

基于动态模拟计算的 低温精馏分离¹³C同位素丰度分析

田叶盛, 李虎林

(上海化工研究院有限公司 上海稳定性同位素工程技术研究中心, 上海 200062)

摘要:低温精馏法分离碳同位素(¹²CO/¹³CO)的分离系数仅为 1.007,且分离操作工况苛刻,富集平衡时间长,为降低工业化装置运行风险,实现¹³C同位素富集的动态过程理论预测是工业化技术研究中亟需解决的问题。为此,本文通过采用 Aspen Dynamics 模拟研究 CO 低温精馏分离碳同位素的动态过程,获取¹³C同位素在全回流、浓缩富集、连续精馏操作条件下的丰度分布等值图,实现¹³C同位素在时间和空间两个维度内丰度变化过程的可视化。将上述操作条件下的动态模拟值与试验值进行对比分析,结果显示,两者吻合较好,且富集平衡时塔底¹³C丰度和富集平衡时间的相对误差均在 15%以下,验证了所建立的低温精馏分离¹³C同位素动态模拟计算方法的准确性,可进一步用于高丰度¹³C同位素生产装置中丰度变化过程的理论预测。

关键词:低温精馏;稳定同位素;¹³C;动态模拟;丰度分析

中图分类号:TQ028.1

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2020)09-1631-07

doi:10.7538/yzk.2019.youxian.0693

Abundance Analysis of ¹³C Isotope Separation by Cryogenic Rectification Based on Dynamic Simulation

TIAN Yesheng, LI Hulin

(Shanghai Engineering Research Center of Stable Isotope,

Shanghai Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Shanghai 200062, China)

Abstract: The carbon isotope (¹²CO/¹³CO) separation has a separation coefficient of only 1.007, which has typical characteristics of severe separation conditions and long equilibrium time. In order to reduce the operational risk of industrial devices, the theoretical prediction of the dynamic process of ¹³C isotope enrichment is an urgent problem to be solved in industrial technology research. Therefore, the dynamic simulation of carbon isotope separation by CO cryogenic rectification was carried out by using Aspen Dynamics. Through the simulation, the abundance distribution of ¹³C isotope was obtained under the conditions of total reflux, concentration and continuous rectification operation, and the visualization of the abundance change of the ¹³C isotope in the two

收稿日期:2019-09-09;修回日期:2019-10-14

基金项目:核能开发科研项目资助(科工二司[2016]1191);上海市科委科研计划资助项目(17XD1421500,18DZ2280200)

作者简介:田叶盛(1988—),男,安徽安庆人,工程师,硕士,化学工程专业

网络出版时间:2020-03-23;网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200320.1322.018.html>

dimensions of space and time was realized. On the other hand, comparing the dynamic simulation values with the experimental data, the results show that they are agree well, and the relative errors of the enrichment equilibrium abundance and equilibrium time are both less than 15%, which indicate that the accuracy of the dynamic simulation calculation method of ^{13}C isotope for cryogenic rectification separation is verified, which can be further used to theoretically predict the abundance enrichment process in the production plant of high abundance ^{13}C isotope.

Key words: cryogenic rectification; stable isotope; ^{13}C ; dynamic simulation; abundance analysis

稳定同位素因其具有优良的物理化学性能,在国民经济发展中发挥着越来越重要的作用,其中 ^{13}C 同位素作为示踪原子已广泛应用于生命科学、临床诊断、食品安全、生态环境、新药开发、新陈代谢等多种研究领域。现阶段,虽已开发多种 ^{13}C 同位素的分离方法,如热扩散法、离子交换法、色谱法、化学交换法、膜分离法、低温精馏法等,但实现 ^{13}C 同位素工业化生产的仅有低温精馏法,且该方法仅被美国、日本、俄罗斯等极少数国家所掌握,国内对于高丰度 ^{13}C 同位素产品完全依赖进口^[1-3]。

低温精馏法分离 ^{13}C 同位素的分离系数约为1.007,制备99%高丰度 ^{13}C 同位素产品往往需要几千块理论板数,其富集平衡时间将长达半年以上。低温精馏分离 ^{13}C 同位素装置属于典型的多变量、强耦合、非线性的复杂系统,在装置运行过程中,稳态只是相对的、短暂的,实际过程则总是处于动态变化之中,而现有的经验半经验方法无法从本质上揭示 ^{13}C 同位素的浓缩变化规律,更无法对工业化生产装置的稳定运行操作提供准确指导,因此从理论上深入研究 ^{13}C 同位素富集的动态变化过程显得尤为重要^[4-8]。为打破国外对 ^{13}C 同位素工业化生产技术的垄断,推动国内民用核技术的健康快速发展,在前期低温精馏分离 ^{13}C 同位素工艺技术的稳态研究^[9-11]基础上,本文拟结合 Aspen Dynamics 动态模拟技术与试验验证,从时间和空间两个维度,研究并获取低温精馏全回流、浓缩富集、连续精馏等操作条件下 ^{13}C 同位素丰度的变化规律,为今后工业化生产装置的运行操作提供理论指导。

1 低温精馏分离 ^{13}C 同位素

上海化工研究院有限公司建立的 CO 低温

精馏试验流程示于图 1,该低温精馏系统由 4 部分组成:低温精馏塔、原料气净化系统、真空绝热系统和冷凝系统。低温精馏塔总高 20 m、内径 45 mm,塔内填充稳定同位素 ^{13}C 分离专用高效填料 PACK- ^{13}C ,填料有效高度 18 m,其中提馏段 2.5 m、精馏段 15.5 m。塔体采用多层绝热保温,塔顶冷凝系统采用液氮作为冷凝介质,塔底再沸器采用电加热,原料采用天然丰度组成的纯度不低于 99%的 CO 气体,该装置设计分离能力为年产 500 g 丰度不低于 10%的净 ^{13}C 。

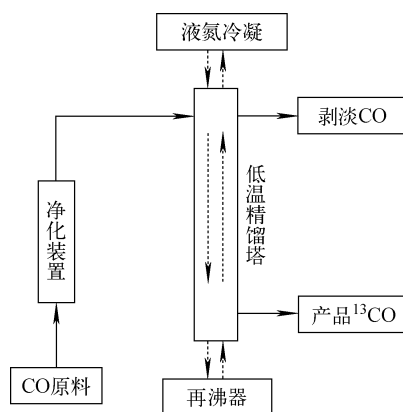


图 1 CO 低温精馏分离碳同位素试验流程
Fig. 1 Carbon isotope separation experimental process by CO cryogenic rectification

在低温精馏塔内,CO 原料经过净化装置后进入低温精馏塔,在塔顶冷凝器处被液氮冷凝成液体,沿着塔内填料表面向下流动,且与上升的气流相互作用,实现同位素组分间的传质交换。在重力作用下流到塔底的液相被再沸器系统加热气化,使得塔内形成持续的上升气流与下降的液相流相互作用,经过长时间持续的

气液交换后,重组分¹³CO同位素分子将在塔底得到富集,而轻组分¹²CO在塔顶实现富集,以此实现碳同位素间的分离。与精馏法分离¹⁸O、¹⁰B等稳定同位素相同,¹³C同位素在低温精馏塔内不断富集浓缩,平衡后在精馏塔轴向建立稳定的丰度梯度。¹³C同位素丰度在时间和

空间两个维度上富集过程的动态模型示于图 2^[12-16]。

为系统研究低温精馏分离碳同位素过程中¹³C丰度的富集变化规律,依次开展 CO 低温精馏全回流、浓缩富集、连续精馏操作的动态模拟与试验。

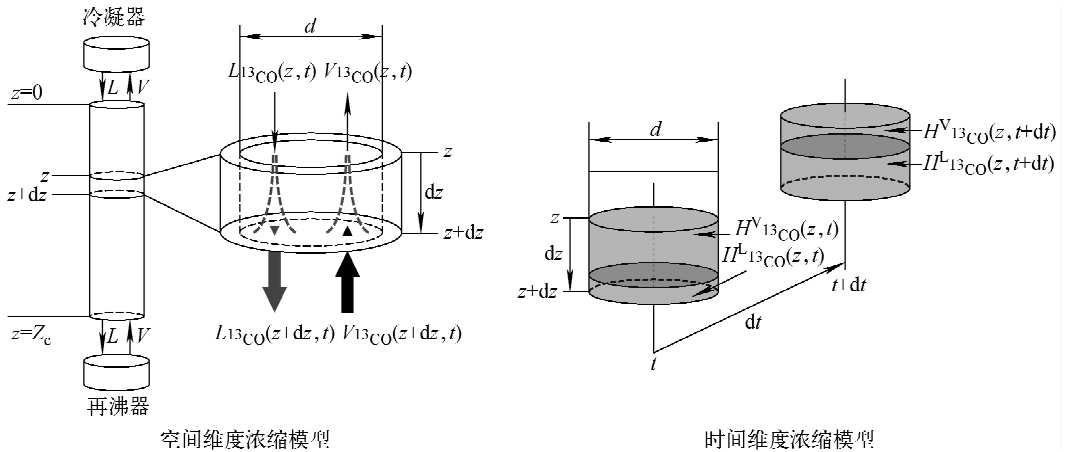


图 2 稳定同位素¹³C浓缩富集过程的动态模型

Fig. 2 Dynamic model of stable isotope ¹³C concentration and enrichment process

2 动态流程模型建立

2.1 动态过程研究的理论方程

本文研究的低温精馏分离¹³C同位素的动态过程是基于精馏平衡级理论模型^[17],该模型假设离开各理论级的气液相处于平衡状态,模型示意图如图 3 所示。

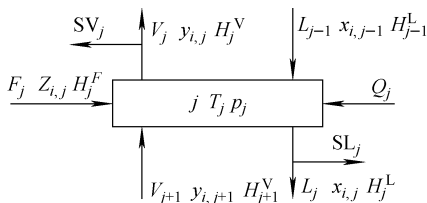


图 3 平衡级理论模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of equilibrium level theoretical model

假定精馏塔体绝热,则对于任意理论级 j ,其液相流体中组分 i 的含量变化及该理论级的能量变化过程可用方程(1)、(2)描述:

$$\begin{aligned} dH_j^L x_{i,j} / dt = & L_{j-1} x_{i,j-1} + V_{j+1} y_{i,j+1} - \\ & (L_j + SL_j) x_{i,j} - (V_j + SV_j) y_{i,j} + F_j Z_{i,j} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} dH_j / dt = & L_{j-1} H_{j-1}^L + V_{j+1} H_{j+1}^V - \\ & (L_j + SL_j) H_j^L - (V_j + SV_j) H_j^V + F_j H_j^F + Q_j \end{aligned} \quad (2)$$

式中: j 为塔板数; x 为液相摩尔分数; L 为液相摩尔流量,kmol/s; V 为气相摩尔流量,kmol/s; F 为进料量,kmol/s; SV 为气相采出量,kmol/s; SL 为液相采出量,kmol/s; $Z_{i,j}$ 为进料中组分 i 摩尔含量; $H_{L,j}$ 为 j 级持液量,mol; t 为时间,s; H_j 为 j 级能量,kJ/s; H_j^L 为液相流体摩尔热焓,kJ/kmol; H_j^V 为气相流体摩尔热焓,kJ/kmol; H_j^F 为进料流体摩尔热焓,kJ/kmol; Q_j 为热量,kJ/s。

上述方程构成了研究精馏动态过程的平衡级数学模型,即通过求解非线性微分方程组,获取精馏过程的动态特性,但因其计算量巨大而难以直接运用于同位素分离的动态过程分析。随着计算机的发展,尤其是 Aspen 流程模拟软件的运用,使得同位素分离的动态过程研究成为可能。

2.2 Aspen Dynamics 动态模拟

Aspen 是美国麻省理工学院开发的第 3 代流程模拟软件,该软件经过 30 多年的不断发展、改进、扩充和提高,成为举世公认的功能最

完善、应用最普遍的大型流程模拟软件,其中 Aspen Plus 用于稳态模拟, Aspen Dynamics 用于动态过程研究。

Aspen Plus 是目前使用最为广泛的稳态模拟计算系统,该系统可提供大量的化工单元操作模型和物性数据,可实现从单个操作单元到复杂工艺流程的稳态模拟研究,并可通过灵敏度分析和优化工具,实现稳态操作参数的优化。然而在复杂的化工生产过程中,稳态过程只是相对且短暂的,实际过程总是存在各种各样的波动与干扰,其动态变化是必然且经常发生的,尤其是精馏法分离 ^{13}C 、 ^{18}O 等同位素装置,属于典型的多变量、强耦合、非线性复杂系统,使得动态过程研究显得尤为重要。Aspen Dynamics 广泛用于动态过程模拟,其研究的出发点为 Aspen Plus 稳态模拟,在此基础上,重点探究操作运行过程的响应分析。因此,动态过程研究对工业装置的开发与设计、操作运行与优化均具有切实的工程指导意义。

本文运用 Aspen Dynamics 模拟研究低温精馏分离 ^{13}C 同位素的动态过程,其流程模拟的建立策略主要包括以下几个步骤:1) 运用 Aspen Plus 建立低温精馏稳态流程,稳态模拟结果应与试验结果一致;2) 在稳态流程中,添加动态模拟所必需的单元设备尺寸等动态数据以及必要的控制阀或泵等模块,然后输出动态模拟文件;3) 运用 Aspen Dynamics 打开上述动态模拟文件,完善控制结构,开展动态模拟研究分析。

天然 CO 原料气中含有 6 种 CO 同位素组分,即 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}^{17}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$ 。通过分析上述组分的基本物性,选取 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ 和 $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$ 4 个组分作为模拟计算时的原料组成。然而 Aspen 数据库中缺少 CO 同位素组分的物性参数,鉴于同位素组分间仅相差 1 个中子,在 Aspen 模拟计算时,按理想混合物处理,热力学性质模型选择 IDEAL 方法,同时只需将各组分的分子量数据和扩展的安托因方程参数嵌入 Aspen 数据库中即可^[18-19]。需特别说明的是,本文运用 Aspen Dynamics 进行低温精馏分离 ^{13}C 同位素过程的动态模拟时,均假定初始时刻($t=0$)为理想状态,即塔内填料层充分润湿,气液两相流量达到稳定,塔内没有浓度差,且各组分丰度均与原料

气的组分丰度相同。

3 结果与讨论

3.1 全回流操作的动态模拟研究

精馏塔开工调试及精馏试验过程研究常采用全回流操作。低温精馏分离 ^{13}C 全回流试验的塔顶操作压力为 60 kPa,塔压降为 2 kPa,塔釜加热功率为 300 W。根据全回流试验分析数据,求取全塔最小理论塔板数 j_{\min} 、低温精馏塔内持液量分布等关键基础数据,将其补充嵌入 Aspen 流程模拟中,然后运用 Aspen Dynamics 进行全回流操作过程的动态模拟,待动态模拟计算达到稳定收敛后,整理低温精馏塔内 ^{13}C 同位素在时间和空间维度内的丰度数据,绘制丰度分布的三维等值图,如图 4 所示。

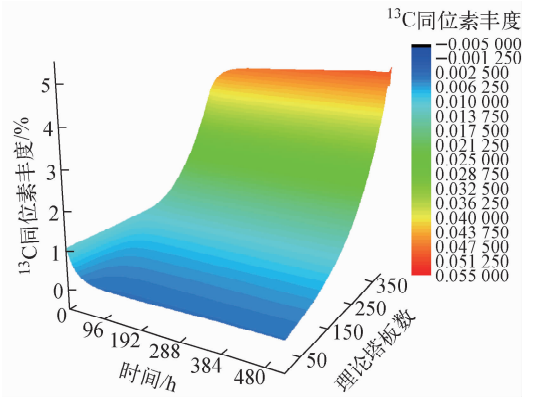


图 4 全回流操作低温精馏塔内 ^{13}C 同位素的丰度分布
Fig. 4 Abundance distribution of ^{13}C in cryogenic rectification column under total reflux operation

由图 4 可知,经过 6 d 的全回流操作,低温精馏塔内 ^{13}C 同位素的丰度梯度达到稳定,塔底 ^{13}C 丰度达到 4.88%,塔顶 ^{13}C 丰度为 0.23%。塔底和塔顶 ^{13}C 同位素丰度变化过程的动态模拟结果与试验结果示于图 5。

由图 5 可知,全回流试验操作的富集平衡时间约为 7 d,塔底 ^{13}C 同位素丰度趋向稳定于 4.66%,塔顶 ^{13}C 同位素丰度趋向稳定于 0.21%;将动态模拟值与试验值进行对比分析,结果显示,全回流初期数据间的相对误差较大,而接近平衡后,两者逐渐接近一致,其主要原因是试验操作初期塔内填料润湿率等因素无法达到模拟计算所假定的初始理想状态,而导致分离效率

有所降低。对比全回流操作平衡时的模拟值与试验值可知,塔底¹³C同位素丰度的平均相对误差为 4.72%,塔顶¹³C同位素丰度的平均相对误差为 9.52%,说明在一定的工程误差范围内,所建立的动态模拟方法可较准确预测低温精馏全回流操作时塔内¹³C同位素丰度的变化过程,可以此为基础开展浓缩富集、连续精馏等操作过程的¹³C同位素丰度分析研究。

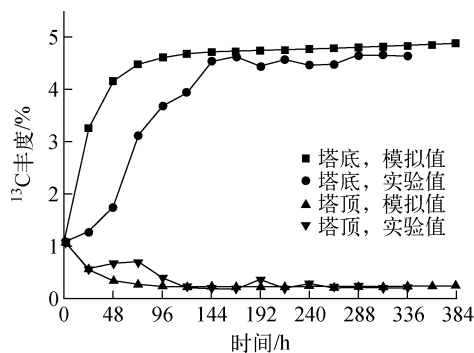


图5 塔底和塔顶的¹³C同位素丰度试验值与模拟值

Fig. 5 Experimental and simulated values of ¹³C abundance at bottom and top of tower

3.2 浓缩富集操作的动态模拟研究

稳定同位素属于典型的难分离体系,生产装置的运行通常采取先浓缩再出料的操作方式。由于¹³C同位素属于重组分,本文研究的浓缩富集操作方式表现为原料进料量等于塔顶采出量,塔底不采出。低温精馏分离¹³C浓缩富集试验的塔顶操作压力为 60 kPa,塔压降为 2 kPa,塔釜加热功率为 300 W,原料进料量与塔顶采出量均为 45.6 L/h(标况下,下同)。运用 Aspen Dynamics 进行浓缩富集操作的动态模拟,待计算达到稳定收敛后,整理低温精馏塔内¹³C同位素在时间和空间维度范围内的丰度数据,绘制丰度分布的三维等值图,如图 6 所示。

由图 6 可知,天然丰度组成的 CO 原料经过浓缩富集操作,在低温精馏塔内同位素丰度梯度达到稳定时,塔底¹³C同位素丰度达到 17.2%,整个富集过程所需平衡时间为 45 d。将上述动态模拟值与试验值进行对比分析可知,在低温精馏浓缩富集操作条件下,当塔内同位素丰度梯度达到稳定时,塔底¹³C同位素丰度的动态模拟值为 17.20%,试验值为 15.84%,

两者相对误差为 9.41%;整个富集过程所需平衡时间的动态模拟值为 45 d,试验值为 40 d,两者相对误差为 12.5%。以上结果表明,在一定的工程误差范围内,所建立的动态模拟计算方法可较准确地预测¹³C同位素丰度在低温精馏浓缩富集操作中的变化规律。

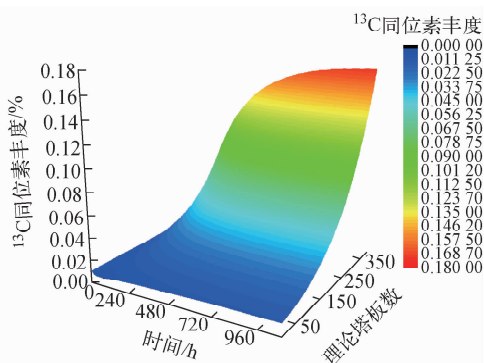


图6 浓缩富集操作低温精馏塔内¹³C同位素丰度分布

Fig. 6 Abundance distribution of ¹³C in cryogenic rectification column under concentration operation

3.3 连续精馏操作的动态模拟

稳定同位素产品采出通常是在浓缩富集达到平衡后,再切换为出料操作。为研究连续精馏操作时,低温精馏塔内¹³C同位素丰度在时间和空间维度上的变化规律,开展了不同出料量条件下的动态模拟与试验研究,具体试验条件如下:塔顶操作压力 60 kPa、塔压降 2 kPa、塔釜加热功率 300 W、原料进料量 45.6 L/h,当浓缩富集达到稳定平衡后,进行第 1 次塔底连续出料操作,采出量为 0.6 L/h,当低温精馏系统再次达到稳定平衡时,将塔底采出量增加到 1.2 L/h。运用 Aspen Dynamics 对上述试验过程进行动态模拟,整理低温精馏塔内¹³C同位素在时间和空间维度范围内的丰度数据,绘制丰度分布的三维等值图,如图 7 所示。

由图 7 可知,首先经过 45 d 浓缩富集,低温精馏系统达到平衡,塔底¹³C同位素丰度为 17.2%。在此基础上进行第 1 次塔底连续出料的切换操作,即设定塔底出料量为 0.6 L/h,其余操作条件不变,连续精馏采出操作持续 28 d 时系统达到稳定平衡,且塔底¹³C同位素丰度稳定于 13.35%。在此基础上进行第 2 次塔底连续

出料的切换操作,即将塔底采出量由 0.6 L/h 调至 1.2 L/h,其余操作条件不变,待系统再次连续精馏操作 22 d 后,重新达到平衡,此时塔底 ^{13}C 同位素丰度稳定于 10.70%。将上述动态模拟值与试验值进行对比分析,结果列于表 1。

由表 1 可知,对于浓缩富集平衡后切换为塔底连续出料的连续精馏操作,当塔内同位素丰度梯度达到稳定时,塔底 ^{13}C 同位素丰度在两种不同出料量条件下试验值与模拟值的相对误差分别为 1.14% 和 3.78%;系统建立平衡状态所需时间试验值与模拟值的相对误差分别为 12.0% 和 10.0%,表明在一定的工程误差范围内,所建立的动态模拟计算方法可用于低温精馏分离 ^{13}C 同位素连续精馏操作的理论预测,且具有优良的稳定性和准确度。

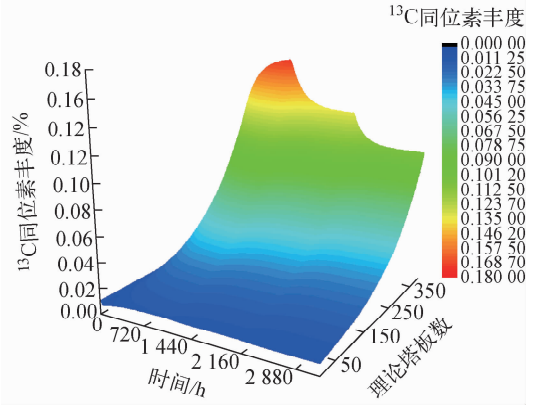


图 7 浓缩富集切换连续精馏操作下 ^{13}C 同位素丰度分布

Fig. 7 Abundance distribution of ^{13}C under concentrated enrichment switching continuous rectification operation

表 1 动态模拟值与试验值对比

Table 1 Comparison of dynamic simulation values and experimental data

原料进料量/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	塔底采出量/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	塔底 ^{13}C 同位素丰度/%		相对 误差/%	达到平衡所需时间/d		相对 误差/%
		试验值	动态模拟值		试验值	动态模拟值	
45.6	0.6	13.20	13.35	1.14	25	28	12.0
45.6	1.2	10.31	10.70	3.78	20	22	10.0

4 结论

本工作提出了一种基于 Aspen Dynamics 动态模拟研究 CO 低温精馏分离碳同位素过程的方法,该方法通过计算 ^{13}C 同位素在时间和空间两个维度上的丰度变化过程,得到 ^{13}C 同位素在不同操作条件下的丰度分布等值图,从而实现 ^{13}C 同位素分离操作时丰度变化的可视化。

另一方面,通过对低温精馏全回流、浓缩富集、连续精馏操作的动态模拟研究,将模拟值与试验值相比较,两者吻合较好,验证了所建立的动态模拟计算方法的准确性。后续可以此为基础,对制备 99% ^{13}C 的产业化系统装置开展运行技术研究,获取优化的运行操作方案。再者本工作也积极推动了同位素分离运行技术由经验半经验向理论预测的跨越,具有显著的工程指导意义。

参考文献:

[1] 徐大刚,钟授富. 稳定同位素的分离与应用[J]. 化工进展,1997(2):41-50.

XU Dagang, ZHONG Shoufu. Separation and application of stable isotopes[J]. Chemical Industry and Engineering Process, 1997(2): 41-50(in Chinese).

[2] 杜晓宁,张鹏帅,雷雯,等. 稳定同位素技术在我国食品安全检测领域的应用进展[J]. 同位素, 2019,32(3):231-243.

DU Xiaoning, ZHANG Pengshuai, LEI Wen, et al. Application of stable isotope technique in food safety field[J]. Journal of Isotopes, 2019, 32(3): 231-243(in Chinese).

[3] 李虎林. 碳、氮、氧稳定同位素生产技术现状及发展趋势[J]. 同位素,2011,24(增刊):7-14. LI Hulin. Production technology status and development trend of stable isotopes C, N, O[J]. Journal of Isotopes, 2011, 24(Suppl.): 7-14(in Chinese).

[4] LI Hulin, JU Yonglin, LI Liangjun, et al. Separation of isotope ^{13}C using high-performance structured packing[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010, 49(3): 255-261.

- [5] 范文雪. 精馏塔动态数学模型的建立、仿真及控制的研究[D]. 北京:北京化工大学,2000.
- [6] 陈晓春,马贵荣. 动态模拟技术与化学工程[J]. 现代化工,2002,22(3):14-17.
CHEN Xiaochun, MA Guirong. Dynamic simulation technique and chemical engineering[J]. Modern Chemical Industry, 2002, 22(3): 14-17 (in Chinese).
- [7] 孙卫国,伏研,李洁,等. 丙烯精馏塔动态模拟[J]. 石化技术与应用,2008,26(2):153-157.
SUN Weiguo, FU Yan, LI Jie, et al. Dynamical simulation of propylene rectifying tower[J]. Petrochemical Technology & Application, 2008, 26(2): 153-157(in Chinese).
- [8] 夏修龙. D₂/DT 低温精馏分离动态模拟[J]. 核技术,2007,30(4):294-296.
XIA Xiulong. A dynamic simulation of D₂/DT separation by cryogenic distillation[J]. Nuclear Techniques, 2007, 30(4): 294-296(in Chinese).
- [9] 吉永喆,巨永林,李虎林. 同位素¹³C分离二塔级联模拟研究[J]. 同位素,2016,29(2):103-107.
JI Yongzhe, JU Yonglin, LI Hulin. Simulation research of isotope ¹³C separation by double-stage cascade[J]. Journal of Isotopes, 2016, 29(2): 103-107(in Chinese).
- [10] 袁家均,李虎林,许保云,等. ¹³C同位素低温精馏过程动态模拟[J]. 同位素,2010,23(4):197-201.
YUAN Jiajun, LI Hulin, XU Baoyun, et al. Dynamic simulation of isotope ¹³C separation by cryogenic distillation[J]. Journal of Isotopes, 2010, 23(4): 197-201(in Chinese).
- [11] 李虎林,巨永林,李良君,等. 低温精馏分离稳定同位素¹³C的模拟优化研究[J]. 原子能科学技术,2009,43(增刊):54-58.
LI Hulin, JU Yonglin, LI Liangjun, et al. Simulation and optimization of stable isotope ¹³C separation by carbon monoxide cryogenic distillation [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43 (Suppl.): 54-58(in Chinese).
- [12] KAMBER T, KIHARA H, HAYASHIDA S, et al. Development of oxygen-18 separation unit by oxygen distillation[J]. Taiyo Nippon Sanso Corp Quarterly, 2004, 23: 20-25.
- [13] WEI Feng, ZHANG Weijiang, HAN Meng. Operational policy of the boron isotopes separation by chemical exchange reaction and distillation [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, 47(1): 17-21.
- [14] MOJTABA A, SEYED J A. Application of ideal temperature gradient technology to optimize the chemical exchange and distillation process of boron isotopes separation by (CH₃)₂O-BF₃ complex[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2014, 76: 26-32.
- [15] DUMITRACHE D C, SCHUTTER B D, HUESMAN A, et al. Modeling, analysis, and simulation of a cryogenic distillation process for ¹³C isotope separation[J]. Journal of Process Control, 2012, 22: 798-808.
- [16] DULF E H, FESTILA C, BALDEA A. Stability of the ¹³C column separation in industrial mode of operation[C]//6th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics. US: IEEE, 2011: 41-44.
- [17] 范文雪. 精馏塔动态数学模型的建立、仿真及控制的研究[D]. 北京:北京化工大学,2000.
- [18] 许保云,田叶盛,李虎林,等. Aspen 软件在低温精馏分离稳定同位素¹³C中的应用[J]. 同位素, 2012,25(4):199-203.
XU Baoyun, TIAN Yesheng, LI Hulin, et al. A dynamic simulation of stable isotope ¹³C separation by cryogenic distillation[J]. Journal of Isotopes, 2012, 25(4): 199-203(in Chinese).
- [19] 徐静安,田叶盛,李虎林. 基于UD+Aspen 模拟¹³C级联装置的耦合优化设计[J]. 上海科技, 2017,42(6):8-14.