

双搅拌高效澄清萃取槽澄清度的因次分析

刘燕, 张延安, 赵秋月, 王淑婵

(东北大学 多金属共生矿生态化利用教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 提出了“双搅拌新型高效分离萃取槽”的新概念,即在澄清室增加搅拌装置,通过选择适当的搅拌条件,提高萃取过程水相与有机相的澄清分离速率,从而达到提高萃取设备效率的目的。设计了一套双搅拌萃取水模型实验装置,采用冷态模拟手段研究不同搅拌条件下搅拌离心场及重力场耦合作用对萃取槽澄清室中水油两相分离效果的影响,并结合实验数据,建立了实验范围内的开式45°涡轮桨的澄清度与搅拌转速、离底距离、搅拌桨距溢流口距离之间的准数方程。经实验验证,计算值与实验值吻合良好。

关键词: 澄清萃取槽; 双搅拌; 澄清度; 因次分析; 物理模拟

中图分类号: TQ 019

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2013)03-0395-04

Dimensional Analysis of the Clarity in High Efficient Extraction and Clarification Tanks with Double Stirring

LIU Yan, ZHANG Ting-an, ZHAO Qiu-yue, WANG Shu-chan

(Key Laboratory of Ecological Utilization of Multi-metal Intergrown Ores of Education Ministry, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Ting-an, E-mail: zta2000@163.net)

Abstract: The new concept "high efficient extraction and clarification tanks with double stirring" was put forward, that is, inserting a stirring unit in the clarifying chamber. By choosing an appropriate stirring condition, the separation rate of the aqueous phase and the organic phase was improved in the clarification extraction process, which increased the efficiency of the extraction equipment. A double stirring water model experimental device was designed and produced in this project. By means of cold state simulation, the influences of centrifugal field coupling with the gravity field on the separation of the oil and water phases in the extraction tank were studied under the different stirring conditions. Finally, combining with the experiment data, the dimensional analysis method was adopted. The dimensionless equation between the clarity under the open type 45 degrees of turbine blades and the stirring speed, distance from the bottom, the distance from the overflow entrance to the stirring blades was established. The experiments showed that the calculations are in good agreement with the experimental values.

Key words: extraction and clarification tanks; double stirring; clarity; dimensional analysis; physical simulation

经查阅相关文献^[1-7],国内外有关萃取槽分离过程的专利技术主要是通过改变萃取槽澄清室结构(如分隔澄清室、加入挡板或回流通道等)来强化两相分离过程,该类方法没有突破重力作用下澄清分离的瓶颈,很难大幅度提高两相澄清分离的速率及单元设备的生产效率。

针对稀土生产过程的萃取分离工序中存在的

问题,东北大学特殊冶金创新团队提出了“双搅拌新型高效分离萃取槽”,即通过在混合-澄清槽的澄清室中加入搅拌装置,利用搅拌过程的离心作用以及搅拌对水油相间包裹的破碎作用提高萃取过程水相与有机相的分离速率,从而提高单体设备的生产能力。按照包头某稀土厂萃取分离过程计算,若把水相与有机相分离时间缩短到与混合时间相

收稿日期: 2012-09-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2010AA03A405); 国家自然科学基金资助项目(51074047); 辽宁省财政厅/省计划项目(200921007)。

作者简介: 刘燕(1970-),女,湖南湘乡人,东北大学副教授,博士; 张延安(1960-),男,河南周口人,东北大学教授,博士生导师。

匹配,则生产能力即可增加一倍。此技术在稀土工业中的应用可有效地解决稀土工业中的瓶颈问题,也是该工业发展的巨大推动。本文根据现有萃取槽的结构特点,设计并制做了一整套萃取槽水模型装置。对搅拌澄清过程中各主要因素对澄清过程强化效果进行研究,并采用因次分析法建立两相分离效果与不同搅拌参数之间准数方程关系式。

1 双搅拌萃取槽的水模型实验

新型萃取槽与传统萃取槽的澄清室流型对比如图1所示。

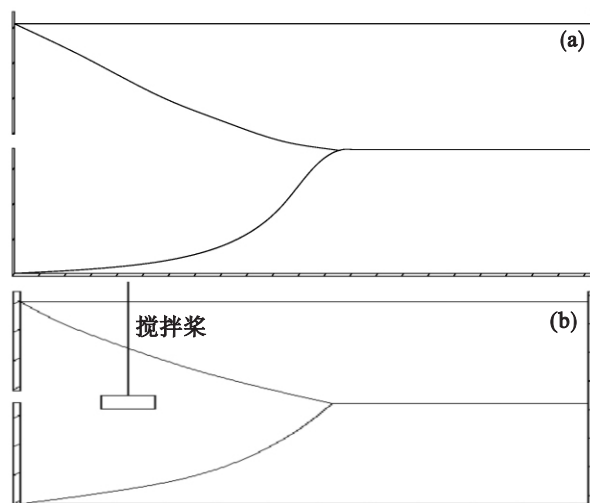


图1 传统萃取槽与新型萃取槽流型对比
Fig. 1 The flow pattern of the new extraction tank compared with the traditional one

(a) —传统萃取槽; (b) —新型萃取槽。

1.1 实验流程

按照工业生产系统的流程,本课题组设计了双搅拌高效澄清萃取槽水模型实验装置。分别通过有机泵和水泵按照2:1流量比流入混合室,两相经搅拌充分混合后通过溢流口进入澄清室,经澄清分离后,分别流回各自储槽,从而实现两相的循环流动。实验流程图如图2所示。

1.2 实验方法

1.2.1 双搅拌萃取槽结构尺寸

本实验以 1 m^3 萃取槽为原型,实验槽长度:原槽长度=1:5,按照混合槽长度:澄清槽长度=1:1.25设计。澄清室距底部2 cm处水平方向上设6个取样口,取样口平均分布,距隔板的距离即搅拌桨距溢流口距离分别是3.6,7.2,10.8,14.4,18,21.6 cm。

1.2.2 桨型的选择

目前萃取流程中混合室通常使用圆盘式四叶

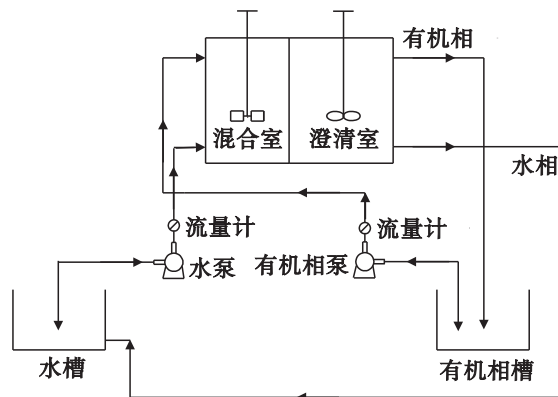


图2 双搅拌萃取实验流程图
Fig. 2 The process chart of the double stirring extraction experiment

涡轮式搅拌桨或开式 45° 搅拌桨对油相和水相进行混合,本实验中混合室采用六直叶圆盘涡轮桨,搅拌转速控制在 950 r/min 左右,可保证油相与水相的充分混合。

在分离室,为考察不同桨型对两相分离效果的影响,本实验选择多种桨型进行考察,包括:开式 45° 桨、框式搅拌桨、Intermig桨、六叶涡轮桨。

1.2.3 有机相与水相夹带率的测定

在不同的搅拌转速、桨叶浸入深度、桨叶搅拌桨距溢流口距离、搅拌模式及桨叶型式条件下,沿萃取槽澄清室油相和水相出口水平面上各取6个取样点,系统稳定后瞬时取样,用玻璃量筒称量油相的体积分数,考察两相分离效果。

1.2.4 澄清室内流型的研究

通过高像素摄像机的拍摄、对比,研究两相混合带状态。

1.2.5 实验参数的选择

分离搅拌转速:搅拌转速考察范围 $20\sim 60\text{ r/min}$,通过不同转速下两相分离速率确定适宜的搅拌转速。

浸入深度:根据有机相与水相夹带率而定,从量筒搅拌分离实验结果初步推断,分离过程中搅拌的主要作用是打破水基和油基的相互包裹,因此理论上最佳的桨叶浸入深度应该是水油包裹最严重的位置,即两相分离面附近。因此,本实验考察不同搅拌桨浸入深度对混合相分离效果的影响。

本实验采用正转和反转两种搅拌模式。经过查阅相关文献[8-9],国内大多数把澄清速率设为 $1\sim 5\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,本实验选取的澄清速率为 $2.4\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,澄清面积 500 cm^2 ,得出 $Q=120\text{ L/h}$ 。由于本实验按照有机相与水相体积比2:1输入,两流量分别控制为80,40 L/h。

2 澄清度的因次分析

2.1 澄清度 θ 的主要影响因素

本文为考察澄清效果,在澄清槽内水相出口水平面定点取样,将样品内油相占两相的体积比定义为澄清度 θ 。

澄清度 θ 主要受以下因素的影响:

1) 搅拌转速 n ; 2) 水相的密度 ρ_1 ; 3) 油相的密度 ρ_2 ; 4) 水相的黏度 μ_1 ; 5) 油相的黏度 μ_2 ; 6) 桨叶的直径 D ; 7) 槽径(澄清室宽度) b ; 8) 桨叶搅拌桨距溢流口距离 l ; 9) 桨叶离底距离 z ; 10)

水相的流量 Q_1 ; 11) 油相的流量 Q_2 ; 12) 水相表面张力 σ_1 ; 13) 油相表面张力 σ_2 。

由以上分析,利用因次分析法^[10],可以得出一般的函数形式为

$$\theta = f(n, \rho_1, \rho_2, \mu_1, \mu_2, D, b, l, z, Q_1, Q_2, \sigma_1, \sigma_2), \quad (1)$$

或

$$f(\theta, n, \rho_1, \rho_2, \mu_1, \mu_2, D, b, l, z, Q_1, Q_2, \sigma_1, \sigma_2) = 0. \quad (2)$$

所有物理量的因次表达式都可以由归纳为一般形式的 $[a] = L^l T^t M^m$ 来代表。式中 $[a]$ 代表物理量的因次; L 为长度因次; T 为时间因次; M 为质量因次。在流体力学中一般涉及的基本因次就是 M, L, T 3 个。因此,以上诸变量的因次列于表 1。

表 1 变量因次表
Table 1 Variable dimensional table

基本因次	θ	n	ρ_1	ρ_2	μ_1	μ_2	D	b	l	z	Q_1	Q_2	σ_1	σ_2
M	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
L	0	0	-3	-3	-1	-1	1	1	1	1	3	3	0	0
T	0	-1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	-1	-1	-2	-2

由 π 定理的分析原理可知^[10],总变量数 $i = 12$, 独立变量数 $k = 3$, 可建立 $i - k = 9$ 个无因次组合量。选取 ρ_1, D, Q_1 为独立变量,对于变量 b, l, z , 它们只含长度因次,因此在构造无因次 π 时可以直接用独立变量 D 表示出来。 θ 为无因次量,可直接写出。

于是可得到

$$f\left(\theta, \frac{D^3 n}{Q_1} \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{D}{\rho_1 Q_1} \mu_1, \frac{D}{\rho_1 Q_1} \mu_2, \frac{b}{D}, \frac{l}{D}, \frac{z}{D}, \frac{Q_2}{Q_1}, \frac{D}{\rho Q_1^2} \sigma_1, \frac{D}{\rho Q_1^2} \sigma_2\right) = 0. \quad (3)$$

上式又可表示成

$$f_1 = \left(\theta, \frac{D^3 n}{Q_1} \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{D}{\rho_1 Q_1} \mu_1, \frac{D}{\rho_1 Q_1} \mu_2, \frac{b}{D}, \frac{l}{D}, \frac{z}{D}, \frac{Q_2}{Q_1}, \frac{D}{\rho Q_1^2} \sigma_1, \frac{D}{\rho Q_1^2} \sigma_2\right). \quad (4)$$

为了得到澄清度 θ 的表达式,还可以表示为显函数的形式:

$$\theta = f_2\left(\frac{D^3 n}{Q_1} \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{D}{\rho_1 Q_1} \mu_1, \frac{D}{\rho_1 Q_1} \mu_2, \frac{b}{D}, \frac{l}{D}, \frac{z}{D}, \frac{Q_2}{Q_1}, \frac{D}{\rho Q_1^2} \sigma_1, \frac{D}{\rho Q_1^2} \sigma_2\right). \quad (5)$$

对于本实验研究的具体情况来说, $\rho_1, \rho_2, \mu_1, \mu_2, Q_1, Q_2, b, D, \sigma_1$ 和 σ_2 均为定量,于是又可得到

$$\theta = f_3\left(\frac{D^3 n}{Q_1}, \frac{l}{D}, \frac{z}{D}\right). \quad (6)$$

式中 θ 随 n, l 和 z 的具体变化关系需要由实验来

确定。

2.2 澄清度因次公式的建立

根据上一节建立的参数关系式,结合实验具体条件,可以推导、建立相应的具体经验公式。

各种现象的准则关系式在自变量的某一范围内往往都可以采用幂函数的形式表述。由以上的分析,可以拟合出经验准则公式为

$$\theta = A \left(\frac{D^3 n}{Q_1}\right)^B \left(\frac{l}{D}\right)^C \left(\frac{z}{D}\right)^E, \quad (7)$$

其中 A, B, C, E 是拟合系数。

将上式两边求对数得到

$$\ln \theta = \ln A + B \ln \frac{D^3 n}{Q_1} + C \ln \frac{l}{D} + E \ln \frac{z}{D}. \quad (8)$$

依据式(8)的线性关系,将实验数据进行处理,就可以得到拟合系数 A, B, C, E 。

根据对开式 45° 桨反转搅拌条件下的实验数据的处理可得到 $A = 0.01691, B = 0.55909, C = -0.36935, E = 0.89015$, 则经验公式为

$$\theta = 0.01691 \left(\frac{D^3 n}{Q_1}\right)^{0.55909} \left(\frac{l}{D}\right)^{-0.36935} \left(\frac{z}{D}\right)^{0.89015}. \quad (9)$$

搅拌桨直径 D 为 10 cm, 水相的流量为 40 L/h, 代入式(9), 可得

$$\theta = 0.00639 n^{0.55909} l^{-0.36935} z^{0.89015}. \quad (10)$$

式中: θ 为澄清度, 无因次量; n 为澄清室搅拌转速 r/min ; l 为搅拌桨离底距离, cm ; z 为搅拌桨距溢流口距离, cm 。

利用上述方法得到的关系式是在本文实验的

基础上得到的. 因此, 对于本实验研究的澄清度, 只要给定主要的结构参数和运行参数, 就可以利用上述关系式预测出澄清度, 这为设计双搅拌混合-澄清槽提供了实验与理论依据.

2.3 因次公式的验证

将各条件下的 n, z, l 代入式(10) 得到理论值, 并与同条件下的实际值进行比较, 得到图3, 图4, 对不同条件的因次公式进行验证.

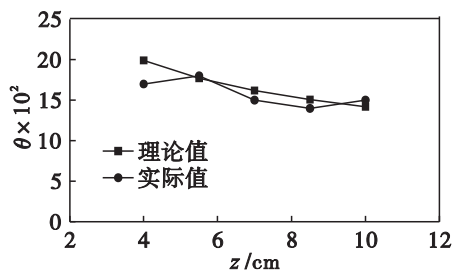


图3 不同离底距离下理论值与实际值的比较 ($n = 30 \text{ r/min}$, $l = 10 \text{ cm}$)

Fig. 3 Comparison of the actual value and the theoretical value at different height to the bottom

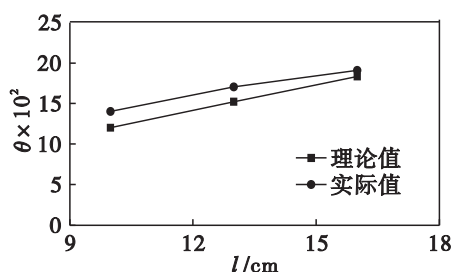


图4 不同搅拌桨距溢流口距离下理论值与实际值的比较 ($n = 20 \text{ r/min}$, $z = 8.5 \text{ cm}$)

Fig. 4 Comparison of the actual value and the theoretical value at different distances between the overflow entrance and the stirring blades

从图3、图4可以发现因次公式推导较好, 理论值与实际值相差较小, 个别点误差较大. 经分析认为该经验公式产生误差的主要原因有: 混合-澄清室双搅拌导致水油两相均有较大波动, 尤其对取样口附近位置影响更大; 混合室较强的搅动造成较严重的喷溅; 实验物料水油两相的挥发、取样点胶皮管的老化现象和人工操作问题都会造成一定的误差以及忽略其他相似准数带来的微弱影响等.

3 结 论

1) 考察了不同搅拌桨转动模式、搅拌转速、

搅拌桨类型、偏心距离以及浸入深度等条件下的水油两相的分离效果, 实验结果表明: 开式 45° 涡轮桨在低转速时有一定澄清效果.

2) 采用因次分析方法, 并结合实验数据, 本文建立了实验范围内的开式 45° 涡轮桨的澄清度与搅拌转速、离底距离、搅拌桨距溢流口距离之间的准数方程, 得到 $\theta = 0.00639n^{0.55909}l^{-0.36935}z^{0.89015}$. 经实验验证, 计算值与实验值吻合较好, 为设计双搅拌混合-澄清槽提供了实验与理论依据.

参考文献:

- [1] 黄桂文. 我国稀土萃取分离技术的现状及发展趋势[J]. 江西冶金, 2003, 23(6): 62-68.
(Huang Gui-wen. Development tendency and present situation of rare earth extraction separation technology in China [J]. Jiangxi Metallurgy, 2003, 23(6): 62-68.)
- [2] Susumu N, Junichiro S, Koji T, et al. Mass transfer coefficients in mixer-settler extraction column [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1997, 30(6): 1083-1089.
- [3] Katsuroku T, Hiroshi T. Holdup of dispersed phase in a mixer-settler extraction column [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1990, 23(1): 12-17.
- [4] Arm S T, Jenkins J A. Aqueous phase entrainment in centrifugal contactors [C] // Proceeding of International Solvent Extraction Conference. Melbourne: Society of Chemical Industry, 1996: 1167-1172.
- [5] Wang X L, Li W, Meng S L, et al. The extraction of rare earths using mixtures of acidic phosphorus-based reagents or their thio-analogues [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2006, 81(5): 761-766.
- [6] Leonard R A, Bernstein G J, Ziegler A A, et al. Annular centrifugal contactor for solvent extraction [J]. Separation Science and Technology, 1980, 15(4): 925-943.
- [7] Milos H, Stanley H. Mixer-settler-extraction column: mass-transfer efficiency and entrainment [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1985, 24: 1220-1225.
- [8] Ralph A L, David B C, Cliff C. Centrifugal contactor for laboratory-scale solvent extraction tests [J]. Separation Science and Technology, 1997, 32(1/2/3/4): 193-210.
- [9] 马荣骏, 罗电宏. 溶剂萃取的新进展及其在新世纪中的发展方向[J]. 矿冶工程, 2001, 21(3): 6-11.
(Ma Rong-jun, Luo Dian-hong. Progress in solvent extraction and perspective in 21st century [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2001, 21(3): 6-11.)
- [10] 孙振东. 因次分析原理[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1979: 1-108.
(Sun Zhen-dong. Dimensional analysis principle [M]. Beijing: Peoples' Railway Press, 1979: 1-108.)