

# 络合萃取法处理含酚废水技术经济分析\*

戴猷元 孙巍 蔡薇 杨义燕 瞿福平

(清华大学化学工程系, 北京 100084 E-mail: daiyy @ mail. tsinghua. edu. cn)

**摘要** 从技术经济角度对络合萃取法处理含酚废水进行了分析, 建立了投资及净现值与处理量和浓度的关系式. 结果表明: 络合萃取法投资及净现值(不回收酚时)指标对处理量敏感, 而对浓度不敏感; 回收酚时净现值指标对处理量和浓度皆敏感, 且存在一个盈亏平衡点, 其临界浓度为 1000mg/L, 高于此浓度, 络合萃取工艺处理为盈利项目.

**关键词** 络合萃取法, 含酚废水, 技术经济, 投资, 净现值, 盈亏平衡点, 临界浓度.

## Technical Economy Analysis for the Complexation Extraction Process Treating Phenolic Wastewater

Dai Youyuan Sun Wei Cai Wei Yang Yiyan Qu Fuping

(Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 E-mail: daiyy @ mail. tsinghua. edu. cn)

**Abstract** Included in this paper is an analysis from a point of view of technical economy for the phenolic wastewater treated by complexation extraction process. Some equations between investment or net present value (NPV) and water quantity and concentration are built. The results show that both index of investment and NPV are sensitive to the water quantity, but not the concentration for the complexation extraction process without phenol recovery; for the process with phenol recovery, NPV is sensitive to the water quantity and concentration and there is an equilibrium concentration of profit and loss of 1000mg/L, when the concentration is larger than 1000mg/L, the complexation extraction process becomes a profit project.

**Keywords** complexation extraction process, phenolic wastewater, technical economy, investment, net present value, concentration of profit and loss, critical concentration.

含酚废水是一种污染面较广、毒性较大、亟需处理的工业废水<sup>[1]</sup>, 络合萃取法是一种基于可逆络合反应萃取极性有机物的分离技术<sup>[2]</sup>, 该法在应用于工业含酚废水的处理中实现了一次萃取后而使残液中酚含量达标排放<sup>[3]</sup>, 从而为含酚废水的处理开辟了新的途径. 本文以清华大学研究开发的包括新型络合剂和相应设备在内的成套含酚废水处理技术为背景, 从技术经济角度对络合萃取法处理含酚废水进行分析, 为决策者的方案比较提供技术经济支持.

### 1 络合萃取法处理含酚废水工艺流程

络合萃取法处理工业含酚废水工艺流程如图 1 所示.

### 2 技术经济评价指标

从费用和效益角度出发, 有多种投资方案

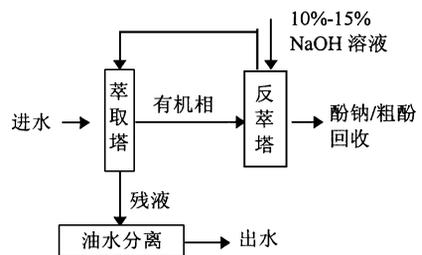


图 1 络合萃取法处理含酚废水工艺流程

经济效果的评价方法<sup>[4]</sup>, 这些方法分别适用于各不同方案的评价问题. 本文选择了动态指标净现值(net present value, NPV), NPV 指标是将不同时间的资金流出和流入换算成同一时间

\* 国家“九五”科技攻关项目(The National Key Science and Technology Project during the Ninth Five-year Plan Period)

戴猷元: 男, 53 岁, 教授, 博导, 系主任

收稿日期: 1997-12-05

点上的等效值,其特点是可为不同方案的比较提供同等可比的基础,对投资者和决策者树立资金的时间价值观念,合理利用建设资金,提高经济效益具有重要意义.NPV计算公式如下:

$$NPV = \sum_{t=0}^n (C_1 - C_0) \frac{1}{(1+i)^t} \quad (1)$$

式中, $n$ 为项目建设及生产服务年限, $i$ 折现率, $t$ 为年份, $C_1 - C_0$ 为 $t$ 年发生的净现金流量.

### 3 计算方法与步骤

针对环保项目的特点,在计算现金流量时主要考虑了方案的投资和运行费用.其中投资主要由萃取塔、反萃塔、填料及其它费用(如机泵、管线、仪表等)4部分组成;运行费用主要由溶剂夹带损失及动力、人工费等组成.

#### 3.1 步骤1:萃取塔塔径计算

$$D = \left[ \frac{8Q}{\pi(u_c + u_d)} \right]^{0.5} \quad (2)$$

式中, $u_c$ 和 $u_d$ 分别为连续相和分散相的表观流速(m/h).已有研究表明,采用QH-1型填料的萃取塔,在正常操作条件下,两相的总流速可取30m/h,若含酚废水处理相比为1:1,则 $u_c$ 和 $u_d$ 可取15m/h; $Q$ 为处理量( $m^3/h$ ).

#### 3.2 步骤2:反萃塔塔径计算

$$D = \left[ \frac{4(Q_d + Q_c)}{\pi(u_c + u_d)} \right]^{0.5} \quad (3)$$

式中, $Q_c$ 和 $Q_d$ 分别为连续相和分散相的流量( $m^3/h$ ), $Q_d$ 为萃取塔中处理量.若两相的总流速仍控制为30m/h,但处理相比需为3:1,则 $u_c = 30 \times 3/4 = 22.5m/h$ , $u_d = 30 \times 1/4 = 7.5m/h$ , $Q_c = 3Q_d = 3Q$

#### 3.3 步骤3:萃取塔与反萃塔塔高计算

$$u_0 = 0.637 \left[ \frac{a_p}{\epsilon^3 g} \cdot \frac{\rho_c}{\Delta \rho} \right]^{-0.5} \quad (4)$$

$$\frac{u_c}{\epsilon(1-\Phi)} + \frac{u_d}{\epsilon\Phi} = u_0(1-\Phi) = u_s \quad (5)$$

$$d_p = 0.92 \left[ \frac{\sigma}{\Delta \rho g} \right]^{0.5} \left[ \frac{\epsilon u_0 \Phi}{u_d} \right] \quad (6)$$

$$a = 6\epsilon\Phi d_p \quad (7)$$

$$k_d = 17.9D_d/d_p \quad (8)$$

$$k_c = 0.725 \left[ \frac{d_p u_s \rho_c}{\mu_c} \right]^{-0.43} \left[ \frac{\mu_c}{\rho_c d_c} \right]^{-0.58} u_s (1 - \Phi) \quad (9)$$

$$\frac{1}{K_{oc}} = \frac{1}{k_c} + \frac{1}{m k_d} \quad (10)$$

$$(HTU)_{oc} = u_c / (K_{oc} a) \quad (11)$$

$$(NTU)_{oc} = \frac{N_T \ln E}{1 - 1/E} \quad (12)$$

$$H = (HTU)_{oc} (NTU)_{oc} \quad (13)$$

式(4)~(13)中, $a$ ,传质比表面积( $m^2/m^3$ ); $a_p$ ,填料比表面积(取 $228m^2/m^3$ ); $d_p$ ,分散相液滴平均直径(m); $D_c$ ,溶质在连续相中扩散系数(取 $0.96 \times 10^{-9} m^2/s$ ); $D_d$ ,溶质在分散相中扩散系数(取 $0.91 \times 10^{-9} m^2/s$ ); $E$ ,萃取因子(= $mu_d/u_c$ ); $H$ ,填料萃取塔有效段高度(m); $H_T$ ,理论级高度(m); $(HTU)_{oc}$ ,基于连续相的传质单元高度(m); $k_c$ ,连续相分传质系数(m/s); $k_d$ ,分散相分传质系数(m/s); $K_{oc}$ ,基于连续相总传质系数(m/s); $m$ ,萃取平衡分配系数(取50); $N_T$ ,理论级数; $(NTU)_{oc}$ ,连续相传质单元数; $u_0$ ,特性速度(m/s); $u_s$ ,滑动速度(m/s); $\epsilon$ ,填料空隙率(取93%); $\rho_c$ ,连续相密度(取 $1000kg/m^3$ ); $\rho_d$ ,分散相密度(取 $838kg/m^3$ ); $\sigma$ ,界面张力(取 $1.12N/m$ ); $\mu_c$ ,连续相粘度(取 $1.0Pa/s$ ); $\mu_d$ ,分散相粘度(取 $2.12Pa/s$ ); $\Phi$ ,分散相存留分数;

由式(4)~(13)逐一计算,最后可得塔高.

#### 3.4 步骤4:萃取塔与反萃塔上下扩大段尺寸

两相在扩大段内的表观流速可取塔内表观流速的25%~35%,据此可估算扩大段直径取塔径的1.9倍;对于扩大段高度,已有研究表明,体系澄清时间在10~15min左右,据此停留时间澄清段有效高度应在1.5~2.0m左右,本文计算中,萃取塔和反萃塔上下扩大段尺寸各取2m.

#### 3.5 步骤5:投资及运行费用的计算

根据前4步结果,可计算得到萃取塔、反萃塔、填料的投資费用.根据已有经验,机泵、管线、仪表等其它投資费用可按40万元考虑.

运行费用按溶剂夹带量2/10000,换算为4

元/t, 其它运行费用(如水电、人工费等)按 2 元/t, 总的操作费用为 6 元/t。

### 3.6 步骤 6: NPV 计算

按式(1)进行计算. 其中  $n$  取 10a,  $i$  取 12%, 在不回收酚时  $C_1$  为 0, 回收酚时为酚回收价值.  $C_0$  在第 0 年即为投资, 在 1—10 年为运行费用。

## 4 结果与讨论

### 4.1 $Q$ 和 $c$ 对投资的影响

$Q$  和  $c$  对络合萃取处理工程投资的影响如图 2 所示。

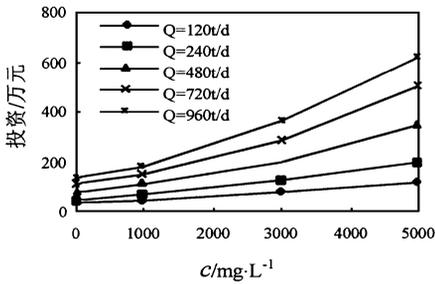


图 2 投资随  $Q$  及  $c$  变化曲线

由图 2 可知, 络合萃取法投资随  $Q$  或  $c$  的增大而增大. 通过对曲线采用多种函数拟合比较, 得出了如下最优关系式:

$$y = 1.0918Q^{0.7051}e^{2.8749 \times 10^{-4}c} \quad (14)$$

$$R = 0.9971$$

从(14)式看出, 投资随  $Q$  的增长具有幂函数关系, 而随  $c$  增长具有指数函数关系. 以  $Q=500t/d, c=500mg/L$  为例, 根据上式, 可求得其投资为 100.84 万元, 假设  $Q$  与  $c$  的变动范围均为  $\pm 20\%$ , 则其敏感性分析如图 3 所示。

由图 3 可知, 在同样变动率下, 投资受  $Q$  的影响较大, 受  $c$  的影响较小. 实际上  $c$  影响的是萃取塔的理论级数, 从而影响塔高, 大约  $c$  每增加 1000—2000mg/L, 理论级才增加一级, 所以  $c$  对塔高的影响较小, 而  $Q$  的变化体现在塔径的变化上, 所以投资对  $Q$  的变化较为敏感。

### 4.2 $Q$ 和 $c$ 对不回收酚时 NPV 的影响

影响如图 4 所示。

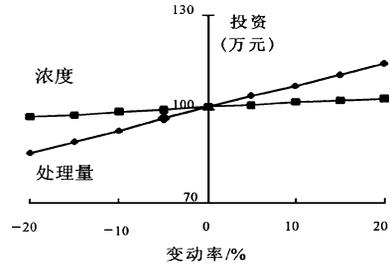


图 3 络合萃取法投资敏感性分析

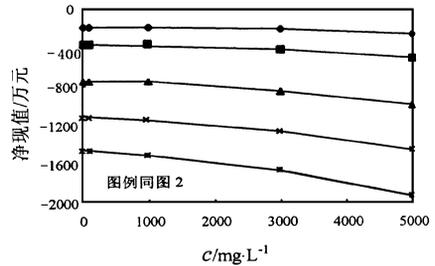


图 4 NPV 随  $Q$  及  $c$  变化曲线

由图 4 可知, 若不回收酚, 络合萃取法 NPV 均为负值,  $Q$  或  $c$  越大, NPV 越小. 通过对曲线的多种函数拟合比较, 得出了如下最优关系式:

$$y = 1.8328 \times 10^{-8}c^2Q - 3.5589 \times 10^{-5}cQ - 1.5222Q - 1.5369 \times 10^{-6}c^2 + 3.1574 \times 10^{-3}c - 7.0979 \quad R = 0.9999 \quad (15)$$

从(15)式可以看出, 络合萃取法 NPV 的负增长与  $Q$  具有线性关系, 而与  $c$  具有二次函数关系. 以  $Q=500t/d, c=500mg/L$  为例, 根据上式, 可求得其 NPV 为 -777 万元, 假设  $Q$  与  $c$  的变动范围均为  $\pm 20\%$ , 则其敏感性分析如图 5 所示。

由图 5 可知, 在同样变动率下, 与投资类似, NPV 受  $Q$  影响较大, 而受  $c$  的影响较小。

### 4.3 $Q$ 和 $c$ 对回收酚时 NPV 的影响

影响如图 6 所示。

由图 6 可知, 在回收酚情况下, 5 个  $Q$  的 NPV 曲线在  $c$  约为 1000mg/L 时有一个交点, 此点的 NPV 约为 0, 根据 NPV 的经济意义, 该点称为盈亏平衡点. 当  $c$  小于 1000mg/L 时, NPV 为负值, 表明项目不赢利,  $Q$  越大, NPV

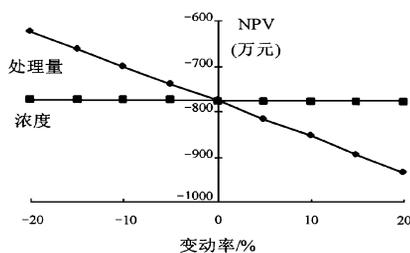
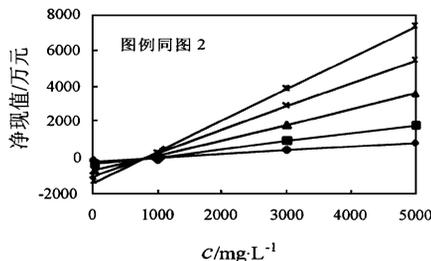


图5 NPV 敏感性分析

图6 NPV 随  $Q$  及  $c$  变化曲线

越小; 当  $c$  大于  $1000\text{mg/L}$  时, NPV 为正值, 表明项目赢利,  $Q$  越大, NPV 越大, 赢利越多。可见萃取回收酚工艺由亏损变为盈利的临界  $c$  为  $1000\text{mg/L}$ 。通过对曲线的多种函数拟合比较, 得出了如下最优关系式:

$$y = -1.8328 \times 10^{-3} Qc - 1.4697Q - 7.4586 \times 10^{-3}c - 15.8693 \quad R = 0.9999 \quad (16)$$

从(16)式可以看出, 络合萃取法 NPV 随  $Q$  及  $c$  的增长均具有线性关系。以  $Q_1 = 500\text{t/d}$ ,  $c_1 = 500\text{mg/L}$  及  $Q_2 = 500\text{t/d}$ ,  $c_2 = 1500\text{mg/L}$  作为低于和高于临界  $c$  的 2 个代表, 进行敏感性分析, 根据上式, 可求得相应的 NPV 为  $-296.2$  万元及  $612.7$  万元, 假设  $Q$  与  $c$  的变动范围均为  $\pm 20\%$ , 则其敏感性分析分别如图 7 和图 8 所示。

由图 7 及图 8 可知, 在同样变动率下, NPV 受  $Q$  和  $c$  的影响均较大,  $Q$  和  $c$  均为敏感因素。在 2 种情况下所不同的只是  $Q$  对 NPV 的影响由不回收时的负效应变为了回收时的正效应。

## 5 小结

(1) 络合萃取法投资随着  $Q$  或  $c$  的增大而

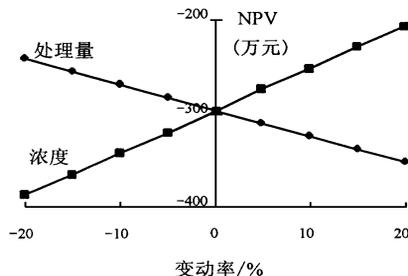


图7 低于平衡点时 NPV 敏感性分析

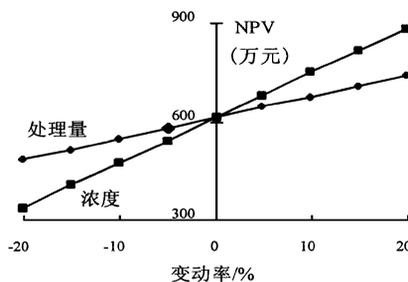


图8 高于平衡点时 NPV 敏感性分析

增大; 投资与  $Q$  具有幂函数增长关系, 与  $c$  具有指数函数增长关系; 敏感性分析表明, 只有  $Q$  是影响投资的敏感因素。

(2) 若不回收酚, 络合萃取法 NPV 均为负值,  $Q$  或  $c$  越大, NPV 越小, NPV 的负增长与  $Q$  具有线性关系, 而与  $c$  具有二次函数关系。敏感性分析表明, 只有  $Q$  是影响 NPV 的敏感因素。

(3) 若回收酚, 络合萃取法 NPV 随  $Q$  及  $c$  的增长均具有线性关系, 而且还存在一个盈亏平衡点, 相应临界  $c$  为  $1000\text{mg/L}$ 。当  $c$  小于  $1000\text{mg/L}$  时, NPV 为负,  $Q$  越大, NPV 越小; 当  $c$  大于  $1000\text{mg/L}$  时, NPV 为正,  $Q$  越大, NPV 越大。敏感性分析表明,  $Q$  和  $c$  均为影响 NPV 的敏感因素。

## 参 考 文 献

- 1 张芳西等. 含酚废水的处理与利用. 北京: 化学工业出版社, 1983: 1—25
- 2 King C J. Handbook of separation process technology. New York: John Wiley & Sons, 1987: 760—774
- 3 杨义燕等. 络合萃取法处理工业含酚废水. 环境科学, 1995, 16(2): 35—38
- 4 曹瑞钰. 环境经济学. 上海: 同济大学出版社, 1992: 43—54