

文章编号:0253-9950(2011)06-0349-04

$\phi 20$ mm 离心萃取器的水力学性能

李传博, 张 宇, 晏太红, 郑卫芳, 左 臣, 袁中伟

中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

摘要:为将 $\phi 20$ mm 离心萃取器用于 Purex 流程 2A 段的研究中, 针对 2A 段的工艺参数进行了 $\phi 20$ mm 离心萃取器的水力学性能研究。固定其重相堰直径为 10.8 mm, 采用 30% TBP/煤油- HNO_3 体系, 研究了流比 (A : O)、流速、转速变化对两相出口料液的夹带及环隙和转筒内液体体积变化的影响。研究表明: 当流比 (A : O) 为 1 : 1、两相总流速小于 70.0 mL/min 及流比为 5 : 1、两相总流速小于 28.8 mL/min 时, 当转速大于 3 000 r/min 时, 该类型离心萃取器处于稳定可操作区间; 此时两相出口料液均不夹带, 两相混合区内液体量约为 5.1 mL, 转筒内液体量约为 12.3 mL。结合总流速可算出两相接触时间 $t = 5.1 \times 60 / v_t$, v_t 为总流速。结果表明, 该类型离心萃取器可满足 Purex 流程中 2A 段工艺实验研究的需要。

关键词:离心萃取器; 水力学性能; 存留量

中图分类号: TL241 **文献标志码:** A

Hydraulic Performance of $\phi 20$ mm Centrifugal Extractor

LI Chuan-bo, ZHANG Yu, YAN Tai-hong, ZHENG Wei-fang, ZUO Chen, YUAN Zhong-wei

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(26), Beijing 102413, China

Abstract: In order to use $\phi 20$ mm centrifugal extractors for experimental study of the 2A contactor of Purex process, the hydraulic properties of such a centrifugal extractor were investigated under the working conditions prescribed by the process parameters of the 2A contactor. By using 30% TBP/kerosene- HNO_3 as the extraction system and fixing the heavy phase weir diameter to 10.8 mm, the influence of aqueous-to-organic phase flow ratio (A : O), two-phase total flow rate, and rotation speed of the rotor on the entrainment of liquids from both light and heavy phase outlet, and on the volume of liquid in the mixing zone and that in the rotator were examined. The experimental results show that when the A : O is 1 : 1 and the total flow rate is less than 70.0 mL/min, or the A : O is 5 : 1 and the total flow rate is less than 28.8 mL/min, and the rotation speed is greater than 3 000 r/min, such type of centrifugal extractor works in a stable operational condition, liquids from both light and heavy phase outlet are not entrained. The liquid volume of the mixing zone is about 5.1 mL, and the total liquid volume in the rotor is about 12.3 mL. The two phase contact time is calculated to be $t = 5.1 \times 60 / v_t$, where v_t is the total flow rate. The results indicate that this type of centrifugal extractor can meet the requirements for process research of 2A contactor of Purex process.

收稿日期: 2011-03-04; **修订日期:** 2011-05-16

作者简介: 李传博(1980—), 男, 山东莱芜人, 硕士, 助理研究员, 核燃料循环与材料专业

Key words: centrifugal extractor; hydraulic performance; liquid inventory

环隙式离心萃取器是一种高效的液-液萃取设备。它具有体积小、萃取效率高、开停车方便等优点,在制药、石油化工、湿法冶金、核化工及废水处理等各种领域已得到广泛应用^[1-3]。

离心萃取器的工作过程包括混合传质和离心分相两部分。其中混合传质在环隙中进行,分相在转筒内进行。离心萃取器两相接触时间短,可以很好地减少溶剂所受辐照程度;同时,30% TBP 萃取 Pu(IV)的反应速率较快,适用于作为 Purex 流程中铀的纯化循环萃取段的离心萃取器。在保证 Pu 达到一定的萃取率下,减小两相流比(A : O)有利于提高铀的浓缩倍数;提高转速有利于增强萃取及分相效果;减小两相接触时间有利于减少溶剂所受辐照程度。 $\phi 20$ mm 离心萃取器可处理的流量较大,相比操作范围较宽。为将 $\phi 20$ mm 离心萃取器用于 Purex 流程中铀纯化循环萃取段的实验研究,本工作拟研究当两相流比、流速和转速变化时离心萃取器两相出口料液的夹带情况以及离心萃取器环隙(混合区)和转筒内液体体积的变化等水力学性能。

1 环隙式离心萃取器的结构和工作原理

环隙式离心萃取器主要由电机、轴、转筒和外壳组成。转筒和外壳的结构示于图 1^[4]。转筒包括堰段和澄清段,堰段上有控制两相溢流半径的圆形堰;澄清段内装有径向叶片。外壳上部有两相各自的出口管和收集室。外壳下部有两相进料口,底部装有固定叶片。外壳内壁和转筒外壁之

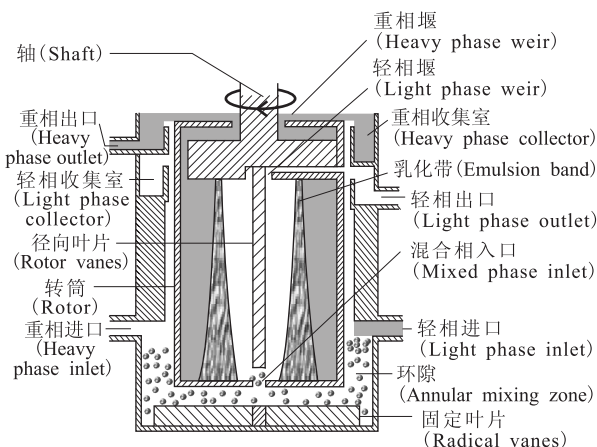


图 1 环隙式离心萃取器转筒和外壳的示意图^[4]

Fig.1 Rotor and housing schematic of annular centrifugal extractor^[4]

间的空间为环隙。

当密度不同且互不相溶的两相分别从两个进料口进入环隙后,高速旋转的转筒带动混合液在环隙间转动并混合,产生泰勒涡流^[5-6]。转动的混合液遇到底部固定叶片后产生一定的静压能,通过转筒的混合相入口,进入转筒分相。在离心力作用下进行分相。重相被甩到外缘,经重相堰流入重相收集室随重相出口流出;轻相流入轻相收集室随轻相出口流出。

2 实验部分

2.1 设备与试剂

$\phi 20$ mm 离心萃取器及其控制系统,清华大学核能与新能源技术研究院制造;MSP1-C1 注射泵,保定兰格恒流泵有限公司。

HNO_3 、TBP、 Na_2CO_3 ,分析纯,北京化学试剂公司。30% TBP:将 TBP 与加氢煤油按 3 : 7 的体积比混合后,振荡,经 5% 的 Na_2CO_3 溶液洗涤 3 次,再经 0.2 mol/L HNO_3 洗涤 3 次,然后用去离子水洗涤至中性。

2.2 实验方法

Purex 流程中 2A 段主要完成对由 1BP(一循环的铀初产品料液)经调价、调酸制备的 2AF 料液中铀的萃取,并通过洗涤段对铀中残留裂片元素和镓、锗等杂质元素作进一步的去除。综合考虑铀的收率、裂片元素的净化以及铀的浓缩等因素,通常选用的流比为:2AF : 2AX : 2AS = 1 : 0.28 : 0.128。通常 2A 段中萃取段为 8 到 10 级,Pu 的萃取率要求达到 99.9% 以上。萃取段流比为 2.45 : 1,基于此,拓宽流比为 1 : 1 和 5 : 1 考察离心萃取器的运行状况和水力学性能。

(1) 调节离心萃取器的重相堰直径为 10.8 mm,控制流比为 1 : 1,调节两台注射泵的总流速分别为 4.8、9.6、14.4、30.0、70.0 mL/min 以及流比为 5 : 1 时,调节总流速分别为 14.4、28.8、43.2 mL/min。其中水相为 0.5 mol/L 硝酸,有机相为 30% TBP。

(2) 离心萃取器在一定转速下运行后,先用注射泵打入水相,等水相出口流出水相时再泵入有机相。待离心萃取器稳定运行至少 5 min 后,分别在水相出口、有机相出口取样,采用离心分相法测量两相夹带量。当每一相对另一相的夹带量

为 0 时方认为不夹带,两相总流速方计入离心萃取器的处理能力范围之内。

(3) 待离心萃取器稳定运行至少 5 min 后,同时切断两相进料,将离心萃取器的转鼓轻轻提起放入一个小烧杯内,关闭电源使转筒内的液体流出并测量其体积,即为转筒内液体体积。将提去转筒的离心萃取器底座内的液体用胶头滴管吸出并测量其体积,即为环隙内液体体积。

3 结果与讨论

3.1 不同流速下改变转速时两相夹带情况

不同流速下、改变转速时两相夹带情况示于图 2。由图 2 可得以下结论。

(1) 当流比为 1 : 1、总流速由 4.8 mL/min 逐渐增大至 70.0 mL/min 时,由于转筒顶端的乳化带宽度随之增大,而使得两相夹带的可能性增大,所以两相出口均不夹带时的转速(r)可操作范围随总流速的增大而逐渐减小,即由 $2\,200\text{ r/min} < r < 4\,200\text{ r/min}$ 逐渐减小为 $2\,800\text{ r/min} < r < 4\,200\text{ r/min}$ 。同样,当流比为 5 : 1、总流速由 14.4 mL/min 逐渐增大至 43.2 mL/min 时,两相出口均不夹带时的转速可操作范围由 $2\,200\text{ r/min} < r < 4\,200\text{ r/min}$ 逐渐减小为转速无可调节区域;当总流速为 43.2 mL/min 时已超过 φ20 mm 离心萃取器在该流比下的最大可处理流速。

(2) 由图 2(a)可知,流速分别为 14.4、30.0、70.0 mL/min 时,由于随着转速的增加,转筒内顶端的乳化带变窄,则使得两相夹带的可能性减小,即离心萃取器的分离能力增强,所以当转速由 2 200 r/min 变为 4 200 r/min 时,两相出口由仅水相夹带变为水相和有机相均不夹带。

(3) 通常,当两相流比为 1 : 1 时,离心萃取

器的最大处理流量达最大。两相流比偏离 1 : 1 的程度越大,离心萃取器的最大处理流量越小。所以,当 $2\,200\text{ r/min} < r < 4\,200\text{ r/min}$ 、两相流比分别为 1 : 1 和 5 : 1 时,φ20 mm 离心萃取器的最大处理流速(v_{\max})分别为 70.0 mL/min 和 28.8 mL/min。另一方面,离心萃取器的最大处理流速随转鼓直径的增大而增大。由文献[7]报道,当两相流比为 4.45 : 1、 $t > 7.5\text{ s}$ 时,即要求萃取器的 $v_{\max} = 12.0\text{ mL/min}$,φ10 mm 离心萃取器可满足 2A 段工艺实验需求。而对于 φ20 mm 离心萃取器,当两相流比为 5 : 1 时,其 v_{\max} 已达 28.8 mL/min,若两相流比为 4.45 : 1,则 v_{\max} 必大于 12.0 mL/min,所以,φ20 mm 离心萃取器也能满足 2A 段工艺实验研究的需要。

3.2 不同流速下改变转速时环隙和转筒内液体体积的变化

不同流速下改变转速时环隙(混合区)和转筒内液体体积变化情况示于图 3。

由图 3(a)、(c)可知,在本实验条件下,两相流比无论是 1 : 1 或 5 : 1,当 $r \geq 3\,000\text{ r/min}$ 时,环隙内(混合区)液体体积量均已几乎达恒定,约为 5.1 mL,此时环隙内液体体积量已不再随流比和总流速的变化而改变,此区间为操作稳定区域。进一步结合总流速 v_t 可计算出两相接触时间 $t(\text{s})$, $t = 5.1 \times 60 / v_t$ 。当两相流比为 1 : 1、 $v_{t,\max} = 70.0\text{ mL/min}$ 时, $t = 4.4\text{ s}$; 两相流比为 5 : 1、 $v_{t,\max} = 28.8\text{ mL/min}$ 时, $t = 10.6\text{ s}$ 。

由图 3(b)、(d)可知,在本实验条件下,两相流比无论是 1 : 1 或 5 : 1,转筒内液体体积量基本保持恒定,约为 12.3 mL,并不随转速、流比和总流速的变化而改变。主要原因是通常转筒内的液体总是充满的,其中的液体体积量由转筒自身的尺寸和

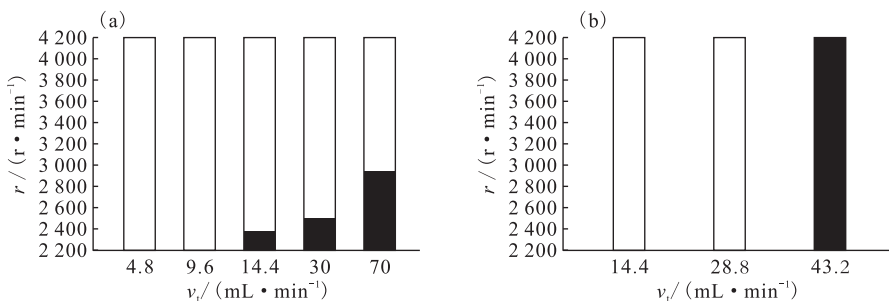


图 2 流比分别为 1 : 1(a)和 5 : 1(b)时转速对两相夹带情况的影响

Fig.2 Schematic of rotor speed vs two-phase exit liquid entrainment state

■——两相至少有一相夹带(Entraining at least in one phase), □——两相均不夹带(Without entraining in both phases)

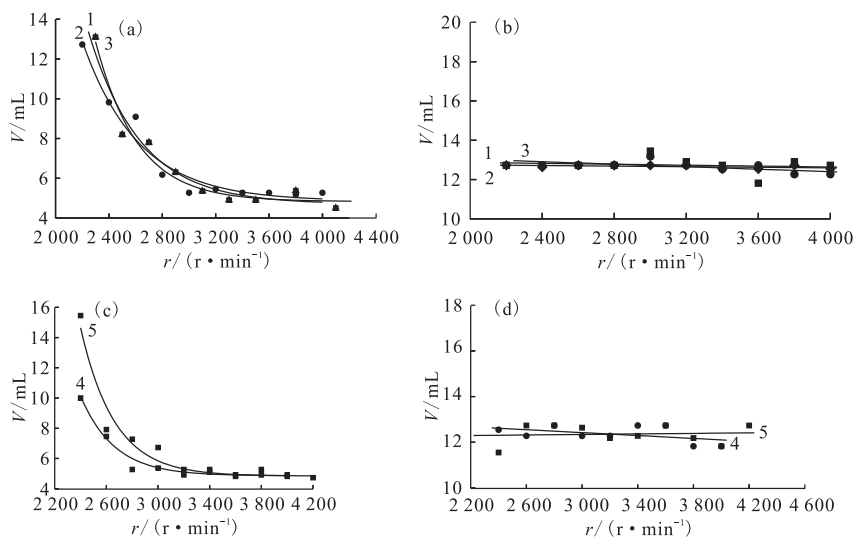


图 3 环隙内和转筒内液体体积随转速变化曲线
Fig. 3 Volume of the liquid in the annular space and in the revolving drum vs the rotor speed
流比(Flow ratio): (a)、(b)——1 : 1, (c)、(d)——5 : 1
 v_t , mL/min: 1——4. 8, 2——30. 0, 3——70. 0, 4——14. 4, 5——28. 8

内体积决定。转筒的主要作用是分相。

4 结 论

(1) 在本实验条件下,当两相流比为 1 : 1、总流速小于 70. 0 mL/min 时以及两相流比为 5 : 1、总流速小于 28. 8 mL/min 时,当 $r > 3\ 000\ \text{r/min}$ 时,该类型离心萃取器处于稳定可操作区间,此时两相出口料液均不夹带;两相混合区内液体体积量约为 5. 1 mL,转筒内液体体积量约为 12. 3 mL;进一步结合总流速,可计算出两相接触时间。

(2) 在相同实验条件下,与 $\phi 10\ \text{mm}$ 离心萃取器相比, $\phi 20\ \text{mm}$ 离心萃取器也可满足 Purex 流程中 2A 段工艺实验研究的需要。

参考文献:

[1] 许金全,段五华. 用 HL 离心萃取器处理含对硝基酚废水的研究[J]. 环境污染治理技术与设备,2006, 10(7):124-127.
[2] DUAN Wuhua, Cheng Qin. Development of a $\phi 20\ \text{mm}$

Annular Centrifugal Contactor for the Hot Test of the Total TRPO Process[J]. Prog Nucl Energy, 2009, 51: 313-318.
[3] Simpson M F, Law J D. Nuclear Fuel Reprocessing[M]. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2010: 17-18.
[4] 周嘉贞,张志庚,唐定芳,等. 微型环隙式离心萃取器的性能与应用[J]. 核科学与工程, 1983, 3 (3): 245-250.
[5] Deshmukh S S, Sathe M J, Joshi J B, et al. Residence Time Distribution and Flow Patterns in the Single-Phase Annular Region of Annular Centrifugal Extractor[J]. Ind Eng Chem Res, 2009, 48: 37-46.
[6] Deshmukh S S, Joshi J B. Flow Visualization and Three-Dimensional CFD Simulation of the Annular Region of an Annular Centrifugal Extractor[J]. Ind Eng Chem Res, 2008, 47: 3 677-3 686.
[7] 罗方祥,黄小红,李高亮,等. Pu 在单级离心萃取器中萃取与反萃取的研究[C]//NCES'04,海拉尔:中国核学会核化工分会,2004:B09.