

# 《岩盐矿提钾母液副产溴化钠》

## 编制说明

(征求意见稿)

编制单位：天津科技大学

编制日期：2025年11月

# 《岩盐矿提钾母液副产溴化钠》

## 编制说明

### 一、任务来源

#### （一）任务来源

本标准由中国化工学会提出并归口，由天津科技大学牵头制定，相关单位参与起草。

#### （二）标准制定的目的和意义

按照国家关于生态文明建设的决策部署，牢固树立创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，在《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》、《国家标准化发展纲要》、《关于加快推进工业资源综合利用的实施方案》等文件指导下，推进岩盐矿提钾母液副产溴化钠资源综合利用是符合国家相关政策的。溴素（ $\text{Br}_2$ ）广泛应用于医药、阻燃，感光 and 印染等工业，我国年产需求溴素 15 万吨，目前超 60% 依赖进口。在岩盐矿提钾过程中，每生产 1 吨氯化钾副产 6~7 吨富含溴母液（浓度约 3000ppm），而全国岩盐矿提钾母液年排放量保守估计约 1.2 亿立方米，上述母液中含溴量折合成溴素（ $\text{Br}_2$ ）约 10 万吨/年。但是，当前提钾母液缺乏合理开发提溴工艺，普遍采用固化后回填注井处理且存在长期环境风险。为此，制定本团体标准旨在提升岩盐矿提钾母液中溴资源的提取率，解决现有技术对溴资源利用率低、后续处理与回填工艺不兼容等问题，通过标准化手段推动工艺创新实现“环保成本内部化”和“资源价值显性化”。

溴化钠是工业制备溴素的核心原料，全球范围内约 80% 以上的溴素产量通过溴化钠的氧化还原反应工艺实现。作为溴素生产链条中不可或缺的关键前驱体，溴化钠的供应稳定性与品质纯度直接决定了溴素产品的生产效率、成本控制及应用性能。现有国内副产工业溴化钠（ $\text{NaBr}$ ）标准涉及原料有岩盐矿提钾母液、医药中间体、溴代反应等工业副产的溴化钠回收，但是不同来源的产品需满足对应不同的提溴工艺与杂质控制要求，特别是缺乏残留钾含量与碳酸盐含量指标，而以国外标准只是涉及  $\text{NaBr}$  应用后端与检测标准，而非生产前端标准。因此，本团体标准制定可填补行业产品标准空白，引导企业采用先进工艺回收提钾母液中溴资源为高价值工业溴化钠产品，可显著提升岩盐矿资源利用率与环保水平，以符合国家“十五五”化工提质发展及资源综合利用政策要求。

### 二、起草工作简要过程

按照中国化工学会标准制修订程序的要求，《岩盐矿提钾母液副产溴化钠》团体标准的编制完成了以下工作：

## （一）资料的收集

在标准编制过程中，起草工作组收集了以下资料：

**核心专利：**专利技术为标准编制提供了关键的工艺技术支撑，本次收集的专利聚焦岩盐矿提钾母液副产溴化钠的制备工艺优化（参加附录 1），涵盖节能降耗、高效提取、纯度提升等核心技术方向。氧化提溴作为溴素提取的核心环节，目前已形成传统氯氧化优化、电氧化、绿色氧化剂替代及组合氧化四大技术方向。氯氧化法虽仍为工业主流（如空气吹出工艺配套氯气氧化），但专利中呈现显著的智能化升级趋势。部分专利进一步优化设备结构，如溴素生产专用蒸馏塔通过优化氯气入口与物料分布，提升氧化反应均匀性，溴纯度与生产效率同步改善。整体来看，氧化提溴技术呈现三大发展趋势：环保化（无氯工艺、绿色氧化剂）、高效化（电极催化升级、自动化控制）、场景精细化（适配高盐卤水、低浓度废水、有机残液等多元原料）。各类技术通过材料创新、设备优化与工艺耦合，构建了多资源协同提取体系，在提钾后通过氧化-空气吹出-精馏工艺制得溴产品，为提钾母液中溴资源的高效回收提供了成套技术方案，逐步解决传统方法中 Cl<sup>-</sup> 干扰、能耗过高、环保不达标等痛点。

**中外文献：**收集的中英文文献系统覆盖了溴产品提溴工艺的技术演进、现状及优化方向，为标准中工艺参数设定提供理论依据（参加附录 2）。整体而言，提溴研究围绕“高效回收、绿色环保、场景适配”三大目标展开，形成氧化、膜分离、吸附、超重力/蒸馏、无氯绿色工艺及低碳集成六大核心技术方向，且中外研究各有侧重——中文文献更聚焦工业化中试与本土场景（如油气田卤水、海水、噻菌灵废水）的工艺优化，外文文献侧重材料分子设计与基础反应机制探索。《溴提取技术的现状与挑战》梳理了我国从制盐母液提取溴素的技术发展历程，从早期蒸馏法到氯气氧化-空气吹出法的升级，明确了提钾母液作为溴资源来源的技术可行性。英文文献主要聚焦国际先进提溴技术，如膜分离技术在高盐卤水提溴中的应用研究（*Desalination*, 613 (2025) 118968），以及低温蒸馏工艺在膜吸收提溴技术突破（*J. Ind. Eng. Chem.* 146 (2025), 319-331），为标准编制提供国际技术视野。从时间趋势看，2015-2019 年以基础工艺优化为主（如蒸馏设备、传统吸附），2022-2025 年更侧重功能化材料（如 MOF、BiOBr 电极）、绿色无氯技术及低碳集成，凸显“材料驱动技术升级、环保引领工艺转型”的研究方向，且技术适配性持续细化，可满足高 Cl<sup>-</sup>-低 Br<sup>-</sup> 卤水、高盐油田水、医药级溴素生产、废水资源化等多元场景需求，为溴资源高效回收提供从实验室材料到工业化应用的全链条解决方案。

## （二）标准的起草

1. 2025 年 6 月至 2025 年 9 月，项目筹备组完成标准的前期预研工作，针对四川省汇元达钾肥有限责任公司、天津长芦海晶集团有限公司、中蓝长化工程科技有限公司等企业的现场提溴与溴化钠生产实际，并且调研了国内主要溴化钠生产企业，对溴化钠生产工艺、产品质量等进行了深入了解，并选择有代表性的溴化产品进行产品各成分的检测，为制定溴化钠各项指标要求提供了初步依据。

2. 2025 年 9 月，召开标准启动会，成立起草工作组，正式启动《岩盐矿提钾母液副产溴化钠》的团体标准编制工作，根据启动会企业代表意见，修改完成《岩盐矿提钾母液副产溴化钠》工作组初稿。

3. 2025年9月至2025年11月，工作组成员根据启动会讨论内容和要求，开展验证试验，按照标准指标项要求，开展了产品指标数据验证试验（附录3），并在此基础上统一各方意见，形成标准征求意见稿。

4. 2025年11月至2026年2月，工作组成员根据中国化工学会提出的具体修改意见进行集中讨论，就标准兼容、检测手段、实验精度、安全需求进行全面修正与数据补充，并在此基础上统一各方意见，进一步形成标准征求意见稿。

### （三）主要参加单位和工作组成员

标准起草单位为天津科技大学、中蓝长化工程科技有限公司、自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所、四川开元矿业有限公司、天津长芦海晶集团有限公司，中国地质科学院矿产资源研究所，各单位主要起草人员情况如表1所示。

表1 主要参加单位和工作组成员表

成员姓名	所在单位	专业方向	邮箱
唐娜	天津科技大学	化学工程	tjtannga@tust.edu.cn
朱桂芳	中蓝长化工程科技有限公司	化学工程	zhuguifang@sinochem.com
刘伟	自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所	无机化工	liuwei@isdmu.com.cn
王德全	四川省汇元达钾肥有限责任公司	无机化工	403610487@qq.com
王丹	天津长芦海晶集团有限公司	无机化工	wangdan345@163.com
乜贞	中国地质科学院矿产资源研究所	盐湖化工	niecezhen518@163.com

## 三、编写原则和确定标准主要内容的依据

### （一）标准的编写原则

1.1 基准标准衔接：以 HG/T 3809《工业溴化钠》为基础框架，核心指标（如主含量、水分、重金属）需与主产工业溴化钠标准保持协调，同时针对“副产”特性合理调整杂质指标阈值。现行 HG/T 3809-2023《工业溴化钠》涉及原料来源于盐田卤水、地下卤水，但缺乏适用于盐矿提钾母液原料的制溴卤水，特别是标准中缺乏残钾含量与残留碳酸盐含量指标，而国外标准只是涉及 NaBr 应用后端与检测标准，而非生产前端标准。因此，制定岩盐矿提钾母液副产溴化钠团体标准十分必要。

1.2 通用规则遵循：严格按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则》和 GB/T 20001.10-2014《产品标准编写规则》构建结构，涵盖范围、术语、技术要求、试验方法、检验规则等核心章节，确保标准格式规范

统一。

1.3 原料特性适配原则：充分考虑了钾矿副产工业溴化钠产业发展现状、趋势及产品生产和使用要求，本着先进性、科学性、合理性和可操作性的原则制定了本标准。从资源利用看，我国钾资源储量不足，提钾母液中溴资源浪费严重，该团体标准可针对性规范其提取工艺，推动参标单位老挝、白俄罗斯等钾矿资源高效利用。现有提溴工艺与提钾母液固化回填要求不匹配，团体标准能聚焦岩盐矿提钾母液特性，开发适配的原料卤水的 NaBr 产品规范。

1.4 实用与可操作性原则：优先采用国标/行标成熟方法，如主含量测定沿用 HG/T 3811-2006 的滴定法，氯化物测定采用硝酸银比浊法，避免引入复杂检测技术增加企业成本。

1.5 安全与全链条管控原则：新增“包装储运”条款，参考 GB/T 191 设置防潮、防腐蚀图示标志。针对提溴过程可能产生的溴气挥发风险，在“试验方法”章节补充安全警示（如通风操作、防护装备要求），并明确产品“应急处理”原则（如泄漏时用亚硫酸钠溶液吸收）。

## （二）确定标准主要内容的依据

本标准草稿规定了岩盐矿提钾母液副产溴化钠的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本标准草稿依据 HG/T 3809-2023《工业溴化钠》与岩盐矿提钾母液组分形成了具体成份范围，术语和定义，具体如表 1 所示：

表 1 副产工业溴化钠技术要求

项 目	技术要求	
	优等品	一等品
NaBr w/%	≥ 99.0	98.5
水分 w/%	≤ 0.300	0.500
氯化物（以Cl计）w/%	≤ 0.10	0.50
碳酸盐（以CO <sub>3</sub> 计）w/%	≤ 0.005	0.010
溴酸盐（以BrO <sub>3</sub> 计）w/%	≤ 0.003	0.005
pH值（50g/L溶液）	5.5~7.5	5.0~8.0
硫酸盐（以SO <sub>4</sub> 计）w/%	≤ 0.01	0.02

项 目	技术要求	
	优等品	一等品
碘化物（以I计） w/%	≤ 0.006	0.010
重金属（以Pb计） w/%	≤ 0.0004	0.0005
铁（Fe） w/%	≤ 0.0003	0.0006
镁（Mg） w/%	≤ 0.0002	0.0004
钙（Ca） w/%	≤ 0.0003	0.0006
钾（K） w/%	≤ 0.0010	0.0020
浊度	≤ 4	4

#### 四、技术经济分析论证和预期的经济效益

NaBr 是关键的化工基础性原料，在无机化工与有机化工领域发挥着举足轻重的作用，在阻燃剂、灭火剂、制冷剂、感光材料、医药中间体、农药前体、油田助剂等行业有着广泛用途。全球溴化钠产业呈现“资源集中、技术垄断、需求升级”的特点。中国作为第三大生产国，2023 年 NaBr 产能达 3.5 万吨/年，但受山东莱州湾地下卤水资源枯竭影响，我国溴资源进口依赖度至 2024 年的 66%。因此，我国亟需突破提钾母液后续提溴技术瓶颈，加速海内外资源综合开发，同时推动绿色化学工艺革新，以应对国内溴资源枯竭和进口依赖风险。

本标准的制定可为钾肥副产工业溴化钠提供科学、有效、统一的行业标准，以此为依据，生产企业可以开展有效的质量控制活动，监管部门可以对流通领域实施有力监管，本标准的实施可有效减少因质量问题、执行标准不一致等问题而引起的纠纷，保护各方的合法权益，溴化钠生产、流通、消费、监管等各个环节更加顺畅，促进钾肥副产工业溴化钠产业健康快速发展。

#### 五、采用国际标准和国外先进标准情况及水平对比

本标准制定过程中未查到同类面向岩盐矿提钾母液原理的工业溴化钠的国际、国外标准，没有采用国际标准或国外先进标准。与国内现行工业 NaBr 标准（HG/T 3809-2023）在主产品组分一致，但额外增加与盐矿提钾母液原料组分相关的残钾含量（优等品 K wt.% ≤0.0010；一等品 K wt.% ≤0.0020）与残留碳酸盐限定含量（优等品 K wt.% ≤0.005；一等品 K wt.% ≤0.0010）指标，而这些指标在现行 HG/T 3809-2023 中的指标并无做出规定与限定。

## 六、与现行法律、法规、政策及相关标准的协调性

本标准与现行相关法律、法规、规章及相关标准协调一致。

## 七、贯彻实施标准的措施和建议

建议本标准的性质为推荐性行业标准。建议标准实施日期为标准发布后的 6 个月。

## 八、其他应予以说明的事项

无

附录 1 老挝开元矿业有限公司岩盐矿提钾母液副产溴化钠产品 4 批次检验记

检测项目	技术要求(优等品)	批次 1 (2025-11-15)	批次 2 (2025-12-22)	批次 3 (2026-01-18)	批次 4 (2026-02-24)
NaBr w/%	≥99.0	99.2	99.1	99.3	98.9
水分 w/%	≤0.300	0.22	0.25	0.20	0.28
氯化物(以 Cl 计) w/%	≤0.10	0.08	0.09	0.07	0.09
碳酸盐(以 CO <sub>3</sub> 计)w/%	≤0.005	0.004	0.004	0.003	0.005
溴酸盐(以 BrO <sub>3</sub> 计) w/%	≤0.003	0.002	0.002	0.002	0.003
pH 值(50g/L 溶液)	5.5~7.5	6.2	6.5	6.0	6.8
硫酸盐(以 SO <sub>4</sub> 计)w/%	≤0.01	0.008	0.009	0.007	0.010
碘化物(以 I 计) w/%	≤0.006	0.005	0.005	0.004	0.006
重金属(以 Pb 计) w/%	≤0.0004	0.0003	0.0003	0.0002	0.0004
铁(Fe) w/%	≤0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003
镁(Mg) w/%	≤0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002
钙(Ca) w/%	≤0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003
钾(K) w/%	≤0.0010	0.0008	0.0009	0.0007	0.0010
浊度	≤4	3	3	2	4

## 附录 2 提溴技术专利列表

### 1. 氧化提溴技术

专利名称	专利号	简要技术特点
一种从含溴水样中电氧化提溴的方法	CN119824432A	通过选择合适氧化电位降低 $\text{Cl}^-$ 干扰, 提高 $\text{Br}^-$ 回收率; pH 调节 + 电化学氧化 + 曝气吸收, 适用于高 $\text{Cl}^-$ 低 $\text{Br}^-$ 卤水
一种限域结构复合膜电极及其制备方法与应用	CN121046862A	微孔陶瓷基底 + $\text{BiOBr}$ 纳米片复合膜电极, 无需贵金属, 溴离子转化率达 94.6%, 适用于油气田卤水
一种溴离子电氧化电极及其制备方法与应用	CN119615232A	采用季铵盐表面活性剂 (如十二烷基三甲基溴化铵) 修饰电极, 提高选择性和效率
一种连续电解工业溴盐制备溴素的工艺及装置	CN202211194047.7	连续化生产, 自动化程度高, 适合大规模工业应用

### 2. 膜分离提溴技术

专利名称	专利号	简要技术特点
一种气态膜法从卤水中提取溴素的方法	CN117430089A	改性聚四氟乙烯中空纤维膜, 脱溴率 92.83%-93.69%, 能耗低, 设备紧凑
一种利用双极膜从海水中提溴的方法	CN102311097B	双极膜电渗析 + 离子交换树脂吸附, 无需添加 $\text{Cl}_2$ , 无废酸排放, 纯度高, 提取率 91%-95%
一种采用中空纤维膜从气田采出水中分离溴素的方法	CN120172573A	膜分离 - 化学吸收耦合, 中空纤维膜材质为聚偏氟乙烯, 能耗低, 分离效率高
一种连续压气膜法提溴装置与方法	CN101570317A	疏水性微孔膜微气泡均匀布气, 连续式操作, 传质效率提高, 适合规模化生产
光电催化氧化耦合树脂吸附法生产溴素的海水提溴装置与方法	CN116854041A	光电催化氧化 + 离子交换树脂吸附, 提高低浓度溴资源回收率, 能耗低

### 3. 无氯 / 绿色提溴技术

专利名称	专利号	简要技术特点

专利名称	专利号	简要技术特点
一种无氯卤水提溴的方法	CN118241225A	电氧化 + 气态膜分离, 完全摒弃氯气, 适用于低品位溴资源, 阳极材料耐腐蚀
一种利用卤水制取溴的方法	CN201010242642.4	酸化 + 氧化 + 解吸吹出 + 吸收 + 预热 + 反应 + 蒸馏 + 冷凝 + 分离, 工艺完善, 产品纯度高
一种溴素的制备方法	CN202410948921.4	原料预处理 + 氧化 + 气态溴分级回收 + 液相残留强化提取 + 萃取 + 精馏, 溴回收率 > 95%
利用一次提溴废液二次提取溴素的方法	CN202411237200.9	电解氧化 + Cl <sub>2</sub> 置换联合工艺, 无需吹出塔和吸收塔, 降低成本 30%+

#### 4. 国外提溴技术专利

专利名称	专利号	简要技术特点
Process for recovering bromine	US3084028A	从有机溴化物溴化反应尾气中回收溴化氢并转化为溴素, 实现资源循环
Process and apparatus for generating bromine	US5679239A	控制酸性 pH 避免溴气逸出, 减少原料消耗, 防止溴酸盐污染, 安全性高
Recovery of bromine and iodine from natural brines	US2412390A	从天然卤水中回收溴和碘, 适用于高矿化度卤水, 溴回收率 > 85%
Verfahren zur Wiedergewinnung von Brom aus organischen bromhaltigen Fabrikationsrückständen	DE2229266C3	从有机溴化物生产残留物中回收溴, 德国专利, 工艺成熟, 已工业化应用
Method for extracting bromine from seawater by vacuum distillation	WO2016054874A1	真空蒸馏 + 超重力分离, 国际专利申请, 提溴效率 > 96%, 能耗低, 环保

#### 附录 3 提溴技术近期文献列表

序号	文献标题	期刊/来源	研究单位	主要内容	年份
----	------	-------	------	------	----

序号	文献标题	期刊/来源	研究单位	主要内容	年份
	Selective trace bromide ion removal from chloride ion-dominated solutions using defective Zr-based metal-organic frameworks	Nanoporous Materials	淑明女子大学、庆北国立大学（韩国）	开发缺陷型 Zr 基 MOF-808-Cl 材料，通过离子交换（70%）与吸附（30%）协同机制，在 Cl <sup>-</sup> 浓度为 Br <sup>-</sup> 100 倍时实现痕量 Br <sup>-</sup> 选择性去除	2025
2	Catalyst and solvent-free bromination of toluene derivatives by HBr-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> with visible-light photocatalysis	Journal of Photochemistry and Photobiology A	浙江工业大学	构建连续流微反应器，采用 HBr-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 为溴源，可见光催化实现甲苯衍生物无溶剂溴化，转化率与选择性优于传统批次工艺	2022
3	A reversible absorption-based supported gas membrane process for enriching bromine	Journal of Membrane Science	天津大学	采用 PTFE 中空纤维支撑气膜，以 NaBr 为可逆吸收剂，溴富集倍数超 14 倍，建立 Cl <sup>-</sup> 干扰下的传质模型，设备稳定运行超 12 个月	2017
4	Current and potential oscillations during the electro-oxidation of bromide ions	Journal of Electroanalytical Chemistry	温莎大学（加拿大）	研究溴离子电氧化过程中的电流 - 电位振荡现象，揭示对流与电容介导的电化学振荡机制，为电极工艺优化提供理论依据	2015
5	Electroadsorption of Bromide from Natural Water in Granular Activated Carbon	Water	安达卢西亚水资源研究所（西班牙）	采用颗粒活性炭电吸附工艺，3V 电压下溴离子去除率达 46%，两级工艺（氧化 + 吸附）效率提升至 59%，无脱附现象	2021
6	Performance study of membrane distillation for SWRO brine treatment	Desalination	阿卜杜勒阿齐兹国王大学（沙特）	利用膜蒸馏处理海水淡化浓盐水，集成溴回收单元，通过温度梯度调控提高溴传质效率，能耗较传统蒸馏降低 35%	2021
7	A TiN Nanorod Array 3D Hierarchical Composite Electrode for Ultrahigh-Power-Density Bromine-Based Flow Batteries	Advanced Material	中科院大连化物所	制备自支撑三维 TiN 纳米棒电极，降低 Br/Br <sup>-</sup> 电对极化，溴离子转化率达 92.3%，适配高 Cl <sup>-</sup> 低 Br <sup>-</sup> 油气田卤水	2019

序号	文献标题	期刊/来源	研究单位	主要内容	年份
8	改性聚四氟乙烯中空纤维膜气态膜提溴工艺优化	膜科学与技术	杭州水处理技术研究开发中心	研发羟基改性 PTFE 膜, 脱溴率从 89% 提升至 93.6%, 建立膜传质阻力模型, 优化气液比与温度参数	2023
9	超重力空气吹出 - 吸收提溴工艺中试研究	无机盐工业	山东省海洋化工科学研究院	超重力因子 84.6 时单级吹脱率 88.2%, 三级串联达 93.5%, 能耗较传统塔设备降低 31%, 运行成本下降 280 元 / 吨	2020
10	双氧水氧化 - 树脂吸附耦合提溴技术	环境工程学报	天津大学化工学院	以 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 替代 Cl <sub>2</sub> 氧化苦卤中 Br <sup>-</sup> , 配合 D201 树脂吸附, 溴回收率 92.1%, 无溴酸盐副产物, 适配医药级溴素生产	2022
11	BiOBr 纳米片复合膜电极的制备及提溴性能	电化学	中蓝长化工程科技有限公司	微孔陶瓷负载 BiOBr 纳米片电极, 无需贵金属, 溴离子转化率 94.6%, 耐高盐腐蚀, 适用于油气田卤水处理	2024
12	双极膜电渗析提溴过程的能效优化	中国给水排水	哈尔滨工业大学环境学院	优化双极膜堆结构, 电流效率提升至 86%, 能耗降至 8.2 kWh/kg Br <sub>2</sub> , 无废酸排放, 提取率 95%	2018
13	真空蒸馏 - 超重力耦合提溴工艺开发	现代化工	华东理工大学化工学院	集成真空蒸馏与超重力分离, 提溴效率 96.3%, 纯度 99.5%, 设备体积较传统蒸馏塔减少 70%, 能耗降低 60%	2019
14	季铵盐修饰电极对溴离子的选择性氧化	分析化学	南京大学化学化工学院	十二烷基三甲基溴化铵修饰石墨电极, 通过静电作用增强 Br <sup>-</sup> 吸附, Cl <sup>-</sup> 干扰降低 40%, 氧化电流密度提升 2.3 倍	2021
15	从噻菌灵废水中回收溴素的吸附 - 解吸工艺	工业水处理	河北科技大学环境科学与工程学院	采用 NDA-99 树脂多级吸附, 80℃ 热水解吸, 溴回收率 91.7%, 处理后废水溴含量 < 0.5 mg/L, 实现资源化	2016

序号	文献标题	期刊/来源	研究单位	主要内容	年份
16	Bromine recovery from oilfield produced water by membrane absorption	Separation and Purification Technology	德克萨斯大学奥斯汀分校 (美国)	采用 PVDF 中空纤维膜吸收工艺, 以 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 为吸收液, 溴回收率 90.2%, 耐受高盐 (TDS>150 g/L) 环境	2020
17	Green bromine production via electrochemical oxidation with BDD electrodes	Electrochimica Acta	苏黎世联邦理工学院 (瑞士)	采用掺硼金刚石 (BDD) 电极, 无氯氧化提溴, 电流效率 93%, 能耗 7.8 kWh/kg $\text{Br}_2$ , 适配低品位溴资源	2023
18	Recovery of bromine and iodine from high-salinity brines	Hydrometallurgy	以色列本古里安大学	开发协同萃取体系, 采用三辛基氧化膦 (TOPO) 萃取剂, 溴碘共提回收率分别达 85%、82%, 适用于死海卤水	2018
19	碳中和驱动的海水浓缩提溴工艺集成	海洋环境科学	中国海洋大学	耦合光伏 - 风电能源与真空浓缩, 溴提取能耗降低 42%, 建立 “淡化 - 提溴 - 制盐” 一体化流程, 水资源利用率 > 95%	2024