

从超纤碱减量废水中回收对苯二甲酸并制备 DOTP 低毒增塑剂

张文乐^{1*}, 孙献冲², 侯德隆¹, 潘思宇¹, 宋兵³, 陈意^{1#}

¹四川大学轻工科学与工程学院, 四川 成都

²山东成武易信环保科技有限公司, 山东 菏泽

³温德水性超纤与皮革创新研究院, 江苏 新沂

收稿日期: 2023年5月11日; 录用日期: 2023年7月4日; 发布日期: 2023年7月11日

摘要

定岛超细纤维在碱减量过程中会产生大量含对苯二甲酸盐的废水, 直接排放不仅会给环境带来严重负担, 同时会造成对苯二甲酸资源浪费。鉴于此, 本论文采用抽滤、混凝、吸附三步法去除定岛超细纤维碱减量废水中杂质, 再通过酸析将废水中对苯二甲酸盐沉淀析出, 最后探索以回收对苯二甲酸为原料制备对苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DOTP)低毒增塑剂的可行性。结果表明, 采用上述技术路线能有效去除定岛超细纤维碱减量废水中纤维碎屑、胶体微粒及重金属等杂质, 回收的对苯二甲酸纯度超过99%, 所制备 DOTP 满足聚氯乙烯增塑剂行业标准。本论文实验结果为定岛超细纤维碱减量废水处理及资源化利用提供了借鉴与参考。

关键词

定岛超细纤维, 碱减量废水, 对苯二甲酸, DOTP, 增塑剂

Preparation of Low-Toxic DOTP Plasticizer by Using Terephthalic Acid Recovered from Microfibers Alkali Weight-Reduction Wastewater

Wenle Zhang^{1*}, Xianchong Sun², Delong Hou¹, Siyu Pan¹, Bing Song³, Yi Chen^{1#}

¹College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan

²Shandong Chengwu Yixin Environmental Technology Co., Ltd., Heze Shandong

*第一作者。

#通信作者。

文章引用: 张文乐, 孙献冲, 侯德隆, 潘思宇, 宋兵, 陈意. 从超纤碱减量废水中回收对苯二甲酸并制备 DOTP 低毒增塑剂[J]. 化学工程与技术, 2023, 13(4): 225-233. DOI: 10.12677/hjct.2023.134026

Abstract

Huge quantities of waste water containing terephthalic acid were generated during the alkali weight-reduction process of microfiber production, which not only causes a serious burden on the environment, but also leads to a tremendous waste of terephthalic acid if directly discharged. Herein, a three-step process, including filtration, coagulation, and adsorption, is employed to remove impurities in microfibers alkali weight-reduction wastewater, followed by exploring the feasibility of synthesizing bis-(2-ethylhexyl) terephthalate (DOTP) plasticizer by using terephthalic acid recovered from the wastewater via acidification. The results demonstrate that impurities such as fiber debris, colloidal particles and heavy metals can be effectively removed from the microfibers alkali weight-reduction wastewater by using the above three-step process, and the recovered terephthalic acid has high purity, while the synthesized DOTP meets the industry standard for PVC plasticizers. The present effort may provide guidance for the treatment and resource utilization of microfibers alkali weight-reduction wastewater.

Keywords

Microfibers, Alkali Weight-Reduction Wastewater, Terephthalic Acid, DOTP, Plasticizer

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碱减量开纤是生产定岛超细纤维的必要工序。该工序的原理是：在高温下采用浓碱液将海岛型复合纤维中碱溶性共聚酯海组分溶解，获得由聚酯或聚酰胺构成的超细纤维束[1] [2] [3]。经碱减量开纤制成的超纤制品具有较高的柔软性、悬垂性及透气性[4] [5]。然而，碱减量工艺产生的废水组分复杂，含有大量对苯二甲酸盐、纤维碎屑、胶体微粒及重金属离子等杂质，总化学需氧量(COD)超过 15000 mg/L [6] [7]。这类废水直接排放不仅会造成严重的环境污染，更为重要的是，对苯二甲酸是一种紧缺的工业原料，将其按废弃物处理会造成资源浪费[8]。

对苯二甲酸是生产对苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DOTP)增塑剂的重要原料。近年来，DOTP 增塑剂凭借其低毒性、良好的耐热及耐迁出性，逐渐成为传统邻苯二甲酸酯增塑剂的理想替代品[9] [10] [11] [12] [13]。DOTP 通常由对苯二甲酸与 2-乙基己醇经酯化反应制备而成。然而，目前用于生产 DOTP 的对苯二甲酸是由对二甲苯制得，该化工原料对外依存度较大，价格居高不下[14]。因此，若能实现定岛超细纤维碱减量废水中对苯二甲酸的回收，并将其用于生产 DOTP 增塑剂，不仅能减轻这类废水对环境的污染，还能降低 DOTP 低毒增塑剂生产成本。

从理论上讲，废水中的对苯二甲酸盐可利用酸析法沉淀回收。然而，由于定岛超细纤维碱减量废水中通常还含有纤维碎屑、胶体微粒及重金属等杂质，直接酸析会使其中的杂质和对苯二甲酸共沉淀析出，导致回收的对苯二甲酸因杂质含量高而难以资源化利用[15] [16]。鉴于此，本论文采用抽滤、混凝、吸附

三步法对定岛超细纤维碱减量废水进行预处理以去除其中杂质，再通过酸析将废水中对苯二甲酸盐沉淀析出，最后探索以回收对苯二甲酸为原料制备 DOTP 增塑剂的可行性(工艺流程见图 1)。上述研究结果为如何减轻定岛超细纤维碱减量废水污染、降低 DOTP 增塑剂生产成本提供了借鉴与参考。

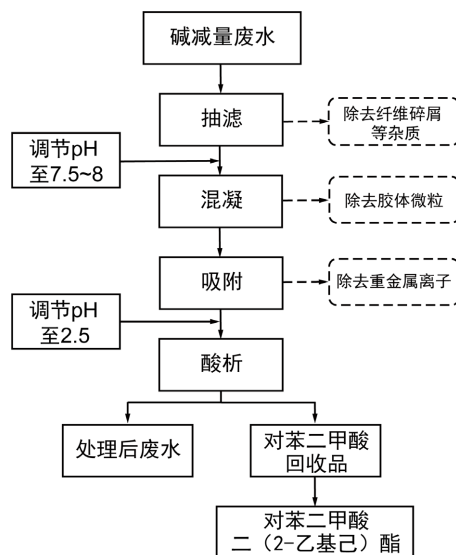


Figure 1. Flow chart for the preparation of low-toxic DOTP plasticizer by using terephthalic acid recovered from microfibers alkali weight-reduction wastewater

图 1. 从定岛超细纤维碱减量废水中回收对苯二甲酸并制备 DOTP 低毒增塑剂工艺流程图

2. 实验部分

2.1. 主要原料

碱减量废水由江苏温德水性超纤与皮革创新研究院提供，主要成分见表 1。

Table 1. Components in alkali weight-reduction wastewater

表 1. 碱减量废水中主要成分

序号	组分	特征
1	对苯二甲酸钠盐	含量高，约 7500 mg/L
2	纤维碎屑等杂质	粒径大，易沉淀
3	胶体微粒	粒径在 0.1 μm ~1 μm 之间
4	重金属离子	含有铬、铁等重金属

阴离子型聚丙烯酰胺，COD 消解液，钛酸四丁酯，2-乙基己醇，无水乙醇，活性炭(40~60 目)，硫酸肼，六次甲基四胺：分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；

聚合氯化铝，硫酸，甲醇：分析纯，成都科龙化工有限公司；

对苯二甲酸标准品：优级纯，上海泰坦科技股份有限公司。

2.2. 主要设备及仪器

COD 测定仪：DR 6000 型，美国 HACH 科技公司；

电感耦合等离子体发射光谱仪：Avio 220 Max 型，美国 PerkinElmer 科技公司；

傅里叶红外光谱仪：IS10 型，美国 Thermo Scientific 科技公司；

高效液相色谱仪：LC1100 型，美国 Agilent 科技公司；

气相色谱 - 质谱联用仪：7890A/5975C 型，美国 Agilent 科技公司；

热重分析仪：TG209F1 型，德国 Netzsch 科技公司。

2.3. 碱减量废水中对苯二甲酸回收

(1) 碱减量废水预处理。

抽滤：取 1000 mL 碱减量废水，采用慢速滤纸抽滤除去其中纤维碎屑等固体杂质；

混凝：用 10% (v/v) 稀硫酸溶液调节废水 pH 至 7.5~8，接着加入 140 mg 聚合氯化铝，搅拌 10 min，再加入 1.2 mg 阴离子型聚丙烯酰胺，静置 1 h 后滤去下层絮状沉淀；

吸附：在滤液中加入 1.6 g 活性炭，常温下快速搅拌 70 min 后滤除；最后将所得滤液在常温下贮存备用。

(2) 对苯二甲酸提取。首先取 500 mL 上述滤液并加热至 85℃，在搅拌状态下以 5 mL/min 的速率缓慢加入 10% (v/v) 稀硫酸溶液；随着滤液 pH 值降低，对苯二甲酸逐渐析出，直至 pH 值降为 2.5 后陈化 2 h；最后分离提取下层白色沉淀，用超纯水清洗三次，然后在 65℃ 下干燥 12 h 后得到对苯二甲酸回收品，并储存至阴凉干燥处备用。

此外，取 1000 mL 碱减量废水，按照上述步骤(2)，直接将废水中对苯二甲酸盐析沉淀析出，最后经水洗、干燥制得对苯二甲酸粗品。

2.4. 对苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DOTP)增塑剂合成

(1) 在装有油水分离器和冷凝管的三口烧瓶中，依次加入 50 g 对苯二甲酸回收品和 80 g 2-乙基己醇；随后升温，至 180℃ 时加入 0.2 g 催化剂钛酸四丁酯，搅拌并逐步升温至 240℃；反应期间，不断监测反应体系酸值，当酸值小于 0.5 mg KOH/g 时，结束反应；除去反应体系中的泥渣后得到 DOTP 粗品。

(2) 用 5% 的碳酸钾水溶液对 DOTP 粗品进行中和，除去未反应的对苯二甲酸和单酸酯，中和至酸值小于 0.05 mg KOH/g 后，再用去离子水洗涤至中性，静置取上层液体；然后在 180℃ 下减压蒸馏除去未反应的 2-乙基己醇；最后用 30% H₂O₂ 脱色得到 DOTP 成品。DOTP 的合成路线如图 2 所示。

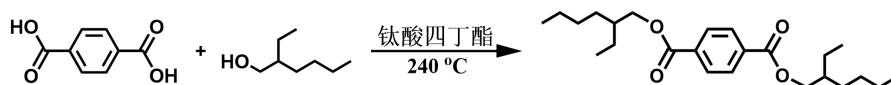


Figure 2. Synthesis procedure and molecular structure of DOTP
图 2. DOTP 合成路线

2.5. 结构表征与性能测试

废水 COD 测定：采用 COD 测定仪测定碱减量废水 COD 值；

废水浊度测定：根据 HJ 1075-2019 测定碱减量废水的浊度；

总重金属离子含量测定：根据 GB/T30921.2-2016 (电感耦合等离子体发射光谱法)，分别测定碱减量废水和对苯二甲酸回收品中总重金属离子(钼铬镍钴锰钛铁)含量；

红外光谱分析：采用傅里叶红外光谱仪表征 DOTP 的结构；

纯度测定：采用高效液相色谱仪分析对苯二甲酸回收品纯度；根据 GB/T 9722-2006，采用气相色谱 - 质谱联用仪分析 DOTP 纯度；

灰分测定：采用热重分析仪测定对苯二甲酸回收品的灰分含量；

水分测定：根据 SH/T 1612.4 测定对苯二甲酸回收品的水分含量；

电导率测定：根据 SL 78-1944 测定对苯二甲酸回收品的电导率；

酸值测定：根据 GB/T 30921.5-2016 和 GB/T 1668-2008 分别测定对苯二甲酸回收品和 DOTP 的酸值；

色度测定：根据 GB/T 3143-1982 和 GB/T 1664-1995 分别测定对苯二甲酸回收品和 DOTP 的色度；

闪点测定：根据 GB/T 1671-2008，采用克利夫兰开口杯法测定 DOTP 的闪点；

电阻率测定：根据 GB/T 1672-1988 测定 DOTP 的体积电阻率。

3. 结果与讨论

3.1. 预处理对碱减量废水中杂质的去除效果

如前所述，直接酸析会造成定岛超细纤维碱减量废水中的杂质和对苯二甲酸共沉淀析出，导致对苯二甲酸回收品因杂质含量高而难以资源化利用。因此，本论文首先采用抽滤、混凝、吸附三步法，在酸析前对碱减量废水进行预处理，重点考察预处理对定岛超细纤维碱减量废水中杂质的去除效果。

首先，选用慢速滤纸抽滤除去碱减量废水中的纤维碎屑等悬浮杂质。如图 3(a)所示，经过抽滤处理后，碱减量废水的浊度从 550 NTU 降低至 94 NTU。除纤维碎屑外，碱减量废水中还存在 $0.1\ \mu\text{m}$ - $1\ \mu\text{m}$ 的胶体微粒，难以通过抽滤方法脱除。为此，实验选用无机聚合氯化铝和有机阴离子型聚丙烯酰胺，对抽滤后的废水进行混凝处理。这两类混凝剂协同增效原理为：先投加的聚合氯化铝会快速水解成氢氧化铝离子，进而吸附废水中带负电的胶体微粒，通过中和这些胶体微粒的表面电荷使其团聚[17]；随后加入的阴离子型聚丙烯酰胺，可以增强电中性胶体微粒间团聚作用，使其形成体积更大的凝聚物而沉淀[18] [19]。由图 3(a)可见，滤除混凝沉淀物后，废水浊度由 94 NTU 降低至 60 NTU。上述实验结果表明，以聚合氯化铝和有机阴离子型聚丙烯酰胺为混凝剂，可以有效脱除超细纤维碱减量废水中的胶体微粒，进一步降低废水浊度。

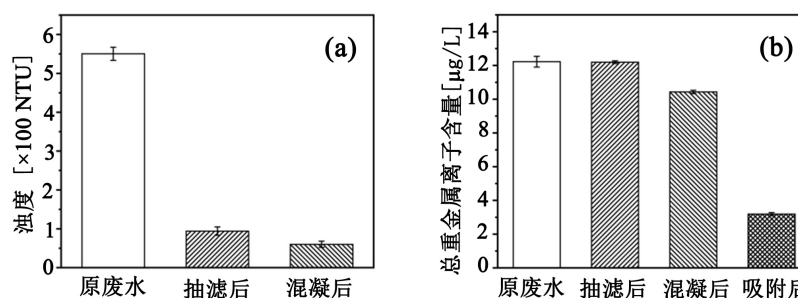


Figure 3. (a) turbidity and (b) total heavy metal content of alkali weight-reduction wastewater

图 3. 碱减量废水处理前后(a) 浊度和(b) 重金属离子含量变化

Table 2. Heavy metal content in alkali-reduced wastewater ($\mu\text{g/L}$).

表 2. 碱减量废水中重金属离子含量($\mu\text{g/L}$)

种类	原废水	抽滤后	混凝后	吸附后
铅	0	0	0	0
铬	8.38	8.35	7.29	2.31
镍	0.05	0.05	0.02	0.01
钴	0	0	0	0
锰	0.04	0.03	0.03	0.01
钛	0.28	0.28	0.23	0.01
铁	3.60	3.60	2.95	0.78
总重金属	12.35	12.31	10.52	3.12

碱减量废水中的重金属离子来自于定岛超细纤维生产过程中添加的各种助剂,以及碱减量工艺对金属设备的腐蚀[20]。通常,废水中的金属离子难以通过抽滤、混凝去除。为此,混凝结束后,实验考察能否以多孔活性炭吸附去除碱减量废水中的重金属离子[21]。由图 3(b)和表 2 可见,采用活性炭吸附后,碱减量废水中的总重金属离子含量由 12.35 $\mu\text{g/L}$ 降低至 3.12 $\mu\text{g/L}$ 。除钼离子和钴离子在处理前后均未检出外,其他金属含量均明显降低。尤其是原废水中含量最多的铬离子和铁离子,分别从 8.38 $\mu\text{g/L}$ 、3.60 $\mu\text{g/L}$ 降低至 2.31 $\mu\text{g/L}$ 、0.78 $\mu\text{g/L}$,降幅分别达到 72.4%、78.3%。这是因为,活性炭的表面官能团能与重金属离子结合,从而达到较高的去除效率。

3.2. 对苯二甲酸回收品的关键性能指标

对上述预处理后的碱减量废水进行酸析,可得到对苯二甲酸回收品。实验采用高效液相色谱仪对产物纯度测定,所得结果如图 4 所示。首先,本文配制了不同浓度的对苯二甲酸标准品溶液,并绘制了对应标准曲线(图 4(a))。随后,配制浓度为 0.1 mg/mL 的对苯二甲酸回收品溶液,并用高效液相色谱测得对应峰面积。由图 4(b)可见,对苯二甲酸回收品和对苯二甲酸标准品均仅有一处单峰,且二者保留时间和峰形基本一致。随后,将测得的对苯二甲酸回收品峰面积与标准曲线对比,结果发现对苯二甲酸回收品纯度为 99.3%。同时,对酸析处理后的废水进行高效液相色谱检测,发现残留对苯二甲酸含量小于 0.01 g/L,进一步证实对苯二甲酸已完全回收。由于对苯二甲酸占定岛超细纤维碱减量废水 COD 总负荷的 70% 以上,回收对苯二甲酸后该废水的 COD 值由 16680 mg/L 降至 1050 mg/L,减轻了废水二级处理难度。

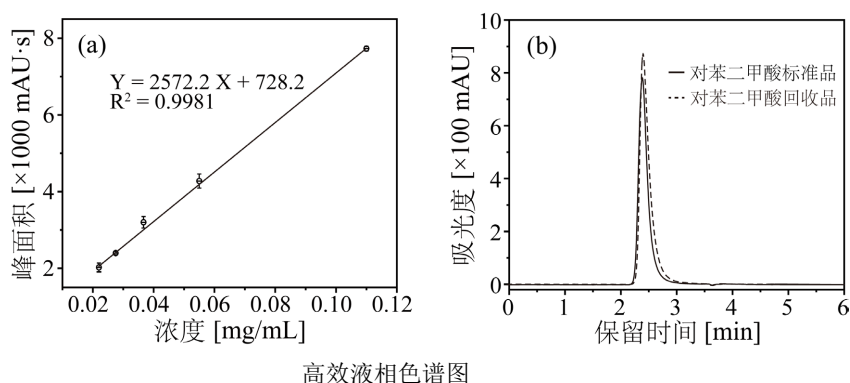


Figure 4. (a) Standard curve for peak area of terephthalic acid standards as a function of concentration, (b) HPLC of terephthalic acid standards and terephthalic acid recyclables

图 4. (a) 对苯二甲酸标准曲线, (b) 对苯二甲酸标准品和对苯二甲酸回收品

Table 3. Analysis of terephthalic acid index

表 3. 对苯二甲酸指标分析

项目	质量指标	对苯二甲酸回收品	对苯二甲酸粗品
外观	白色粉末	白色粉末	灰白色粉末
酸值(KOH)/(mg/g)	675 ± 2	676	637
灰分/(mg/kg)	≤ 15	2.7	19.2
水分/(%)	≤ 0.5	0.02	0.03
总重金属(钼铬镍钴锰钛铁)/(mg/kg)	≤ 10	4.2	25
5% DMF 色号(铂钴色号)	≤ 10	10	70
电导率/($\mu\text{s/cm}$)	≤ 100	26.5	53.5

为检验对苯二甲酸回收品是否满足使用标准,依据《回收利用的对苯二甲酸技术要求》(FZ/T

01108-2011)标准, 对其各项质量指标进行测试。由表 3 可知, 相比于直接酸析得到的对苯二甲酸粗品, 本论文回收的对苯二甲酸回收品各项质量指标均能达到回收要求, 可以作为合成 DOTP 的原料。

3.3. DOTP 增塑剂的化学结构、组成及关键性能指标

最后, 本论文以上述对苯二甲酸回收品为原料, 通过与 2-乙基己醇的酯化反应合成了 DOTP 增塑剂。首先, 利用傅里叶红外光谱分析了 DOTP 的结构。如图 5 所示, 2959 cm^{-1} 和 2861 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_3$ 和 $-\text{CH}_2$ 的伸缩振动吸收峰; 1269 cm^{-1} 、 1116 cm^{-1} 和 1724 cm^{-1} 处为酯类特征吸收峰, 分别来自于酯基中 C-O 和 C=O 的伸缩振动; 同时在 1505 cm^{-1} 和 1463 cm^{-1} 处检测到苯环骨架的振动吸收峰。此外, 图谱中未检测到羧基的振动信号。以上结果初步证明 DOTP 合成成功。

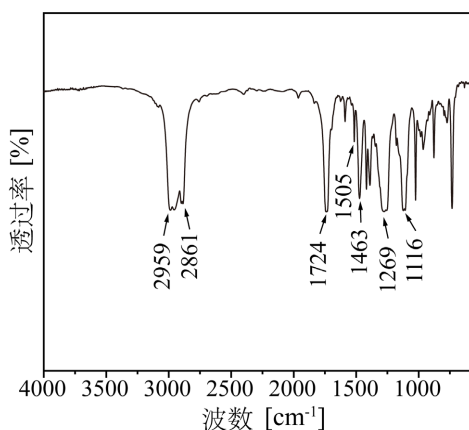


Figure 5. FT-IR spectra of DOTP synthesized from terephthalic acid recyclables

图 5. 以对苯二甲酸回收品为原料合成的 DOTP 红外光谱图

为了进一步确定产物组分, 实验采用气相色谱-质谱联用技术对 DOTP 组分进行分析, 所得气相色谱图如图 6 所示。在此基础上, 将所得质谱数据与 NIST08.LIB 质谱库检索匹配, 识别了图 6 中主要色谱峰对应的组分。分析结果显示, 保留时间为 22.6 min 的组分为 DOTP, 其峰面积占总色谱峰面积的 99.1%, 证明该样品中对苯二甲酸纯度较高。

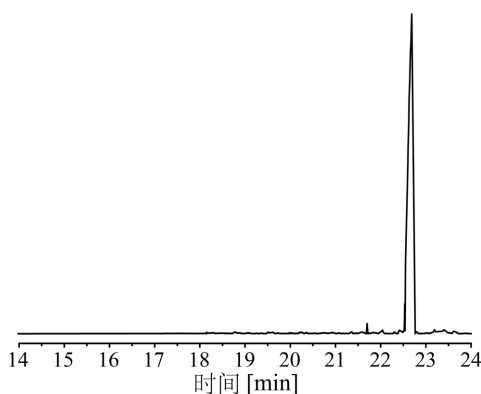


Figure 6. Gas chromatograms of DOTP synthesized from terephthalic acid recyclables

图 6. 以对苯二甲酸回收品为原料合成的 DOTP 气相色谱图

为检验以对苯二甲酸回收品所合成的 DOTP 增塑剂能否满足行业使用标准, 依据《工业对苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DOTP)》(HG/T 2423-2018)标准, 对其理化参数进行测试。由表 4 可知, 本论文制备的

DOTP 各项性能指标已达到一等品标准。

Table 4. Analysis of DOTP index
表 4. DOTP 指标分析

项目	指标		本样品
	优等品	一等品	
外观	透明、无可见杂质的油状液体		透明、无可见杂质的油状液体
色度/(Pt-Co)号	≤	20	40
纯度(GC 法)/(%)	≥	99.5	99.1
酸值(以 KOH 记)/(mg/g)	≤	0.02	0.03
水分/(%)	≤	0.03	0.05
闪点(开口杯法)/(°C)	≥	210	
体积电阻率/($\times 10^{10} \Omega \cdot m$)	≥	3	2

4. 结论

本论文采用抽滤、混凝、吸附三步法,对定岛超细纤维碱减量废水预处理,去除废水中杂质,再通过酸析将废水中对苯二甲酸盐沉淀析出,最后探索以回收对苯二甲酸为原料制备 DOTP 增塑剂的可行性。得到如下结论:

(1) 三步预处理可显著降低碱减量废水中纤维碎屑、胶体微粒和重金属离子等杂质含量,有效提升对苯二甲酸回收品纯度;

(2) 对预处理后碱减量废水进行酸析,不仅可获得纯度大于 99%、满足回收标准的对苯二甲酸,还可将废水 COD 值由 16880 mg/L 降低至 1050 mg/L,减轻了废水二级处理难度。

以上述对苯二甲酸回收品为原料,可制备出满足行业标准的 DOTP 增塑剂。

基金项目

四川省中央引导地方科技发展专项(2022ZYD0035);四川省重点研发项目(2023YFG0087)。

参考文献

- [1] 蒋志青,尹德河,陈建民,等.定岛型海岛纤维的生产及其在超纤革中的应用[J].现代纺织技术,2018,26(3):29-33.
- [2] 李梅英,张玉洲,赵烈,等.高透湿、易染色不定岛超纤皮贝斯的研究[J].西部皮革,2017,39(19):23-25.
- [3] 何佩芸,尹建伟,傅跃.海岛型超细纤维仿麂皮在汽车上的应用研究[J].上海汽车,2022(9):49-54.
- [4] 张明礼,王君,陈昌江.共聚型大有光直纺聚酯 FDY 织物碱减量工艺研究[J].轻纺工业与技术,2023,52(1):12-14.
- [5] 郭提,张书良,杜小玉.亚硫酸处理碱减量废水的研究及回收利用[J].绿色科技,2021,23(8):59-61+79.
- [6] Nam, C.W. and Lee, J.J. (2022) Weight Reduction of Sea-Island-Type PTT/PET Conjugate Fiber and Dyeing of Poly-trimethylene Terephthalate Flock Microfibers. *Fibers and Polymers*, **23**, 436-442.
<https://doi.org/10.1007/s12221-021-1096-5>
- [7] 孔彤彤,李鑫,李政,等.涤纶碱减量废水中对苯二甲酸的生物降解[J].印染,2020,46(3):15-20.
- [8] 李巧红.电化学法在超细纤维合成革基布染色废水预处理中的应用研究[J].皮革制作与环保科技,2020,1(6):28-30.
- [9] Pan, S., Hou, D., Chang, J., et al. (2019) A Potentially General Approach to Aliphatic Ester-Derived PVC Plasticizers with Suppressed Migration as Sustainable Alternatives to DEHP. *Green Chemistry*, **21**, 6430-6440.
<https://doi.org/10.1039/C9GC03077H>
- [10] 李雪银,黄孟丽,孙小杰,等.气相色谱-质谱法测定乳制品中对苯二甲酸二辛酯[J].现代食品,2022,28(2):

183-186+193.

- [11] 唐立成, 骆立刚, 吴梦凡, 等. 医用家具中邻苯二甲酸酯的测定及风险分析[J]. 化纤与纺织技术, 2022, 51(10): 51-53.
- [12] 杨彬, 高云方, 沈小宁. 新型绿色环保增塑剂的开发与应用[J]. 聚氯乙烯, 2021, 49(4): 1-7+35.
- [13] Tran, H.T., Lin, C., Bui, X.T., *et al.* (2021) Bacterial Community Progression during Food Waste Composting Containing High Dioctyl Terephthalate (DOTP) Concentration. *Chemosphere*, **265**, Article ID: 129064. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129064>
- [14] 李晓莲. 对苯二甲酸生产工艺技术及行业发展现状[J]. 化工管理, 2022(32): 59-62.
- [15] 陈成广, 骆阿明, 宋江平, 等. 印染行业碱减量废水治理现状与对策研究[J]. 化工管理, 2020(10): 102-104.
- [16] 徐超, 蓝师哲, 何岩, 等. 碱减量废水资源化回收与处理技术研究进展[J]. 工业用水与废水, 2018, 49(6): 1-4.
- [17] 黄英豪, 吴敏, 陈永, 等. 絮凝技术在疏浚淤泥脱水处治中的研究进展[J]. 水道港口, 2022, 43(6): 802-812.
- [18] 马松杰. 一种适用于废水站水处理的复合混凝剂[J]. 云南化工, 2023, 50(4): 55-57.
- [19] 王鑫, 闫淑梅, 马宵颖. 无机絮凝剂与 PAM 协同处理脱硫废水的实验研究[J]. 吉林电力, 2022, 50(6): 39-42.
- [20] 范立海, 张林, 潘韬, 等. 色纤碱减量废水中对苯二甲酸的回收精制研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(1): 107-110.
- [21] 张璐, 杨小丽, 董维华. 活性炭吸附法处理实验室重金属废液的研究进展[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(3): 135+140.