

AMPS 釜液回收 N-叔丁基丙烯酰胺工艺及检测方法

程伟琴^{1,2}, 赵聪聪¹, 冯 明¹, 杨鹏飞¹, 王延花¹, 霍二福^{1,3*}

(1. 河南省化工研究所有限责任公司, 河南 郑州 450052; 2. 中国矿业大学化工学院, 江苏 徐州 221116;
3. 河南省科学院质量检验与分析测试研究中心, 河南 郑州 450046)

摘要:针对 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸 (AMPS) 生产中浓缩液经水解回收 N-叔丁基丙烯酰胺 (N-t-BAA) 的难题, 开发多级水相纯化-乙醇重结晶工艺。优化工艺为一级水料比 1.5:1、二级补加 0.5 倍水、静置 6 h, 初产品纯度 $\geq 98.5\%$; 再经乙醇重结晶, 产品纯度 $\geq 99.7\%$, 磺酸类杂质 $\leq 0.1\%$, 总回收率 84.23%。乙醇母液可循环使用 5 次, 产品纯度 $>99.5\%$ 。建立的高效液相色谱 (HPLC) 检测方法线性良好 ($R^2=0.9989$), 检出限 0.05~0.06 mg/L, 平均回收率 101.45% ($RSD=1.2\%$)。质谱 (MS) 和核磁共振 (NMR) 确证结构。

关键词: AMPS 釜液; N-叔丁基丙烯酰胺; 水解转化; 水相析晶; 高效液相色谱

中图分类号: TQ225.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0164-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.028

Process and detection method for recovering N-tert-butylacrylamide from AMPS kettle residue

CHENG Wei-qin^{1,2}, ZHAO Cong-cong¹, FENG Ming¹, YANG Peng-fei¹,
WANG Yan-hua¹, HUO Er-fu^{1,3*}

(1. Henan Chemical Industry Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Quality Inspection and Analysis Testing Research Center, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: To address the challenge of recovering N-tert-butylacrylamide (N-t-BAA) from the concentrated liquid generated in the production of 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS) via hydrolysis, a multi-stage aqueous purification-ethanol recrystallization process was developed. The optimized conditions are: primary water-to-material ratio of 1.5:1, secondary addition of 0.5 equivalents of water, and settling time of 6 h. After aqueous crystallization and phase separation, the crude product reaches a purity of $\geq 98.5\%$; subsequent ethanol recrystallization affords a final product with a purity of $\geq 99.7\%$, with sulfonic acid impurities of $\leq 0.1\%$, and an overall recovery of 84.23%. The ethanol mother liquor can be recycled for five cycles, with product purity still $>99.5\%$. The established high-performance liquid chromatography (HPLC) method exhibits good linearity ($R^2=0.9989$), detection limits of 0.05–0.06 mg/L, and an average recovery of 101.45% ($RSD=1.2\%$). The structure was confirmed by mass spectrometry (MS) and nuclear magnetic resonance (NMR).

Key words: AMPS kettle residue; N-tert-butylacrylamide; hydrolytic conversion; aqueous crystallization; HPLC

2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸 (AMPS) 作为一种重要的乙烯基磺酸单体, 广泛应用于水处理、石油开采、纺织印染及高分子合成等领域^[1-4]。工业上以丙烯腈、异丁烯、浓硫酸为原料经 Ritter 反应连续合成 AMPS, 反应过程伴随副反应生成 N-叔丁基丙烯酰胺 (N-t-BAA)^[5-7]。N-t-BAA 是重要精细化工中间体, 可用于合成絮凝剂、分散剂、医药中间体与功能聚合物, 高纯度产品附加值显著^[8-11]。

目前, 关于从 AMPS 釜残中回收 N-t-BAA 的研

究报道较少^[8,12-13]。现有方法主要包括升华法^[13]和常规溶剂重结晶法^[14]。升华法利用 N-t-BAA 与其他组分挥发度的差异实现分离, 虽然可获得较高纯度产品, 但对设备真空度要求高、能耗大、操作周期长, 难以实现工业化连续生产。

传统溶剂重结晶法通常采用有机溶剂 (如乙醇、乙酸乙酯等) 直接处理釜残, 由于磺酸类副产物与 N-t-BAA 在有机溶剂中溶解度差异有限, 往往需要多次结晶才能达到较高纯度, 导致溶剂消耗量

收稿日期: 2026-03-18; 修回日期: 2026-06-16

基金项目: 河南省科学院基本科研业务费项目 (20250608001); 中原科技创新领军人才项目 (254200510045)

作者简介: 程伟琴 (1989-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为化学工程, chengweiqin1989@126.com; 霍二福 (1981-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为精细有机合成, 通讯联系人, hef330@aliyun.com。

大、回收效率低、废液排放多,且产品纯度难以突破 99%。此外,部分专利报道了采用酸/碱洗涤、吸附脱色等辅助手段,但流程复杂、成本较高,限制了其大规模应用。

本研究以 AMPS 生产薄膜蒸发浓缩液为原料,提出“多级水相纯化-溶剂重结晶”工艺,利用 N-t-BAA 与磺酸类副产物及无机盐在水相中溶解度的显著差异,通过多级水相析晶与洗涤实现杂质的梯度脱除;再经乙醇重结晶提升纯度并实现溶剂循环。配套建立精准高效液相色谱法(HPLC)检测方法,经核磁与质谱确证结构,最终获得纯度 $\geq 99.7\%$ 的高纯级 N-t-BAA,为工业化回收提供可靠技术支撑。

1 实验部分

1.1 主要仪器与试剂

Agilent 1260 Infinity II 高效液相色谱仪,美国安捷伦科技公司;Agilent 400 MR 核磁共振波谱仪,美国安捷伦科技公司;QP2010Ultra GC-MS 联用仪,日本岛津;SHZ-D 循环水式真空泵,巩义市予华仪器有限公司;DZF-6030A 真空干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限公司。

AMPS 生产浓缩液(工业级,某化工企业);乙醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);乙腈(色谱纯,赛默飞世尔科技有限公司);磷酸氢二钾(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);去离子水(电导率 $\leq 10 \mu\text{S}/\text{cm}$,自制);AMPS 标准品、N-t-BAA 标准品(纯度 $\geq 99.9\%$,Sigma-Aldrich 公司)。

1.2 实验回收工艺

称取 100 g AMPS 浓缩液于 500 mL 烧杯,按水料比 1.5:1 加入去离子水, $(45\pm 2)^\circ\text{C}$ 搅拌分散,自然冷却至室温,静置 6 h 分层,弃去下层水相;向上层补加初始物料质量 0.5 倍的去离子水,室温静置 6 h 进行二级水相纯化,进一步脱除水溶性杂质;收集上层浆料,真空抽滤,滤饼用 $5\sim 10^\circ\text{C}$ 预冷去离子水淋洗 2 次, $60\sim 70^\circ\text{C}$ 常压干燥 6~8 h,得到 N-t-BAA 初产品;用乙醇重结晶,搅拌至全溶,降温至室温,恒温结晶 2 h,真空抽滤,滤饼 60°C 常压干燥 6 h,得到精制的高纯 N-t-BAA。母液可多次循环,待产品纯度下降至不达标时,经减压蒸馏回收乙醇,循环用于下批次产品重结晶。

1.3 结构表征

采用核磁共振氢谱(^1H NMR)、核磁共振碳谱

(^{13}C NMR)[以氘代氯仿(CDCl_3)为溶剂,四甲基硅烷(TMS)为内标]和质谱(MS,电子轰击电离源,EI 源)对精制产品进行结构表征。

1.4 HPLC 检测条件

色谱条件:色谱柱 YMC J'sphere ODS-H80 C18 ($4.6 \text{ mm}\times 150 \text{ mm}, 4 \mu\text{m}$);流动相为 0.01 mol/L 磷酸氢二钾水溶液:乙腈体系,通过优化不同体积比(60:40、50:50、40:60, v/v)对 N-t-BAA 与杂质分离效果的影响,确定最佳比例为 50:50 (v/v),此时目标峰与相邻杂质峰分离度大于 1.5;流速:0.5 mL/min;柱温: 30°C ;检测波长:225 nm;进样量:10 μL 。

2 结果与分析

2.1 N-t-BAA 生成与水解转化机理

AMPS 合成过程中,主、副反应均遵循 Ritter 反应机理^[4,15]。在浓硫酸催化下,异丁烯首先质子化生成稳定的叔丁基碳正离子;该碳正离子作为亲电试剂进攻丙烯腈的氰基,形成高活性的腈鎓离子中间体。该中间体系为 AMPS 与 N-t-BAA 的共同前体,与浓硫酸发生磺化反应生成 AMPS 主产物;在体系水分存在下发生水解副反应生成 N-t-BAA。

AMPS 生产过程中产生的薄膜蒸发浓缩液中,富含腈鎓离子以磺酸酯形式存在的中间体(主要为叔丁基丙烯酰胺磺酸)。加水后,该中间体在弱酸性条件下发生选择性水解,脱除磺酸基定向转化为 N-t-BAA。水解过程遵循加成-消除机制:水分子作为亲核试剂进攻腈鎓离子中带正电的碳原子,形成不稳定的四面体过渡态;随后发生分子内质子转移,氮原子上的正电荷被中和,生成负氧离子中间体;最后电子重排,磺酸基作为离去基团脱除,形成稳定的酰胺产物。总反应式如图 1 所示。

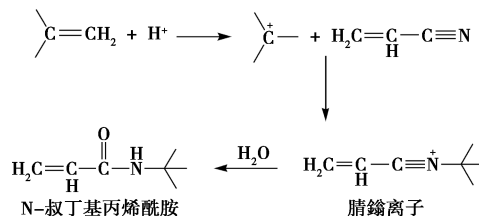


图 1 N-t-BAA 生成与水解转化机理历程

2.2 水相纯化工艺优化

水相纯化的核心是利用 N-t-BAA 与磺酸类副产物、无机盐的水溶性差异实现杂质的高效脱除。本研究系统考察水料比及静置时间对初产品纯度与收率的影响。

2.2.1 水料比优化

固定总加水量为原料质量的 2 倍,对比一级水

洗与二级分步水洗对产品纯度与回收率的影响,结果见表 1。

表 1 分级水洗对产品纯度及回收率的影响

水料比 (<i>v:v</i>)	一级水洗			二级水洗(控制两级水总量为 物料的 2 倍)			
	产品 纯度/ %	重结晶 后产品 纯度/%	回收 率/%	补加 水量	二次水 洗产品 纯度/%	重结晶 后产品 纯度/%	总回 收率/%
1:1	86.29	93.53	94.41	1.00	98.10	99.45	84.34
1.25:1	89.06	96.75	91.23	0.75	98.33	99.51	84.10
1.5:1	95.01	97.87	88.50	0.50	98.45	99.83	84.23
1.75:1	96.58	98.11	86.64	0.25	98.35	99.54	84.54
2:1	97.59	98.32	84.43	—	—	—	—

从表 1 结果可知,一级水料比 1.5:1+二级补加 0.5 倍水的梯度水洗方式,可实现杂质梯度脱除,初产品纯度达 98.45%,重结晶后纯度达 99.83%,总回收率 84.23%,杂质脱除效果与产品收率达到最优平衡。水料比过高会增加 N-t-BAA 溶解损失,降低收率;水料比过低则杂质溶解不充分,除杂效果差。

2.2.2 静置时间对产品纯度的影响

由图 2 结果可知,静置时间直接影响分层效果与杂质脱除效率。静置时间不足 3 h 时,体系分层不完全,磺酸杂质去除不彻底;静置时间超过 6 h,对纯度提升贡献有限,且降低生产效率,静置 6 h 时体系分层完全、杂质脱除充分,产品纯度达到最优水平,为最佳静置时间条件。

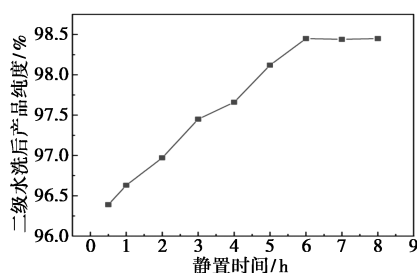


图 2 静置时间对产品纯度的影响

2.3 重结晶精制及溶剂循环性能

为将初产品提升至高纯级,需通过重结晶进一步脱除微量磺酸杂质。基于 N-t-BAA 与杂质在乙醇中溶解度差异,本文选用乙醇作为重结晶溶剂。为实现溶剂绿色循环,母液被连续套用于后续批次的初产品重结晶,待杂质累积至影响产品质量时,再通过蒸馏回收溶剂。该工艺的循环稳定性结果如

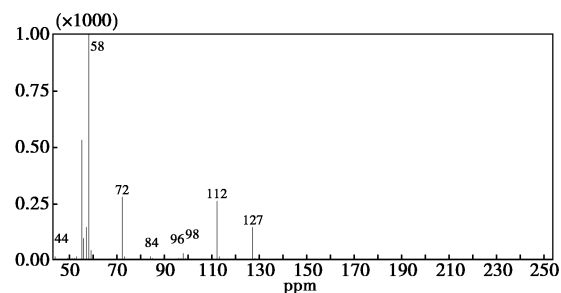
表 2 所示:乙醇循环使用 5 次,产品纯度始终保持在 99.5% 以上,收率稳定在 92% 左右,而磺酸盐杂质含量仅从 0.05% 缓慢上升至 0.08%,远低于 0.1% 的控制指标。这表明该溶剂循环工艺不仅稳定性良好,还能大幅降低溶剂消耗与废液排放,显著提升了过程的经济性和环保性。

表 2 母液循环使用对产品质量的影响 ($n=3$)

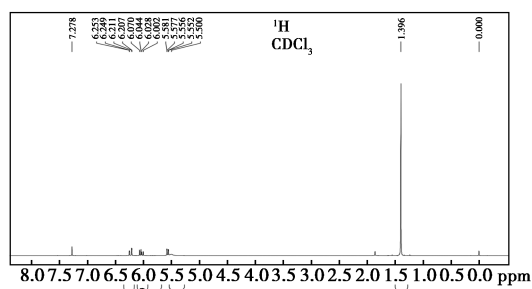
循环次数	产品纯度/%	产品收率/%	磺酸盐含量/%
1	99.81	92.2	0.05
2	99.76	91.5	0.05
3	99.75	92.0	0.06
4	99.65	92.2	0.07
5	99.51	92.0	0.08

2.4 产物结构鉴定

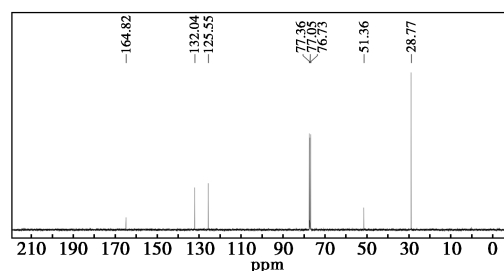
采用 GC-MS、 ^1H NMR 与 ^{13}C NMR 对精制产品进行结构表征,见图 3。



(a) 质谱



(b) 核磁 ^1H 谱



(c) ^{13}C 谱

图 3 N-t-BAA 的质谱、核磁 ^1H 谱与 ^{13}C 谱

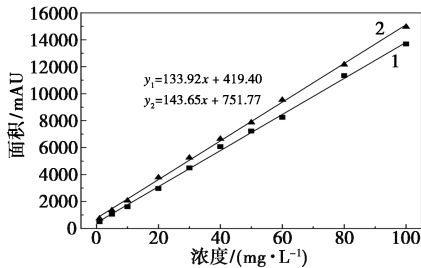
EI-MS, m/z : 127 [M] $^+$, 与 $\text{C}_7\text{H}_{13}\text{NO}$ 为 127.1 理

论值一致。 ^1H NMR(CDCl_3 , 400 MHz), δ : 6.24 (1H, $\text{CH}_2=\text{CH}-$); 6.04 (1H, $\text{CH}_2=\text{CH}-$); 5.57 (s, 1H, $\text{CH}_2=\text{CH}-$); 5.50 (1H, $-\text{NH}-$); 1.39 [s, 9H, $(\text{CH}_3)_3\text{C}-$]; ^{13}C NMR(CDCl_3 , 400 MHz), δ : 164.82 ($\text{C}=\text{O}$); 132.04、125.55 ($\text{CH}_2=\text{CH}-$); 51.36 [$(\text{CH}_3)_3\text{C}-$]; 28.7 [$(\text{CH}_3)_3\text{C}-$]。表征结果与 N-叔丁基丙烯酰胺标准品图谱完全一致, 确证精制产品为目标产物 N-t-BAA。

2.5 HPLC 方法学验证

2.5.1 线性关系与检出限、定量限

将系列标准工作液进样分析, 以质量浓度 (x , mg/L) 对峰面积 (y , mAU) 进行线性回归, 得到 AMPS 回归方程为 $y_1 = 133.92x + 419.40$, 相关系数 $R^2 = 0.998\ 9$; $y_2 = 143.65x + 751.77$, 相关系数 $R^2 = 0.998\ 6$ 。图 4 表明两种化合物在 1~100 mg/L 范围内线性关系良好。以信噪比 (S/N) = 3 和 $S/N = 10$ 分别计算检出限 (LOD) 和定量限 (LOQ), 结果分别为 $LOD_1 = 0.06\ \text{mg/L}$, $LOQ_1 = 0.1\ \text{mg/L}$; $LOD_2 = 0.05\ \text{mg/L}$, $LOQ_2 = 0.1\ \text{mg/L}$, 满足微量杂质检测需求。



1—AMPS 的线性拟合; 2—N-t-BAA 的线性拟合

图 4 AMPS 及产品 N-t-BAA 标准曲线

2.5.2 精密度

取 50 mg/L 标准工作液重复进样 6 次, 考察峰面积与保留时间的精密度, 结果峰面积加标回收率 (RSD) = 0.15%, 保留时间 $RSD = 0.08\%$; 取同一样品溶液重复测定 6 次, 样品纯度 $RSD = 0.37\%$ (表 3), 表明方法精密度良好。

表 3 样品精密度测定结果 ($n=6$)

序号	质量分数/%	平均值/%	标准偏差	$RSD/\%$
1	97.34	97.91	0.36	0.37
2	97.12			
3	97.56			
4	98.12			
5	97.89			
6	97.65			

2.5.3 加样回收率

采用加标回收法验证方法准确性, 取已知含量的样品溶液, 分别加入不同量的标准品, 按实验方法测定, 结果如表 4 所示。平均回收率为 101.45%, $RSD = 1.2\%$, 回收率在 99.0%~104.0% 范围内, 表明方法准确可靠, 可用于产品质量控制。

表 4 加样回收率结果 ($n=5$)

序号	加标准量/ mg	测量值/ mg	回收率/%	平均回收率/%
1	1.00	6.01	101.00	101.45
2	2.00	5.98	99.00	
3	3.00	8.12	104.00	
4	4.00	9.09	102.25	
5	5.00	10.05	101.00	

3 结论

(1) 阐明 AMPS 浓缩液中 N-t-BAA 的 Ritter 副反应-水解转化-水相析晶完整机理, 明确磺酸中间体水解是产物生成的核心步骤, 溶解度差异是水相高效除杂的关键依据, 为工艺开发提供理论支撑。

(2) 开发多级水相纯化-乙醇重结晶新工艺, 最优工艺条件为: 一级水料比 1.5:1、二级补加 0.5 倍水、静置 6 h, 制得 N-t-BAA 产品纯度 $\geq 99.7\%$, 磺酸类杂质 $\leq 0.1\%$, 达到高纯级标准; 乙醇母液可循环套用 5 次以上, 溶剂消耗降低约 80%, 废液减排约 50%, 绿色经济性显著。

(3) 建立的 HPLC 定量检测方法线性范围宽、检出限低、精密度与回收率优异, 可实现产品与杂质的快速、准确分析。

(4) 工艺流程简洁、设备通用、操作简便、投资成本低, 实现 AMPS 生产浓缩液危废高值化利用, 为行业清洁生产提供技术示范, 适合工业化推广应用。

参考文献

[1] Li S, Long W, Wei Z, et al. Source, type, controlling, and utilization of by-and side-products arising from the production process of 2-acrylamido-2-methyl propane sulfonic acid (AMPS): A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 438: 140671.

[2] Jebri S, Mabrouk W, Elleuch R, et al. Dual proton transport in Schiff base-modified chitosan functionalized with AMPS for fuel cell applications[J]. Materials for Renewable and Sustainable Energy, 2025, 14(3): 60.

[3] 谷永, 胥博文, 王惠荣, 等. 绿色阻垢剂对地热流体碳酸钙垢的阻垢性能与机理[J]. 现代化工, 2025, 45(S2): 163-169.

(下转第 176 页)

- 的吸附性能研究[J].现代化工,2021,41(12):136-139,145.
- [2] 张云峰,郭昭华,池君洲,等.金属镓的资源分布情况及应用现状[J].中国煤炭,2014,40(S1):36-38.
- [3] Zhao Z, Yang Y, Xiao Y, *et al.* Recovery of gallium from Bayer liquor: A review[J]. Hydrometallurgy, 2012, 125: 115-124.
- [4] 邹铭金,李栋,田庆华,等.从二次资源中分离回收镓的研究进展[J].有色金属科学与工程,2020,11(5):45-51.
- [5] Kou Z, Bian W, Wang C. Preparation of novel amidoxime resin and its performance in gallium(Ⅲ) extraction from Bayer liquor[J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2022, 11: 100317.
- [6] Lu S, Chen L, Hamza M F, *et al.* Amidoxime functionalization of a poly(acrylonitrile)/silica composite for the sorption of Ga(Ⅲ)-Application to the treatment of Bayer liquor[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 368: 459-473.
- [7] Lu F, Xiao T, Lin J, *et al.* Resources and extraction of gallium: A review[J]. Hydrometallurgy, 2017, 174: 105-115.
- [8] Zhao Z, Li X, Chai Y, *et al.* Adsorption performances and mechanisms of amidoxime resin toward Gallium(Ⅲ) and Vanadium(V) from bayer liquor[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2015, 4(1): 53-59.
- [9] Long H, Zhao Z, Chai Y, *et al.* Binding mechanism of the amidoxime functional group on chelating resins toward gallium(Ⅲ) in Bayer liquor[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(33): 8025-8030.
- [10] Guo W, Zhang J, Yang F, *et al.* Highly efficient and selective recovery of gallium achieved on an amide-functionalized cellulose[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 237: 116355.
- [11] Yi T, Cen Z, Ji Y, *et al.* Amidoxime-based star polymer adsorbent with ultra-high uranyl affinity for extremely fast uranium extraction from natural seawater[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(41): 2404220.
- [12] Lv Z, Fan G, Bai Y, *et al.* Dual-ligand metal-organic frameworks via in situ amidoxime engineering for selective ion separation[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(30): e26751.
- [13] Stock N, Biswas S. Synthesis of metal-organic frameworks (MOFs): Routes to various MOF topologies, morphologies, and composites[J]. Chemical Reviews, 2012, 112(2): 933-969.
- [14] Shekhah O, Liu J, Fischer R, *et al.* MOF thin films: Existing and future applications[J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40(2): 1081-1106.
- [15] Qin Z, Wang S, Zhang S, *et al.* Cross-linked amidoxime porous resin for selective gallium separation in Bayer solutions: Reaction mechanism and kinetic study[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481: 148340.
- [16] Diakonov I I, Pokrovski G S, Bénézech P, *et al.* Gallium speciation in aqueous solution. Experimental study and modelling: Part 1. Thermodynamic properties of Ga(OH)₄— to 300 °C[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(7): 1333-1343.
- [17] 卢思名.树脂吸附法从拜耳溶液中分离回收镓的研究[D].南宁:广西大学,2020.
- [18] Zhao Y, Li J, Zhao L, *et al.* Synthesis of amidoxime-functionalized Fe₃O₄@SiO₂ core-shell magnetic microspheres for highly efficient sorption of U(VI)[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 235: 275-283.
- [19] 秦达峰.偕胺肟基吸附剂的制备及对镓离子的分离性能研究[D].成都:四川大学,2023.
- [20] Lu X, He S, Zhang D, *et al.* Synthesis and characterization of amidoxime modified calix[8] arene for adsorption of U(VI) in low concentration uranium solutions[J]. RSC Advances, 2016, 6(103): 101087-101097. ■

(上接第167页)

- [4] 米楚,赖小娟,冯小龙,等.荧光聚丙烯酰胺纳米微球的制备与性能研究[J].现代化工,2023,43(1):169-174.
- [5] Pang S C, Zhu H M, Ma J Y, *et al.* Sulfonated sodium tannin and AM/AMPS copolymer complex as an anti-temperature viscosity reducer for water-based drilling fluid[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2022, 44(4): 9827-9843.
- [6] Ritter J J, Minieri P P. A new reaction of nitriles. i. amides from alkenes and mononitriles[J]. Journal of the American Chemical Society, 1948, 70: 4045-4048.
- [7] 高旭.N-叔丁基丙烯酰胺的合成及反应动力学和固液相平衡的研究[D].上海:华东理工大学,2015.
- [8] 李斗星,齐兰芝,黄凤兴,等.一种回收N-叔丁基丙烯酰胺的方法及装置:CN 201410472828.7[P].2016-04-13.
- [9] Li W B, Zhao Y J, Sun W L, *et al.* Multi-responsive poly N-isopropylacrylamide/poly N-tert-butylacrylamide nanocomposite hydrogel with the ability to be adsorbed on the chitosan film as an active antibacterial material[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 208: 1019-1028.
- [10] 朱卓岩,欧阳坚,任建军,等.N-叔丁基丙烯酰胺、AMPS与丙烯酰胺共聚物及其水溶液特性的研究[J].精细与专用化学品,2009,17(7):21-22.
- [11] 赵地顺,申晓冰,李倩,等. Brønsted酸离子液体催化合成N-叔丁基丙烯酰胺[J].化学工程,2010,38(5):42-45,90.
- [12] 赵计虎,单保卿,李金磊.一种2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸的生产工艺及生产设备:CN 2020109905512[P].2020-12-08.
- [13] 李斗星,齐兰芝,黄凤兴,等.一种叔丁基丙烯酰胺磺酸的合成方法:CN 201110252780.5[P].2014-05-28.
- [14] 松本吉裕,梅田靖,青山茂之,等.一种降低着色的N-叔丁基丙烯酰胺的生产方法:JP 2011178715A[P].2011-09-15.
- [15] 李猛,田勇,胡永玲,等.AMPS的反应历程及副产物[J].中国化工贸易,2012,4(5):25-26. ■