

APMP 综合废液膜分离处理的投资和生产成本初探

陈霖铮¹ 吕卫军² 高畅¹ 李厦¹ 张勇^{1,3,*}

(1. 浙江理工大学材料与纺织学院, 浙江杭州, 310018; 2. 中国制浆造纸研究院, 北京, 100061;

3. 华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室, 广东广州, 510640)

摘要: 构建了一种评估 APMP 综合废液膜分离处理投资成本和生产成本的数学模型, 用于计算膜分离处理 APMP 综合废液的投资成本和生产成本。模型以处理 APMP 综合废液的膜分离设备投资成本 (C_c)、生产成本 (P_c)、操作运行成本 (O_c) 和处理后废水浓缩液中有机物贡献价值 (O_v) 部分数据作为计算依据, 通过公式 $C_c = \text{Cost}_{\text{memb}} \cdot A_{\text{memb}} + \text{Cost}_{\text{equip}}$ 、 $P_c = O_c - O_v$ 、 $O_c = \text{Cost}_{\text{electricity}} + \text{Cost}_{\text{replacement of memb}} + \text{Cost}_{\text{maintenance}} + \text{Cost}_{\text{cleaning}} + \text{Cost}_{\text{labour}}$ 和 $O_v = A \cdot H_{\text{fuel}}$, 计算实际的投资成本和生产成本。数学模型能够客观全面地反映采用膜分离工艺处理 APMP 综合废液的投资成本和生产成本, 过程简单、易于实施, 可以作为处理 APMP 综合废液的膜分离设备和工艺的选型与优化的理论基础。

关键词: APMP 综合废液; 膜分离处理; 数学模型; 投资成本; 生产成本

将膜分离技术应用于造纸工业是目前膜科学与造纸科学领域的研究热点^[1]。自 20 世纪中叶膜分离技术首次介入造纸工业的废水处理过程以来, 经历几十年的发展, 已逐步应用于造纸工业中化学制浆废液(黑液、红液)、高得率制浆废水、中段废水和造纸白水的处理工段并取得了良好效果^[2-4]。碱性过氧化氢机械浆(APMP)是 20 世纪 90 年代发展起来的新型制浆技术, 具有纸浆得率高、白度高、强度好, 污染小, 能耗低等优点, 目前已在全球范围广泛应用^[5]。其产生的综合废液主要成分有木素碎片、单糖、低聚糖、抽出物、低分子有机酸、无机金属离子等, 其总排放量在 20~30 m³/t 浆^[6]。

膜分离技术在造纸工业中尚属新兴的废水处理技术, 不仅有助于造纸企业实现废水零排放的目标, 大幅减少生产过程中的清水用量, 还可以高值化利用废水中的一些残存物质, 目前已引起广大造纸企业技术人员的密切关注^[7]。同时, 这种新兴废水处理技术的生产成本, 直接涉及造纸企业的切身利益, 必将成为企业技术人员关注的焦点, 也将成为评判企业是否引进该项技术的关键指标。本研究构建了一种评估 APMP 综合废液膜分离处理投资成本和生产成本的数学模型, 用于计算膜分离处理 APMP 综合废液的投资成本和生产成本, 以作为处理 APMP 综合废液的膜分离设备和工艺的选型与优化的理论基础。

1 数学模型构建

评估 APMP 综合废液膜分离处理投资成本和生产成本的数学模型, 以处理 APMP 综合废液的膜分离设备投资成本 (C_c)、生产成本 (P_c)、操作运行成本 (O_c) 和处理后废水浓缩液中有机物贡献价值 (O_v) 4 部分数据作为计算依据, 具体投资成本和生产成本可以通过公式 (1) ~ (4) 确定:

$$C_c = \text{Cost}_{\text{memb}} \cdot A_{\text{memb}} + \text{Cost}_{\text{equip}} \quad (1)$$

$$P_c = O_c - O_v \quad (2)$$

$$O_c = \text{Cost}_{\text{electricity}} + \text{Cost}_{\text{replacement of memb}} + \text{Cost}_{\text{maintenance}} + \text{Cost}_{\text{cleaning}} + \text{Cost}_{\text{labour}} \quad (3)$$

$$O_v = A \cdot H_{\text{fuel}} \quad (4)$$

其中 C_c 、 P_c 、 O_c 、 O_v 分别为 APMP 综合废液膜分离处理工段的投资成本、生产成本、操作运行成本和有机物贡献价值, 单位均为万元; $\text{Cost}_{\text{memb}}$ 、 A_{memb} 和 $\text{Cost}_{\text{equip}}$ 分别为滤膜价格、滤膜面积和设备价格, 单位分别为万元、m² 和万元; $\text{Cost}_{\text{electricity}}$ 、 $\text{Cost}_{\text{replacement of memb}}$ 、 $\text{Cost}_{\text{maintenance}}$ 、 $\text{Cost}_{\text{cleaning}}$ 和 $\text{Cost}_{\text{labour}}$ 分别为设备电耗成本、滤膜更换成本、维护保养成本、滤膜清洗成本和劳动力成本, 单位均为万元; H_{fuel} 为膜分离处理过程中有机物的贡献热值, 单位为 MJ/kg; A 为具体情况的价格调整因数。

本课题得到华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室开放基金(201027)和浙江理工大学科研启动基金(1001821-Y)资助。

1.1 投资成本 C_c

(1) 根据具体造纸企业所需处理的废水量和采用膜分离工艺的实际处理能力, 确定建立废水膜分离处理装置所需的设备规模和滤膜面积 A_{memb} 。

(2) 依据市场价格和设备规模确定滤膜价格 $Cost_{memb}$ 和设备价格 $Cost_{equip}$ 。

(3) 通过公式 (1) 即可计算得出 APMP 综合废液膜分离处理工段的投资成本 C_c 。

1.2 操作运行成本 O_c

(1) 根据具体造纸企业所需处理的废水量和采用膜分离工艺的最佳体积减少因子, 计算得出吨浆产生透过液, 同时依据膜分离工艺的设备平均电耗和实际工业电价, 确定设备电耗成本 $Cost_{electricity}$ 。

(2) 根据选定滤膜的平均使用周期和市场平均价格, 同时依据上述所需滤膜面积 A_{memb} , 确定滤膜更换成本 $Cost_{replacement\ of\ memb}$ 。

(3) 根据实际生产经验数值一般采用膜分离技术处理制浆造纸废水时, 膜分离设备的年日常维护保养成本约占设备总投资的 0.2%, 以此确定维护保养成本 $Cost_{maintennace}$ 。

(4) 根据具体造纸企业所需处理的废水量和采用膜分离工艺的最佳体积减少因子, 计算得出吨浆产生透过液, 同时依据实际生产经验, 一般污染滤膜的清洗成本约为 0.16~0.24 元/ m^3 透过液, 以此确定滤膜清洗成本 $Cost_{cleaning}$ 。

(5) 根据具体造纸企业纸浆及废水产能, 计算得出保证膜分离设备的正常操作运行所需配备的操作工人数量, 同时依据当地工人工资水平, 确定劳动力成本 $Cost_{labour}$ 。

(6) 通过公式 (3) 即可计算得出操作运行成本 O_c 。

1.3 有机物贡献价值 O_v

根据具体造纸企业所需处理的废水量和采用膜分离工艺的最佳体积减少因子, 计算得出吨浆产生透过液, 通过公式 (5)、(6) 计算得出膜分离处理过程中有机物的贡献热值 H_{fuel} , 同时依据实际工业电价选定价格调整因数 A , 确定有机物贡献价值 O_v 。

$$H_{fuel} = H_{fuel(concentration)} - H_{fuel(feed)} \quad (5)$$

$$H_{fuel(concentration/feed)} = H_{organics(concentration/feed)} \cdot X_{organics(concentration/feed)} - 20.5(1-TS) \quad (6)$$

其中,

H_{fuel} 为膜分离处理过程中有机物的贡献热值, MJ/kg;

$H_{fuel(concentration)}$ 为浓缩液中有机物的净热值, MJ/kg;

$H_{fuel(feed)}$ 为原料液中有机物的净热值, MJ/kg;

$H_{organics(concentration/feed)}$ 为浓缩液/原料液中有机物的热值, MJ/kg;

$X_{organics(concentration/feed)}$ 为浓缩液/原料液中有机物的质量分数, %;

TS 为浓缩液的总固形物浓度, %。

1.4 生产成本 P_c

通过公式 (2) 即可计算得出 APMP 综合废液膜分离处理工段的生产成本 P_c 。

2 模型计算实例

以国内某大型纸厂 10 万 t/a P-RC APMP 制浆项目为例, 用于计算生产过程产生的 APMP 综合废液膜分离处理的投资成本和生产成本。首先根据制浆项目的实际情况, 合理提出以下计算前提:

(1) 采用的膜分离设备为间歇式板式组件膜分离设备。

(2) 以 APMP 的综合废液产生量为 8 m^3 /t 浆计, APMP 综合废液的日产生量为 2222 m^3 。

(3) 工业用电价格为 525 元/MWh。

(4) 工业用水价格为 3.5 元/ m^3 。

(5) 工业用 PES 10 滤膜的平均使用周期为 2 年。

(6) 工业用 PES 10 滤膜的平均市场价格为 250 元/ m^2 。

(7) 操作工人的工资成本为 25000 元/年。

依据上述计算前提, 采用本研究构建的用于评估 APMP 综合废液膜分离处理投资成本和生产成本的数学模型, 对该大型纸厂年产 10 万 t P-RC APMP 制浆项目生产过程产生的 APMP 综合废液膜分离处理的投资成本和生产成本进行计算。

2.1 投资成本 C_c

根据实际生产经验, 采用膜分离技术处理制浆造纸废水时, 膜分离设备的投资成本应在 3.4 万~3.6 万元/ m^2 有效膜过滤面积。依据前提 2, 该大型纸厂 APMP 车间的综合废液产生量为 2222 m^3/d , 膜分离处理的废水通量为 21.61 L/($m^2 \cdot h$), 即 0.52 $m^3/(m^2 \cdot d)$ 。则实际需要有效滤膜面积为 $2222 \div 0.52 = 4273 m^2$, 即 APMP 综合废液膜分离处理工段的投资成本 C_c 为 14528~15383 元。

2.2 操作运行成本 O_c

(1) 根据实际生产经验, 采用膜分离技术处理制浆造纸废水时, 膜分离工艺的设备电耗在 2.6~3.4 kWh/ m^3 透过液。依据前提 2, 该大型纸厂 APMP 车间的综合废液产生量为 8 m^3/t 浆, 膜分离过程采用的体积减少因子为 0.9。因此, 吨浆产生透过液 $8 \times 0.9 = 7.2 m^3$; 依据前提 3, 工业用电价格为 525 元/MWh, 膜分离处理的设备电耗成本为: $2.6 \times 7.2 \times 525 \div 1000 = 9.8$ 元/t 浆, $3.4 \times 7.2 \times 525 \div 1000 = 12.8$ 元/t 浆, 即设备电耗成本 $Cost_{electricity}$ 为 9.8~12.8 元/t 浆。

(2) 依据前提 5, 工业用 PES 10 滤膜的平均使用周期为 2 年; 依据前提 6, 工业用 PES 10 滤膜的平均市场价格为 250 元/ m^2 , 以 2 年为周期, 该大型纸厂 APMP 车间的制浆产量为 20 万 t, 所需更换的有效滤膜面积为 4273 m^2 , 则滤膜更换成本 $Cost_{replacement\ of\ memb}$ 为 $4273 \times 250 \div 200000 = 5.3$ 元/t 浆。

(3) 根据实际生产经验, 采用膜分离技术处理制浆造纸废水时, 膜分离设备的年日常维护保养成本约占设备总投资的 0.2%。以 1 年为周期, 该大型纸厂 APMP 车间的制浆产量为 10 万 t, 则膜分离设备在日常维护上的费用为 $14528 \times 0.002 \div 10 = 2.9$ 元/t 浆, $15383 \times 0.002 \div 10 = 3.1$ 元/t 浆, 即维护保养成本 $Cost_{maintennace}$ 为 2.9~3.1 元/t 浆。

(4) 根据实际生产经验, 采用膜分离技术处理制浆造纸废水时, 污染滤膜的清洗成本约为 0.16~0.24 元/ m^3 透过液。依据前提 2, 该大型纸厂 APMP 车间的综合废液产生量为 8 m^3/t 浆, 膜分离过程采用的体积减少因子为 0.9。因此, 吨浆产生透过液 $8 \times 0.9 = 7.2 m^3$ 。则膜分离处理过程的清洗污染滤膜所需成本为 $0.16 \times 7.2 = 1.2$ 元/t 浆, $0.24 \times 7.2 = 1.7$ 元/t 浆, 即滤膜清洗成本 $Cost_{cleaning}$ 为 1.2~1.7 元/t 浆。

(5) 针对该大型纸厂 APMP 车间纸浆及废水产能, 需配备 6 名操作工人以保证膜分离设备的正常操作运行。依据前提 7, 操作工人的工资成本为 25000 元/年, 同时考虑到 APMP 车间的纸浆产能为 10 万 t/a, 则膜分离处理过程的劳动力成本 $Cost_{labour}$ 为 $25000 \times 6 \div 100000 = 1.5$ 元/t 浆。

(6) 根据公式 (3), APMP 综合废液膜分离处理过程的操作运行成本为设备电耗成本、滤膜更换成本、维护保养成本、滤膜清洗成本和劳动力成本之和。将这 5 项成本支出累加, 即可得出该年产量 10 万 t APMP 的浆厂采用膜分离处理 APMP 综合废液的实际操作运行成本 O_c 为 20.7~24.4 元/t 浆。

2.3 有机物贡献价值 O_v

该大型纸厂 APMP 车间膜分离处理 APMP 综合废液采用的体积减少因子为 0.9, 即将固形物浓度为 25.47 g/L 的原料液分离浓缩至固形物浓度为 128.36 g/L。经测定原料液中有机的热值 $H_{organics\ (feed)}$ 为 12.68 MJ/kg, 浓缩液中有机的热值 $H_{organics\ (concentration)}$ 为 20.65 MJ/kg; 原料液中有机的质量分数 $X_{organics\ (feed)}$ 为 1.50%, 浓缩液中有机的质量分数 $X_{organics\ (concentration)}$ 为 8.80%; 浓缩液的总固形物浓度 TS 为 12.80%。因此, 可以通过公式 (5) 和 (6) 计算得出 APMP 综合废液膜分离处理过程中有机物的贡献价值。具体计算过程步骤如下:

(1) 依据公式 (6), 浓缩液中有机的净热值 $H_{fuel\ (concentration)}$ 为 $20.65 \times 0.088 \times 0.1 - 20.5 \times (1 - 0.128) = -17.6943$ MJ/kg, 即浓缩液中的有机物在蒸发掉其所有水分达到完全燃烧的状态时, 需从外界摄取热量 17.6943 MJ/kg。

(2) 依据公式 (6), 假定采用热泵系统将原料液的总固形物含量同样提升至 128.36 g/L, 原料液中有机的净热值 $H_{fuel\ (feed)}$ 为 $12.68 \times 0.015 - 20.5 \times (1 - 0.128) = -17.6858$ MJ/kg, 即原料液中的有机物在其总固形物含量用热泵提升至 128.36 g/L 后, 蒸发掉其所有水分达到完全燃烧的状态时, 需从外界摄取热量 17.6858 MJ/kg。

(3) 依据公式 (5), APMP 综合废液膜分离处理过程中有机物的贡献价值为 $17.6943 - 17.6858 = -0.0085$

MJ/kg, 即通过膜分离过程, 由于部分有机物透过滤膜流失, APMP 综合废液的有机物贡献价值会降低 0.0085 MJ/kg。针对产能 10 万 t/a 的大型纸厂 APMP 车间, 依据前提 2, APMP 车间的综合废液产生量为 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 浆, 同时依据前提 3, 工业用电价格为 525 元/MWh, 则 APMP 综合废液膜分离处理过程中有机物的贡献价值 H_{fuel} 为 $-0.0085 \times 1000 \times 8000 \div 3600 \times 525 = -48.7$ 元/t 浆。

2.4 生产成本 P_c

依据公式 (2) 可以计算得出 APMP 综合废液膜分离处理过程的生产成本, 即生产成本 P_c 为 $(20.7 \sim 24.4) - (-148.7) = 169.4 \sim 173.1$ 元/t 浆。

3 结论

本研究构建了一种评估 APMP 综合废液膜分离处理投资成本和生产成本的数学模型, 用于计算膜分离处理 APMP 综合废液的投资成本和生产成本。模型以处理 APMP 综合废液的膜分离设备投资成本 (C_c)、生产成本 (P_c)、操作运行成本 (O_c) 和处理后废水浓缩液中有机物贡献价值 (O_v) 4 部分数据作为计算依据, 正确反映了膜分离处理过程生产成本、设备选型和工艺优化之间的相互关联, 达到了根据生产成本最低化原则优选膜分离工艺, 同时计算在最佳工艺条件下膜分离处理的投资成本和生产成本的双重目的。构建的数学模型未作任何假设, 不存在任何理论偏差, 且过程简单、易于实施, 可以此作为理论基础, 指导处理 APMP 综合废液的膜分离设备和工艺的选型与优化。

参 考 文 献

- [1] Beril G, Semiha A, Hulusi B, et al. Advanced treatment of pulp and paper mill wastewater by nanofiltration process: Effects of operating conditions on membrane fouling [J]. Sep. Purif. Technol., 2011, 76 (3): 292.
- [2] Ko CH, Fan C. Enhanced chemical oxygen demand removal and flux reduction in pulp and paper wastewater treatment using laccase-polymerized membrane filtration [J]. J. Hazard. Mater., 2010, 181 (1/3): 763.
- [3] Mika M, Markku K, Juha K, et al. Membrane filtration and ozone treatment of biologically treated effluents from the pulp and paper industry [J]. J. Membrane Sci., 2008, 309 (1/2): 112.
- [4] Zhang Y Z, Ma C M, Ye F, et al. The treatment of wastewater of paper mill with integrated membrane process [J]. Desalination, 2009, 236 (1/3): 349.
- [5] Liu T Z, He Z B, Hu H R, et al. Treatment of APMP pulping effluent based on aerobic fermentation with *Aspergillus niger* and post-coagulation/flocculation [J]. Bioresource Technol., 2011, 102 (7): 4712.
- [6] Zhang Y, Cao C Y, Feng W Y, et al. Performance of a pilot-scale membrane process for the concentration of effluent from alkaline peroxide mechanical pulping plants [J]. BioResources, 2011, 6 (3): 3044.
- [7] Ebrahim N, Alice A, Mojgan B, et al. Selective separation of contaminants from paper mill effluent using nanofiltration [J]. Chem. Eng. Res. Des., 2012, 90 (4): 576.

Preliminary Study of the Investment and Production Cost of APMP Plant's Effluent Treatment with Membrane Separation Process

CHEN Lin-zheng¹ LV Wei-jun² GAO Chang¹ LI Sha¹ ZHANG Yong^{1, 3, *}

(1. College of Material and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang province, 310018;

2. China National Pulp and Paper Research Institute, Beijing, 100061; 3. State Key Laboratory of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong province, 510641)

(*E-mail: zhangyong@zstu.edu.cn)

Abstract: In this study, a mathematical model was established to evaluate the investment and production cost of APMP plant's effluent treatment with membrane separation process. Four parts of data were included in this model, which are the capital cost (Cc), production cost (Pc), operation cost of the membrane separation equipments (Oc) and the organics contribution value in the concentrated effluent (Ov). The actual investment and production cost were calculated according to the following formulas: $Cc = \text{Cost}_{\text{memb}} \times A_{\text{memb}} + \text{Cost}_{\text{equip}}$, $Pc = Oc - Ov$, $Oc = \text{Cost}_{\text{electricity}} + \text{Cost}_{\text{replacement of memb}} + \text{Cost}_{\text{maintenance}} + \text{Cost}_{\text{cleaning}} + \text{Cost}_{\text{labour}}$ and $Ov = A \times H_{\text{fuel}}$. This mathematical model could overall reflect the cost of APMP plant's effluent treatment with membrane separation process objectively. It holds an easy calculation process and provides a theoretical basis for the selection and optimization of the membrane separation equipments and process for APMP plant's effluent treatment.

Key words: APMP plant's effluent; Membrane separation process; mathematical model; Investment cost; Production cost