◆磷及关联产业工艺创新◆

湿法净化磷酸对热法磷酸的替代效应分析

刘帅杰

（新洋丰农业科技股份有限公司，湖北 荆门 448000）

［摘 要］介绍几种成熟的湿法磷酸净化工艺技术，围绕政策、生产成本、工艺成熟度、磷矿质量要求、产品质量、环境影响等方面比较湿法净化磷酸与热法磷酸的优劣势。分析湿法净化磷酸的历史变化及未来发展趋势，探讨湿法净化磷酸对热法磷酸的替代效应及市场空间。

［关键词］湿法净化磷酸；热法磷酸；替代效用

［中图分类号］TQ126.3+5 ［文献标志码］A ［文章编号］2097-4566（2024）07-0033-05

Analysis of the substitution effect of wet-process purified phosphoric acid on thermal-process phosphoric acid

LIU Shuaijie

(*Xinyangfeng Agricultural Technology Co., Ltd., Jingmen* 448000, *China*)

Abstract: Several mature wet-process phosphoric acid purification technologies are introduced, and the advantages and disadvantages of wet-process purified phosphoric acid and thermal-process phosphoric acid are compared in terms of policy, production cost, technical maturity, phosphate rock quality requirements, product quality and environmental impact. The historical changes and future development trends of wet-process purified phosphoric acid are analyzed, its substitution effect on thermal-process phosphoric acid and the market space for wet-process purified phosphoric acid are discussed.

Key words: wet-process purified phosphoric acid; thermal-process phosphoric acid; substitution effect

磷酸是磷化工的重要原料，其生产工艺分为热法与湿法两种路线。其中，热法磷酸产品纯度高；湿法磷酸中杂质种类多、含量波动大，且净化工艺存在一定技术难度。因此，热法磷酸一度成为我国工业磷酸生产的主流工艺。近些年随着湿法磷酸净化工艺的成熟，湿法净化磷酸市场渗透率逐步提升，既推动了我国磷化工市场的结构调整，又有助于促进我国磷化工产业的转型发展[1]。因此，笔者以此为切入点，重点探究湿法净化磷酸对热法磷酸的替代效应，以期为我国磷化工企业的发展提供参考借鉴。

1 湿法磷酸净化工艺技术

我国以溶剂萃取法为代表的湿法磷酸净化工艺经多年研究，已趋于成熟并实现大规模工业化应用。目前，国内湿法磷酸净化的主流工艺分别以瓮福（集团）有限责任公司（以下简称瓮福集团）、四川大学、华中师范大学为代表而形成了3种典型的技术路线[2]。

1.1 瓮福集团湿法磷酸净化工艺

瓮福集团在引进国外湿法磷酸净化技术的基础上，经自主研发开发出有机溶剂萃取工艺技术，工艺流程如图1所示。湿法粗磷酸经预处理、萃取及后处理工序后产出$w(H_3PO_4)$ 85%的湿法净化磷酸

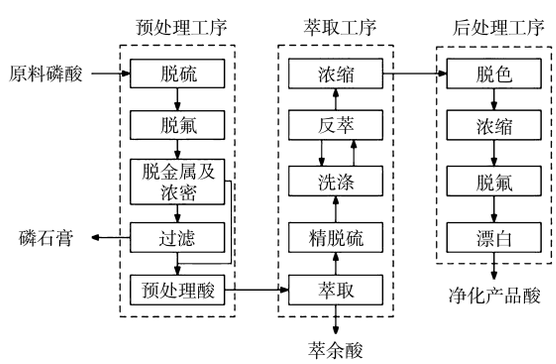

图1 瓮福集团湿法磷酸净化工艺流程

［收稿日期］2024-01-11

［作者简介］刘帅杰(1994-)，男，山西忻州人，工程师，从事精细磷、氟化工及新能源材料研究。E-mail:531611073@qq.com

产品。该工艺装置运行稳定，还可同时满足工业级磷酸、食品级磷酸的生产需求[1-3]。截至目前，瓮福集团已利用该技术在国内建成产能约 160 万 t/a 的生产装置，并且该技术在贵州开磷股份有限公司（简称贵州开磷）、湖北兴发化工集团股份有限公司（简称兴发集团）等企业得到推广。瓮福集团技术已成为国内建成装置产能最大的工艺路线。

1.2　四川大学湿法磷酸净化工艺

四川大学与中化重庆涪陵化工有限公司（简称中化涪陵）经多年联合攻关，开发了混合溶剂萃取湿法磷酸净化技术，其工艺流程如图 2 所示。稀磷酸经预处理、二次脱硫脱氟、萃取、洗涤、反萃取、浓缩等工序后产出湿法净化磷酸产品[4-5]。采用该工艺可直接生产 $w(H_3PO_4)$ 75%的磷酸。如要生产 $w(H_3PO_4)$ 85%的磷酸，需进一步增加深度脱氟工序[2, 6]。截至目前，该工艺已在安徽六国化工股份有限公司（简称六国化工）、中化涪陵、昆明川金诺化工股份有限公司（简称川金诺）、云南云天化股份有限公司（简称云天化）、成都云图控股股份有限公司（简称云图控股）等企业实现应用，成为国内推广范围最广的工艺路线。

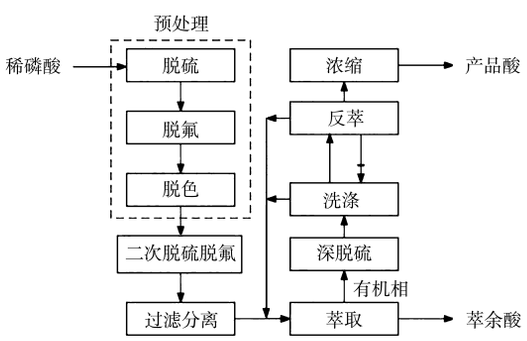

图 2　四川大学湿法磷酸净化工艺流程

1.3　华中师范大学湿法磷酸净化工艺

华中师范大学经自主研发形成了湿法磷酸精制技术。该技术稀磷酸经预处理、萃取、溶剂回收、后处理等工序后，制备出 $w(H_3PO_4)$ 85%的工业磷酸，且废渣及尾液可回收后用于肥料生产[7-9]。该工艺所得磷酸产品质量满足 HG/T 4069—2008 规定的合格品要求[2]。截至目前，该工艺已在湖北三宁化工股份有限公司（简称三宁化工）、湖北中孚化工集团有限公司（简称中孚化工）、史丹利农业集团股份有限公司（简称史丹利）等企业得到应用。

2　湿法净化磷酸与热法磷酸的比较分析

2.1　政策支持度

政策严控黄磷新增产能，鼓励湿法净化磷酸发展。2023 年 12 月，国家发展和改革委员会公布《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，黄磷生产装置被纳入限制类目录；2024 年 1 月，工业和信息化部等八部门公布《推进磷资源高效高值利用实施方案》，明确提出严格控制黄磷等行业新增产能，推广湿法磷酸净化生产技术。另外，贵州、云南、湖北、四川等磷化工大省在相关政策中亦提出要严控黄磷新增产能，加快推广湿法磷酸净化工艺。

2.2　生产成本

湿法净化磷酸生产成本更低。根据相关文献信息及生意社价格测算，热法磷酸（以 P_2O_5 计）成本约 13 000 元/t，湿法净化磷酸（以 P_2O_5 计）成本约 9 600 元/t（见图 3）[6, 10]，相比热法磷酸，湿法净化磷酸成本降低 20% ~ 30%。

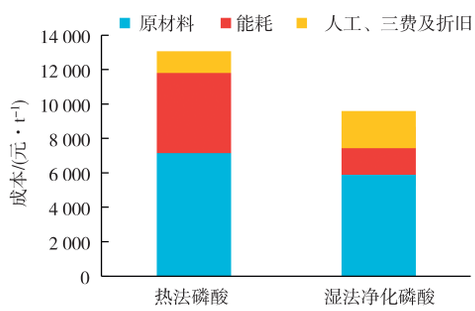

图 3　热法磷酸、湿法净化磷酸生产成本比较

2.3　工艺成熟度

热法磷酸与湿法净化磷酸工艺均处于成熟阶段。我国关于热法磷酸生产工艺的研究历经 60 余年，已处于成熟阶段，形成了带热能回收技术的二步法生产流程，并逐步向节能化、安全环保化、精细化等方向发展[11]。湿法净化磷酸工艺研究虽起步略晚，但经多年发展，目前以瓮福集团、四川大学、华中师范大学等为代表的工艺路线已实现大规模工业化应用[1-2]。

2.4　磷矿质量要求

我国磷矿资源储量虽是世界第二，但从储量构成来看，90%以上的资源为中低品位磷矿，品位（$w(P_2O_5)$）大于 30%的富矿仅占探明储量的 7%，平均品位仅 16.85%，存在高品位矿石资源极少、中低品位磷矿资源多的特征[12-13]。因此，对中低品位磷矿石的合理有效利用，是我国磷化工行业稳定持续发展的关键。热法磷酸生产所需的黄磷对磷矿品位要求较高。根据相关研究，我国黄磷企业为节能降本，生产所需磷矿仍以富矿（$w(P_2O_5) \geqslant 28\%$）为主[14]。湿法磷酸工艺可采用中低品位磷矿为原料进行生产，对磷矿石的适应性更强[15]。

2.5　产品质量

在当前技术水平下，湿法磷酸净化工艺可得到工业级、食品级磷酸产品，但由于在生产过程中会引入较多杂质，尚无法用于制备高纯的电子级磷酸。目前，国内以黄磷净化与磷酸净化为代表的电子级磷酸生产技术，本质上均属于热法路线[16]。

2.6　环境影响度

黄磷是热法磷酸生产不可或缺的原料，属于高污染、高能耗、高碳排放行业。生产 1 t 黄磷过程的碳足迹约 15 800 kg（以 CO_2 计），副产物有炉渣、尾气和泥磷等[17]。同时，生产热法磷酸、湿法净化磷酸的能耗分别约为标准煤 1.859 5、0.645 4 t/t，热法磷酸能耗远高于湿法净化磷酸[6]。

湿法净化磷酸生产的环境影响主要体现在磷石膏的处置与综合利用。生产磷酸 P_2O_5 1 t 副产磷石膏 4 ~ 5 t，磷石膏主要成分为 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$，具有杂质成分复杂、水含量高等特征，存在处理成本高、下游应用市场开拓难等问题。如不能妥善处置或综合利用，将对环境产生较大的影响[18]。《推进磷资源高效高值利用实施方案》提出到 2026 年，新增磷石膏无害化处理率达到 100%，综合利用率达到 65%，存量磷石膏有序消纳。磷石膏的处置与综合利用难题有望逐步解决。

2.7　小结

基于以上，湿法净化磷酸与热法磷酸工艺均处于成熟阶段。但湿法净化磷酸在政策支持度、生产成本、磷矿石适应性、环境影响度等方面具有优势，在部分应用端对热法磷酸形成替代效应。同时，基于当前热法磷酸产品在超高纯应用领域具有一定不可替代性，将推动湿法净化磷酸与热法磷酸形成差异化发展。

3　湿法净化磷酸对热法磷酸的替代效应

3.1　发展趋势分析

3.1.1　历史变化趋势

从长期发展趋势看，热法磷酸产能、产量呈下降趋势，湿法净化磷酸产能、产量大幅度增加（见表 1、表 2）。根据百川盈孚、隆众资讯、中国无机盐工业协会磷化工分会以及瓮福集团重组系列报告等公开信息统计，2017—2022 年，湿法净化磷酸、热法磷酸的产能增长率分别为 188%、−28%。其中，湿法净化磷酸产能 2022 年增至 245 万 t/a，占磷酸总产能的 50.3%，占比首次超过热法磷酸。同时，2015—2022 年，热法磷酸、湿法净化磷酸产量年均复合增长率分别达−4.94%、23.7%。2017—2022 年，热法磷酸、湿法净化磷酸的平均产能利用率分别为 41%、73%（见表 3）。湿法净化磷酸的产能及产量增速、产能利用率均明显高于热法磷酸，替代效应逐步显现。

表 1　热法磷酸、湿法净化磷酸产能变化

年份	磷酸总产能/（万 t·a^{-1}）	热法磷酸产能/（万 t·a^{-1}）	湿法净化磷酸产能/（万 t·a^{-1}）	湿法净化磷酸产能占比/%
2017	419.1	334.1	85	20.3
2018	448.6	333.6	115	25.6
2019	424.9	284.9	140	32.9
2020	423.9	283.9	140	33.0
2021	382.0	242.0	140	36.6
2022	487.0	242.0	245	50.3

表 2　热法磷酸、湿法净化磷酸产量变化

年份	热法磷酸产量/万 t	湿法净化磷酸产量/万 t	湿法净化磷酸产量占比/%
2010	150	20	12
2015	145	40	22
2021	106	113	51
2022	103	158	59

表 3　热法磷酸、湿法净化磷酸产能利用率变化

项目	产能利用率/%		项目	产能利用率/%	
	热法磷酸	湿法净化磷酸		热法磷酸	湿法净化磷酸
2018 年	37	79	2021 年	44	81
2019 年	44	67	2022 年	43	64
2020 年	39	72	平均	41	73

从当前态势来看，热法磷酸趋于稳定发展，湿法净化磷酸处于起步发展阶段。经长期压减调整后，2022 年热法磷酸产能、产量均保持大致稳定状态；湿法净化磷酸产能、产量相较 2021 年分别大幅度提升 105 万 t/a、45 万 t。基于政策限制，未来热法磷酸产能新增困难，而随着湿法净化磷酸产能释放，对热法磷酸的替代效应将更加显著。

另外，热法磷酸在黄磷消费结构中的占比亦持续下降。据百川盈孚统计，2019—2022 年，热法磷酸在黄磷消费结构中的占比由 47% 下降至 40%（见表 4）。在同期新能源行业获得快速发展并驱动磷化工产品需求向好的情况下，一定程度上间接说明了湿法净化磷酸对热法磷酸的替代效应逐步加强。

表 4　2019—2022 年黄磷消费结构

年份	黄磷表观消费量/万 t	消费占比/%			
		热法磷酸	草甘膦	三氯化磷	其他
2019	74.52	47	27	15	11
2020	73.58	46	26	15	13
2021	72.34	42	30	17	11
2022	78.58	40	25	24	11

3.1.2　未来发展趋势

经统计梳理，2022 年国内湿法净化磷酸产能

约 245 万 t/a，其中，贵州磷化（集团）有限责任公司（简称贵州磷化）净化磷酸产能居全国首位，产能占比达 65.35%。根据公开信息整理，国内湿法净化磷酸规划产能达 401 万 t/a，主要由大型磷化工企业配套磷酸铁锂等新能源材料建设。我国主要磷化工企业湿法净化磷酸产能统计见表 5。考虑到近期磷酸铁锂市场行情低迷、磷石膏处置能力限制等问题，上述项目建设进度或许会放缓。

表 5　我国主要磷化工企业湿法净化磷酸产能统计

项目	产能/(万 t·a^{-1})		说明
	2022 年	规划	
贵州磷化	160	40	开磷 40 万 t/a 净化磷酸项目投产后，贵州磷化净化磷酸总产能达 160 万 t/a，同时贵阳开磷化肥有限公司拟建 40 万 t/a 净化磷酸项目
兴发集团	10	5	实施湿法磷酸精制技术改造项目，拟将食品级磷酸产能提升为 15 万 t/a
三宁化工	10	10	10 万 t/a 磷酸精制项目 2016 年建成；建设湿法磷酸节能减排技改项目，生产 10 万 t/a 工业磷酸
云天化	30	10	云南磷化集团海口磷业有限公司 2012 年建成 10 万 t/a 湿法净化磷酸产能；云南天安化工有限公司 2022 年已建成 20 万 t/a 湿法净化磷酸产能，另云南三环中化化肥有限公司在建 10 万 t/a 湿法净化磷酸产能
川金诺	10	5	防城港基地 10 万 t/a 精制磷酸 2022 年投产，并规划通过技改将产能提升至 15 万 t/a
六国化工	5	28	拟于当阳市建设 28 万 t/a 电池级精制磷酸项目
中孚化工	10		10 万 t/a 工业磷酸 2015 年 9 月顺利投产
中化涪陵	10		中化涪陵环保搬迁项目包含 10 万 t/a 净化磷酸产能
史丹利		20	拟在松滋建设新能源材料前驱体磷酸铁及配套项目，包含 20 万 t/a 精制磷酸装置
贵州川恒化工股份有限公司		32	拟于广西基地建设 10 万 t/a 食品级净化磷酸项目；拟于福泉建设 10 万 t/a 食品级净化磷酸项目、中低品位磷矿综合利用生产 12 万 t/a 食品级净化磷酸项目
云图控股		40	拟于荆州建设 35 万 t/a 电池级磷酸铁及相关配套项目，包含 30 万 t/a 精制磷酸；拟于襄阳建设绿色化工循环产业园项目，包含 10 万 t/a 精制磷酸
深圳市芭田生态工程股份有限公司		15	拟建硝酸法生产 15 万 t/a 高纯磷酸项目
新洋丰农业科技股份有限公司		10	荆门新洋丰中磷肥业有限公司建设 10 万 t/a 精制磷酸项目
湖北宜化化工股份有限公司		40	投资建设 20 万 t/a 精制磷酸、65 万 t/a 磷铵搬迁及配套装置升级改造项目；宜昌邦普宜化新材料有限公司配套原料及磷酸铁项目，包含 20 万 t/a 精制磷酸
宜宾天原集团股份有限公司		8	拟建 10 万 t/a 磷酸铁锂正极材料一体化项目，包含 8 万 t/a 精制磷酸项目
四川发展龙蟒股份有限公司		20	拟投资建设磷酸盐节能环保改造项目，包含 20 万 t/a 湿法净化磷酸装置
广西粤桂广业控股股份有限公司		10	广东广业云硫矿业有限公司拟投资建设 10 万 t/a 精制湿法磷酸项目
江苏东方盛虹股份有限公司		28	湖北海格斯新能源股份有限公司拟建配套原料及磷酸铁、磷酸铁锂新能源材料项目，包含 28 万 t/a 湿法磷酸净化装置
云南祥丰金麦化工有限公司		10	10 万 t/a 新能源材料前驱体配套项目，包含 10 万 t/a 工业级湿法净化磷酸产能
湖北祥云(集团)化工股份有限公司		40	新祥云新材料产业园项目生产 40 万 t/a 湿法净化磷酸，分两期进行
金正大生态工程集团股份有限公司		10	金正大诺泰尔化学有限公司实施 40 万 t/a 电池用磷酸二氢铵和 10 万 t/a 净化磷酸项目
安徽省司尔特肥业股份有限公司		20	拟在开阳县投资建设的磷氟新材料矿化一体化产业园项目，包含 20 万 t/a 湿法净化磷酸装置
合计	245	401	

基于热法磷酸受黄磷新增产能限制缘故，预计其产能变化较小。假设热法磷酸产能不变，结合湿法净化磷酸的产能规划情况，预计 2025 年国内磷酸总产能将达 858 万 t。其中，湿法净化磷酸产能达 616 万 t，产能占比提升至 72%（见表 6），成为国内磷酸供给的绝对主力。湿法净化磷酸替代热法磷酸成为磷化工发展的大趋势。

表 6　国内磷酸产能变化预测

年份	湿法净化磷酸产能/万 t	热法磷酸产能/万 t	磷酸总产能/万 t	湿法净化磷酸产能占比/%
2022	245	242	487	50
2023	420	242	662	63
2024	508	242	750	68
2025	616	242	858	72

3.2　替代市场分析

3.2.1　替代效应

磷酸下游产品包括不同等级的磷酸盐及磷酸，分别应用于工业、食品、医药及电子领域。热法磷酸与湿法净化磷酸目前主要在工业级、食品级应用领域存在竞争替代关系。《中国无机盐工业年鉴（2022）》指出，未来我国湿法磷酸产量增长主要来自磷酸铁锂对湿法净化磷酸的需求，热法磷酸占工业磷酸的比重将进一步下降并最终趋于稳定，未

来热法磷酸主要应用于直接用酸与高品质磷酸盐；热法磷酸生产企业江苏澄星磷化工股份有限公司年报披露，湿法磷酸下游主要应用于工业级磷酸和磷酸盐，热法磷酸下游可以用于高附加值的电子级、食品级磷酸和磷酸盐；瓮福集团在其系列重组报告中披露，除了食品级磷酸的小部分需求只能用热法磷酸外，其他需求均可用湿法净化磷酸替代。

综上，湿法净化磷酸替代热法磷酸并逐步扩大市场份额主要有两个方向：在传统工业级、食品级磷酸盐领域，湿法净化磷酸逐步替代热法磷酸；新兴磷系新能源材料领域，湿法净化磷酸将占据主导地位。而热法磷酸将更聚焦于电子级磷酸、高纯特种磷酸盐等高端应用领域。在该发展趋势推动下，湿法净化磷酸与热法磷酸将形成差异化发展。

目前发达国家磷化工产业已经历了以热法磷酸为主逐步过渡到湿法磷酸为主的过程，其湿法净化磷酸渗透率已达80%以上[1]。而当前我国正处于该转换过程中，2022年湿法净化磷酸产量仅占磷酸总产量的59%，随着湿法净化磷酸对热法磷酸的替代效应进一步加强，其渗透率有望进一步提升。

3.2.2　市场前景

磷酸铁将成为湿法净化磷酸的主要需求增长点。随着以电动汽车、储能为代表的新能源市场的快速发展，磷酸铁锂电池路线成为主流，促使大量企业进入磷酸铁锂材料行业。其中，既包括电池及其材料企业，亦涵盖磷化工、钛白粉企业，还有许多其他跨界企业。

以产能计，当前国内磷酸铁实际产能达347万t/a，在建及规划产能达874万t/a，合计约1 211万t/a。湿法净化磷酸基于其成本优势，将是磷酸铁生产所需磷源的主要来源。如上述产能均能投产，对湿法净化磷酸的需求约950万t/a。考虑到市场行情波动、公司资金及技术实力等影响，实际建成产能或将萎缩。但基于新能源市场的巨大机遇，未来对湿法净化磷酸的需求依然是巨量的。起点锂电、共研网、信达证券等多家机构预测，2030年全球磷酸铁锂需求将超过1 000万t，将产生磷酸铁需求超过1 000万t，继而对湿法磷酸需求约800万t。与之形成鲜明对比的是，根据中国有色金属工业协会锂业分会统计，2022年中国磷酸铁锂产量约119.6万t，换算成磷酸需求仅约90万t。

因此，从长期来看，新能源行业将给湿法净化磷酸带来巨大的需求增量。而这种增量空间是当前磷酸的其他应用市场所远无法相比的。因此，虽然湿法净化磷酸在其他工业级、食品级磷酸盐领域亦将由于替代效应产生一定市场空间，但磷酸铁等新能源材料由于其巨大市场将成为湿法净化磷酸最主要的需求增长点。

4　结论

湿法净化磷酸由于在政策支持度、生产成本、磷矿石适应性、环境影响度等方面的优势，在工业级、食品级领域对热法磷酸形成较强的替代效应，市场渗透率快速提升。随着新能源市场的蓬勃发展，湿法净化磷酸的市场前景将更为广阔；同时，热法磷酸在超高纯产品方面仍具备优势。未来湿法净化磷酸与热法磷酸有望在一段时间内形成差异化发展。

［参考文献］

［1］ 閤松柏，徐金桥，李志刚.湿法磷酸净化新技术的开发与应用[J].化肥设计，2013，51(6)：48–51.
［2］ 田文航，张才华，陈元辉，等.溶剂萃取法湿法磷酸净化技术应用现状[J].磷肥与复肥，2019，34(3)：24–26.
［3］ 石通杉，刘旭，杨俊.湿法磷酸净化技术研究现状及发展[J].磷肥与复肥，2023，38(6)：26–28.
［4］ 齐亚兵，张思敬.湿法磷酸净化技术研究新进展及应用现状[J].应用化工，2022，51(9)：2798–2804.
［5］ 张俊，韩喜超，潘继斐，等.国内湿法磷酸净化技术的工业化应用[J].磷肥与复肥，2022，35(11)：30–31.
［6］ 钟本和，方为茂，李军，等.中国湿法磷酸净化技术(工程)进展情况[J].无机盐工业，2013，45(2)：8–10.
［7］ 方竹堃，杨文娟，彭桦，等.湿法磷酸净化技术概述[J].云南化工，2021，48(11)：29–30.
［8］ 侯炎学，吴杰.溶剂萃取法精制湿法磷酸技术的工业应用[J].磷肥与复肥，2016，31(1)：28–30.
［9］ 侯炎学，陈志孚，吴杰，等.华中师范大学湿法磷酸精制技术的应用及优势[J].化肥设计，2018，56(3)：1–3.
［10］ 梅毅，樊蕾，梁雪松，等.热法磷酸与湿法工业磷酸的技术经济分析[J].无机盐工业，2011，43(1)：4–7.
［11］ 杨亚斌.热法磷酸生产技术发展和趋势[J].云南化工，2019，46(11)：32–35.
［12］ 张汉泉，周峰，许鑫，等.中国磷矿开发利用现状[J].武汉工程大学学报，2020，42(2)：159–164.
［13］ 樊蕾，方晓峰.我国中低品位磷矿利用技术现状及前景展望[J].化工矿物与加工，2015，44(8)：42–46.
［14］ 罗宗恬，杜星，黄勇，等.低品位磷矿富化生产黄磷技术[J].化肥工业，2017，44(2)：1–3.
［15］ 杨文娟，何宾宾，朱桂华，等.磷矿制湿法磷酸技术综述[J].磷肥与复肥，2022，37(8)：26–28.
［16］ 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.
［17］ 王雪萌，安燕，刘海，等.基于生命周期评价法的黄磷产品碳足迹分析[J].无机盐工业，2023，55(12)：36–42.
［18］ 国亚非，赵泽阳，张正虎，等.磷石膏的综合利用探讨[J].中国非金属矿工业导刊，2021(4)：4–7.