贵州磷矿伴生碘资源赋存特征与高效回收技术研究

李海孝，张宽涛，苏晓林，陈　鸿，周　红

（贵州开磷集团股份有限公司 矿肥公司，贵州 贵阳　550302）

［摘　要］贵州海相沉积型磷矿伴生碘资源储量丰富（总量达8.07万t），w(碘) 17.6～76.0 mg/kg，主要以无机碘赋存，具备规模化开发价值，但传统工艺碘回收率偏低、环保压力大。本文系统阐明贵州磷矿伴生碘的资源禀赋、赋存形态及湿法磷酸工艺中的迁移规律；对比空气吹出法、溶剂萃取法、离子交换法、膜分离法的适配性与瓶颈，确定空气吹出法为主流技术。通过设备结构优化、新型复合吸收剂研发、“磷酸-石膏-尾气”三级回收工艺构建及参数优化，形成强化型空气吹出技术。中试结果表明，碘回收率由60%～65%提升至82%～83%，实现废水循环、尾气达标排放。设计不同规模产业化方案，技术经济分析显示项目投资回收期短、抗风险能力强，构建“磷化工-碘化工”协同模式，为磷矿伴生碘资源高效清洁利用提供技术支撑与产业化路径。

［关键词］贵州磷矿；伴生碘；湿法磷酸；空气吹出法；三级回收；资源综合利用

［中图分类号］TQ124.6+1　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）07-0094-06

Research on the occurrence characteristics and efficient recovery technology of iodine resources associated with Guizhou phosphate rock

LI Haixiao, ZHANG Kuantao, SU Xiaolin, CHEN Hong, ZHOU Hong

(*Mineral Fertilizer Company, Guizhou Kailin Graup Co., Ltd., Guiyang* 550302, *China*)

Abstract: Guizhou has abundant reserves of iodine resources associated with marine sedimentary phosphate deposits (total amount of 80 700 tons), with iodine content ranging from 17.6 to 76.0 mg/kg, mainly in the form of inorganic iodine, which has the value of large-scale development. However, traditional processes have low iodine recovery rates and high environmental pressure. This article systematically elucidates the resource endowment, occurrence forms, and migration patterns of iodine associated with Guizhou phosphate rock in wet-process phosphoric acid production technology; Comparing the adaptability and bottlenecks of air blowing method, solvent extraction method, ion exchange method, and membrane separation method, it is determined that air blowing method is the mainstream technology. Through equipment structure optimization, research and development of new composite absorbents, construction of a three-stage recovery process of “phosphoric acid-gypsum-tail gas”, and parameter optimization, an enhanced air blowing technology has been formed. The pilot test results show that the iodine recovery rate has increased from 60% - 65% to 82% - 83%, achieving wastewater recycling and meeting exhaust emissions standards. Design industrialization plans of different scales, and technical and economic analysis shows that the project has a short investment payback period and strong risk resistance ability. Construct a “phosphorus chemical-iodine chemical” collaborative model to provide technical support and industrialization path for efficient and clean utilization of iodine resources associated with phosphate rock.

Key words: Guizhou phosphate rock; associated iodine; wet-process phosphoric acid; air blowing method; three-stage recycling; comprehensive utilization of resources

0　引言

贵州省拥有丰富的海相沉积型磷矿资源，已查明磷矿资源储量达42.51亿t，主要集中在开阳、福泉等海相沉积型磷矿区，磷矿年产量约1 700万t，相关工业总产值达53亿元[1-2]。而贵州磷矿中又伴生可观的碘资源，总量达8.07万t，其中开阳、福泉等核心磷矿石矿区磷矿中碘质量分数达17.6～76.0 mg/kg，具备规模化回收的潜在价值[1, 3-4]。传

收稿日期：2026-02-01

作者简介：李海孝（1980—　），男，贵州遵义人，工学学士，主要从事磷酸、磷肥生产。

通信作者：张宽涛（1998—　），男，贵州剑河人，工学硕士，主要从事磷酸、磷肥生产及相关研发工作。

统湿法磷酸工艺仅以磷提取为目标，伴生碘在硫酸分解、固液分离、磷酸浓缩等环节分散进入磷酸溶液、磷石膏及尾气中，未能有效回收，既造成资源浪费，也带来环境压力[5-6]。

本文在系统分析贵州磷矿伴生碘禀赋与地球化学行为的基础上，揭示湿法磷酸工艺中碘的迁移转化动力学规律。与此同时，针对传统空气吹出法的技术瓶颈，提出强化型吹出塔、新型复合吸收剂及“磷酸–石膏–尾气”三级回收工艺。另外，基于中试规模化方案开展了技术经济评估与产业化方案设计，提出“磷化工–碘化工”产业链协同发展模式。本文为我国磷矿伴生碘资源的高效、清洁、产业化利用提供了系统的理论依据和技术参考。

1　碘赋存与迁移规律

1.1　碘在磷矿中的地球化学行为

碘在贵州海相沉积型磷矿石中主要以无机碘和有机碘两种形式存在。其中，无机碘占比约85%，主要以I^-、IO_3^-形态吸附在磷灰石、碳酸盐岩和硅酸盐矿物表面，少量通过类质同象替代进入磷灰石晶格。有机碘主要与腐殖质结合存在于磷矿石的有机质组分中[7]。

碘与磷酸钙矿物的结合方式以物理吸附为主、类质同象替代为辅，其在磷矿形成过程中的富集机制主要包括生物成因富集、沉积作用富集和热液作用富集，其中生物成因富集是贵州磷矿碘富集的核心机制[8]。此外，通过对碘存在形式、结合方式、富集机制的系统研究，为提取工艺选择、工艺参数优化提供了理论依据。碘在磷矿中的地球化学行为如表1所示。

表1　碘在磷矿中的地球化学行为

Table 1　Geochemical behavior of iodine in phosphate rock

研究内容	研究方向	预期效果
碘的存在形式	价态定量分析（无机或有机碘）	确定碘形态，为工艺选择提供依据
结合方式与机制	吸附、类质同象替代、界面相互作用	明确碘解吸条件，优化工艺参数
富集机制	生物成因、沉积作用、热液作用	指导贵州磷矿碘资源勘探与靶区优选
关键地质因素	磷矿石类型、碘含量、矿物组成	针对性设计矿浆预处理工艺，提高碘提取效率

1.2　贵州主要磷矿区碘资源分布特征

贵州磷矿伴生碘资源主要集中在开阳、福泉两大核心矿区，均为海相沉积型磷矿，不同矿段磷矿中碘含量存在显著空间差异，具体分布特征如表2所示。

表2　贵州主要磷矿区碘资源分布特征

Table 2　Distribution characteristics of iodine resources in major phosphate mining areas in Guizhou province

矿区名称	磷矿类型	w(碘)/(mg·kg^{-1})	碘资源储量/t
开阳磷矿	海相沉积型	19 ~ 40	55 780
福泉磷矿–大湾矿段	海相沉积型	22 ~ 76	7 400
福泉磷矿–英坪矿段	海相沉积型	17.6 ~ 58.0	6 926
其他矿区	海相沉积型	10 ~ 50	17 514

1.3　湿法磷酸生产过程中碘的迁移转化规律

湿法磷酸生产采用硫酸分解磷矿石工艺，使磷矿石中碘的迁移转化行为具有显著的阶段性特征（如图1所示）：①硫酸分解阶段，矿物表面吸附的

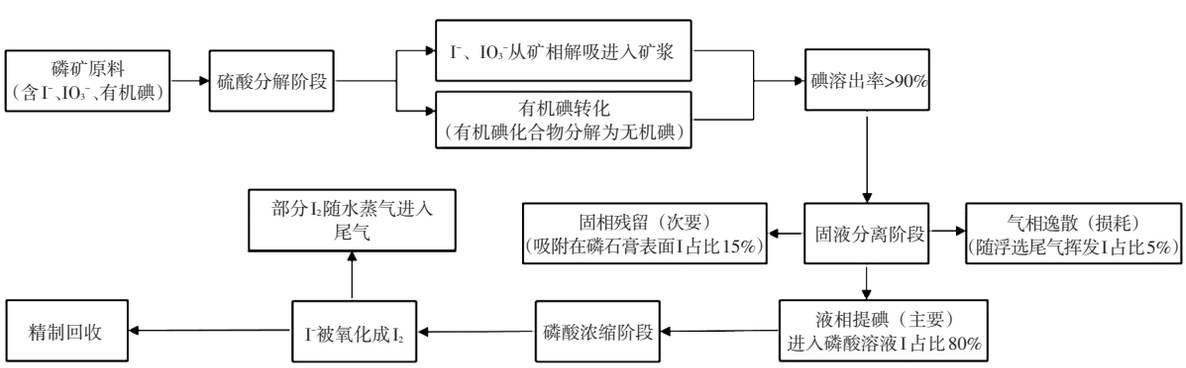

图1　磷矿石中碘元素的迁移转化过程

Fig. 1　Migration and transformation process of iodine element in phosphate rock

I^-、IO_3^-在酸性条件下解吸进入矿浆，有机碘在硫酸作用下发生分解转化为无机碘，此阶段碘溶出率达90%以上；②固液分离阶段，约80%碘进入磷酸溶液，15%左右吸附在磷石膏表面，5%随浮选尾气挥发；③磷酸浓缩阶段，溶液中I^-在高温下被氧化为I_2，部分随水蒸气挥发进入尾气[9-13]。

2 碘回收技术现状

目前磷矿伴生碘提取技术主要包括空气吹出法、溶剂萃取法、离子交换法、膜分离技术，各技术均基于湿法磷酸工艺中碘的形态特征设计，但在湿法磷酸体系中的兼容性、回收率、成本、环保性等方面存在显著差异[14]，如表3所示。

表3 不同碘提取技术的应用特征对比

Table 3 Comparison of application characteristics of different iodine extraction technologies

技术名称	技术原理	湿法磷酸体系兼容性	碘回收率/%	投资运行成本	环保性	应用瓶颈
空气吹出法	酸性条件下,将I⁻氧化为I_2,空气吹出吸收	兼容性好,可直接处理矿浆	60 ~ 65	投资成本低，设备简单,易操作	尾气易造成碘损失与二次污染	传质效率低,吸收剂性能差,回收率偏低
溶剂萃取法	利用碘在有机相与水相溶解度差异实现萃取	兼容性较差,磷酸溶液中杂质易乳化,需预处理	75 ~ 80	投资成本高，萃取剂消耗量大	有机萃取剂易挥发、有毒,存在环保风险	杂质干扰大、萃取剂再生困难,环保压力大
离子交换法	利用离子交换膜树脂对I^-、I_2的选择性吸附	兼容性较差,磷酸根和硫酸根易与碘竞争吸附	78 ~ 83	投资成本高，树脂价格高、再生频繁	无有害试剂，污染小	树脂易中毒失效、处理量小、成本高
膜分离法	利用膜的选择性渗透实现碘与溶液分离	兼容性差,磷酸溶液易造成膜污染	70 ~ 75	投资成本高，膜组件价格高、维护成本高	无相变,无试剂消耗,无污染	膜易污染堵塞、寿命短，规模化应用困难

空气吹出法因兼容性好、成本低、工艺简单，成为目前磷矿伴生碘回收的主流技术，但其回收率偏低的问题亟待解决；溶剂萃取法、离子交换法、膜分离技术虽回收率较高，但受限于兼容性、成本或环保性，尚未实现工业化大规模应用[15-17]。

贵州省因磷矿资源丰富，成为国内碘回收技术研究的核心区域。其中贵州大学陈肖虎团队在空气吹出法碘回收技术优化方面取得了阶段性突破，为贵州磷矿伴生碘回收提供了技术基础[18-20]。但目前仍面临诸多工程化落地难题：①在高酸矿浆条件下，填料式吹出塔填料易结垢堵塞，需频繁清洗，影响连续生产；②复合型吸收剂在长期使用过程中，易受磷酸溶液中杂质污染，吸收性能逐渐衰减；③尚未形成完整的多级回收工艺，磷石膏和尾气中的碘未得到有效回收，总回收率仍有提升空间；④缺乏中试规模的连续运行数据，工艺稳定性和设备耐腐蚀性能有待验证。

3 关键技术创新与优化

本文以空气吹出法为核心，基于贵州磷矿湿法磷酸工艺特征，从设备结构、吸收剂、工艺体系及参数优化4方面对该方法进行强化，以实现伴生碘资源的高效提取。

3.1 设备结构创新方向

结合磷矿湿法磷酸体系，提出了吹出塔和吸收塔的结构优化（见图2）与材质改进。

（1）吹出塔：采用陶瓷波纹填料和微孔曝气头优化塔内布气装置以实现气液均匀分布，使气液接触面积进一步提升。

（2）吸收塔：设计逆流喷淋式吸收塔，采用多层雾化喷淋头，使吸收液与碘气充分接触。

（3）耐腐蚀设备材质：提取系统核心设备采用钛材制造，管道及辅助设备采用316L不锈钢并涂覆聚四氟乙烯防腐涂层，解决了碘及其化合物的设备腐蚀问题，降低设备维护成本。

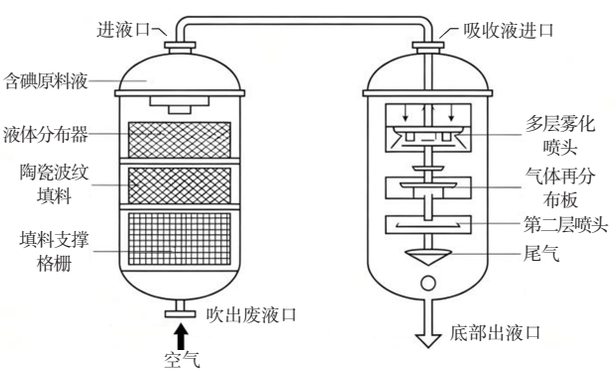

图2 吹出塔和吸收塔强化结构简图

Fig. 2 Schematic diagram of the reinforced structure of the blowing tower and absorption tower

3.2 新型高效碘吸收剂研发与性能优化

在复合型吸收剂基础上，首次提出了添加焦亚硫酸钠以提升吸收剂的氧化还原稳定性，添加EDTA以络合磷酸溶液中的金属杂质的新型复合型吸收剂。该新型吸收剂可实现以下目标：

（1）新型复合型吸收剂吸收容量可提升20%以上；

（2）在连续使用30 d后，吸收效率仍保持95%以上；

（3）采用电解法再生，再生率达98%，再生后吸收剂性能无明显衰减；

（4）可在pH 6.0 ~ 8.0、温度25 ~ 50 ℃范围内

稳定使用，适配湿法磷酸工艺的操作条件。

3.3　“磷酸–石膏–尾气”三级碘回收工艺构建

针对湿法磷酸工艺中碘分布在磷酸溶液、磷石膏、尾气中的特点，可构建了三级碘回收工艺，实现碘资源的全流程回收，工艺流程如图3所示。

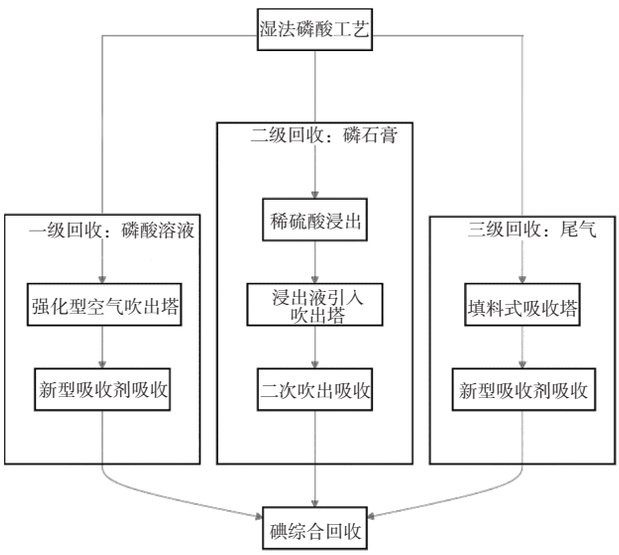

图3　三级碘回收工艺流程

Fig. 3　Process flow of three-stage iodine recovery

3.4　工艺参数优化

选取吹出温度、气液比、吸收液浓度、浸出液固比4个关键工艺参数，采用控制变量法进行试验，确定了三级碘回收工艺的最佳工艺参数组合，结果如表4所示。

表4　三级碘回收工艺最佳工艺参数组合

Table 4　Optimal process parameter combination for three-stage iodine recovery process

工艺环节	吹出温度/℃	气液比	吸收液浓度/(mol·L^{-1})	浸出液固比
一级	48	18∶1	0.35	
二级	42	12∶1	0.30	3∶1
三级	35	20∶1	0.25	

3.5　技术优化效果验证

通过中试试验，对空气吹出法的优化效果进行验证，中试规模处理湿法磷酸矿浆5 m^3/h，连续运行30 d，核心验证结果如下。

（1）碘回收率：一级、二级、三级回收碘回收率分别为80%、90%、95%，碘总回收率稳定在82%～83%，较传统空气吹出法提升17%～18%。

（2）设备运行稳定性：设备无明显腐蚀、结垢现象，系统运行效率保持95%以上。

（3）吸收剂再生效率：采用电解法再生，再生率稳定在97%～98%，吸收剂再生成本为200元/t。

（4）环保指标：排放尾气碘质量浓度低于0.05 mg/m^3，废水经处理后循环利用，实现零排放。

4　技术经济与产业化分析

基于以上技术优化结果及中试试验数据，开展磷矿伴生碘回收的技术经济评估，设计规模化生产技术方案，提出产业链协同发展模式，为技术产业化落地提供支撑。

4.1　规模化生产技术方案设计

针对贵州磷矿资源分布特征及磷化工产业现状，以空气吹出法为主体工艺，结合“磷酸–石膏–尾气”三级回收工艺，设计小型、中型、大型3种规模化生产技术方案，适配不同规模的磷化工企业，具体方案如表5所示。

表5　磷矿伴生碘回收规模化生产技术方案

Table 5　Technical scheme for large scale production of iodine recovery associated with phosphate rock

类型	矿浆规模/(m^3·h^{-1})	碘年产量/t	占地面积/m^2	建设周期/月
小型	10	50	800	6
中型	50	200	2 000	8
大型	100	500	4 000	12

各方案均采用自动化控制系统（DCS），实现工艺参数的实时监测与精准调控，系统自动化程度达90%以上，大幅度减少人工操作，提升生产稳定性。同时，各方案均配套尾气处理、废水循环利用系统，实现清洁生产。

4.2　技术经济评估

以中型方案（年产碘200 t）为核心，基于中试试验数据及贵州当地市场价格，建立技术经济评估模型，对项目的投资、成本、收益、回收期等关键经济指标进行分析，具体评估结果如下。

（1）投资估算：固定资产投资2 200万元（含设备、厂房、安装工程），流动资金500万元，项目总投资2 700万元。

（2）运营成本：年原材料成本300万元，能源成本200万元，人工及维护成本150万元，其他成本50万元，年总运营成本700万元。

（3）收益估算：目前国内工业碘市场销售价格约20万元/t，以年产碘200 t计，年销售收入约4 000万元，年增值税及附加约220万元，年利润总额约3 080万元。

（4）盈利指标：投资利润率114.07%，销售利润率77%，静态投资回收期0.88年（含建设期），

动态投资回收期1.05年（折现率8%）。

（5）敏感性分析：当碘销售价格下降10%或运营成本上升10%时，项目仍保持较高盈利水平，投资回收期分别为0.98年和0.95年，项目抗风险能力强。

技术经济评估结果表明，磷矿伴生碘回收项目投资少、收益高、回收期短、抗风险能力强，具备显著的经济效益。

4.3 产业链协同发展模式

结合贵州磷化工产业现状，构建“磷化工–碘化工”产业链协同发展模式，实现磷、氟、硅、碘资源的协同提取，提升产业整体附加值，具体发展模式如下。

（1）上下游协同：磷化工与碘化工行业建立战略联盟，签订长期合同，共享原料与加工优势。

（2）多资源协同提取：结合碘回收与氟、硅、硫酸、水泥等提取利用，构建“磷–氟–硅–碘”及“磷石膏–硫酸–建材”循环链。

（3）产业集群发展：在开阳、福泉建设综合利用园区，集聚磷、碘、氟、建材企业，实现资源能源废水循环。

（4）技术创新协同：产学研合作攻关碘回收与深加工，开发电子级、医药级碘等高附加值产品。

4.4 环境与社会效益分析

4.4.1 环境效益

（1）资源节约：按年产碘200 t计算，每年可回收贵州磷矿伴生碘资源200 t，相当于节约原生碘矿资源约10万t，提升磷矿资源综合利用效率。

（2）减污降碳：项目实现废水循环利用、尾气零排放，每年减少碘污染物排放约10 t，减少CO_2排放（因资源综合利用减少了原生碘矿开采和加工的碳排放）约5 000 t。

（3）固废利用：磷石膏经碘浸出后，进一步用于制取硫酸和水泥熟料，实现磷石膏无害化、资源化处理，每年可消纳磷石膏约10万t。

4.4.2 环境效益

（1）保障国家资源安全：增加国内碘供给，降低对外依存，保障医药、电子等领域供应。

（2）推动产业转型升级：助力贵州磷化工从单一产品向多资源协同、精细化转型，提升竞争力。

（3）促进地方经济发展：带动设备、物流等产业，新增就业约200人，年增财政税收约500万元。

（4）树立行业绿色发展标杆：提供磷矿伴生资源综合利用的可推广方案，推动行业绿色可持续发展。

5 结论

本文以贵州磷矿伴生碘资源为研究对象，围绕湿法磷酸工艺中碘的赋存、迁移、提取及产业化开展系统性研究，得出以下结论。

（1）贵州磷矿伴生碘资源量达8.07万t，以无机碘吸附于磷灰石表面，开阳、福泉磷矿碘含量居全国前列，具备规模化开发基础。

（2）空气吹出法是湿法磷酸体系中最具适配性的碘提取技术。

（3）优化吹出塔结构及研发新型复合吸收剂，可大幅度提升碘吹出率和吸收效率。

（4）构建“磷酸–石膏–尾气”三级回收工艺，中试碘回收率达82.5%，较传统工艺提升17% ~ 18%。

（5）设计的规模化生产技术方案适配不同规模磷化工企业，技术经济评估表明，年产200 t碘项目投资少、收益高、回收期短，静态投资回收期仅0.88年，具备显著的经济效益。

（6）构建“磷化工–碘化工”协同模式，实现磷、氟、硅、碘协同提取及磷石膏资源化，环境效益与社会效益良好，为磷矿综合利用提供可落地方案。

[参考文献]

[1] 彭宝林,吴有丽,项双龙.磷矿伴生超低品位碘资源回收工业化技术研究[J].现代化工,2017,37(8):162–165,167.
Peng Baolin, Wu Youli, Xiang Shuanglong. Industrial technology to recover ultra-low grade iodine resource associated in phosphate rock[J]. Modern Chemical Industry,2017,37(8):162–165,167.

[2] 王克功,佘顺利,孙克萍.磷矿资源的综合利用技术研讨[J].现代机械,2009(1):90–91,63.
Wang Kegong, She Shunli, Sun Keping. Technical Seminar of Comprehensive Utilization of Phosphate Resources[J]. Modern Machinery,2009(1):90–91,63.

[3] 宋生琼,李士彬,管永胜,等.贵州省磷矿及伴生矿种开发利用面临的问题与对策建议[J].中国矿业,2020,29(3):24–28.
Song Shengqiong, Li Shibin, Guan Yongsheng, et al. Problems and suggestions on the development and utilization of phosphate ores and associated ores in Guizhou province[J]. China Mining Magazine, 2020,29(3):24–28.

[4] 吴有丽,王绍江,王成,等.二水物湿法磷酸萃取过程中磷矿伴生碘分布研究[J].硫磷设计与粉体工程,2017(4):22–24.
Wu Youli, Wang Shaojiang, Wang Cheng, et al. Study on Distribution of Iodine Associated with Rock Phosphate during Extraction of Dihydrate Wet-process Phosphoric Acid [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2017(4):22–24.

[5] 高永璋.基于我国战略性矿产萤石及磷矿的氟资源供应形势研究及建议[J].中国矿业,2024,33(10):44–53.
Gao Yongzhang. Research and suggestions on the supply situation of fluorine resources based on China’s strategic mineral resources of fluorite and phosphate rock [J]. China

Mining Magazine, 2024,33(10):44-53.
[6] 鞠建华,万会,韩见.我国共伴生矿产资源特点及综合评价要点综述[J].中国矿业,2024,33(12):17-23.
Ju Jianhua, Wan Hui, Han Jian. Overview of characteristics and comprehensive evaluation points of associated mineral resources in China[J]. China Mining Magazine, 2024,33(12):17-23.
[7] Peng Bingxian, Ma Zhen, Zhu Yongbo, et al. Release and recovery of fluorine and iodine in the production and concentration of wet-process phosphoric acid from phosphate rock [J]. Minerals Engineering, 2022,188:107843.
[8] Zhou Fei, Yang Lin, Zhang Lingyun, et al. Investigation of decomposition of dolomite and distribution of iodine migration during the calcination-digestion process of phosphate ore [J]. Hydrometallurgy,2019,188:174-181.
[9] Peng Bingxian, Li Xinrui, Xiang Sulin, et al. Release behavior of iodine during leaching and calcination of phosphate rock[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021,28(24):31059-31070.
[10] 潘至中,潘恒.瓮福磷肥厂回收碘的探讨[J].贵州化工,2003(6):4-6.
Pan Zhizhong, Pan Heng. Recovery of Iodine in Wengfu Phosphate Plant[J]. Guizhou Chemical Industry,2003(6):4-6.
[11] 叶志海,游贤贵,肖丹.磷酸生产过程中碘的检测与回收初探[J].四川化工,2006(3):4-6.
Ye Zhihai, You Xiangui, Xiao Dan. Preliminary study on detection and recovery of iodine in phosphoric acid production process[J]. Sichuan Chemical Industry, 2006(3):4-6.
[12] 杨丽萍,史春英,胡宏,等.半水法湿法磷酸生产工艺条件对碘分布影响的研究[J].磷肥与复肥,2013,28(4):22-23.
Yang Liping, Shi Chunying, Hu Hong, et al. Research on effect of process conditions of WPA by hemihydrate process on distribution of iodine [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2013,28(4):22-23.
[13] 杨萍,杨林,冯洋,等.硝酸分解磷矿过程中碘的迁移分布规律[J].无机盐工业,2020,52(4):53-56.
Yang Ping, Yang Lin, Feng Yang, et al. Migration and distribution of iodine in process of decomposing phosphate ore by nitric acid[J]. Inorganic Chemicals Industry,2020,52(4):53-56.
[14] Kamal B, Rachid B, Khaoula K. A novel and complete process for iodine extraction and recovery from industrial wet-process phosphoric acid based on chemical oxidation and solvent extraction [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023,176:332-345.
[15] 张承屏,李天祥,朱静,等.碘的回收方法及其在磷化工中的应用[J].磷肥与复肥,2012,27(6):7-10.
Zhang Chengping, Li Tianxiang, Zhu Jing, et al. Recovery methods of iodine and its application in the phosphorus chemical industry[J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2012, 27(6):7-10.
[16] 张耀,李天祥,朱静,等.湿法磷酸中碘的回收及其在医药中间体制备中的应用[J].化肥工业,2016,43(2):6-9,14.
Zhang Yao, Li Tianxiang, Zhu Jing, et al. Recovery of Iodine from Wet-Process Phosphoric Acid and Use of Iodine in Preparation of Pharmaceutical Intermediates [J]. Fertilizer & Health,2016,43(2):6-9,14.
[17] 杨跃华,罗如意.湿法磷酸中碘的回收利用[J].无机盐工业,2013,45(1):8-9.
Yang Yuehua, Luo Ruyi. Recycling of iodine from wet-process phosphoric acid[J]. Inorganic Chemicals Industry,2013,45(1):8-9.
[18] 先桁,冯鹤,孙克萍,等.富碘废水回收碘及热力学分析[J].有色金属(冶炼部分),2012(5):24-26,42.
Xian Heng, Feng He, Sun Keping, et al. Iodine Extracting from Iodine Enrichment Waste Water and Thermodynamics Analysis [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2012(5):24-26,42.
[19] 先桁,冯鹤,孙克萍,等.从醋酸厂富碘废水中吹出萃取分离碘[J].有色金属(冶炼部分),2012(1):24-26.
Xian Heng, Feng He, Sun Keping, et al. Blowing and Extracting Iodine from Acetic Acid Waste Water [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2012(5):24-26.
[20] 先桁,王芹,余顺利,等.从碘产品中除杂制备精碘的工艺探讨[J].有色金属(冶炼部分),2011(1):34-36.
Xian Heng, Wang Qin, She Shunli, et al. The Research of Refined Iodine Production from Iodine Products through Impurities Purification [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(1):34-36.

(上接第63页)

[6] 李财红,沈慧斌,王永宏,等.传统法磷酸二铵产品的养分释放特性[J].磷肥与复肥,2022,37(4):17-19.
Li Caihong, Shen Huibin, Wang Yonghong, et al. Nutrient Release Characteristics of Diammonium Phosphate Production by traditional method[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(4): 17-19.
[7] 高保亮.磷酸二铵产品外观质量的影响因素及控制措施[J].磷肥与复肥,2023,38(2):12-15.
Gao Baoliang. Influencing factors and control measures of appearance quality of DAP products [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(2): 12-15.
[8] 董泽宽,张水勤,李燕婷,等.添加螯合剂对磷酸二铵溶解、固定及转化的影响[J].中国农业科学,2022,55(21):4225-4236.
Dong Zekuan, Zhang Shuiqin, Li Yanting, et al. Effects of chelating agent on dissolution, fixation and transformation of diammonium phosphate[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(21): 4225-4236.
[9] 马航,匡家灵,籍婷婷,等.磷肥的创新与应用[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(6):33-40.
Ma Hang, Kuang Jialing, Ji Tingting, et al. Innovation and Application of Phosphate Fertilizers [J]. Eco-Industry Science and Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(6): 33-40.
[10] 周定聪.利用渣酸和萃余酸生产功能型磷酸一铵的工艺研究[J].云南化工,2024,51(S1):61-66.
Zhou Dingcong. Research on the process of producing functional monoammonium phosphate by using residual acid and extracted residual acid [J]. Yunnan Chemical Technology, 2024, 51(S1): 61-66.