

基于两平衡的两组分串级萃取静态递推数学模型

李明周¹, 童长仁^{1*}, 黄金堤²

(1. 江西理工大学 冶金与化学工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 江西理工大学 软件学院, 江西 南昌 330013)

摘 要:针对两组分分馏串级萃取的特点,从萃取平衡反应和物料传递守恒本质出发,假定各级组分间萃取反应和级间流量达到平衡状态,基于萃取反应平衡和质量守恒递推关系,构建了两组分分馏串级萃取递推数学模型,并进行了某工艺条件下的模型应用计算,揭示了各级平衡相中两组分的纯度分布规律,确定了最优化级数方案,绘制了纯度分布曲线,为优化设计两组分分馏串级萃取工艺参数提供了理论指导。

关键词:两组分;串级萃取;萃取平衡;质量守恒;递推模型

中图分类号:TQ018

文献标识码:A

文章编号:1004-0277(2018)02-0074-08

1959年,Alders提出了分馏萃取理论^[1]。20世纪70年代国内开始有串级萃取的文献报道^[2~5],期间,徐光宪院士等提出了串级萃取理论^[6~8],奠定了我国稀土分离工艺参数设计的理论基础。20世纪80年代后,李标国、严纯华、高松等将计算技术引入到串级萃取工艺中的静态计算和动态仿真的全过程中^[9~14],此后,又实现了理论设计结果的一步放大,极大地加快了我国稀土分离技术的产业化进程。目前,我国的稀土溶剂萃取分离技术已经达到了国际领先水平,稀土分离工业的规模和产品产量也已雄据世界之首^[15]。

在我国科研院所和产业界人员的共同努力下,在稀土冶金相关工艺和自动化的开发方面,新工艺、新方法、新设备不断涌现^[16~21],相关理论设计更

是获得了长足发展。串级萃取分离工艺的理论设计,一般是指在给定的物料组成和分离指标下,建立在稳态体系下的萃取平衡和物料平衡关系之上的静态计算方法。静态计算方法的目标是计算出稳态体系下满足给定分离指标要求,优化工艺参数,如萃取量和萃取段、洗涤段的级数,以及各级中的稀土分布组成。然而,现有两组分分馏串级萃取静态模型,均通过引入纯化倍数和分离因数等来进行数学描述,并通过数值计算来实现工艺参数的最优化设计。在一定时期内,该类理论计算模型对稀土生产最优化萃取量、洗涤量和级数等关键工艺参数的确定起到了积极作用,但模型涉及方程往往多而复杂,且计算结果与实际最优化状态存在一定计算偏差,因此,在普及推广串级萃取理论方面存在

收稿日期:2016-04-25

基金项目:江西省高等学校教改课题(JXJG-17-7-10);江西理工大学校级自然基金项目(NSFJ2014-G10)

作者简介:李明周(1980-),男,河南巩义人,硕士研究生,讲师,主要从事冶金过程数模仿真研究。

* 通讯联系人(E-mail:Tong_cr@163.com)

DOI:10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.201802010

一定的难度。

鉴于此,本文针对 A 和 B 两组分分馏串级萃取的特点,从萃取平衡反应和物料传递守恒的本质出发,摒弃纯化倍数和分离因数的定义,假定各级两相间两组分萃取反应和级间流量达到平衡,根据萃取反应平衡和质量守恒递推关系,经过严格的数学推导,构建基于两平衡的两组分分馏串级萃取递推数学模型,揭示平衡各级各相两组分的纯度分布规律,为优化设计两组分串级萃取工艺参数提供理论指导。

1 串级萃取递推数学模型的建立

1.1 两组分分馏串级萃取

两组分分馏萃取是将含待分离组分(A 和 B , 其中 A 和 B 均可由单一组分或多组分构成)的水相

料液由串级萃取器的中间某级流入,而不含待分离组分的洗涤液和有机相分别由串级萃取器的两端流入的串级萃取模式,见图1。该模式串级萃取一般有萃取和洗涤两段,能在分离系数不大的条件下同时获得纯的易萃组分 A 和纯的难萃组分 B 两种产品,收率很高,在实际生产中应用最广。

图1中,萃取段从 $1 \sim n$ 级,洗涤段从 $n+1 \sim n+m$ 级,进料级设在第 n 级。 M_F 为单位时间进料量, f_a 和 f_b 分别为料液中易萃组分 A 和纯的难萃组分 B 的摩尔分数, W 和 S 分别为洗涤液和有机相的组分洗涤量和萃取量, f'_a 和 f'_b 分别为有机相和水相产品出口分数, P_{B_1} 和 P_{A_1} 分别为水相产品中组分 B 和 A 的纯度, $\bar{P}_{A_{n+m}}$ 和 $\bar{P}_{B_{n+m}}$ 分别为有机相产品中组分 A 和 B 的纯度。

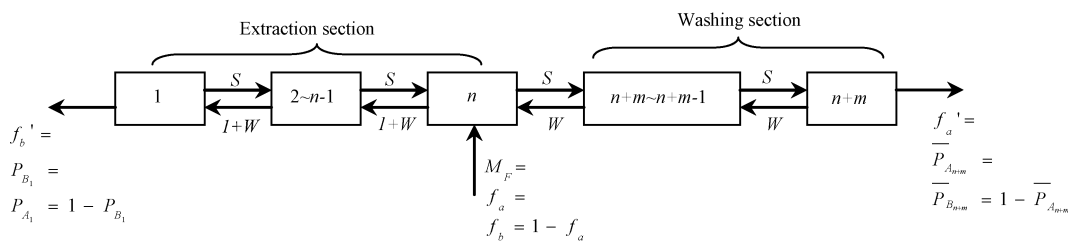


图1 两组分分馏串级萃取示意图

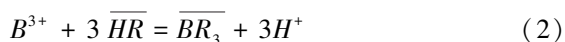
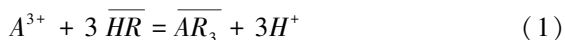
Fig. 1 Schematic diagram of fractional countercurrent extraction of two component

1.2 模型构建

根据两组分分馏串级萃取的特点,假定各级槽体内相比恒定,则在槽体各级萃取反应和流量达到平衡状态下,根据萃取反应平衡和质量守恒递推关系,构建基于两平衡的两组分分馏串级萃取递推数学模型。

1.2.1 萃取反应平衡关系

在 A 和 B 两组分分馏串级萃取某级萃取反应体系中, A 和 B 组分与萃取剂 $\overline{HR}$ 可发生式(1)和(2)所示的萃取反应:



A 、 B 两组分萃取总反应可由式(1)-式(2)得到,见式(3):

$$A^{3+} + \overline{BR_3} = \overline{AR_3} + B^{3+} \quad (3)$$

式(3)萃取反应平衡常数可表示为式(4):

$$K = \frac{[\overline{AR_3}] \times [B^{3+}]}{[A^{3+}] \times [\overline{BR_3}]} = \beta_{A/B} \quad (4)$$

式(4)中: $[\overline{AR_3}]$ 和 $[\overline{BR_3}]$ 分别为萃取平衡时有机相中 A 和 B 萃合物的浓度, $[A^{3+}]$ 和 $[B^{3+}]$ 分别为水相中 A 和 B 组分的平衡浓度,由文献[22]中 A 和 B 组分萃取分离因数 $\beta_{A/B}$ 的定义,显然,萃取反应的平衡常数 K 等同于 $\beta_{A/B}$, 当 $K > 1$ 时, A 为易萃组分,反之, B 为易萃组分,能实现 A 和 B 的萃取分离,而当 $K = 1$ 时, A 和 B 组分不能分离。

将式(4)左边分子和分母同乘以该级槽内水相体积 V_a 和有机相体积 V_o , 可得到式(5):

$$\frac{[\overline{AR_3}] \times V_o \times [B^{3+}] \times V_a}{[A^{3+}] \times V_a \times [\overline{BR_3}] \times V_o} = \beta_{A/B} \quad (5)$$

式(5)可转化为式(6):

$$\frac{n_{\overline{AR_3}} \times n_{B^{3+}}}{n_{A^{3+}} \times n_{\overline{BR_3}}} = \beta_{A/B} \quad (6)$$

式(6)中: $n_{\overline{AR_3}}$ 和 $n_{\overline{BR_3}}$ 分别为萃取平衡时有机相中 A 和 B 萃合物的摩尔数, $n_{A^{3+}}$ 和 $n_{B^{3+}}$ 分别为平衡时水相中 A 和 B 萃合物的摩尔数。将式(6) 左边分子和分母同乘以 $(n_{A^{3+}} + n_{B^{3+}})(n_{\overline{AR_3}} + n_{\overline{BR_3}})$, 可得到式(7):

$$\frac{\frac{n_{\overline{AR_3}}}{n_{\overline{AR_3}} + n_{\overline{BR_3}}} \times \frac{n_{B^{3+}}}{n_{A^{3+}} + n_{B^{3+}}}}{\frac{n_{A^{3+}}}{n_{A^{3+}} + n_{B^{3+}}} \times \frac{n_{\overline{BR_3}}}{n_{\overline{AR_3}} + n_{\overline{BR_3}}}} = \beta_{A/B} \quad (7)$$

定义:该级水相中 A 和 B 组分的纯度分别为 $P_A = n_{A^{3+}}/(n_{A^{3+}} + n_{B^{3+}})$ 和 $P_B = n_{B^{3+}}/(n_{A^{3+}} + n_{B^{3+}})$, 有机相中 A 和 B 组分的纯度分别为 $\overline{P_A} = n_{\overline{AR_3}}/(n_{\overline{AR_3}} + n_{\overline{BR_3}})$ 和 $\overline{P_B} = n_{\overline{BR_3}}/(n_{\overline{AR_3}} + n_{\overline{BR_3}})$, 则式(7)可表示为式(8):

$$(\overline{P_A} \times P_B)/(P_A \times \overline{P_B}) = \beta_{A/B} \quad \text{即:}$$

$$\overline{P_A} \times P_B = \beta_{A/B} \times P_A \times \overline{P_B} \quad (8)$$

a. 萃取段萃取平衡关系

在萃取段,从 1 级向后递推计算,往往已知槽体该级水相中 A 和 B 组分的纯度,即式(8)中 P_A 或 P_B 为已知量,对式(8)展开并合并同类项,可得到式(9):

$$(1 - \overline{P_B}) \times P_B = \beta_{A/B} \times P_A \times \overline{P_B} \quad \text{或}$$

$$\overline{P_A} \times P_B = \beta_{A/B} \times P_A \times (1 - \overline{P_A}) \quad (9)$$

转换式(9),可得到有机相中 A 和 B 组分纯度 ($\overline{P_B}$ 和 $\overline{P_A}$) 的求解方程,如式(10)所示:

$$\begin{cases} \overline{P_B} = \frac{P_B}{P_B + \beta_{A/B} \times P_A} \\ \overline{P_A} = \frac{\beta_{A/B} \times P_A}{P_B + \beta_{A/B} \times P_A} \end{cases} \quad (10)$$

可见,在萃取段,若已知某级水相中两组分纯度,可由式(10)计算出该级有机相中两组分的

纯度。

b. 洗涤段萃取平衡关系

在洗涤段,从 $n + m$ 级开始向前递推计算,往往已知槽体某级有机相中 A 和 B 组分的纯度,即式(8)中 $\overline{P_A}$ 或 $\overline{P_B}$ 为已知量,对式(8)展开并合并同类项,可得到式(11):

$$\begin{aligned} \overline{P_A} \times (1 - P_A) &= \beta'_{A/B} \times P_A \times \overline{P_B} \quad \text{或} \\ \overline{P_A} \times P_B &= \beta'_{A/B} \times (1 - P_B) \times \overline{P_B} \end{aligned} \quad (11)$$

转换式(11)可得到有机相中 A 和 B 组分的纯度 (P_A 和 P_B) 的求解方程,如式(12)所示:

$$\begin{cases} P_B = \frac{\beta'_{A/B} \times \overline{P_B}}{\beta'_{A/B} \times \overline{P_B} + \overline{P_A}} = \frac{\overline{P_B}}{\overline{P_B} + \overline{P_A}/\beta'_{A/B}} \\ P_A = \frac{\overline{P_A}}{\beta'_{A/B} \times \overline{P_B} + \overline{P_A}} = \frac{\overline{P_A}/\beta'_{A/B}}{\overline{P_B} + \overline{P_A}/\beta'_{A/B}} \end{cases} \quad (12)$$

可见,在洗涤段,若已知某级有机相中两组分的纯度,可由式(12)计算出该级水相中两组分的纯度。

1.2.2 质量守恒递推关系

a. 萃取段递推

由图 1 中萃取段可知:当槽体各级萃取反应和流量均达到平衡状态时,将第 1~ j 级视为一个整体,根据质量守恒定理,流入该整体某组分(i 组分, i 为 A 或 B) 的摩尔量应等于流出量,可用式(13)表示 i 组分的质量平衡关系。

$$(1 + W) \cdot P_{(i,j+1)} = S \cdot \bar{P}_{(i,j)} + M_1 \cdot P_{(i,1)} = S \cdot \bar{P}_{(i,j)} + f'_b \cdot P_{(i,1)} \quad (13)$$

转换式(13),可得到第 $j+1$ 级水相中 i 组分纯度的求解方程,如式(14):

$$P_{(i,j+1)} = (S \cdot \bar{P}_{(i,j)} + M_1 \cdot P_{(i,1)})/(1 + W) = (S \cdot \bar{P}_{(i,j)} + f'_b \cdot P_{(i,1)})/(1 + W) \quad (14)$$

式(13)和式(14)中, $(1 + W) \cdot P_{(i,j+1)}$ 为第 $j+1$ 级流入第 j 级的水相中 i 组分的摩尔量, $S \cdot \bar{P}_{(i,j)}$ 是从第 j 级流向第 $j+1$ 级的有机相中 i 组分的摩尔量, $M_1 \cdot P_{(i,1)}$ 为从第 1 级流出的水相出口产品中 i 组分的

摩尔量,其中第1级A和B的摩尔量 $M_1 = M_F \cdot f_b$ 。

可见,在萃取段,若已知某组分在有机相中的纯度,由式(14)可计算出下一级水相中该组分纯度。

b. 洗涤段递推

由图1中洗涤段可知:若将第 $n+m-j \sim n+m$ 级视为一个整体,同样,根据质量守恒定理,流入该整体 i 组分的摩尔量等于流出量,可用式(15)表示 i 组分的质量平衡关系。

$$S \cdot \bar{P}_{(i,n+m-j-1)} = W \cdot P_{(i,n+m-j)} + M_{n+m} \cdot \bar{P}_{(i,n+m)} = W \cdot P_{(i,n+m-j)} + f'_a \cdot \bar{P}_{(i,n+m)} \quad (15)$$

转换式(15)可得到第 $n+m-j-1$ 级有机相中 i 组分纯度的求解方程,如式(16):

$$\bar{P}_{(i,n+m-j-1)} = (W \cdot P_{(i,n+m-j)} + M_{n+m} \cdot \bar{P}_{(i,n+m)}) / S = (W \cdot P_{(i,n+m-j)} + f'_a \cdot \bar{P}_{(i,n+m)}) / S \quad (16)$$

式(13)和式(14)中, $S \cdot \bar{P}_{(i,n+m-j-1)}$ 为第 $n+m-j-1$ 级流入第 $n+m-j$ 级的有机相中 i 组分的摩尔量, $W \cdot P_{(i,n+m-j)}$ 是第 $n+m-j$ 级流向第 $n+m-j-1$ 级的水相中 i 组分的摩尔量, $M_{n+m} \cdot \bar{P}_{(i,n+m)}$ 是第 $n+m$ 级流出的有机相出口产品中 i 组分的摩尔量,其中 $M_{n+m} = M_F \cdot f'_a$ 。

可见,在洗涤段,若已知某组分在水相中的纯度,由式(16)可计算出前一级水相中该组分纯度。

利用萃取平衡和质量守恒关系式分别从萃取段从前向后和洗涤段从后向前递推计算过程中,利用式(17)所示的第 n 级质量守恒关系,可实现整个槽体的计算衔接。

$$S \cdot \bar{P}_{B_{n-1}} + W \cdot P_{B_{n+1}} + M_F \cdot f_b = (1 + W) \cdot P_{B_n} + S \cdot \bar{P}_{B_n} \quad (17)$$

综合以上推导和分析,式(10)、式(12)、式(14)、式(16)和式(17)构成了两组分分馏串级萃取递推数学模型。

2 模型应用

2.1 计算条件

假定分馏串级萃取采用水相进料方式,萃取段

和洗涤段各级萃取反应平衡常数(即A和B组分间分离因数 $\beta_{A/B}$ 和 $\beta'_{A/B}$)分别恒定,进料量、洗涤量水相和有机相产品纯度(P_{B_1} 和 $\bar{P}_{A_{n+m}}$)指标等已知条件如下:

(1)单位时间内进料量 $M_F = 1 \text{ mol}$ 。

(2)料液组成:A组分摩尔分数 $f_a = 0.4$,则B组分摩尔分数 $f_b = 1 - f_a = 0.6$ 。

(3)由文献[22]提供的极值公式 $W = 1/(\beta_{A/B}^k - 1)$,当 $k = 0.9$, $\beta_{A/B} = \beta'_{A/B} = 3.0$ 时,计算并令各级间洗涤量 $W = 0.6 \text{ mol}$,将第 $n+m$ 级视为一个整体,则由进出该整体A和B组分总量平衡关系可得萃取量 $S = W + f'_a \cdot M_F$ 。

(4)在水相出口级(第1级),B产品纯度控制指标 $P_{B_1} = 0.9999$,有机相出口级(第 $n+m$ 级),A产品纯度 $\bar{P}_{A_{n+m}} = 0.9999$ 。

2.2 计算结果

由以上已知条件,将整个槽体视为一个整体,根据式(18)所示的A和B组分质量守恒方程组,可求解得到两相产品出口分数 f'_b 和 f'_a ,并基于所构建的两组分分馏串级萃取递推数学模型计算各级(萃取段和洗涤段各35级)水相中两组分的纯度($P_{(B,j)}$ 、 $P_{(A,j)}$)和各级有机相中两组分的纯度($\bar{P}_{(A,j)}$ 、 $\bar{P}_{(B,j)}$),见表1和表2。

$$\begin{cases} f_b = f'_b \cdot P_{B_1} + f'_a \cdot \bar{P}_{B_{n+m}} \\ f_a = f'_b \cdot P_{A_1} + f'_a \cdot \bar{P}_{A_{n+m}} \end{cases} \quad (18)$$

由表1和表2计算结果可知,在萃取量、洗涤量及分离因数一定的前提下,达到一定的纯度指标,无论萃取段还是洗涤段,不是级数越大越好,过多的级数设置只能增加无效分离级,而起不到两组分分离的效果。可见,此时存在一个最优化级数的选取问题,即进料级位置的确定。

基于计算出的萃取段和洗涤段纯度分布数据,由式(17)确定最优进料级为17级,可得到最小的级数 n 和 m 之和为33级,此时槽体各级各组分纯度分布曲线,见图2和图3。

表 1 萃取段两组分纯度计算结果

Table 1 Results of purities of two components for extraction section				
Level j	$P_{(B,j)}$	$P_{(A,j)}$	$\bar{P}_{(B,j)}$	$\bar{P}_{(A,j)}$
1	0.9999	0.0001	0.9997	0.0003
2	0.9998	0.0002	0.9993	0.0007
3	0.9995	0.0005	0.9986	0.0014
4	0.9991	0.0009	0.9973	0.0027
5	0.9983	0.0017	0.9949	0.0051
6	0.9968	0.0032	0.9903	0.0097
7	0.9939	0.0061	0.9820	0.0180
8	0.9887	0.0113	0.9668	0.0332
9	0.9792	0.0208	0.9402	0.0598
10	0.9626	0.0374	0.8955	0.1045
11	0.9347	0.0653	0.8266	0.1734
12	0.8916	0.1084	0.7327	0.2673
13	0.8329	0.1671	0.6243	0.3757
14	0.7652	0.2348	0.5206	0.4794
15	0.7004	0.2996	0.4379	0.5621
16	0.6487	0.3513	0.3810	0.6190
17	0.6131	0.3869	0.3456	0.6544
18	0.5910	0.4090	0.3251	0.6749
19	0.5781	0.4219	0.3136	0.6864
20	0.5709	0.4291	0.3073	0.6927
21	0.5670	0.4330	0.3039	0.6961
22	0.5649	0.4351	0.3020	0.6980
23	0.5637	0.4363	0.3011	0.6989
24	0.5631	0.4369	0.3005	0.6995
25	0.5628	0.4372	0.3003	0.6997
26	0.5626	0.4374	0.3001	0.6999
27	0.5625	0.4375	0.3000	0.7000
28	0.5625	0.4375	0.3000	0.7000
29	0.5624	0.4376	0.3000	0.7000
30	0.5624	0.4376	0.2999	0.7001
31	0.5624	0.4376	0.2999	0.7001
32	0.5624	0.4376	0.2999	0.7001
33	0.5624	0.4376	0.2999	0.7001
34	0.5624	0.4376	0.2999	0.7001
35	0.5624	0.4376	0.2999	0.7001

表 2 洗涤段两组分纯度计算结果

Table 2 Results of purities of two components for scrubbing section				
Level j	$P_{(B,j)}$	$P_{(A,j)}$	$\bar{P}_{(B,j)}$	$\bar{P}_{(A,j)}$
1	0.6668	0.3332	0.4001	0.5999
2	0.6668	0.3332	0.4001	0.5999
3	0.6668	0.3332	0.4001	0.5999
4	0.6668	0.3332	0.4001	0.5999
5	0.6668	0.3332	0.4001	0.5999
6	0.6668	0.3332	0.4001	0.5999
7	0.6667	0.3333	0.4001	0.5999
8	0.6667	0.3333	0.4000	0.6000
9	0.6666	0.3334	0.4000	0.6000
10	0.6665	0.3335	0.3998	0.6002
11	0.6663	0.3337	0.3996	0.6004
12	0.6659	0.3341	0.3992	0.6008
13	0.6652	0.3348	0.3984	0.6016
14	0.6640	0.3360	0.3971	0.6029
15	0.6617	0.3383	0.3947	0.6053
16	0.6577	0.3423	0.3904	0.6096
17	0.6505	0.3495	0.3829	0.6171
18	0.6381	0.3619	0.3702	0.6298
19	0.6169	0.3831	0.3492	0.6508
20	0.5820	0.4180	0.3170	0.6830
21	0.5282	0.4718	0.2717	0.7283
22	0.4528	0.5472	0.2162	0.7838
23	0.3602	0.6398	0.1580	0.8420
24	0.2633	0.7367	0.1064	0.8936
25	0.1773	0.8227	0.0670	0.9330
26	0.1116	0.8884	0.0402	0.9598
27	0.0669	0.9331	0.0233	0.9767
28	0.0388	0.9612	0.0133	0.9867
29	0.0220	0.9780	0.0075	0.9925
30	0.0123	0.9877	0.0041	0.9959
31	0.0068	0.9932	0.0023	0.9977
32	0.0037	0.9963	0.0012	0.9988
33	0.0020	0.9980	0.0007	0.9993
34	0.0010	0.9990	0.0003	0.9997
35	0.0004	0.9996	0.0001	0.9999

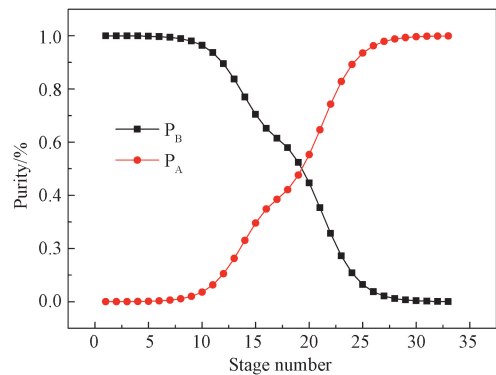


图 2 水相中两组分纯度分布

Fig. 2 Distribution of purities of two components in aqueous phase

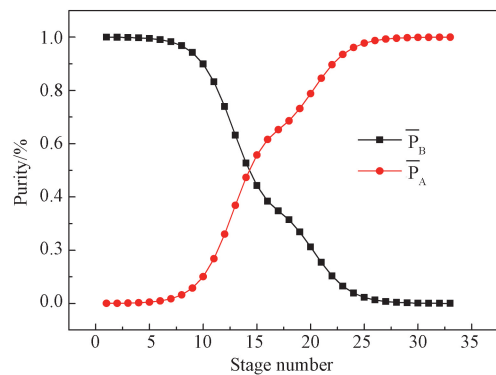


图 3 有机相中两组分纯度分布

Fig. 3 Distribution of purities of two components in organic phase

由图 2 和图 3 结果可知,经递推模型确定的最优化级数方案既能满足产品纯度指标要求,也未出现无效分离级,直观显示了各级组分纯度分布情况,且与实际情况吻合,从而为优化设计两组分分馏串级萃取工艺参数提供理论指导。

3 结论

1. 针对两组分分馏串级萃取的特点,从萃取平衡反应的本质出发,假定各级组分间萃取反应和级间流量达到平衡状态,基于萃取反应平衡和质量守恒递推关系,构建了两组分分馏串级萃取递推数学模型。

2. 基于所构建模型,计算了某工艺条件,揭示

了各级平衡相中两组分的纯度分布规律,确定了最优化级数方案,绘制了纯度分布曲线,为优化设计两组分分馏串级萃取工艺参数提供了理论指导。

参考文献:

[1] L A.Liquid-Liquid Extraction [M]. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1959.

[2] 罗振华.溶剂萃取分离基本计算[J].化学通报,1977,(2):33-37.

Luo Z H.Basic calculation of solvent extraction and separation[J].Chemistry, 1977,(2):33-37.

[3] 孙元洪,刘景心,辛世烜,等.镧与镨钕的环烷酸萃取分离[J].化学通报,1978,(5):18.

Sun Y H, Liu J X, Xin S X, et al.The naphthenic acid extraction separation of La and Nd, Pr [J]. Chemistry, 1978,(5):18.

[4] 黄仲贤,徐息良,胡建国.环烷酸及其对稀土元素萃取的研究(II)—轻稀土元素的系统分离及高纯氧化镧的制备[J].复旦学报(自然科学版),1979,18(3):8-14.

Huang Z X, Xu X L, Hu J G. An investigation of naphthenic acid and its extratcion behaviors to rare earth elements(II)-A systematical separation of lighter rare earth elements [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 1979, 18(3):8-14.

[5] 罗振华.论串级萃取影响因素和最优工艺条件[J].有色金属(冶炼部分),1979,(2):20-27.

Luo Z H. Written discussions on influencing factors and optimum conditions of countercurrent extraction [J]. Non-ferrous Metals(Extractive Metallurgy), 1979, (2):20-27.

[6] 徐光宪.串级萃取理论—最优化方程及其应用[J].稀土与铈,1978,(2):1-48.

Xu G X.Theory of current extraction-optimization equation and its application [J]. Chinese Rare Earths, 1978, (2):1-48.

[7] 徐光宪.串级萃取理论 II,纯度对数图解法[J].北京大学学报(自然科学版),1978,14(1):67-75.

Xu G X.Theory of current extraction II, determination of the number of stages by the method of log putity plot [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,

- 1978,14(1): 67-75.
- [8] 李标国, 徐献瑜, 徐光宪. 串级萃取理论 III 逆流萃取动态平衡的数学模型[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1980, 16(2): 66-84.
- Li B G, Xu X Y, Xu G X. Theory of current extraction III a mathematical model for the dynamic equilibrium of counter current extraction[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1980, 16(2): 66-84.
- [9] 吴声, 廖春生, 贾江涛, 等. 多组分多出口稀土串级萃取静态优化设计研究(I) 静态设计算法[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(1): 17-21.
- Wu S, Liao C S, Jia J T, et al. Static design for multiple components and multiple outlets rare earth countercurrent extraction (I): Algorithm of static design[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2004, 22(1): 17-21.
- [10] 钟盛华. 串级萃取最低成本优化萃取比方程[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 1131-1135.
- Zhong S H. Equations of optimized extraction factor for minimum production cost in counter current extraction [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(6): 1131-1135.
- [11] 李标国, 严纯华, 高松, 等. 串级萃取理论的新进展—三出口萃取工艺的优化设计实例[J]. 稀土, 1986, 6(8): 8-14.
- Li B G, Yan C H, Gao S, et al. Development of the theory of countercurrent extraction—instance of optimal design for three-exit extraction separation techniques [J]. Chinese Rare Earths, 1986, 6(8): 8-14.
- [12] 徐光宪, 李标国, 严纯华. 串级萃取理论的进展及其在稀土工艺中的应用[J]. 稀土, 1985, 6(1): 56-67.
- Xu G X, Li B G, Yan C H. Development of the theory of countercurrent extraction and its application in the technology of rare-earth [J]. Chinese Rare Earths, 1985, 6(1): 56-67.
- [13] 李标国, 严纯华, 乔书平, 等. 串级萃取理论 VIII—三组份体系动态过程的研究[J]. 中国稀土学报, 1985, 3(3): 20-26.
- Li B G, Yan C H, Qiao S P, et al. Theory of current extraction VIII—dynamic equilibrium in three [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 1985, 3(3): 20-26.
- [14] 吴声, 廖春生, 贾江涛, 等. 多组份多出口稀土串级萃取静态优化设计研究(II) 静态程序设计及动态仿真验证[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(2): 171-176.
- Wu S, Liao C S, Jia J T, et al. Static design for multiple components and multiple outlets rare earth countercurrent extraction (II) static design and its verification [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2004, 22(2): 171-176.
- [15] 王振华. 稀土串级萃取分离过程的数学模型和计算机仿真[J]. 中国稀土学报, 2002, 20(专辑): 132-135.
- Wang Z H. Mathematical model for rare earth solvent extraction separation and its computer simulation [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2002, 20 (Spec. Issue): 132-135.
- [16] 钟学明. 多组分稀土串级萃取有效分离系数的理论分析[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(10): 1926-1930.
- Zhong X M. Theoretical analysis of effective separation factor for multi-component rare earths in countercurrent extraction [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(10): 1926-1930.
- [17] 贾文君, 柴天佑. 稀土串级萃取分离过程的双线性模型及其参数辨识[J]. 控制理论与应用, 2007, 23(5): 717-723.
- Jia W J, Chai T Y. Bilinear model of rare earth cascade extraction process and its parameter identification [J]. Control Theory & Applications, 2007, 23(5): 717-723.
- [18] 白彦, 李德谦. 稀土串级萃取过程中“无效区”现象的探究[J]. 稀土, 2009, 30(6): 1-7.
- Bai Y, Li D Q. Studies on the ineffective separation zone in the extraction cascade for separating rare earths [J]. Chinese Rare Earths, 2009, 30(6): 1-7.
- [19] 崔小震, 陈月华, 任萍, 等. 独居石酸溶渣资源综合回收绿色循环工艺[J]. 稀土, 2015, 36(3): 61-66.
- Cui X Z, Chen Y H, Ren P, et al. Recycling of residual slag from monazite processing [J]. Chinese Rare Earths, 2015, 36(3): 61-66.
- [20] 肖燕飞, 黄小卫, 冯宗玉, 等. 离子吸附型稀土矿绿色提取技术研究进展[J]. 稀土, 2015, 36(3): 109-115.
- Xiao Y F, Huang X W, Feng Z Y, et al. Progress in the

green extraction technology for rare earth from ion-adsorption type rare earths ore[J].Chinese Rare Earths, 2015,36(3): 109-115.

[21] 彭俊, 沈裕军, 刘强, 等. 风化壳淋积型稀土矿选择性浸出新工艺研究[J].稀土, 2016,37(1): 34-38.

Peng J, Shen Y J, Liu Q, et al. The new leaching technology of weathered crust elution-deposited rare earth ores [J]. Chinese Rare Earths, 2016, 37(1): 34-38.

[22] 徐光宪. 稀土:上册[M]. 北京: 冶金工业出版社. 2002.

Xu G X. Rare Earths(Volume One) [M]. Beijing: Press of Metallurgy Industry. 2002.

A Recursion Mathematical Model of Two-component Countercurrent
Extraction System Based on Two Equilibriums

LI Ming-zhou¹, TONG Chang-ren^{1}, HUANG Jin-di²*

(1. School of Metallurgy & Chemistry Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;
2. School of Software, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract:For characteristics of two components fractionation cascade extraction, the equilibrium of the extracting reactions and the essence of conservation of material transfer were used as starting points, the balance of extraction components and all levels flow value were considered as presupposition. A two components cascade extraction recursion mathematical model based on the equilibrium of extraction and the recursion relation of mass conservation law was established. The recursion model was used to calculate under the certain condition of a process. The results not only reveal the principle of purity distribution of the two components on all levels balanced phase but also determined the optimization levels scheme and draw curves of purity distribution. Lastly, the calculations also provide theory guards for optimizing and designing the two components cascade extraction technological parameters.

Key words:two components; cascade extraction; extraction equilibrium; mass conservation; recursion model