wang T, et al. Removal of metal ions in phosphoric acid by electro-electrodialysis with cross-linked anion-exchange membranes[J]. *ACS Omega*, **2021**, 6: 32417-32430.
- 22 Duan X, Wang C, Wang T, et al. Comb-shaped anion exchange membrane to enhance phosphoric acid purification by electro-electrodialysis[J]. *J Membr Sci*, **2019**, 573: 64-72.
- 23 Duan X, Wang C, Wang T, et al. A polysulfone-based anion exchange membrane for phosphoric acid concentration and purification by electro-electrodialysis[J]. *J Membr Sci*, **2018**, 552: 86-94.
- 24 Pisarska B, Jaroszek H, Mikoszekulf W, et al. Application of electro-electrodialysis for processing of sodium sulphate waste solutions containing organic compounds: Preliminary study[J]. *J Cleaner Production*, **2017**, 142: 3741-3747.
- 25 Jaroszek H, Mikolajczak W, Nowak M, et al. Comparison of the applicability of selected anion-exchange membranes for production of sulfuric acid by electro-electrodialysis[J]. *Desalin Water Treat*, **2017**, 64:223-227.
- 26 Strnad J, Kincl M, Bene J, et al. Overlimiting mechanisms of heterogeneous cation- and anion-exchange membranes: A side-by-side comparison[J]. *Desalination*, **2024**, 571: 117093.
- 27 Xu M, Li S, Jin Z, et al. Mathematical model and experiment investigation on electrodialysis separation process of LiBr from NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O-LiBr ternary solution in ammonia absorption refrigeration system[J]. *Int J Refrig*, **2024**, 158: 9-24.
- 28 Gao W, Zhao H, Wei X, et al. A green and economical method for preparing potassium glutamate through electrodialysis metathesis[J]. *Ind Eng Chem Res*, **2022**, 61: 1486-1493.
- 29 Xue S, Wu C, Wu Y, et al. An optimized process for treating sodium acetate waste residue: Coupling of diffusion dialysis or electrodialysis with bipolar membrane electrodialysis[J]. *Chem Eng Res Des*, **2018**, 129: 237-247.
- 30 Sedighi M, Behvand U M M, Ismail A F, et al. Environmental sustainability and ions removal through electrodialysis desalination: Operating conditions and process parameters[J]. *Desalination*, **2023**, 549: 116319.

- 31 Wang C, Li T, Yu G, et al. Removal of low concentrations of nickel ions in electroplating wastewater by combination of electrodialysis and electrodeposition[J]. *Chemosphere*, **2021**, 263: 128208.

Research paper

## Study on Concentration and Purification of Wet Phosphoric Acid by Eletrodialysis

LIU Yi-tian, TU Ya-lan, QI Xin-gang, WANG Li, XU Lin-po, CHENG Man-yu, ZHANG Yu, DUAN Xiao-ling\*  
(School of Chemistry and Life Sciences, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China)

**Abstract** The wet phosphoric acid contains more metal ion impurities such as calcium, magnesium and iron, and must be purified to produce phosphoric acid and phosphate products above industrial grade. In this paper, electrodialysis was used to concentrate and purify wet phosphoric acid in one step, and the application differences of five different commercial anion exchange membranes in electrodialysis purification of wet phosphoric acid were compared. Meanwhile, the effects of current density and solution flow rate on the electrodialysis performance were investigated, while voltage of the stack, phosphoric acid concentration in the cathode chamber and anode chamber, metal ion removal rate, current efficiency, and average energy consumption were used as evaluation indexes. The experimental results indicated that when AMI-7001 membrane was used, the current density was 40 mA/cm<sup>2</sup>, and the flow rate was 4.5 L/h, the removal rate of metal ions was more than 70%, and the energy consumption was less than 3.3 kW·h/kg. Electrodialysis was an effective method for concentration and purification of wet phosphoric acid solution, which was environmentally friendly, simple to operate, and has an important reference significance for concentration and purification of wet phosphoric acid.

**Keywords** Electrodialysis, Anion exchange membrane, Wet phosphoric acid, Metal ion

---

\* Corresponding author: DUAN Xiao-ling, E-mail: xlduan@hue.edu.cn.