

文章编号: 1006-3080(2025)04-0468-08

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20241025001

低含水量乙酸废液分离过程的模拟与能耗-经济性分析

黄良德¹, 童张法^{1,2}, 金庸³, 蒋迎花^{1,2}

(1. 广西大学化学化工学院, 南宁 530004; 2. 广西石化资源加工及过程强化技术重点实验室, 南宁 530004; 3. 广西华谊能源化工有限公司, 广西 钦州 535000)

摘要: 乙酸生产过程中会产生大量废液, 对其进行回收是乙酸企业实现节能减排和可持续发展的重要手段之一。针对低含水量的乙酸废液分离和回收问题, 本文分别构建了常规精馏、萃取精馏、共沸精馏和热泵精馏共 4 种不同分离工艺的模拟流程, 分析对比了这 4 种分离工艺的能耗和经济性, 并根据一个实例研究 4 种方法的优缺点。结果表明, 4 种分离工艺均能满足 GB/T 1628—2020 要求。在能耗和公用工程成本上, 采用热泵精馏的分离流程能耗最低、但设备投资费用较高, 而采用萃取精馏的分离流程能耗最高但分离工艺经济性更好。综合对比不同乙酸废液回收规模下的分离效果, 发现随着废液处理量增加, 公用工程成本与经济效益都会增加, 热泵精馏和共沸精馏更适合长期、大规模生产, 而萃取精馏适合短期、小规模生产。

关键词: 乙酸废液; 分离回收; 精馏技术; 能耗分析; 经济性评价

中图分类号: TQ028.3

文献标志码: A

乙酸是一种重要的有机酸和有机溶剂, 在乙醇、乙酸酯及乙酸纤维素等化工产品生产过程中有着重要的作用^[1]。乙酸的生产方法主要有乙醇氧化法^[2]、木质素制备法^[3]、甲醇羰基化法^[4]等。其中, 甲醇羰基化法具有转化率高、产率高等优点而受到关注^[5], 被广泛应用于乙酸化工生产中, 但生产过程中会产生大量含乙酸、丙酸、水和金属盐等杂质(质量分数分别约为 70%、20%、5% 和 4%) 的乙酸废液。随着环保要求的日趋严格, 没有达到国标要求的乙酸废液必须以危废形式进行处理, 因而增加了企业的运行成本。为降低危废处理量、减少企业运行成本、实现企业的可持续发展, 开发和探索乙酸废液回收工艺愈加重要。

在分离乙酸废液过程中, 由于乙酸和水的沸点十分相近, 相对挥发度接近于 1, 导致乙酸和水的分离十分困难^[6]。因而, 乙酸和水分离工艺的探索是企业进行乙酸废液回收中最为关键的问题之一。目

前, 乙酸和水的分离工艺主要包括精馏法、膜分离法和吸附法等^[7-9]。其中, 精馏法是一种基于多次部分汽化和部分冷凝促使液体混合物能够顺利完成分离的方法^[10], 也是目前工业上最为成熟的工艺之一。但是对于乙酸-水体系, 采用普通的精馏分离技术需要很大的回流比和塔板数, 成本和能耗很高。为了降低分离费用, 可采用基于热泵、萃取和共沸技术的特殊精馏方法实现乙酸和水体系的分离^[11]。其中, 热泵精馏通过提高塔顶蒸汽流股的品位并代替再沸器热源, 可以节省绝大部分热能, 如 Shahandeh 等^[12]设计了热泵精馏分离水和甲酸, 总能耗较常规精馏降低了 70.04%, 证明热泵精馏具有较高的节能效益。萃取精馏是一种通过添加萃取剂增大体系组分相对挥发度从而达到节能降本目的的分离技术^[13], Li 等^[14]提出了一种萃取精馏流程工艺分离废水中乙酸乙酯和二恶烷, 热集成后的流程较普通精馏流程在总能耗和年总投资成本方面分别降低 28.18% 和 24.28%。

收稿日期: 2024-10-25

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA23062019-4); 国家自然科学基金(22308064); 广西大学高层次人才引进科研启动项目(A3040051027); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD23026166)

作者简介: 黄良德(2001—), 男, 硕士生, 研究方向为过程系统工程。E-mail: 1454315020@qq.com

通信联系人: 蒋迎花, E-mail: jiangyinghua@gxu.edu.cn

引用本文: 黄良德, 童张法, 金庸, 等. 低含水量乙酸废液分离过程的模拟与能耗-经济性分析[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(4): 468-475.

Citation: HUANG Liangde, TONG Zhangfa, JIN Yong, *et al.* Simulation and Energy-Economic Analysis for Separation Process of Acetic Acid Waste Liquid with Low Water Content[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2025, 51(4): 468-475.

Leng 等^[15]使用二甲基亚砜(DMSO)和对二甲苯(PX)萃取精馏分离乙酸甲酯、四氢呋喃和甲醇形成的共沸物,热集成后的萃取精馏流程焓效率提高了 8.06%, CO₂ 排放量降低了 33.26%,可见萃取精馏可以降低难分离组分的分离成本和能耗。与萃取精馏相似,共沸精馏也可用于难分离体系的分离,如 Ma 等^[16]研究了环己烷作为共沸剂共沸精馏分离甲醇和甲基丙烯酸甲酯,也体现出了较强的节能作用。有很多研究者对乙酸-水体系的精馏分离流程进行了深入的探索,如唐守胜等^[17]采用共沸精馏的方法研究了乙酸溶液(乙酸质量分数为 40%)的分离过程;常洪委等^[18]对比研究了不同萃取剂对乙酸溶液(乙酸质量分数为 3%)的分离效果;You 等^[19]探究了采用 *N*-甲基乙酰胺作为萃取剂分离乙酸溶液(乙酸质量分数为 50%)的能耗和经济性能。以上大多数精馏分离流程针对的均是含水量较高的乙酸溶液,而对于低含水量乙酸废液的分离缺乏详细研究。因此,探究低含水量乙酸溶液的分离工艺既是乙酸生产工厂实现废液回收的重要技术攻克点,也是关键科学问题。

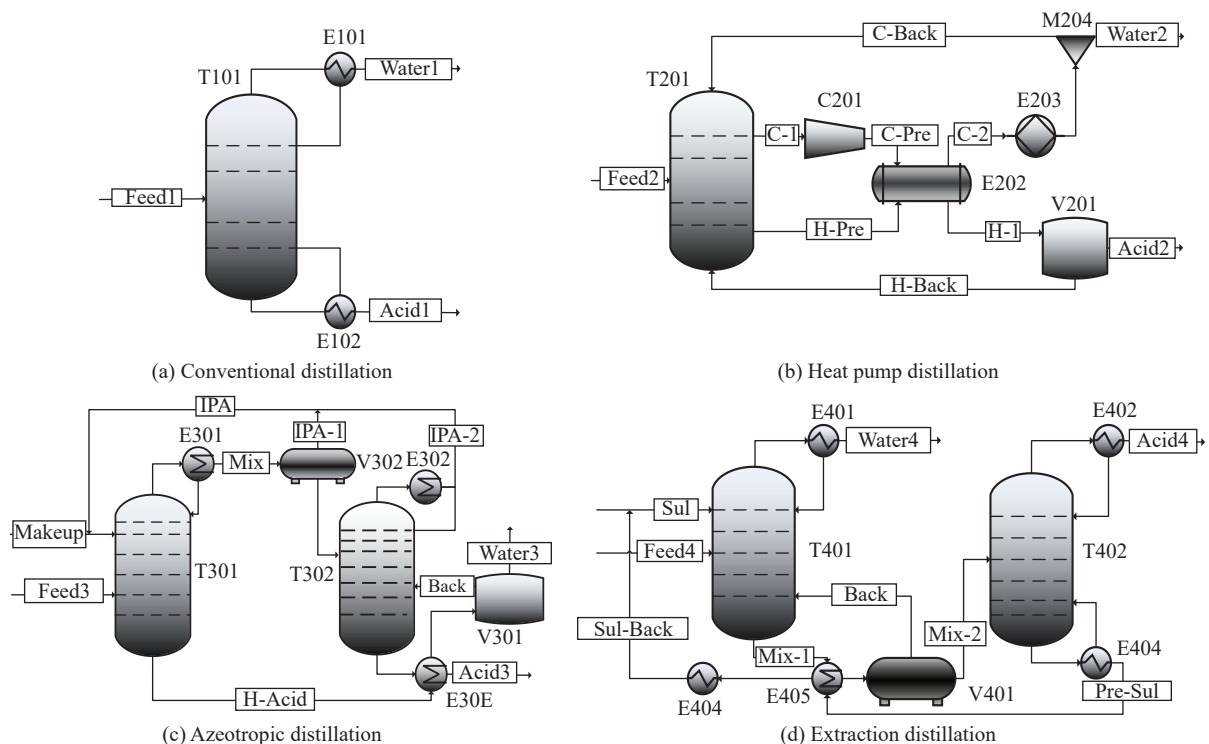
本文以低含水量的乙酸废液为研究对象,分别

构建了常规精馏、热泵精馏、萃取精馏、共沸精馏共 4 种工艺的乙酸-水分离模拟流程,以期回收满足国家标准需求的乙酸产品和获取低含水量的乙酸废液在不同情况下的最佳分离工艺,并分析对比这 4 种分离工艺的能耗和经济性。最后探究在不同的废液处理规模下这 4 种不同分离工艺的差异。

1 乙酸废液分离工艺

针对低含水量乙酸废液的回收问题,本文构建了常规精馏、萃取精馏、共沸精馏和热泵精馏共 4 种不同的分离流程,如图 1 所示。因为乙酸-水溶液具有强非理想特性,故采用能够处理任意极性和非极性混合物的 NRTL-HOC 方法作为模拟过程的热力学物性方法^[20]。

图 1(a)所示为常规精馏,该流程只包含一座精馏塔,乙酸和水分别从塔底和塔顶流出。在常规精馏的基础上,热泵精馏将再沸器和冷凝器集成为一个换热器,塔顶的蒸汽在压缩后代替热源与塔底的物流进行换热,换热后各流股部分回流^[21],如图 1(b)所示。与常规精馏相似,在热泵精馏中,乙酸和水分



C—Cold flow; H—Heat flow; C-PRE—Cold flow before heat exchange; H-Pre—Heat flow before heat exchange; IPA— Azeotropic agent flow; Sul—Extractant flow; C201—Compressor; E101、E102、E203、E301、E302、E303、E401、E402、E403、E404、E405—Heat Exchanger; M204—Divider; T101、T201、T301、T302、T401、T402—Tower; V201、V301—Component separator; V401、V302—Gas-liquid flash evaporator

图 1 各工艺模拟流程

Fig. 1 Simulation process of each technology

别从塔底和塔顶流出。图 1(c)和 1(d)分别为共沸精馏和萃取精馏。其中,在共沸精馏中,水与共沸剂形成低沸点共沸物在塔 T301 的塔顶馏出,而萃取精馏流程中水在萃取剂里的溶解度较小,故水单独从塔 T401 塔顶馏出。共沸精馏和萃取精馏两种工艺都是通过添加夹带剂增大体系的相对挥发度促进乙酸和水的分离,所以相对于常规精馏,共沸精馏和萃取精馏分别在乙酸分离塔 T301、T401 之后增加了一座夹带剂回收塔 T302、T402 对夹带剂进行回收。

2 能耗和经济性评价方法

2.1 能耗评价

为了便于对比各种能耗,根据折能系数(GB/T 2589—2020)将不同能源消耗量转化为综合能耗。乙酸-水溶液分离过程的总能耗表示为:

$$E = \sum_{i=1}^N E_i k_i \quad (1)$$

其中, E 为综合能耗, E_i 为第*i*种能源消耗量, k_i 为第*i*种能源的折能系数。

2.2 经济性评价

乙酸-水溶液分离过程的经济性可用年度总成本(TAC)来评价,表示为:

$$TAC = \frac{TCC}{n} + TOC \quad (2)$$

式中, n 为投资回报期年限,TCC是乙酸-水溶液分离过程的设备成本,TOC为总公用工程成本。

为简化计算过程,设备成本主要考虑了塔、换热器、压缩机等成本较高的设备,忽略了泵、阀门、容器罐和运输管道等成本较小的设备^[22]。因此,设备成本可表示为:

$$TAC = C_t + C_s + C_{ex} + C_{com} \quad (3)$$

$$C_t = 21\,142.4 \times D^{1.066} \times H^{0.802} \quad (4)$$

$$C_s = 967.1 \times D^{1.55} \times H \quad (5)$$

$$C_{ex} = 5.85 \times A^{0.65} \times m \quad (6)$$

$$C_{com} = 12\,135.785\,6 \times \rho^{0.82} \quad (7)$$

式中, C_t 、 C_s 、 C_{ex} 、 C_{com} 分别为塔身成本、塔板成本、换热器成本和压缩机成本; D 为塔内径; H 为塔高; A 为换热面积; m 为换热器系数; ρ 为电消耗量。

总公用工程成本主要包括蒸汽、冷凝水和用电成本,可表示为:

$$TOC = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times \beta \quad (8)$$

式中, α_i 为第*i*种资源各公用工程使用 1 h 所需的成本, β 为运行时间。

3 案例分析

3.1 基础数据

本文案例来源于某工厂乙酸生产过程,根据该乙酸生产过程的实际运行条件,可得预处理去除丙酸和金属盐杂质后废液的组成:乙酸质量分数为 94.53%、水质量分数为 5.47%,处理量为 1344 t/a。依据相关研究可知,环丁砜和醋酸异丙酯有较强的改变乙酸-水体系相对挥发度的能力^[23-25],所以本文选择环丁砜作为萃取剂,醋酸异丙酯作为共沸剂。回收的乙酸产品需满足国标 GB/T 1628—2020 的要求,即乙酸产品质量分数应至少为 99.8%。假设工厂每年运行 8 000 h,各工艺的投资回报年限为 3 a。

本文将常规精馏、萃取精馏、共沸精馏和热泵精馏 4 种工艺流程在 Aspen Plus 中进行构建并模拟,具体模拟过程为:首先采用简捷计算的方法获得乙酸溶液分离过程的基础参数,然后基于此构建乙酸溶液分离过程的严格模拟流程,最后采用灵敏度分析的方法确定满足产品生产需求的操作参数。

3.2 模拟结果

采用本文所构建的常规精馏、萃取精馏、共沸精馏和热泵精馏 4 种工艺对乙酸-水溶液进行处理,可得到各流程的参数和产品流股结果,如表 1 所示。为了方便描述,在图表中采用 CD、HPD、AD 和 ED 分别表示常规精馏、热泵精馏、共沸精馏和萃取精馏。

由表 1 可知,从产品流股的质量浓度上看,不管是常规精馏、萃取精馏、共沸精馏还是热泵精馏,均能获得满足国标 GB/T 1628—2020 需求的乙酸产品,说明本文所构建的 4 种分离方法均能实现乙酸废液的有效回收,满足乙酸生产工业的废液处理要求。从分离流程的设备和操作参数上看,常规精馏采用 1 个精馏塔实现乙酸-水的分离需要很大的塔板数和回流比,这意味着分离过程的顺利实现需要投入较大的设备费用和操作费用。从降低操作费用的角度出发,热泵精馏在常规精馏的基础上,通过增加压缩机而实现塔顶热量的回收利用,但该技术本身并没有影响乙酸-水体系的分离,所以塔板数、进料塔板数和回流比参数与常规精馏保持一致。为降低乙酸-水的分离难度,萃取精馏和共沸精馏引入了夹带剂,但同时也额外增加了一座回收夹带剂的塔。总体来说,夹带剂的引入均降低了乙酸分离塔的塔板数

表 1 流程模拟结果
Table 1 Process simulation results

Type	Acetic acid separation column				Reagent recycling column			Compressor	w(Acetic acid)/%
	N_t	N_f	N_e	R	N_t	N_f	R	C_r	
CD	60	14		25.00					99.82
HPD	60	14		25.00				2.07	99.83
AD	47	10	13	3.50	3	2	0.26		99.81
ED	19	6	6	1.40	11	5	1.00		99.88

N_t, N_f, N_e, R and C_r represent the number of trays, number of feed trays, extractant feed plates, reflux ratio, and compression ratio, respectively

和回流比。对比共沸精馏可以发现, 萃取精馏能大幅度降低乙酸分离塔的塔板数和回流比, 但其夹带剂回收阶段所需要的条件却严苛于共沸精馏。

3.3 不同乙酸溶液分离工艺的能耗与经济性对比

各工艺所需的能源种类不尽相同, 为了对比不同分离工艺的能耗情况, 本文给出了回收每吨乙酸产品的能耗, 如表 2 所示。

由表 2 可见, 从能源消耗的总量上看, 相比于常规精馏, 热泵精馏和共沸精馏的综合能耗均有所降

低(分别下降了 87.08% 和 37.35%), 而萃取精馏的综合能耗却有所增加(提高了 21.77%)。其中, 热泵精馏的能源消耗量降低得最多, 这是因为热泵精馏使用较少的电能回收了塔顶的蒸汽的能量从而大大降低了分离过程对外界能源的需求量。萃取精馏能耗增加的原因是需要使用压力更高的蒸汽公用工程。因为萃取剂的沸点较高, 回收萃取夹带剂需要更高的温度和操作条件, 所以需要高压蒸汽和更大的塔板数与回流比, 这与表 1 所得到的结果一致。

表 2 生产每吨乙酸的能耗
Table 2 Energy consumption of per ton acetic acid production

RC/t		Water	Electricity consumption/(kW·h)	ERC/GJ			Electricity consumption/GJ	Total consumption/GJ
Medium pressure stream	High pressure stream			Medium pressure stream	High pressure stream	Water		
1.65	—	157.85	—	5.25	—	0.39	—	5.65
—	—	12.69	75.79	—	—	0.03	0.70	0.73
1.03	—	100.34	—	3.29	—	0.25	—	3.54
0.13	1.60	82.30	—	0.41	6.26	0.20	—	6.88

RC and ERC represent utility consumption and comprehensive energy consumption, respectively

从经济性的角度进一步分析各个流程的能耗, 图 2 给出了乙酸溶液不同分离方法的公用工程费用。由图 2 可见, 从能源费用上看, 相比于常规精馏, 3 种特殊精馏的公用工程费用均有所降低。这与表 2 结果有差异。萃取精馏尽管使用了高压蒸汽, 但其使用量并不大, 所以萃取精馏的公用工程费用也是降低的。

进一步对不同分离过程的设备费用进行对比分析, 结果如图 3 所示。由图 3 可见, 相比于常规精馏, 热泵精馏的设备费用增加了 31.68%, 而共沸精馏和萃取精馏的设备费用则分别降低了 25.38% 和 54.41%。从设备费用的组成上看, 塔的费用最高。由表 1 可知, 热泵精馏在常规精馏的基础上, 增加压

缩机以回收塔顶的蒸汽的能量, 所以设备费用有所增加。而萃取精馏和共沸精馏由于引入夹带剂降低了乙酸溶液的分离难度, 减少了塔板数的需求量, 从而使设备费用均显著降低。

为了综合评价 4 种分离工艺的经济性, 图 4 给出了年度总成本的对比结果。可以看出, 相比于常规精馏, 热泵精馏、共沸精馏、萃取精馏的年度总成本均有所下降, 分别下降了 0.40%、28.48% 和 41.08%。从年度总成本的组成上看, 设备费用远远大于公用工程费用, 故各分离流程的年度总成本主要是由设备成本的大小决定的, 这也导致了设备成本更低的分离流程具有更好的经济性。热泵精馏公用工程的费用优势无法弥补设备成本的劣势, 从而并没有过

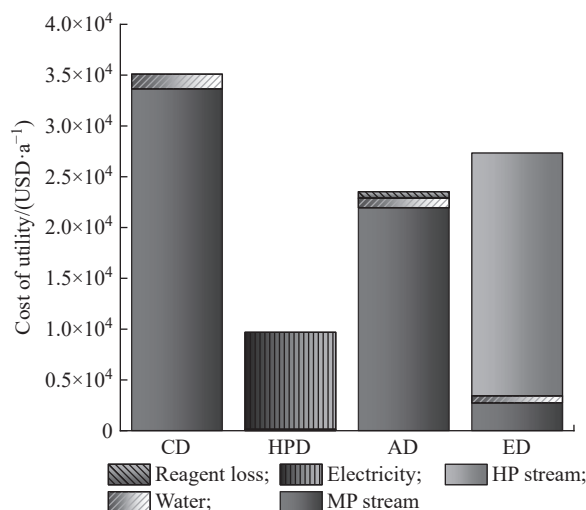


图 2 不同分离方法的公用工程费用

Fig. 2 Utility costs for different separation methods

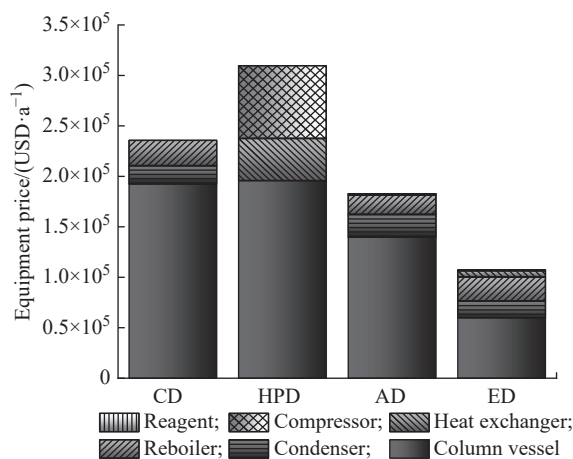


图 3 不同分离方法的设备费用

Fig. 3 Equipment costs for different separation methods

多地降低乙酸溶液分离过程的总费用,而设备费用较低的萃取精馏和共沸精馏则更具有经济性。综合上述分析可得,在 3 年投资回报期内,萃取精馏是最佳的乙酸溶液分离方法。

4 不同进料规模下乙酸溶液分离过程的经济效益对比分析

为了应对工厂未来增产导致的乙酸废液处理量增大的情况,进一步模拟了 4 000、6 000、8 000 t/a 进料规模下不同乙酸废液的分离工艺。各流程在处理不同规模的废液时所得乙酸产品的质量分数如表 3 所示,可见得到的乙酸产品符合国标要求。

为了更好地描述不同情况下废液的分离经济性,以经济效益指标(即产品收入减去总费用)来对比不同进料规模下分离过程的经济性(取乙酸的市场

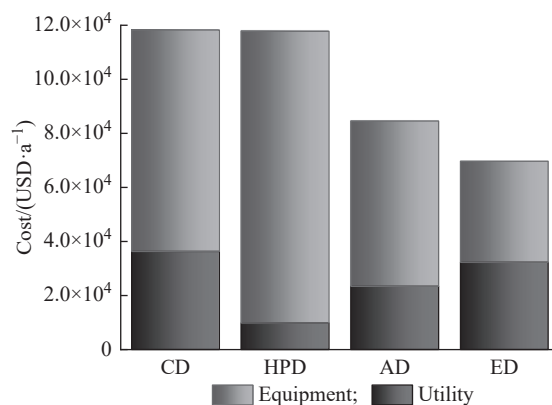


图 4 不同分离方法的年度总成本

Fig. 4 TAC for different separation methods

表 3 不同进料流量下不同分离方法得到的乙酸产品质量分数

Table 3 Mass fraction of acetic acid products obtained by different separation methods under different feed flowrates

Feed flowrate/(t·a ⁻¹)	w(Acetic acid)/%			
	CD	HPD	AD	ED
4 000	99.81	99.81	99.86	99.80
6 000	99.82	99.82	99.84	99.82
8 000	99.82	99.82	99.86	99.85

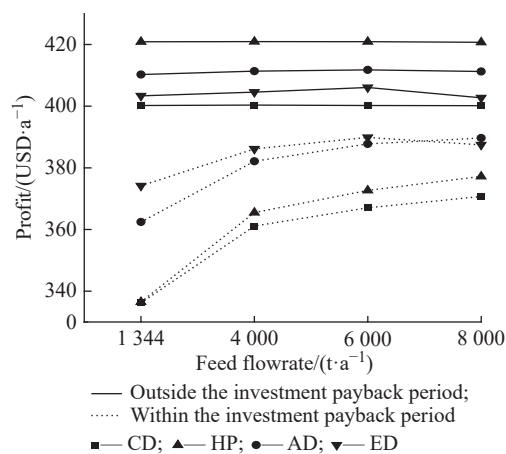


图 5 不同进料规模下不同分离方法的系统经济效益

Fig. 5 Economic benefits of different separation methods under different feed flowrates

价格 428.6 USD/t^[26])。图 5 给出了投资回报期内和回报期外的经济效益,其中实线和虚线分别表示投资回报期之外、之内的经济效益的变化趋势。

由图 5 可以看出,不管是在投资回报期内还是在投资回报期外,与常规精馏方法相比,采用特殊精馏技术的乙酸溶液分离过程的经济效益均会提高。在投资回报期内,随着废液处理量增大,各流程的经济效益呈增大趋势。相比于其他特殊分离方法,热泵精馏的经济效益相对较差。这是因为在投资回报

年限内, 经济效益取决于年度总成本, 而年度总成本则主要取决于设备费用, 热泵精馏的设备费用占比最高。对比萃取精馏和共沸精馏, 可以发现随着乙酸废液处理量增大, 共沸精馏会反超萃取精馏的经济效益。为了进一步分析在投资回报期内经济效益变化的原因, 图 6 给出了不同进料规模下不同分离方法的系统费用占比情况。

由图 5 和图 6 可得, 随着废液处理规模的增加, 公用工程成本的占比也会增加(即在废液处理量增大的过程中, 设备成本的增长速率低于公用工程成本), 所以, 对公用工程成本降低能力较弱的分离工艺其经济效益也会降低。但在投资回报期外, 不同

精馏过程经济效益的大小依次为热泵精馏>共沸精馏>萃取精馏, 并且各流程经济效益并不会随着废液处理规模的变化而显著改变。这是因为在本文案例中, 在投资回报期之外经济效益只与公用工程成本相关。

综上可知, 热泵精馏在投资回报期之外的经济效益最高, 随着时间的推移, 热泵精馏的总经济效益会超越共沸精馏和热泵精馏, 表 4 给出了热泵精馏总经济效益反超另外两种特殊精馏总经济效益的投资时长。由表 4 可知, 热泵精馏的经济效益超过另外两种分离工艺经济效益的投资时长会随着进料量的变化而变化。热泵精馏更适用于大规模、长周期的应用场景。

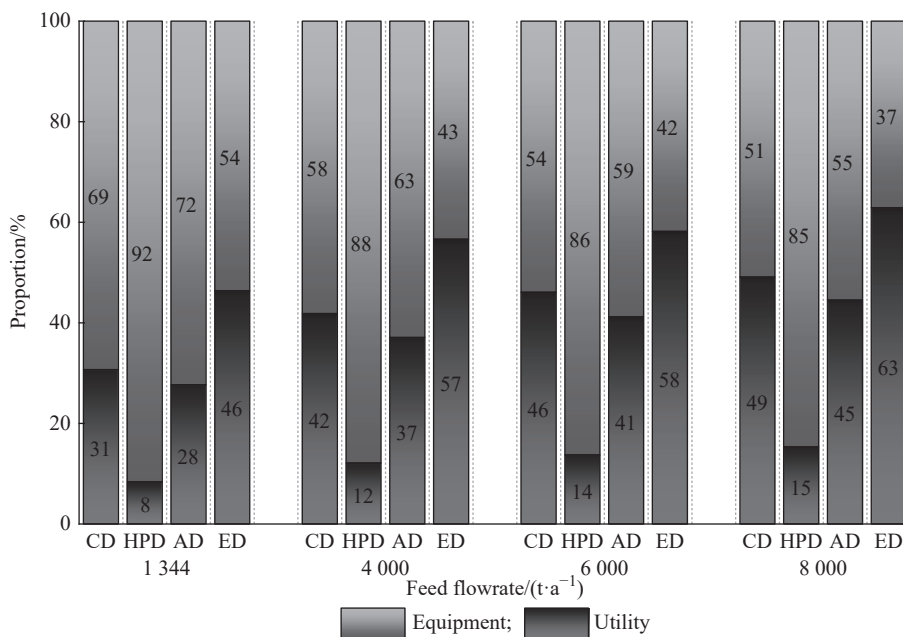


图 6 不同进料规模下不同分离方法的系统费用占比情况

Fig. 6 Cost proportion of different separation methods for different feed flowrates

表 4 热泵精馏总经济效益超过萃取精馏和共沸精馏经济效益的总年份

Table 4 Years in which the total economic benefits of HPD exceed those of ED and AD

Feed flowrate / (t·a ⁻¹)	Investment duration/a	Total profit/10 ⁶ USD		Investment duration/a	Total profit/10 ⁶ USD	
		HPD	AD		HPD	ED
1 344	10	5.07	5.06	11	5.60	5.57
4 000	7	10.53	10.52	9	13.72	13.58
6 000	7	15.91	15.96	8	18.30	18.17
8 000	5	15.08	14.94	7	21.31	21.00

5 结 论

针对低含水量的乙酸废液中乙酸的处理问题, 本文建立了常规精馏、萃取精馏、共沸精馏和热泵精馏 4 种不同的分离工艺并在 Aspen Plus 平台上构建

了相对应的模拟流程, 通过处理乙酸废液的实际工业案例来探究 4 种方法在经济和能耗上的优劣, 并进一步分析对比了这 4 种分离方法在处理不同规模废液时的经济效益, 主要得出以下结论:

(1) 针对乙酸废液分离问题, 采用常规精馏、萃

取精馏、共沸精馏和热泵精馏 4 种不同的分离工艺均能回收满足国标要求的乙酸产品。

(2)在投资回报期内,热泵精馏能耗和公用工程成本最小,能耗较常规精馏下降了 87.08%,而萃取精馏设备成本和年度总成本最小,较常规精馏分别下降了 54.41% 和 41.08%。故在投资回报期内,萃取精馏是最适合乙酸废液回收的技术。并且,在投资回报期内,各流程的经济效益和公用工程成本占比均随着废液处理规模的增加而增大,所以热泵精馏和共沸精馏这类降低公用工程成本能力更强的工艺更适合大规模生产,而降低设备成本能力更强的萃取精馏更适合小规模生产。

(3)在投资回报期外,随着废液处理规模的增大,各流程的经济效益并不会显著变化,但是热泵精馏总经济效益超过萃取精馏和共沸精馏两种工艺的时间会缩短,所以热泵精馏更适合长期生产。

参考文献:

- [1] CHEN Y J, YANG Y, LIU X, *et al.* Sustainable production of formic acid and acetic acid from biomass[J]. *Molecular Catalysis*, 2023, 545: 113199.
- [2] ZHANG Y F, ZHU W, FANG J J, *et al.* Electrochemical converting ethanol to hydrogen and acetic acid for large scale green hydrogen production[J]. *Nano Research*, 2024, 17(3): 1542-1551.
- [3] LI M, TANG H Z, HU H Y, *et al.* Production of acetic acid from wheat bran by catalysis of an acetoxylan esterase[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 396: 130443.
- [4] DIMIAN A C, KISS A A. Novel energy efficient process for acetic acid production by methanol carbonylation[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2020, 159: 1-12.
- [5] NEWMAN A D, WANG Y, ORR S A, *et al.* Rhodium promoted heteropolyacid catalysts for low temperature methanol carbonylation[J]. *Catalysis Science & Technology*, 2022, 12(12): 3886-3897.
- [6] PENG Y, SHEN Y H, HUANG Q, *et al.* Separation of near-boiling mixtures (acetic acid and water) enhanced by ionic liquid[J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2023, 187: 107147.
- [7] HU N, GUO J, WU Q, *et al.* Design and evaluation of energy-saving total distillation separation of *N, N*-Dimethylacetamide/acetic acid/water[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 282: 120154.
- [8] 徐凤, 刘爱伦. 基于小波核函数极限学习机的模型预测控制模拟 [J]. *华东理工大学学报 (自然科学版)*, 2015, 41(2): 185-191.
- [9] 王诗桥, 张西标, 李涛, 等. 醋酸废水分离提纯及合成的研究进展 [J]. *山东化工*, 2023, 52(13): 85-88.
- [10] 郑雨婷, 方冠东, 张梦波, 等. 微化工精馏分离技术研究进展 [J]. *化工学报*, 2024, 75(1): 47-59.
- [11] LIU C L, ZHONG J H, WEI R R, *et al.* Process design and intensification of multicomponent azeotropes special distillation separation *via* molecular simulation and system optimization[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2024, 71: 24-44.
- [12] SHAHANDEH H, JAFARI M, KASIRI N, *et al.* Economic optimization of heat pump-assisted distillation columns in methanol-water separation[J]. *Energy*, 2015, 80: 496-508.
- [13] 吴启铭, 王振, 徐文武, 等. 绿色节能的萃取精馏工艺设计与强化 [J]. *石油炼制与化工*, 2024, 55(2): 128-134.
- [14] LI Y D, SUN T Y, YE Q, *et al.* Investigation on energy-efficient extractive distillation for the recovery of ethyl acetate and 1, 4-dioxane from industrial effluent[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 329: 129759.
- [15] LENG J J, FAN S D, LU C Y, *et al.* Sustainable design and multi-objective optimization of heat pump assisted extractive distillation process for separating a ternary mixture of methyl acetate, tetrahydrofuran and methanol[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138186.
- [16] MA Y, HU Z, SUN X, *et al.* Energy-saving design of azeotropic distillation for the separation of methanol-methyl methacrylate azeotrope from industrial effluent[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 353: 128382.
- [17] 唐守胜, 李绍军. 醋酸甲酯对醋酸脱水共沸精馏过程的影响 [J]. *华东理工大学学报 (自然科学版)*, 2012, 38(5): 606-611.
- [18] 常洪委, 刘冬, 高瑞昶. 填料塔萃取回收醋酸废水的工艺研究 [J]. *现代化工*, 2013, 33(11): 86-88,90.
- [19] YOU X Q, GU J L, PENG C J, *et al.* Optimal design of extractive distillation for acetic acid dehydration with *N*-methyl acetamide[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2017, 120: 301-316.
- [20] 杨利利. 醋酸和丙酸分离工艺过程设计模拟 [J]. *石油化工应用*, 2017, 36(8): 136-137,145.
- [21] YANG D M, WAN D H, YUN Y, *et al.* Energy-saving distillation process for mixed trichlorobenzene based on ORC coupled MVR heat pump technology[J]. *Energy*, 2023, 262: 125565.
- [22] LI Y D, SUN T Y, YE Q, *et al.* Economic and environmental assessment for purification of acetonitrile and isopropanol by reactive coupling extractive distillation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 275: 119133.
- [23] 田琨, 张乐, 朱丽珺. 基于 Aspen 的醋酸-水萃取精馏工艺设计及优化 [J]. *云南化工*, 2023, 50(3): 127-131.
- [24] CHILEV C, LAMARI F, DICKO M, *et al.* Investigation of acetic acid dehydration by various methods[J]. *Journal of*

- Chemical Technology and Metallurgy, 2015, 51(1): 73-84. [26] 陈科宇, 杨哲, 李代红, 等. 国内外乙酸市场及发展前景分析 [J]. 石油化工技术与经济, 2023, 39(6): 10-13.
- [25] 陈奕炫. 醋酸异丙酯自水解动力学及其对醋酸脱水过程影响的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.

Simulation and Energy-Economic Analysis for Separation Process of Acetic Acid Waste Liquid with Low Water Content

HUANG Liangde¹, TONG Zhangfa^{1,2}, JIN Yong³, JIANG Yinghua^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Petrochemical Resource Processing and Process Intensification Technology, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Huayi Energy Chemical Co. Ltd, Qinzhou 535000, Guangxi, China)

Abstract: The acetic acid production process can produce a considerable amount of waste liquids. Thus, recycling acetic acid from those liquids is one of the key approaches for acetic acid industry to help achieve energy conservation, emission reduction, and sustainable development. For the separation and recovery of acetic acid waste liquids with low water content, four different separation simulation processes, namely, conventional distillation, extractive distillation, azeotropic distillation, and heat pump distillation are established, and the energy consumption and economy of these four separation processes are analyzed and compared with each other comprehensively. Taking a practical acetic acid production industry as an example, the strengths and weaknesses of the four methods proposed in this paper are investigated. The results indicate that all these four separation processes are capable of recovering acetic acid products that meet the requirements of GB/T 1628—2020. In terms of energy consumption and utility cost, the energy consumption of the heat pump distillation is the lowest among these four separation processes, while that of the extractive distillation is the highest. Nevertheless, the equipment investment cost of the heat pump distillation is relatively higher, and the extractive distillation separation process exhibits better economic feasibility. Through a comprehensive comparison of the separation effects under different scales, it is found that as the feeding flowrate of waste liquid increases, the utility cost proportion and economic benefit of the separation process show rising trends. Meanwhile, the heat pump distillation and azeotropic distillation are more suitable for long-term and large-scale production situations, and the extractive distillation is better suited for short-term and small-scale production ones.

Key words: acetic acid waste liquid; separation and recovery; distillation technology; energy consumption analysis; economic evaluation

(责任编辑: 张欣)