

# 存在损耗的多组分级联的改进模型

谢全新<sup>1</sup>, G. A. Sulaberidze<sup>2</sup>, 吴建军<sup>1</sup>, 王黎明<sup>1</sup>

(1. 核工业理化工程研究院, 天津 300180; 2. 莫斯科工程物理学院, 莫斯科 115409)

**摘要:** 本工作建立了损耗同时存在于级联各级供料流、精料流与贫料流中的多组分级联的数学模型, 提出了求解该类级联方程的数值方法。各级组分分流比不变的多组分级联称为准理想级联, 得到了计算存在损耗的准理想级联中相对产品流、相对贫料流、级联中总物质流量以及产品流和贫料流中组分丰度的解析表达式。

**关键词:** 多组分同位素; 分离; 准理想级联; 损耗

中图分类号: TL251.01

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)08-0750-06

## Improved Model of Multicomponent Cascade With Losses

XIE Quan-xin<sup>1</sup>, G. A. Sulaberidze<sup>2</sup>, WU Jian-jun<sup>1</sup>, WANG Li-ming<sup>1</sup>

(1. Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China;

2. Moscow Engineering Physics Institute, Moscow 115409, Russian)

**Abstract:** A mathematical model was established for multicomponent separation cascades with losses of working substances in the feed flows, enriched flows and depleted flows of cascade stages. A numerical calculation method to solve the cascade equation was presented. Analytical solution to the cascade equation was obtained in the case of quasi-ideal cascades, that is, the cascades with a constant partial cut at all stages. Formulas were given for the calculation of the relative product and waste flows, the total substance flow, and the component concentrations in the product and waste flows of a quasi-ideal cascade with losses.

**Key words:** multicomponent isotope; separation; quasi-ideal cascade; loss

稳定同位素及其化合物的应用领域和生产规模日益扩大, 与此同时, 用于稳定同位素生产的级联理论与实验研究不断发展与完善。在现存稳定化学元素中, 大部分具有 3 种或 3 种以上同位素组分, 这类元素的同位素被称为多组分同位素, 分离多组分同位素的级联习惯上称

为多组分级联。在某些多组分同位素分离工艺中, 如分离镅、钼、镍、钨等同位素, 在分离过程中存在工作物质的损耗, 在这种情况下的级联设计和计算更为复杂。存在损耗的级联理论最初是由柯恩<sup>[1]</sup>创建的, 其理论以理想级联为模型, 主要针对双组分同位素分离。后来进行了

收稿日期: 2008-04-10; 修回日期: 2008-05-28

基金项目: 核工业理化工程研究院留学教育基金资助项目; 核工业理化工程研究院科研基金资助项目

作者简介: 谢全新(1974—), 男, 湖南新化人, 博士研究生, 同位素分离专业

存在损耗的多组分同位素分离级联<sup>[2-5]</sup>的理论研究。在所有上述研究工作中仅考虑了在分离级的供料流中存在损耗的情况,而实践表明,在分离级的精料流和贫料流中均可能存在损耗。本文建立了在供料流、精料流和贫料流中同时存在损耗的实用性更广的多组分级联模型。

### 1 级联方程

级联中物质运输规律是级联特性研究的基础和前提,而物质运输规律通常借助于合理的数学模型来描述。为使理论更具一般性,将研究如图1所示的存在工作物质损耗的多组分逆流型级联。

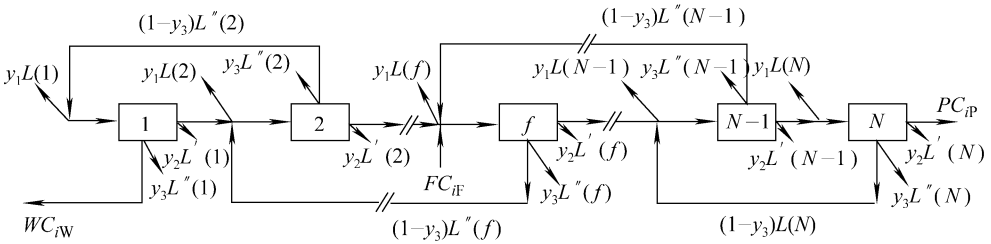


图1 存在损耗的逆流型级联

Fig. 1 Counter current cascade with losses

级联具有供料流  $F$ , 产品流  $P$  和贫料流  $W$ , 相应的组分丰度为  $C_{iF}, C_{iP}, C_{iW}$  ( $i=1, \dots, m, m$  为同位素混合物的组分数), 相应的流量为  $F, P, W$ 。级联共有  $N$  级, 第  $f$  级为供料级, 第1级到第  $f-1$  级为级联贫化段, 第  $f$  到第  $N$  级为级联浓缩段, 在级联内部的  $s$  分离级, 流量为  $L(s)$  的供料流流入分离级, 其同位素组分丰度为  $C_i(s)$ 。从分离级流出两股流, 即流量为  $L'(s)$  的精料流 (或轻馏分) 和流量为  $L''(s)$  的贫料流 (或重馏分), 相应的组分丰度为  $C'_i(s), C''_i(s)$ 。级的分流比  $\theta(s)$ 、组分流  $L_i(s), L'_i(s), L''_i(s)$  为:

$$\theta(s) = \frac{L'(s)}{L(s)} \quad (1)$$

$$L_i(s) = C_i(s)L(s), L'_i(s) = C'_i(s)L'(s), L''_i(s) = C''_i(s)L''(s) \quad (2)$$

定义  $g_i(s)$  为第  $i$  组分在  $s$  级的精料流与贫料流之比, 即:

$$g_i(s) = \frac{L'_i(s)}{L''_i(s)} \quad (3)$$

则有<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} g_i(s) = \frac{\alpha_{ik}(s)[\beta_{ik}(s) - 1]}{\alpha_{ik}(s) - 1} & i \neq k \\ g_k(s) = \frac{\beta_{ik}(s) - 1}{\beta_{ik}(s)[\alpha_{ik}(s) - 1]} & i = k \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $k$  为关键同位素的组分序数;  $\alpha_{ik}(s), \beta_{ik}(s)$  为第  $i, k$  两种组分在第  $s$  级的精料相对分离系

数与贫料相对分离系数。

由式(4)可得:

$$\frac{g_i(s)}{g_k(s)} = \alpha_{ik}(s)\beta_{ik}(s) = q_{ik}(s) \quad (5)$$

其中:  $q_{ik}(s)$  为第  $i, k$  两种组分在第  $s$  级的相对全分离系数。对于大多数基于分子动力学的分离方法, 相对全分离系数  $q_{ik}$ <sup>[2-10]</sup> 为:

$$q_{ik} = q_0^{M_i - M_k} \quad (6)$$

其中:  $q_0$  为基本全分离系数;  $M$  为组分的摩尔质量。

假设损耗同时存在于各级的供料流, 精料流与贫料流中, 且工作物质的损耗量正比于物质流量(图1), 即:

$$\begin{aligned} \Delta L(s) &= y_1 L(s), \Delta L'(s) = y_2 L'(s), \\ \Delta L''(s) &= y_3 L''(s) \end{aligned} \quad (7)$$

其中:  $y_1, y_2, y_3$  为损耗系数, 假设它们在级联各级中保持不变。

在稳态条件下, 对于任意分离级  $s(s \neq f)$  存在以下组分流守恒方程:

$$(1 - y_2)L'_i(s - 1) + (1 - y_3)L''_i(s + 1) - (1 + y_1)L_i(s) = 0 \quad (8)$$

考虑到:

$$L''_i = \frac{L'_i}{g_i}, L_i = \frac{g_i + 1}{g_i} L'_i \quad (9)$$

式(8)可表达为:

$$\begin{aligned} \frac{1 - y_3}{g_i(s + 1)} L'_i(s + 1) - \frac{g_i(s) + 1}{g_i(s)} (1 + y_1) L'_i(s) + \\ (1 - y_2) L'_i(s - 1) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

对于  $s=2,3,\dots,N-1$ ,描述级联各级精料组分流的函数  $L'_i(s)$  必须满足式(10),同时,式(10)在级联两端以及供料点具有下列边界条件:

$$\begin{cases} L'_i(0) = L'_i(N+1) = 0 \\ L'_i(1) = g_i(1)WC_{iW}/(1-y_3) \\ L'_i(N) = PC_{iP}/(1-y_2) \\ (1-y_2)L'_i(f-1) + \frac{1-y_3}{g_i(f)}L'_i(f+1) - \frac{g_i(f)+1}{g_i(f)}(1+y_1)L'_i(f) + FC_{iF} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式(10)是损耗同时存在于各级供料流、精料流和贫料流情况下的多组分级联的组分流运输方程,欲研究这种级联的分离特性,必须求解式(10)。

## 2 级联方程的数值求解

为求解级联方程(10),引入函数  $L'_{wi}(s)$  和  $L'_{pi}(s)$  分别用来表示  $L'_i(s)$  在级联段  $s=0,\dots,f$  和级联段  $s=f-1,\dots,N+1$  的值,即:

$$\begin{aligned} L'_{wi}(s) &= \begin{cases} 0 & s=0 \\ L'_i(s) & s=1,\dots,f \end{cases} \quad (12) \\ L'_{pi}(s) &= \begin{cases} L'_i(f-1) + FC_{iF} & s=f-1 \\ L'_i(s) & s=f,\dots,N \\ 0 & s=N+1 \end{cases} \quad (13) \end{aligned}$$

式(12)、(13)具有下列边界条件:

$$\begin{cases} L'_{wi}(0) = L'_{pi}(N+1) = 0 \\ L'_{wi}(f-1) + FC_{iF} = L'_{pi}(f-1) \\ L'_{wi}(f) = L'_{pi}(f) \end{cases} \quad (14)$$

级联精料流量  $P$ 、贫料流量  $W$  及其相应的组分丰度  $C_{iP}$ 、 $C_{iW}$  与函数  $L'_{wi}(s)$  及  $L'_{pi}(s)$  的关系可表示为:

$$\begin{cases} PC_{iP} = L'_{pi}(N)(1-y_2) \\ WC_{iW} = (1-y_3)L'_{wi}(1)/g_i(1) \end{cases} \quad (15)$$

根据式(5)、(6),在  $q_0$  已知的情况下,只要给定 1 个  $g_k$  值,就可确定其它  $g_i$  值;或已知  $\alpha_{ik}$ 、 $\beta_{ik}$ ,由式(4)来确定  $g_i$  值。 $g_i$  确定之后,可按照下列步骤对存在损耗的多组分级联进行计算。

1) 根据下面的递推关系计算出比值

$$\frac{L'_{wi}(s)}{L'_{wi}(1)} \text{ 和 } \frac{L'_{pi}(s)}{L'_{pi}(N)}。$$

当  $s=1,\dots,f-1$  时,

$$\begin{aligned} \frac{L'_{wi}(s+1)}{L'_{wi}(1)} &= \\ g_i(s+1) \left(1 + \frac{1}{g_i(s)}\right) \frac{1+y_1}{1-y_3} \cdot \frac{L'_{wi}(s)}{L'_{wi}(1)} - \\ g_i(s+1) \frac{1-y_2}{1-y_3} \cdot \frac{L'_{wi}(s-1)}{L'_{wi}(1)} \end{aligned} \quad (16)$$

当  $s=f,\dots,N$  时,

$$\begin{aligned} \frac{L'_{pi}(s-1)}{L'_{pi}(N)} &= \left(1 + \frac{1}{g_i(s)}\right) \frac{1+y_1}{1-y_2} \cdot \frac{L'_{pi}(s)}{L'_{pi}(N)} - \\ \frac{1}{g_i(s+1)} \cdot \frac{1-y_3}{1-y_2} \cdot \frac{L'_{pi}(s+1)}{L'_{pi}(N)} \end{aligned} \quad (17)$$

2) 利用上面得到的  $\frac{L'_{wi}(f-1)}{L'_{wi}(1)}$ 、 $\frac{L'_{wi}(f)}{L'_{wi}(1)}$ 、

$\frac{L'_{pi}(f-1)}{L'_{pi}(N)}$ 、 $\frac{L'_{pi}(f)}{L'_{pi}(N)}$  及边界条件(14)计算出  $L'_{wi}(1)$  和  $L'_{pi}(N)$ ,然后可求出  $L'_{wi}(s)$  和  $L'_{pi}(s)$ 。

3) 根据式(15),利用丰度归一化条件

$$\sum_{i=1}^m C_{iP} = \sum_{i=1}^m C_{iW} = 1, \text{ 可计算 } P, W \text{ 以及 } C_{iP} \text{ 和 } C_{iW}:$$

$$P = \sum_{i=1}^m L'_{pi}(N)(1-y_2) \quad (18)$$

$$W = \sum_{i=1}^m (1-y_3)L'_{wi}(1)/g_i(1) \quad (19)$$

$$C_{iP} = \frac{1}{P}(1-y_2)L'_{pi}(N) \quad (20)$$

$$C_{iW} = \frac{1}{W} \cdot \frac{1}{g_i(1)}(1-y_3)L'_{wi}(1) \quad (21)$$

4) 利用所得到的  $L'_i(s)$ ,各级供料流量  $L(s)$  和组分丰度  $C_i(s)$  在级联内部的分布以及级联的总的物质流量  $\sum L$  根据下式确定:

$$L(s) = \sum_{i=1}^m L_i(s) = \sum_{i=1}^m \frac{g_i(s)+1}{g_i(s)} L'_i(s) \quad (22)$$

$$C_i(s) = \frac{g_i(s)+1}{g_i(s)} \cdot \frac{L'_i(s)}{L(s)} \quad (23)$$

$$\sum L = \sum_{s=1}^N L(s) = \sum_{s=1}^N \left( \sum_{i=1}^m \frac{g_i(s)+1}{g_i(s)} L'_i(s) \right) \quad (24)$$

上述存在损耗的多组分级联具有普遍性,不受级联形式的限制。在某些情况下,可得到式(10)的解析解,准理想级联就是特例之一。

### 3 准理想级联的解析解

多组分级联的设计与优化通常以某种模型级联为基础,在多组分同位素分离理论中在分离系数较小的情况下的模型级联称 Q 级联<sup>[11]</sup>,而在大分离系数情况下的模型级联称作准理想级联<sup>[2, 4, 6-8, 10]</sup>。准理想级联是组分分流比  $L'_i/L_i$  在各级中保持不变的多组分级联。因此,对于准理想级联,  $g_i = L'_i/L''_i$  为常量。

另一个重要的概念是丰度比匹配级联 (matched abundance ratio cascade)<sup>[2-3, 6, 8-10]</sup>, 简称 M 级联,它是准理想级联的一种特殊情形,满足在级的汇合点处被选定的两组分(如第  $i$  和第  $k$  组分)的相对丰度相等,即:

$$R'_{ik}(s-1) = R_{ik}(s) = R''_{ik}(s+1) \quad (25)$$

其中:  $R_{ik} = C_i/C_{kj}$ ;  $R'_{ik} = C'_i/C'_{kj}$ ;  $R''_{ik} = C''_i/C''_{kj}$ 。

在这种情况下,  $g_i$  可用基本全分离系数  $q_0$  以及组分摩尔质量<sup>[2-4, 6, 8-9]</sup>来表达:

$$g_i = q_0^{(M^* - M_i)} \quad (26)$$

$$M^* = (M_i + M_k)/2 \quad (27)$$

由于在准理想级联中,  $g_i$  是常量,因此,式(10)是以  $L'_i(s)$  为函数的常系数二阶差分方程,其解可表示为:

$$L'_i(s) = A_i \omega_{1i}^s + B_i \omega_{2i}^s \quad (28)$$

其中:  $A_i, B_i$  为常数,由具体的边界条件来确定,  $\omega_{1i}, \omega_{2i}$  是下面二次方程的解:

$$\begin{aligned} (1 - y_3) \omega_i^2 - (g_i + 1)(1 + y_1) \omega_i + \\ g_i(1 - y_2) = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

即:

$$\begin{cases} \omega_{1i} = [(g_i + 1)(1 + y_1) + \\ \sqrt{((g_i + 1)(1 + y_1))^2 - 4(1 - y_3)(1 - y_2)g_i}] / \\ 2(1 - y_3) \\ \omega_{2i} = [(g_i + 1)(1 + y_1) - \\ \sqrt{((g_i + 1)(1 + y_1))^2 - 4(1 - y_3)(1 - y_2)g_i}] / \\ 2(1 - y_3) \end{cases} \quad (30)$$

利用边界条件可得到式(10)在级联贫化段 ( $s=1, 2, \dots, f-1$ ) 以及浓缩段 ( $s=f, \dots, N$ ) 的解,为:

$$L'_i(s) = \frac{g_i WC_{iW}}{(1 - y_3)(\omega_{2i} - \omega_{1i})} (\omega_{2i}^s - \omega_{1i}^s) \quad (31)$$

$$L'_i(s) = \frac{PC_{iP} \omega_{2i} \omega_{1i}}{(1 - y_2)(\omega_{2i} - \omega_{1i})} (\omega_{1i}^{s-N-1} - \omega_{2i}^{s-N-1}) \quad (32)$$

在存在工作物质损耗的多组分同位素分离级联计算中,通常需要计算级联中的总物质流量、物质损耗量以及级联的产品丰度和贫料丰度,下面将求解这些参量。

分别对式(31)、(32)在相应的级联段求和并利用式(7)、(9),可求得第  $i$  组分在整个级联中的总物质损耗  $Loss_i$ , 即:

$$\begin{aligned} Loss_i = -PC_{iP} \left[ \frac{(\omega_{2i} - 1)(1 - \omega_{1i}^{f-N-1})}{\omega_{2i} - \omega_{1i}} - \frac{(\omega_{1i} - 1)(1 - \omega_{2i}^{f-N-1})}{\omega_{2i} - \omega_{1i}} \right] - \\ WC_{iW} \left[ \frac{(\omega_{2i} - 1)(\omega_{1i} - \omega_{1i}^f)}{\omega_{2i} - \omega_{1i}} - \frac{(\omega_{1i} - 1)(\omega_{2i} - \omega_{2i}^f)}{\omega_{2i} - \omega_{1i}} \right] \end{aligned} \quad (33)$$

整个级联的组分质量守恒方程为:

$$FC_{iF} = PC_{iP} + WC_{iW} + Loss_i \quad (34)$$

将式(33)代入式(34),组分质量守恒方程变为:

$$\begin{aligned} FC_{iF} = PC_{iP} \left[ \frac{(\omega_{2i} - 1)\omega_{1i}^{f-N-1}}{\omega_{2i} - \omega_{1i}} - \frac{(\omega_{1i} - 1)\omega_{2i}^{f-N-1}}{\omega_{2i} - \omega_{1i}} \right] + \\ WC_{iW} \left[ \frac{(\omega_{2i} - 1)\omega_{1i}^f}{\omega_{2i} - \omega_{1i}} - \frac{(\omega_{1i} - 1)\omega_{2i}^f}{\omega_{2i} - \omega_{1i}} \right] \end{aligned} \quad (35)$$

将式(31)、(32)代入式(11)的级联进料点处的边界条件中,可得到以下关系式:

$$\begin{aligned} FC_{iF} = WC_{iW} \frac{\omega_{1i} \omega_{2i}}{\omega_{1i} - \omega_{2i}} (\omega_{1i}^{-1} - \omega_{2i}^{-1}) + \\ PC_{iP} \frac{\omega_{1i} \omega_{2i}}{\omega_{1i} - \omega_{2i}} (\omega_{1i}^{f-N-2} - \omega_{2i}^{f-N-2}) \end{aligned} \quad (36)$$

由式(35)、(36)求得:

$$PC_{iP} = \frac{\omega_{2i}^{-f} - \omega_{1i}^{-f}}{\omega_{2i}^{-N-1} - \omega_{1i}^{-N-1}} FC_{iF} \quad (37)$$

$$WC_{iW} = \frac{\omega_{2i}^{N+1-f} - \omega_{1i}^{N+1-f}}{\omega_{2i}^{N+1} - \omega_{1i}^{N+1}} FC_{iF} \quad (38)$$

考虑到  $\sum_{i=1}^m C_{iP} = 1, \sum_{i=1}^m C_{iW} = 1$ , 由式(37)、(38)可得:

$$\frac{P}{F} = \sum_{j=1}^m \frac{\omega_{2j}^{-f} - \omega_{1j}^{-f}}{\omega_{2j}^{-N-1} - \omega_{1j}^{-N-1}} C_{iF} \quad (39)$$

$$\frac{W}{F} = \sum_{j=1}^m \frac{\omega_{2j}^{N+1-f} - \omega_{1j}^{N+1-f}}{\omega_{2j}^{N+1} - \omega_{1j}^{N+1}} C_{iF} \quad (40)$$

$$C_{iP} = \frac{\omega_{2i}^{-f} - \omega_{1i}^{-f}}{\omega_{2i}^{-N-1} - \omega_{1i}^{-N-1}} C_{iF} / \sum_{j=1}^m \frac{\omega_{2j}^{-f} - \omega_{1j}^{-f}}{\omega_{2j}^{-N-1} - \omega_{1j}^{-N-1}} C_{iF} \quad (41)$$

$$C_{iW} = \frac{\omega_{2i}^{N+1-f} - \omega_{1i}^{N+1-f}}{\omega_{2i}^{N+1} - \omega_{1i}^{N+1}} C_{iF} / \sum_{j=1}^m \frac{\omega_{2j}^{N+1-f} - \omega_{1j}^{N+1-f}}{\omega_{2j}^{N+1} - \omega_{1j}^{N+1}} C_{iF} \quad (42)$$

对式(31)、(32)在相应的级联段求和并利用关系式(9)得到存在损耗的准理想级联中的总的物质流量为:

$$\sum L = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{g_i + 1}{1 - y_3} \left[ \frac{PC_{iP}(1 - \omega_{1i}^{f-N-1}) + WC_{iW}(1 - \omega_{1i}^f)}{(\omega_{1i} - 1)(\omega_{2i} - 1)} \right] \right\} \quad (43)$$

如果给定参量  $g_i, f, N, y_1, y_2, y_3, C_{iF}$  的值,根据式(39)~(42)可计算出产品流和贫料流的相对流量  $W/F, P/F$ ,产品流和贫料流中的组分丰度  $C_{iP}, C_{iW}$ ,利用式(31)、(32)及式(1)、(9)能确定级联各级中物质流量  $L(s)$ 、组分丰度  $C_i(s)$  和级的分流比  $\theta(s)$ ,由式(43)可计算级联中的总的物质流量  $\sum L$ 。

计算相对产品流量、相对贫料流量及其组分丰度的式(39)~(42)与损耗只存在于供料流情况下的<sup>[3-4]</sup>在形式上完全一样,两者的差别通过式(29)的  $\omega_{1i}, \omega_{2i}$  来体现。此外,在没有损耗的情况下( $y_1 = y_2 = y_3 = 0$ ),式(39)~(42)简化为不存在损耗的准理想级联的计算式<sup>[6]</sup>,证明了本文所得结论的普遍性和准确性。

#### 4 准理想级联的算例分析

根据上面得到的准理想级联的解析关系,对钨同位素分离进行了级联计算。工作物质为  $WF_6$ , 供料丰度为钨同位素的天然丰度,即  $C_{1F}(^{180}WF_6) = 0.0014, C_{2F}(^{182}WF_6) = 0.2646, C_{3F}(^{183}WF_6) = 0.1440, C_{4F}(^{184}WF_6) = 0.3060, C_{5F}(^{186}WF_6) = 0.2840$ ,基本全分离系数  $q_0 = 1.16306$ <sup>[3]</sup>。目标同位素为  $^{180}W$ ,因此,式(27)中的  $n = 1, k = 2$ 。在计算中假设把目标同位素  $^{180}W$  浓缩到 50% ( $C_{nP} = 0.5$ ),目标同位素的产品提取率 ( $Rec = PC_{nP}/FC_{nF}$ ) 为 0.9。由于  $C_{nP}$  和  $PC_{nP}/FC_{nF}$  已知,可在  $i = n$  的情况下用数值方法比如牛顿法求解以  $N, f$  为变量的式(37)和(41),求得  $N, f$  后,根据式(41)、(42)求产品流和贫料流中的组分丰度,再由式(43)求级联中总物质流量。

图2示出了损耗出现在级联不同位置时级联相对总流量  $(\sum L - \sum L_0)/\sum L_0$  与相对损耗系数  $y/\ln^2 q_0$  的关系,其中,  $\sum L$  为存在损耗情况下的级联中的总物质流量,  $\sum L_0$  为级联中没有损耗情况下的总物质流量。从图2可看出,欲获得给定丰度和给定产品提取率的目标同位素产品,随着损耗系数  $y$  的增加,级联中总的物质流量也增加,意味着所需分离器的总数目也要增加。在损耗系数  $y$  相同的条件下,对于上述4种情况,所需分离器数量从大到小依次为损耗同时存在于级联各级供料流、精料流与贫料流情况( $y_1 = y_2 = y_3 = y$ ),损耗分别存在于各级供料流( $y_1 = y$ )、精料流( $y_2 = y$ )、贫料流( $y_3 = y$ )情况。

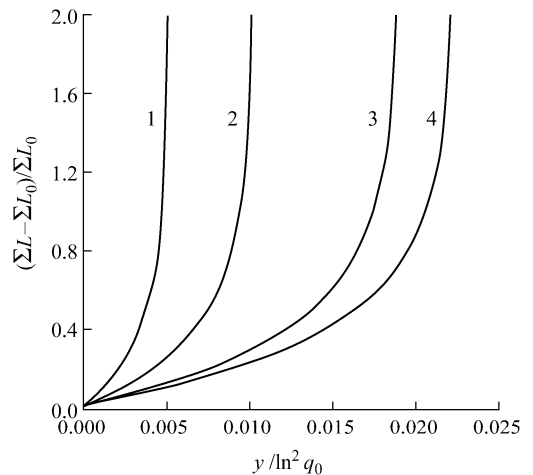


图2 级联相对总流量与相对损耗系数的关系

Fig. 2 Dependences of relative total flow vs relative loss factor

1—— $y_1 = y_2 = y_3 = y$ ; 2—— $y_1 = y, y_2 = y_3 = 0$ ;  
3—— $y_2 = y, y_1 = y_3 = 0$ ; 4—— $y_3 = y, y_1 = y_2 = 0$

#### 5 结论

建立了损耗同时存在于级联各级供料流、精料流与贫料流情况下的多组分级联的数学模型。提供了求解该类级联方程的数值方法。求得了各级组分分流比不变的情况下存在损耗的准理想级联方程的解析解。得到了计算准理想级联中相对产品流、相对贫料流、组分丰度以及级联中的总物质流量的解析表达式。利用所得到的解析表达式,对钨多组分同位素进行了级

联计算。比较了损耗存在于级联不同位置时损耗对级联特性的影响程度。

感谢莫斯科工程物理学院 V. D. Borisevich 的帮助。

#### 参考文献:

- [1] COHEN K. The theory of isotope separation as applied to the large scale production of  $^{235}\text{U}$ [M]. USA: McGraw Hill Book Co., Inc., 1951.
- [2] XIE Q X, SULABERIDZE G A, BORISEVICH V D. Some properties of quasi-ideal cascades with losses at stages [C] // Proceedings of the XX International Symposium on Physico-Chemical Methods of the Mixtures Separation. Szklarska Poreba, Poland: [s. n.], 2005: 205-207.
- [3] KHOLPANOV L P, SULABERIDZE G A, PATAPOV D V, et al. Multicomponent isotope separating cascade with losses[J]. Chemical Engineering and Processing, 1997, 36: 189-193.
- [4] SAZYKIN A A. Quasi-ideal cascade with losses [C] // Proceedings of the XI All-Russia (International) Scientific Conference, Physical and Chemical Processes on Selection of Atoms and Molecules. Zvenigorod, Russia: [s. n.], 2006: 7-14.
- [5] XIE Q X, BORISEVICH V D, PATAPOV D V, et al. Multicomponent isotope mixture separation in square cascade with losses of working substances[J]. Engineering Physics, 2006, 2: 30-34.
- [6] SULABERIDZE G A, BORISEVICH V D. Cascades for separation of multicomponent isotope mixtures[J]. Separation Science and Technology, 2001, 36(8/9): 1 769-1 817.
- [7] BARANOV V Y U. Isotopes: Properties, production, application [M]. Moscow: Izdat, 2000: 72-107.
- [8] SULABERIDZE G A, BORISEVICH V D, XIE Q X. Study of regularities of stationary mass transfer in separating cascade for enrichment of regenerated uranium[J]. Engineering Physics, 2005, 3: 15-19.
- [9] von HALLE E. Multicomponent isotope separation in matched abundance ratio cascade composed of stages with large separation factors[C] // Proceedings of the Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases. Darmstadt, Germany: [s. n.], 1987: 325-356.
- [10] SONG T M, ZENG S. On the optimism of separation cascade for a binary and multi-component case [C] // Proceedings of the Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases. Beijing, China: [s. n.], 2006: 132-142.
- [11] KECHEROV R Y A, MINENKO V P. Theory of cascades for separating multicomponent isotope mixtures[J]. Atomic Energy, 1961, 3: 188-194.