

高昆, 杨海军, 秦伟, 等. 真空热泵技术处理丙烯酸酯生产废水中试试验[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 115-122.

GAO K, YANG H J, QIN W, et al. Pilot-scale test of vacuum heat pump technology for acrylate production wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 115-122.

真空热泵技术处理丙烯酸酯生产废水中试试验

高 昆*, 杨海军, 秦 伟, 童育涛, 王 洋, 杨影影, 石 晨

(威立雅<中国>环境服务有限公司北京分公司, 北京 100071)

摘 要 【目的】为探索某外资化工企业丙烯酸酯生产废水的达标和经济化处理, 文章开展了中试试验。【方法】在现有污水处理工艺的基础之上以超滤系统出水为进水, 采用真空热泵蒸发器(24 h 产生 150 L 蒸馏液)开展中试试验, 对系统稳定运行过程中蒸发器产水的 COD、氨氮、TN、TP、总溶解性固体(TDS)和 SO_4^{2-} 等指标进行了考察分析。【结果】中试装置最终出水的 COD、TDS、 SO_4^{2-} 和 TP 均可稳定达标, 中试装置对 COD、TDS、 SO_4^{2-} 和 TP 的平均去除率分别可以达到 99.4%、99.3%、99.9% 和 99.8%。【结论】真空热泵技术可用于对高有机物含量、高色度和高含盐量特征的丙烯酸酯生产废水的处理, 且处理效果稳定可靠, 污水减量化效果明显。所产蒸馏水可用于生产车间的清洗用水或工艺稀释用水。中试结果同时表明, 针对丙烯酸酯生产废水, 若要完全满足达标要求, 仅靠一级蒸发处理较难实现, 需进一步结合其他深度处理技术。

关键词 丙烯酸酯 生产废水 真空热泵 低温蒸发 中试试验 污水减量

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)07-0115-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.014

Pilot-Scale Test of Vacuum Heat Pump Technology for Acrylate Production Wastewater Treatment

GAO Kun*, YANG Haijun, QIN Wei, TONG Yutao, WANG Yang, YANG Yingying, SHI Chen

(Beijing Branch, Veolia <China> Environment Services Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract [Objective] To achieve compliant and economic treatment of acrylate production wastewater in a foreign-funded chemical production company, the pilot-scale experiment is carried out. [Methods] Based on the existing WWTP treatment process, the effluent of the ultrafiltration system was used as the influent and the vacuum heat pump evaporator was set up in pilot-scale to treat the raw water. To evaluate the performance of pilot equipment and process, some indices such as COD, ammonia nitrogen, TN, TP, total dissolved solids(TDS) and SO_4^{2-} were analyzed. [Results] The effluent of the pilot plant can meet the emission standard for the COD, TDS, SO_4^{2-} and TP. The average removal rate of COD, TDS, SO_4^{2-} and TP were 99.4%, 99.3%, 99.9% and 99.8%, respectively. [Conclusion] Vacuum pump technology can be used to treat acrylate production wastewater with high concentration of organic matter, chrominance and saltiness, and the treatment performances are stable and reliable. Meanwhile, the reduction of discharge wastewater is significant. The distilled water produced in the vacuum heat pump evaporator can be used as cleaning water in the production workshop or dilution water. The pilot test results also show that for acrylate production wastewater, it is difficult to fully meet the standard requirements by relying solely on primary evaporation treatment. Further integration with other advanced treatment technologies is needed.

Keywords acrylate production wastewater vacuum heat pump low-temperature evaporation pilot test wastewater reduction

[收稿日期] 2024-01-15

[通信作者] 高昆(1987—), 男, 主要从事水污染控制和工业废水处理工程设计等工作, E-mail: gaokun91@126.com。

丙烯酸酯是一类重要的有机化工原料,由于其具有独特的化学和物理性质,使得丙烯酸酯在许多应用中成为理想的材料,其被广泛应用于涂料、造纸、皮革、纺织、黏合剂和橡胶等众多领域。截至2022年底,我国丙烯酸总产量已达350万t,丙烯酸丁酯总产量达到290万t。丙烯酸酯的主要生产工艺是单体法,单体法生产工艺主要分为醇酸化反应、灌包反应、分离纯化和返流蒸馏等步骤,其中醇酸化反应将丙烯酸和醇通过催化剂的作用进行酯化反应,而灌包反应是将醇酯和聚丙烯酰氯等进行缩合反应,生成灌包丙烯酸酯,然后需再经萃取、蒸馏、纯化等一系列的工艺才能最终得到高纯度丙烯酸酯。在各个工艺的生产过程中不可避免地会产生大量废水,一般而言每生产1t丙烯酸及其酯产品,约产生废水1.2t。丙烯酸酯生产废水中主要含有乙酸、丙烯酸、甲醛和丙烯醛等有机物,其化学需氧量(COD)高达几万至几十万mg/L,属于高浓度有机废水,具有高有机物含量、高色度、高含盐量和有毒有害等特点,且废水呈强酸性,具有一定的腐蚀性,极大地影响了后续废水的处理^[1]。除COD之外,该类型废水主要污染物指标还包括氨氮、氯离子(Cl^-)和硫酸根(SO_4^{2-})等。目前,此类废水常见的处理方法有焚烧法^[2]、湿式催化氧化法^[3]、生物法^[4]和芬顿氧化法^[5]等,但这些方法或多或少都存在一些短板。

文章以某外资丙烯酸酯生产厂商的生产废水为试验对象,采用某公司的专利技术蒸发器对丙烯酸酯生产废水进行中试试验研究。该系列蒸发器是威立雅针对实现液体零排放而开发的模块化蒸发与结晶装置,共有3款类型的产品可供选择,即:热泵型、热/冷水型和机械蒸汽再压缩型。本次中试采用了真空热泵型蒸发器。

与传统蒸发器相比,真空热泵蒸发器具有以下优点:热泵蒸发器和热泵氟利昂压缩系统是2个独立的循环,采用间接热泵,一个循环是污水,一个是氟利昂,两者互不干扰,因此,热泵压缩机工作稳定,系统可靠;该装置采用热泵的热源进行加热、蒸发,并通过热泵的副产冷量进行凝结,是一种能源消耗稳定、维修费用低廉的蒸发装置;真空热泵蒸发器的出水温度多为常温(20~25℃),系统工作噪声低,无高温区,对环境友好,节能;真空热泵蒸发器可以

选择多种材料制作,针对性更强,维护成本低^[6]。该技术已成功应用于钢铁、煤化工、电镀和食品等行业废水的处理。

本中试试验首次将真空热泵蒸发器应用于丙烯酸酯生产废水的处理,考察了真空热泵蒸发器的运行效果并明确工艺基础设计参数,同时验证真空热泵蒸发器用于处理丙烯酸酯生产废水的工程可行性以期减少该生产厂商外送至第三方公司的废水量进而降低废水处理总运行成本。

1 试验材料及方法

1.1 试验用水水质和处理要求

试验废水来源于该外资厂商的丙烯酸酯生产废水处理车间,丙烯酸酯生产废水包括高浓度废水(丙烯酸酯单体生产过程中酯化反应产生水和水洗废水)和低浓度废水(车间洗涤塔吸附废水、设备清洗废水、反应釜混合罐清洗废水和车间地面清洗水),分别统一收集后全部排入厂区自建的污水处理系统,处理到一定的浓度后再用槽车运至具有工业污水处理资质的第三方公司进行深度处理。该生产废水中含有高浓度的有机酸、甲醛和其他难生物降解类有机物,对微生物具有较强的抑制性和毒副作用。现阶段该厂商的丙烯酸酯生产废水采用流态化复合处理工艺进行处理,该工艺的主要工作原理是嗜热好氧菌生物技术,可对高浓度的有机废水进行预处理,既可大大降低进水的COD的浓度,又不产生污泥。该工艺由进水系统、生物反应罐、超滤系统和化学处理罐等组成,工艺处理流程如图1所示。首先将高、低浓度废水分别抽至混合罐内进行充分混合,再用泵将混合后废水抽至高温好氧罐(生物反应罐)内进行消化,生化反应后的废水再被输送至超滤系统内进行过滤处理,分离出的浓缩液经化学处理罐处理后再重新流入高温好氧池内进行进一步消化,超滤系统渗透液则进入已处理废水储罐中储存待外运处理。中试原水取自该超滤系统的出水(渗透液)。由于生产原料和生产工艺的特点,该废水具有高COD、高色度和高含盐量等特点。根据该厂商要求,所得蒸馏水作为回用水其水质需满足COD质量浓度<500mg/L和总溶解性固体(TDS)质量浓度<2000mg/L或满足排往工厂所在工业园区污水处理厂的纳管标准[《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)的表1B级]中的部

分水质指标要求。中试原水水质及处理要求如表 1 所示。

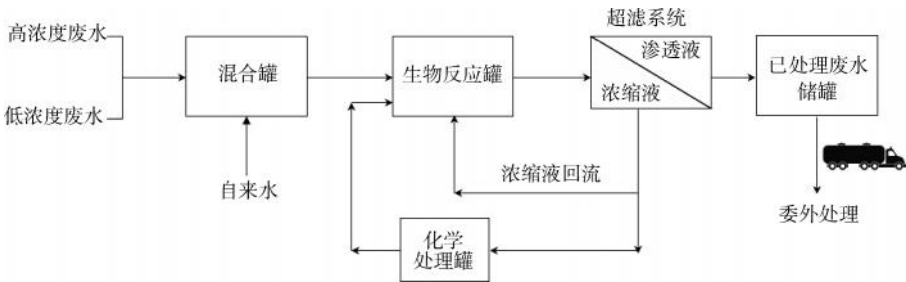


图 1 现阶段工厂丙烯酸酯生产废水处理工艺

Fig. 1 Existing Process of Acrylate Production Wastewater Treatment

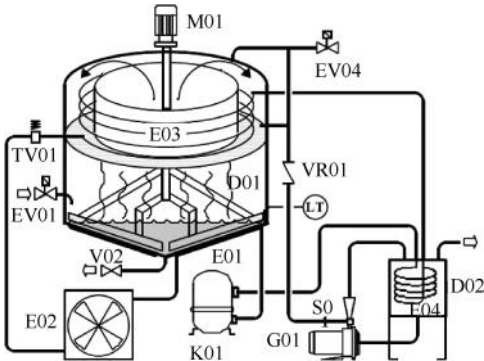
表 1 中试设计进水水质和处理要求

Tab. 1 Design Influent Quality and Effluent Discharge Requirements

指标	设计值	处理要求
pH 值	7.5~8.5	6.5~9.5
TDS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	50 000~70 000	<2 000
COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	10 000~20 000	<500
总磷(TP)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	100~200	<8
总氮(TN)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	300~1 000	<70
氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	100~1 000	<45
Cl^{-} /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1 500~2 000	<800
SO_4^{2-} /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	10 000~40 000	<600

1.2 试验装置及运行条件

中试蒸发装置具有 1 个基于热泵的加热系统，可在 3~7 kPa 和 25~40 ℃ 的真空环境下运行。热交换发生在锥形夹套内，沸腾室内通过可连续搅拌浓缩物的内部刮板进行清洁。该配置设计可用于生产高浓度的浓缩液和低电导率的蒸馏液。中试用蒸发器的生产能力为每 24 h 产生 150 L 蒸馏液，蒸发过程采用可编程逻辑控制器(PLC)进行自动控制。该蒸发器装置的设计，通过在处理过程中产生真空环境使得浓缩的废水以更低的沸点蒸发。蒸发器可连续对废水进行处理，而蒸馏液和浓缩液被连续分离并通过重力排出蒸发器，同时通过进液侧的预热换热器回收浓缩液和蒸馏液的热量，从而使进液温度得到提升，仅需要操作人员进行最少程度的监控。该装置配套有进水罐、蒸馏液罐和浓缩液罐。该蒸发装置为强制循环机组，主要由蒸发室、刮板、压缩机、循环泵和真空泵等设备组成，蒸发器中配置有液位计和压力表，可实时监控设备的运行状态。该系统蒸发装置主要配置如图 2 所示。中试蒸发器主要设备参数如表 2 所示。主要工艺流程为原水首先经



注: D01—蒸发室; E02—空气热交换器; E03—冷凝器; E04—冷凝液储罐; E01—加热夹套; EV01—进料阀; V02—排放阀; G01—真空泵; K01—压缩机; S0—喷射器; M01—电动机; EV04—呼吸阀; TV01—叠片阀; VR01—回止阀; D02—冷凝水箱。

图 2 中试用蒸发器的主要配置

Fig. 2 Main Components of Pilot-Scale Evaporator

表 2 中试蒸发器主要设备参数

Tab. 2 Main Equipment Parameters of Pilot-Scale Evaporator

项目	内容
设备型号	R150
输入功率	(2.30±0.23) kW
蒸发形式	真空蒸发(附带刮板)
蒸发压力	3~7 kPa(绝对压力)
蒸馏液温度	25~40 ℃
液滴分离方式	除雾器
加热/冷却方式	热泵
制冷剂	R134a
电源	230 V
真空系统	液体喷射
结构形式	整机
外形尺寸	850 mm×730 mm×1460 mm
质量	260 kg

由真空泵和喷射器产生的真空环境通过气动阀被抽入蒸发室内进行低温蒸发,蒸发所产生的蒸气通过冷凝器进行冷凝,所得冷凝液进入冷凝液储罐进行储存,浓缩液则被连续分离并可通过排放阀重力排出。压缩机在 2.0 ~ 2.1 MPa 的压力下对气体 1,1,1,2-四氟乙烷(R134a)进行压缩,并将其输送至加热夹套内凝结放热,从而将热量释放到蒸发室内的废水中。

1.3 工艺流程及说明

中试原水首先进入进水罐,在加入少量消泡剂之后被抽入进蒸发器进行蒸发,废水在蒸发器内通过真空和热泵的联合作用在低温下获得蒸馏液和浓缩液。所得蒸馏液和浓缩液分别自动排入蒸馏液罐和浓缩液罐进行储存后取样检测,中试所得浓缩液最终储存入污水站现有事故水池中,待委外处理。中试工艺流程如图 3 所示。

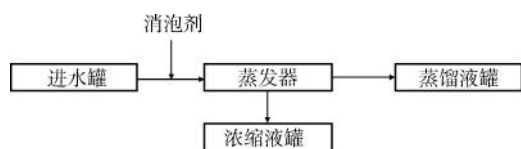


图 3 中试工艺流程

Fig. 3 Process Flow of Test Pilot-Scale

1.4 分析仪器及方法

水质检测项目主要有: COD、pH、TN、氨氮、TDS、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 TP。COD 测定采用重铬酸钾比色法;pH 测定采用 MeterLab PHM220 实验室台式 pH 计;TN 测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;氨氮测定采用纳氏试剂光度法;TDS 测定采用称量法进行检测; SO_4^{2-} 和 Cl^- 测定采用比色法;TP 测定采用钼酸铵分光光度法。

1.5 计算公式及说明

本次中试的主要目的是探究真空热泵技术对丙烯酸酯生产废水中各污染水质指标的去除能力。各项污染物指标的去除能力以去除率为衡量指标。以 COD 为例,COD 去除率计算如式(1)。其余指标的去除率也按照类似的公式进行计算。

$$R = \left(1 - \frac{C_{\text{蒸馏液}}}{C_{\text{原水}}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

其中: $C_{\text{蒸馏液}}$ ——蒸馏液的 COD 质量浓度, mg/L;

$C_{\text{原水}}$ ——原水的 COD 质量浓度, mg/L;

R ——COD 去除率。

2 结果与讨论

2.1 COD 处理效果

图 4 为中试期间蒸发所得蒸馏液的 COD 检测值。由图 4 可知,虽然原水经过高温活性污泥法(AFC)工艺进行了一定程度的处理,但中试装置进水 COD 仍然很高,且有一定程度的波动,同时随着中试的进行呈逐渐上升的趋势。中试装置进水 COD 平均质量浓度为 16 321 mg/L,蒸馏液 COD 平均质量浓度为 92.6 mg/L,平均 COD 去除率为 99.4%,浓缩液 COD 平均质量浓度为 61 625 mg/L。装置出水(蒸馏液)已达到表 1 的处理要求(<500 mg/L)。

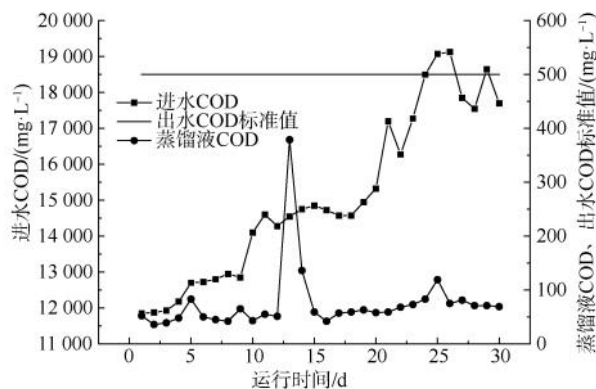


图 4 中试装置 COD 处理效果

Fig. 4 COD Removal Performance of Pilot-Scale Plant

2.2 氨氮和 TN 处理效果

丙烯酸酯生产废水中氨氮质量浓度为 100 ~ 1 000 mg/L,属于中高氨氮浓度废水。中试装置处理氨氮的效果如图 5 所示。由图 5 可知,中试装置进水氨氮平均质量浓度为 469 mg/L,蒸馏液氨氮平均质量浓度为 289 mg/L,装置出水(蒸馏液)氨氮值未能满足表 1(<45 mg/L)中的要求。同时可知在中试中后期,随着进水氨氮浓度降低,氨氮的去除率迅速下降,甚至降为负值,即出水氨氮浓度大于进水氨氮浓度。造成该现象的主要原因是蒸发过程中,在原水水质呈碱性(pH 值为 7.55 ~ 8.33)的状态下,如图 6 所示,废水中的部分氨氮变为游离氨的形态,然后经过充分的气液传质,水中的游离氨会穿过气液界面转移到气相,待水蒸气冷凝后,由于氨极易溶于水,又重新溶解到冷凝液中,造成冷凝液中氨氮质量浓度较大^[7]。同时,由于蒸发过程为减压蒸

馏,采用减压方式可降低氨氮分离时气相中氨的分压^[8],有助于增强氨氮传质推动力,提高氨氮分离的反应动力学常数。而自由氨含量的下降,会造成溶液 pH 的降低。由图 7 可知,该中试装置进水 TN 平均质量浓度为 656 mg/L,蒸馏液 TN 平均质量浓度为 287 mg/L,出水(蒸馏液)TN 也未能满足表 1 (<70 mg/L)中的要求。氨氮和 TN 的去除效果表明在采用低温蒸发工艺之后仍需结合其他深度处理工艺(如二级生化),来进一步保障出水 TN 和氨氮达标以实现出水的合规排放或回用。

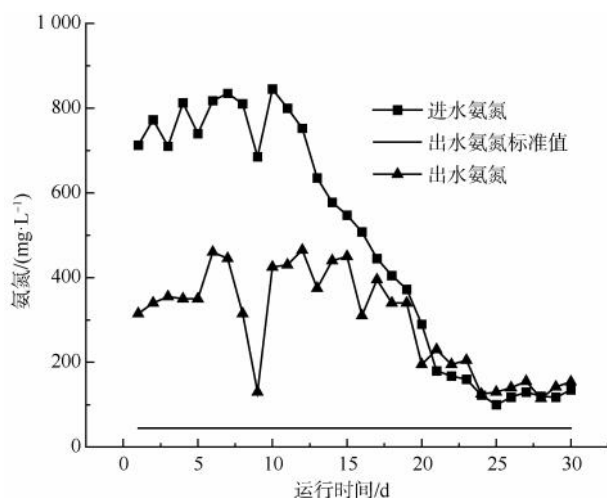


图 5 中试装置氨氮去除效果

Fig. 5 Ammonia Nitrogen Removal Performance of Pilot-Scale Plant

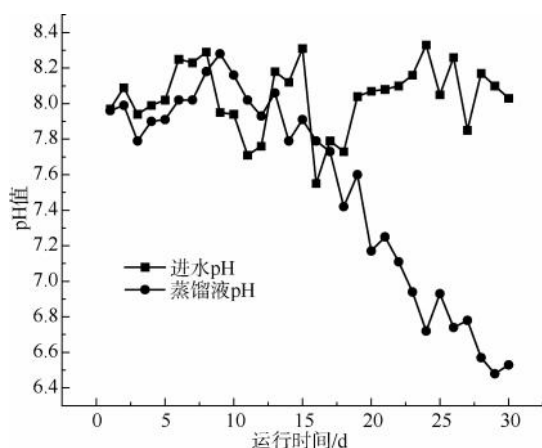


图 6 中试进水及蒸馏液的 pH 变化趋势

Fig. 6 Trend of pH Values for Influent and Distillate

2.3 TDS 处理效果

由图 8 可知,该中试装置进水 TDS 平均质量浓度为 61 672 mg/L,符合丙烯酸酯生产废水高含盐量

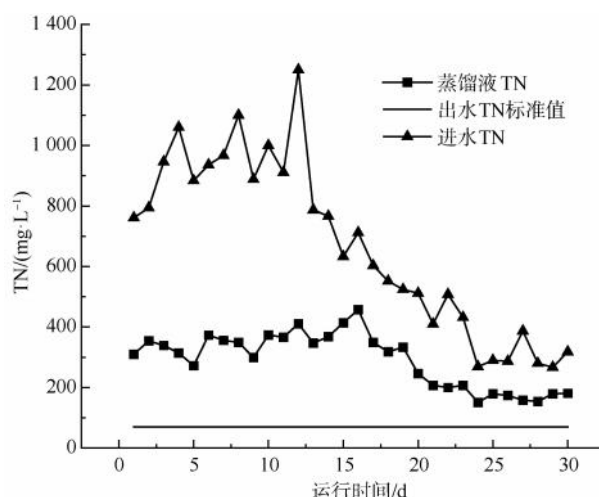


图 7 中试装置 TN 去除效果

Fig. 7 TN Removal Performance of Pilot-Scale Plant

的特点。蒸馏液 TDS 平均质量浓度为 423 mg/L, TDS 平均去除率为 99.3%,出水 TDS 可以满足表 1 中的要求(<2 000 mg/L)。据中试检测数据统计,浓缩液 TDS 平均质量浓度为 247 490 mg/L,蒸发浓缩液 TDS 约是进水 TDS 的 4 倍,蒸发浓缩效果明显。

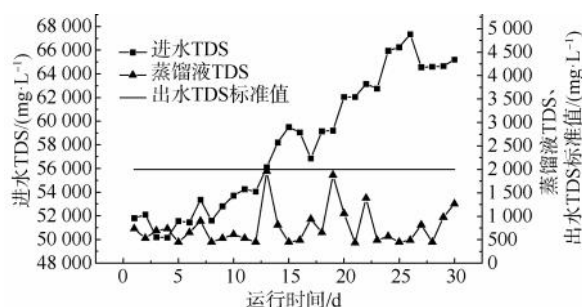


图 8 中试装置 TDS 去除效果

Fig. 8 TDS Removal Performance of Pilot-Scale Plant

2.4 SO_4^{2-} 和 Cl^- 处理效果

由图 9 可知,该中试装置进水 SO_4^{2-} 平均质量浓度为 25 625 mg/L,蒸馏液平均 SO_4^{2-} 质量浓度为 32 mg/L, SO_4^{2-} 平均去除率为 99.9%,出水 SO_4^{2-} 浓度可满足表 1 (<600 mg/L)中的要求。冷凝液中 SO_4^{2-} 主要来自于溶解入冷凝液中的 SO_2 。这与该厂商生产丙烯酸酯的原料和生产工艺以及蒸发过程中出现的液沫夹带^[9-10]有关,蒸发器中的除雾器也不能完全有效分离液沫,导致部分液沫随着蒸汽进入蒸馏液箱,进而影响蒸馏液的品质。中试期间,进水 Cl^- 质量浓度为 372~557 mg/L,平均值为 462 mg/L,小于

处理要求标准值(<800 mg/L)。

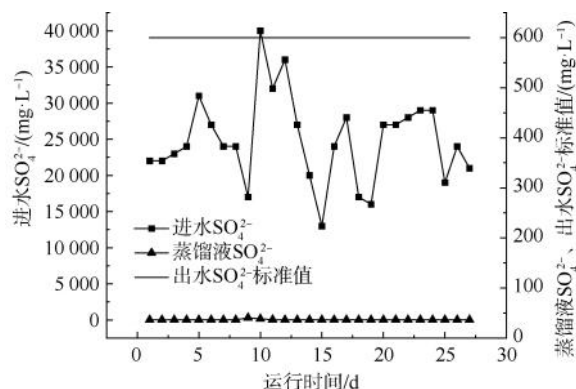


图9 中试装置去除 SO_4^{2-} 效果

Fig. 9 SO_4^{2-} Removal Performance of Pilot-Scale Plant

2.5 TP 处理效果

由图 10 可知,该中试装置进水 TP 平均质量浓度为 227 mg/L,蒸馏液 TP 平均质量浓度为 0.37 mg/L,TP 平均去除率为 99.8%,出水 TP 可满足表 1 (<8 mg/L)中的要求。图 11 为中试装置对丙烯酸酯生产废水蒸发处理效果对比情况。

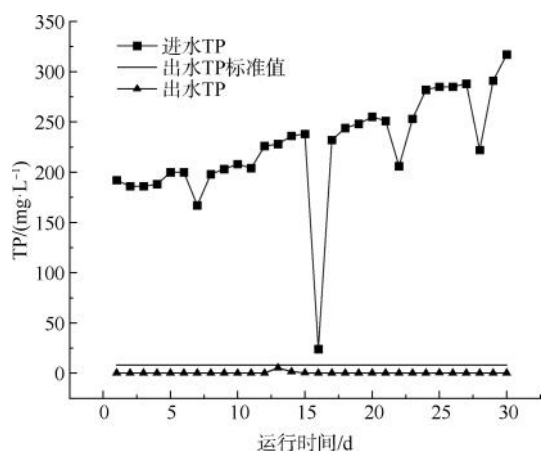


图10 中试装置去除 TP 效果

Fig. 10 TP Removal Performance of Pilot-Scale Plant

2.6 成本分析

该中试试验设备的主要能耗部分为真空泵和压缩机,仅使用极少量的消泡剂和自来水,二者消耗不计入成本分析内,因此,本中试试验中废水处理成本仅包括电费。当废水浓缩倍数为 4 倍的情况下,若电价按 0.6 元/(kW·h) 计算,每产出 1 t 蒸馏水的运行成本可控制在 195 元(蒸发出 1 L 蒸馏液需耗电量为 0.325 kW·h),折算吨废水处理成本为 146 元。与现阶段厂商委外处理废水的费用(500



图11 丙烯酸酯生产废水蒸发处理水样对比

Fig. 11 Comparison of Water Samples from Evaporation Treatment of Acrylate Production Wastewater

元/t) 相比具有较大的优势。蒸发所得冷凝水可以作为丙烯酸酯单体生产车间的清洗用水或厂内污水处理站的工艺稀释用水,实现废水再利用,进一步节约运行成本。因该中试试验装置规模较小,成本估算只能作为未来工程设计的参考。后续试验可从经济性方面进一步优化处理工艺与运行方案,如采用处理水量较大的同一系列其他型号真空热泵蒸发器^[11]。

3 结论

本中试试验旨在为丙烯酸酯生产废水提供一种运行连续稳定可靠的处理方法,并将具有专利技术的真空热泵蒸发器应用于该类型废水的处理。主要结论有以下几点。

(1)真空热泵技术可用于对高 COD、高色度和高含盐量的丙烯酸酯生产废水的处理,且可知该技术可对该类型废水进行 4 倍或以上浓缩,减量化效果明显,值得深入研究和推广应用。

(2)真空热泵技术对丙烯酸酯生产废水中 COD、TDS、 SO_4^{2-} 和 TP 均具有较高的去除率,所产蒸馏水可用于丙烯酸酯生产车间的清洗用水或工艺稀释用水。

(3)真空热泵蒸发器处理后出水氨氮和 TN 未能满足处理要求。综合考虑出水水质特征,可进一步考察论证深度处理工艺(如二级生化)对其的去除效果。

(4)中试设备的运行成本主要为电耗,本中试的吨废水处理成本与现阶段厂商委外处理成本相比具有较大优势。但本次中试试验装置规模较小,成本估算只能作为未来工程设计的参考。

(5)后续试验可从经济性方面进一步优化工艺设计参数、设备材质与运行方案。如采用处理水量较大的该系列其他型号蒸发器,从而进一步提高系统效率,减少设备投资和降低运行成本。

4 问题与建议

4.1 泡沫现象

在中试运行过程中会在蒸发室内出现泡沫现象,一般正常情况下泡沫位置会保持在蒸发器的1/3高度处,但偶尔泡沫高度会超出蒸发器的观察窗上沿。这种现象会对蒸发系统造成很多影响^[9],直接的影响则是部分泡沫会随着蒸汽一同进入蒸馏液箱,进而影响蒸馏液的水质。一般而言,具有发泡性质的有机物是产生泡沫的主要原因。故应尽可能降低进入蒸发器内废水中的有机物含量,并探索出消泡剂的最优投加量和投加方式。

4.2 臭气和结垢控制

原水的氨氮含量较高,试验过程中会有氨气的逸出,产生臭味,影响感官且具有一定程度的健康危害性,工业应用中建议对逸出的氨气进行收集并通过除臭设备去除。同时,对于高含盐量废水在浓缩过程中通常会发生盐类的富集,进而引起蒸发结晶装置产生较多的结垢物质。中试过程中,在蒸发室内也偶尔会出现结垢现象。中试运行中,由于偶尔蒸发器观察窗会被结垢物质和蒸气遮挡,运行人员未能及时发现蒸发器内的结垢和结晶现象,进而造成结垢物和结晶物阻碍了刮板的转动,使得蒸发室内壁和排出管内布满了结晶物质,最后使得浓缩液较难排出蒸发器,需在试验后采用少量的自来水对蒸发器内壁进行清洗后方可完全排出。在工业应用中应考虑增设清洗设备和配有刮刷的观察窗。

参考文献

[1] 隋云乐. 丙烯酸行业废水处理技术的研究与应用[J]. 广东化工, 2023, 50(11): 126-127, 135.
SUI Y L. Research and application of wastewater treatment technology for acrylic acid industry[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(11): 126-127, 135.
[2] CHEN R J, FEI Z Y, LIU Q, et al. Simultaneous disposal of acrylic acid (ester) wastewater and residue with high efficiency and low energy consumption [J]. Desalination and Water Treatment, 2019, 172: 368 - 376. DOI: 10.5004/dwt.

2019. 24505.
[3] 张博, 陈荣珍, 刘建春, 等. 湿式催化过氧化氢法处理丙烯酸废水实验研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(11): 104-107.
ZHANG B, CHEN R Z, LIU J C, et al. Study on catalytic wet hydrogen peroxide oxidation for the treatment of acrylic wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(11): 104 - 107.
[4] 姜晓锋, 高明瑜, 王诗涵, 等. 多相催化氧化-EGSB 组合工艺处理丙烯酸废水研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(2): 92-96.
JIANG X F, GAO M Y, WANG S H, et al. Acrylic acid wastewater treatment by combined process of heterogeneous catalytic oxidation-EGSB[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(2): 92-96.
[5] 杨兴兵, 邱仁. “絮凝—气浮—生化处理(UASB—A/O)—Fenton 氧化”组合工艺处理丙烯酸酯橡胶生产废水[J]. 化工环保, 2021, 41(3): 377-381.
YANG X B, QIU R. Treatment of acrylic rubber production wastewater by combined process of flocculation-air floatation-biochemical treatment (UASB-A/O)-Fenton oxidation [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2021, 41(3): 377-381.
[6] 刘文彬, 易继红, 戴劲, 等. 热泵闪蒸汽提脱氨技术在高氨氮废水处理中的应用[J]. 广州化工, 2020, 48(17): 119-121.
LIU W B, YI J H, DAI J, et al. Application of heat pump flash steam stripping ammonia removal technology in treatment of high ammonia nitrogen wastewater[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(17): 119-121.
[7] 徐腾, 张有贤, 施仲扬. pH 对蒸发技术处理高盐高氨氮废水的影响[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2016, 32(6): 83-88.
XU T, ZHANG Y X, SHI Z Y. The influence of different pH on evaporation technology to treat high salt high ammonia nitrogen wastewater[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2016, 32(6): 83-88.
[8] EL-BOURAWI M S, KHAYET M, MA R, et al. Application of vacuum membrane distillation for ammonia removal[J]. Journal of Membrane Science, 2007, 301(1/2): 200 - 209. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.06.021.
[9] 武海杰, 李献禹, 李成, 等. 蒸发结晶技术应用于高含盐废水处理存在的问题及其应对措施[J]. 净水技术, 2019, 38(6): 102-106.
WU H J, LI X Y, LI C, et al. Problems and countermeasures in application of evaporation and crystallization technology for treatment of high salinity wastewater[J]. Water Purification

- Technology, 2019, 38(6): 102–106.
- [10] 李浩铭. 低温常压蒸发技术处理高盐废水的效能与机理研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- LI H M. Mechanism and effects study of evaporation process for treating high salinity wastewater at low temperatures and ambient pressure [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [11] KRZYSZTOF S, MARCIN S, TOMASZ I, et al. Reduction of chloride emission by thickening of metallurgical wastewater [J]. E3S Web of Conferences, 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201910000074.
-
- (上接第 49 页)
- [16] LIU G, BAKKER G L, LI S, et al. Pyrosequencing reveals bacterial communities in unchlorinated drinking water distribution system; An integral study of bulk water, suspended solids, loose deposits, and pipe wall biofilm [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(10): 5467–5476.
- [17] YAO M C, ZHANG Y, DAI Z H, et al. Building water quality deterioration during water supply restoration after interruption; Influences of premise plumbing configuration [J]. Water Research, 2023, 241: 120149. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120149.
- [18] KECHIN A, BOYARSKIKH U, KEL A, et al. A new tool for accurate cutting of primers from reads of targeted next generation sequencing [J]. Journal of Computational Biology, 2017, 24(11): 1138–1143.
- [19] SASADA R, WEINSTEIN M, PREM A, et al. FIGARO: An efficient and objective tool for optimizing microbiome rRNA gene trimming parameters [J]. Journal of Biomolecular Techniques, 2020(s2). DOI: 10.1101/610394.
- [20] CALLAHAN B J, MCMURDIE P J, ROSEN M J, et al. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data [J]. Nature Methods, 13(7): 581–583.
- [21] Bolyen E, RIDEOUT J R, DILLON M R, et al. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2 [J]. Nature Biotechnology, 2019, 37(8): 852–857.
- [22] HUO L X, PAN L L, CHEN R Y, et al. Effects of disinfectants and particles on the occurrence of different microorganisms in drinking water distribution systems [J]. Environmental Science-Water Research & Technology, 2021, 7(5): 983–992.
- [23] HORTAL J, BORGE P A V, GASPAR C. Evaluating the performance of species richness estimators; Sensitivity to sample grain size [J]. Journal of Animal Ecology, 2006, 75(1): 274–287.
- [24] WILLIAMS M M, DOMINGO J W S, MECKES M C, et al. Phylogenetic diversity of drinking water bacteria in a distribution system simulator [J]. Journal of Applied Microbiology, 2004, 96(5): 954–964.
- [25] YU Z, XIE Y C, LI X Q, et al. Why the disinfection efficiency of ultraviolet radiation may become unsatisfactory at low suspended solid concentrations; The mechanism of extracellular polymeric substances secretion induced by different particles [J]. Water Research, 2025, 274: 123122. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123122.
- [26] ZHONG D, FENG W N, MA W C, et al. A variable parabolic reaction coefficient model for chlorine decay in bulk water [J]. Water Research, 2021, 201: 117302. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117302.
- [27] WANG H B, HU C, YIN L, et al. Characterization of chemical composition and bacterial community of corrosion scales in different drinking water distribution systems [J]. Environmental Science-Water Research & Technology, 2017, 3(1): 147–155.
- [28] FISH K, OSBORN A M, BOXALL J B. Biofilm structures (EPS and bacterial communities) in drinking water distribution systems are conditioned by hydraulics and influence discolouration [J]. Science of the Total Environment, 2017, 593: 571–580. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.176.
- [29] ANDERSON B, BRAGA A S, FILJON Y, et al. Behaviour of particle mobilization and reattachment under flushing conditions in PVC pipes using a full-scale laboratory system [J]. Environmental Science-Water Research & Technology, 2025, 11(3): 714–724.
- [30] JI N N, LIU Y, WANG S R. Buffering effect of suspended particulate matter on phosphorus cycling during transport from rivers to lakes [J]. Water Research, 2022, 216: 118350. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118350.
- [31] JING Z B, LU Z D, MAO T, et al. Microbial composition and diversity of drinking water; A full scale spatial-temporal investigation of a city in northern China [J]. Science of the Total Environment, 2021: 145986. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145986.
- [32] RYAN M P, ADLEY C C. *Ralstonia* spp. emerging global opportunistic pathogens [J]. European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases, 2014, 33(3): 291–304.
- [33] SUDARSHAN A S, DAI Z H, GABRIELLI M, et al. New drinking water genome catalog identifies a globally distributed bacterial genus adapted to disinfected drinking water systems [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(37): 16475–16487.