

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.02.009

氧化铝生产多效蒸发器建模仿真

宋二伟^{1,2}, 彭庆收¹, 王二强²

(1. 滨州魏桥国科高等技术研究院, 山东 滨州 256606;

2. 中国科学院大学, 北京 101410)

摘要:作为氧化铝生产过程的关键工序,多效蒸发工序的设备较多、操作复杂,蒸发过程涉及到的变量众多、变量之间的耦合关系很复杂,给现场操作带来了一定挑战。蒸发器蒸水量和汽水比(新蒸汽用量与蒸水量比值)是蒸发工序考核的重要指标,其数值大小直接影响到蒸发工序操作成本。尤其在蒸汽不足时,蒸发效果直接影响到母液浓度,甚至影响整个生产流程及产能,最终影响到企业的竞争力。调查发现,现场操作基本以经验为主,调整工艺参数未能到达预期目的,有时甚至出现相反效果,致使蒸发器潜能未能充分发挥,生产条件未能达到最优。基于物料衡算、能量衡算,借助流程模拟软件,搭建氧化铝生产逆流多效蒸发工艺等效物理模型,对拜耳法氧化铝生产多效蒸发工序工艺参数进行分析,探究不同工艺参数对蒸水量(汽耗)的影响规律,为蒸发工序实际操作提供理论指导,进而实现氧化铝生产节能、减排目的,助力氧化铝企业绿色低碳可持续发展。

关键词:建模仿真;氧化铝;拜耳法;多效蒸发器;节能减排

中图分类号:TF821

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)02-0057-07

Model and Simulation for Multi-effect Evaporator in Bayer Process

SONG Erwei^{1,2}, PENG Qingshou¹, WANG Erqiang²

(1. Binzhou Institute of Technology, Binzhou 256606, Shandong, China;

2. The University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101410, China)

Abstract: As one of the most important sections in Bayer process, the multi-effect evaporation process has more equipment and complex operation, and the evaporation process involves numerous variables, whose coupled relations are complicated, which brings certain challenges to the field operation. Water evaporating value and steam to water ratio (ratio of fresh steam to water evaporating value) are the important assessment indicators of evaporation process, which values directly affect the operational cost. Especially when the steam is insufficient, the evaporation effect directly affects the concentration of mother liquor, even affects the entire production process and capacity, and ultimately affects the competitiveness of the enterprise. In the real refinery, workers manage process parameters according to practice experience, which sometime cannot achieve expected goal and even arise reverse effect, restricting evaporators potential performance, and process parameters are not optimal. Based on material balance and energy balance, the equivalent physical modules of countercurrent multi-effect evaporation process for alumina production were modeled with the help of process simulation software, and the process parameters of the multi-effect evaporation process for alumina production by Bayer process were analyzed. The influences of

收稿日期:2023-10-24

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(2222037);魏桥国科低碳技术专项(GYY-DTFZ-2022-016)

作者简介:宋二伟(1989-),男,博士,工程师;通信作者:王二强(1976-),男,博士,副教授

different process parameters on the evaporation water amount (steam consumption) were explored to provide theoretical guidance for the actual operation of the evaporation process, which can achieve the purpose of energy saving and emission reduction in alumina production, and help the green and low-carbon sustainable development of alumina enterprises.

Key words: model and simulation; alumina; Bayer process; multi-effect evaporator; energy-saving and emission reduction

氧化铝生产方法主要分为酸法、碱法、酸碱联合法和热法等四种工艺,目前主要以碱法为主^[1]。碱法主要包括烧结法、拜耳法和联合法等工艺流程。相比烧结法,拜耳法具有能耗低、流程短、产品质量高等优点,90%以上的氧化铝生产以拜耳法为主。

国内氧化铝生产蒸发工序存在汽耗高、循环效率低、换热管结垢严重、蒸发能力低等诸多弊端,其能耗、汽耗和成本分别占全厂总指标的20%~25%、30%~40%和10%~12%^[2-3],氧化铝生产多效蒸发工序节能降耗对氧化铝绿色低碳可持续发展

具有重要意义^[4-5]。计算机流程模拟技术已成为化工过程分析诊断、工艺优化及新技术开发研究的有效手段^[6], Aspen Plus 作为一款成熟的商业化流程模拟软件,和其他流程模拟软件相比,具有物性数据及物性方法较多等优点^[7-8]。本研究拟借助 Aspen Plus 流程模拟软件,搭建氧化铝多效蒸发等效模型,对多效蒸发工艺条件进行仿真分析研究。

1 蒸发器等效模型搭建

利用 Aspen Plus 内置模块(换热器和闪蒸器等模块)搭建蒸发器等效模型^[9],等效模型见图 1。

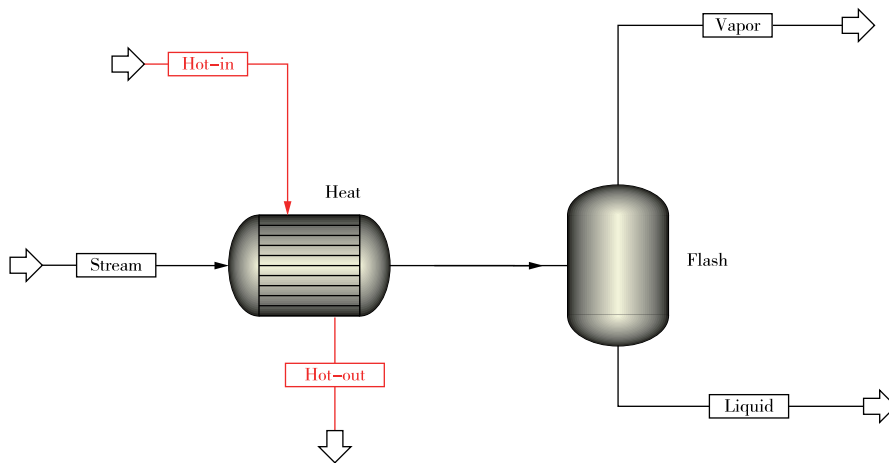


图 1 单一蒸发器等效模型

Fig. 1 Equivalent module for single evaporator

如图 1 所示,利用 Aspen Plus 中的换热器和闪蒸器分别等效单个蒸发器的加热室和分离室。基于单一蒸发器模型和氧化铝实际生产工艺流程,搭建拜耳法氧化铝生产多效蒸发工艺

等效物理模型。基于国内某氧化铝厂单组蒸发器的实际工艺流程,搭建其等效物理模型——逆流六效-四闪工艺并进行流程仿真分析,具体见图 2。

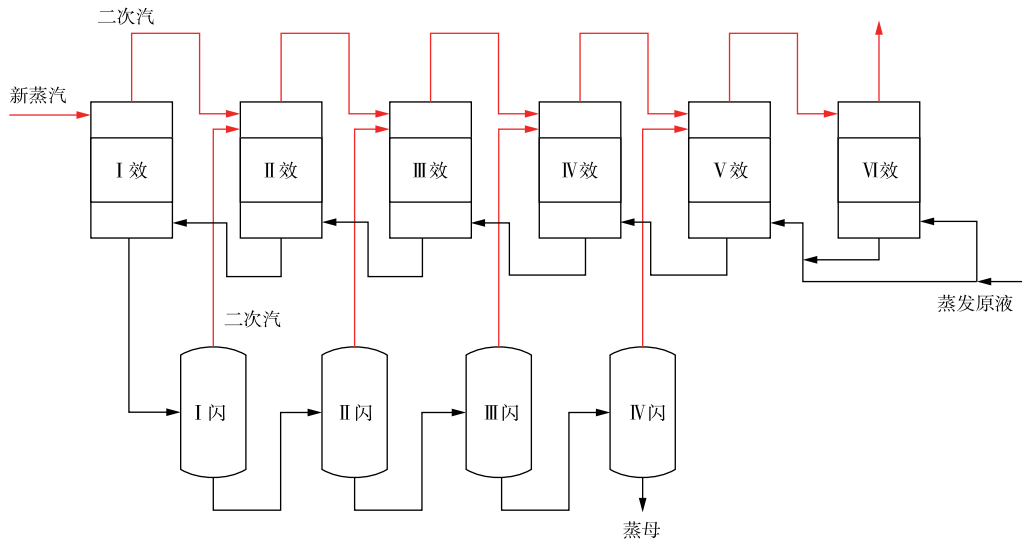


图 2 六效四闪—“两进一出”工艺流程

Fig. 2 Process flow for six-effect-four-flash and two-in-one-out

2 物性方法选择

物性方法是建模仿真的基础,直接影响仿真结果的准确性。氧化铝蒸发原液比较复杂,其中主要成分为铝酸钠、氢氧化钠、碳酸钠。为了选择合适的物性方法,以铝酸钠溶液密度为基准,将仿真结果与经验关系式^[10]计算结果进行对比。

铝酸钠溶液密度计算经验关系式为:

$$d = d_{20\text{ }^\circ\text{C}} \times K \tag{1}$$

$$d_{20\text{ }^\circ\text{C}} = 0.5 + \sqrt{0.25 + 0.00144N + 0.0009A + 0.001865N_c} \tag{2}$$

式中, N 、 A 和 N_c 分别代表苛碱、氧化铝和碳碱含量(g/L),苛碱和碳碱以 Na_2O 计;不同温度下的 K 值见表 1。

表 1 K 值与温度的对应关系

Table 1 Corresponding relation between K value and temperature

温度/ $^\circ\text{C}$	30	40	50	60	70	80	90	100
K	0.995	0.991	0.986	0.981	0.976	0.971	0.966	0.960

以六效-四闪蒸发工艺流程为例,分别取蒸发原料泵、一效出料和四闪出料三个位置点的铝酸钠溶液进行常规分析,结果如表 2 所示。

表 2 铝酸钠溶液成分

Table 2 Components of sodium aluminate solution

名称	/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	Na_2O_k	Al_2O_3	Na_2O_c
蒸发原液	162	92.1	26.8
一效出料	198	112.2	29.0
四闪出料	224	128	31.8

根据表 2 的溶液分析结果,基于不同的物性方法,采用模拟仿真的手段计算三个溶液在 $30 \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 内的密度,并将模拟仿真结果和经验关系式计算得到的数值进行比较,结果见图 3,其中模拟仿真为选择 Aqueous Debye-Huckel 和真实组成模型计算液相混合物摩尔体积建模仿真得到的铝酸钠溶液密度数值,经验关系式采用式(2)计算得到铝酸钠溶液密度数值。

以经验关系式计算结果为基准,计算模拟仿真结果的相对偏差 ϵ :

$$\epsilon = 100\% \times |d_m - d_e| / d_e \tag{3}$$

式中, d_m 和 d_e 分别表示铝酸钠溶液密度的仿真和经验关系式计算值(g/cm^3)。

从相对偏差分析结果可知,蒸发原液、一效出料及四闪出料的最大相对偏差分别为 2.12%、3.49% 和 4.59%,满足生产现场精度要求。因此选择 Aqueous Debye-Huckel 和真实组成模型计算液相混合物摩尔体积,在此基础上进行流程模拟仿真分析。

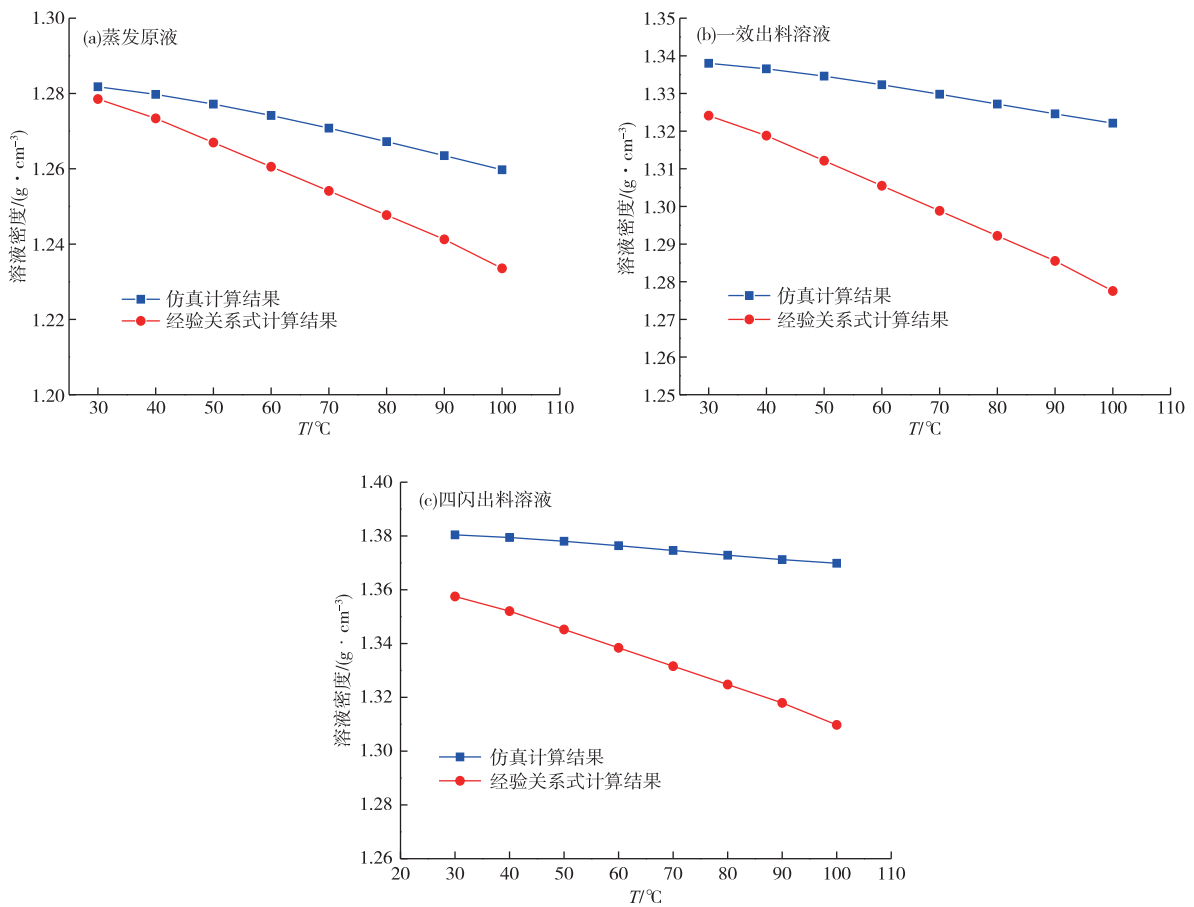


图 3 铝酸钠溶液密度计算结果

Fig. 3 Calculation results for density of sodium aluminate solution

3 蒸发系统工艺参数分析

选择逆流六效-四闪、五六效进料-四闪出料蒸

发工艺(见图 4),基于建模仿真对氧化铝生产多效蒸发工艺进行分析研究,主要分析闪蒸器压力及分离室压力对蒸发效果的影响。

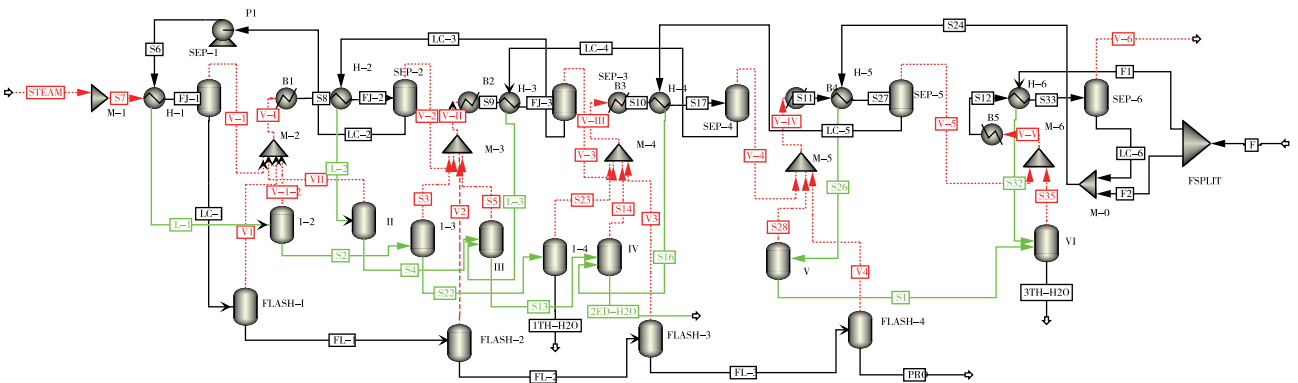


图 4 六效四闪—“两进一出”多效蒸发系统等效模型

Fig. 4 Equivalent module for six-effect-four-flash and two-in-one-out evaporator system

3.1 闪蒸器压力的影响

固定其它参数,每次只改变单个闪蒸器压力,分析其对整个蒸发器蒸发效果的影响,结果如图 5 所示。由图 5(a)知,1#闪蒸罐压力变化对各部分蒸

水量均有影响,但影响效果存在差别。以 1#闪蒸罐,2#闪蒸罐和 II 效蒸发器为例,随着 1#闪蒸器闪蒸压力升高,1#闪蒸器蒸水量降低,2#闪蒸器蒸水量增加,II 效蒸发器蒸水量降低。1#闪蒸器蒸水

量降低,与亨利定律相符。2#闪蒸罐蒸水量增加,主要是在操作压力不变的前提下,进料量及进料温度、压力增加所致。II效蒸发器蒸水量降低,主要是因为1#闪蒸器闪蒸乏汽为II效加热室热源,1#乏汽量降低,导致II效热源减少,在操作压力不变的情

况下,导致II分离室蒸水量降低。图5(b)~图5(d)结果类似,即改变某一闪蒸器操作压力不仅对前后临近单元操作有影响,而且会影响到蒸发工艺流程的所有单元操作,这与多效蒸发强耦合特点相符。

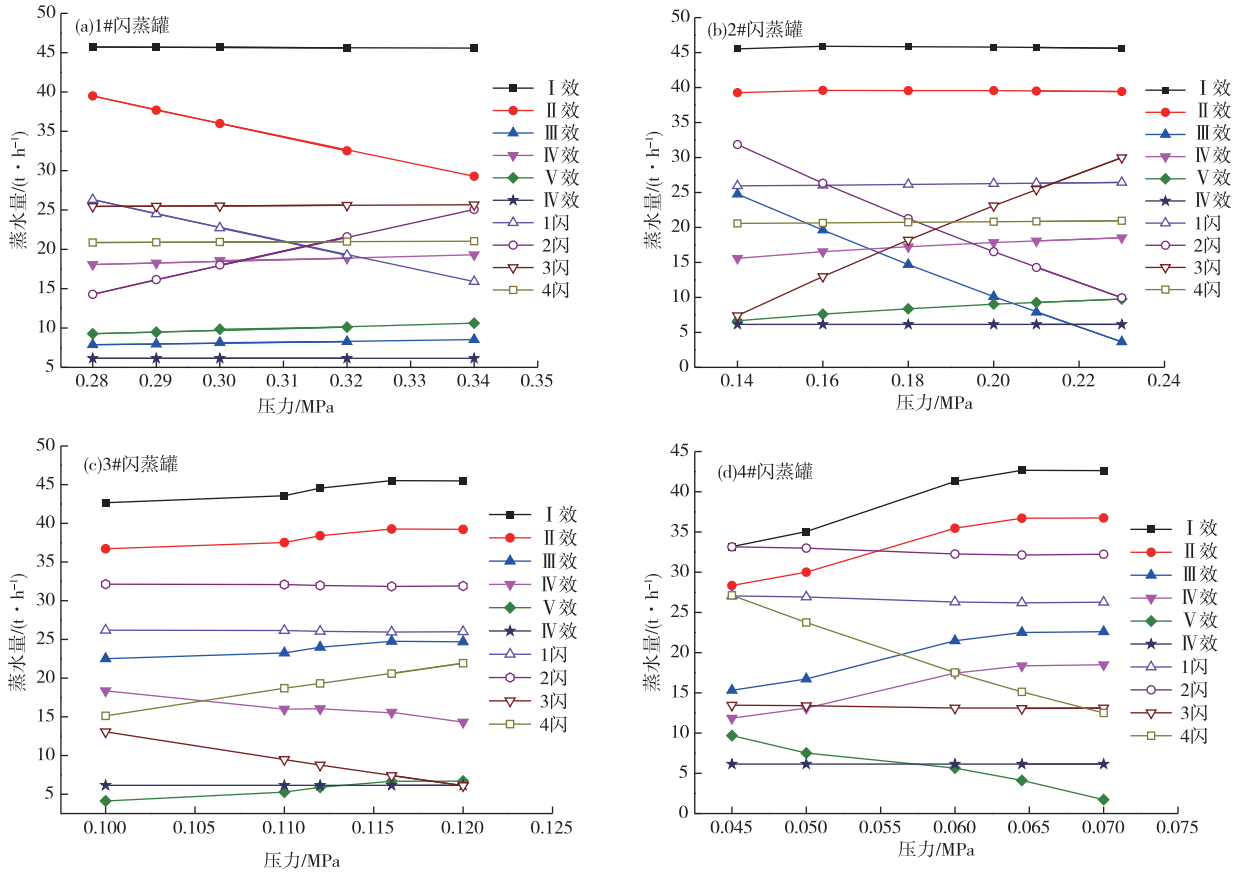


图5 闪蒸罐闪蒸压力对蒸发器蒸发效果的影响

Fig. 5 Effects of operational pressure in flasher on efficiency of evaporator

3.2 分离室操作压力的影响

固定其它参数,每次只改变单个蒸发器分离室操作压力,分析其对整个蒸发器蒸发效果的影响,此处以蒸发系统的汽水比(新蒸汽用量(t/h)与蒸水量(t/h)比值)表示,结果如图6所示。由图6可知,随着蒸发器分离室操作压力的变化,蒸发系统蒸发效果也随之改变,且汽水比随分离室操作压力的变化趋势不唯一,部分操作单元,随操作压力增加,汽水比呈波浪型变化(见I效分离室数据);部分操作单

元,随操作压力增加,汽水比整体呈下降趋势(见V效和VI效分离室数据)。其它操作条件不变的情况下,末效操作压力在0.018~0.024 MPa内变化,即末效真空度在0.076~0.082 MPa范围内,随着末效真空度增加,系统汽耗升高,这与传统概念中随着真空度增加,蒸水量增加(汽耗降低)结论不符,主要是因为多效蒸发流程为强耦合工艺,改变某一操作参数就会影响所有操作单元性能,且影响效果存在差别。

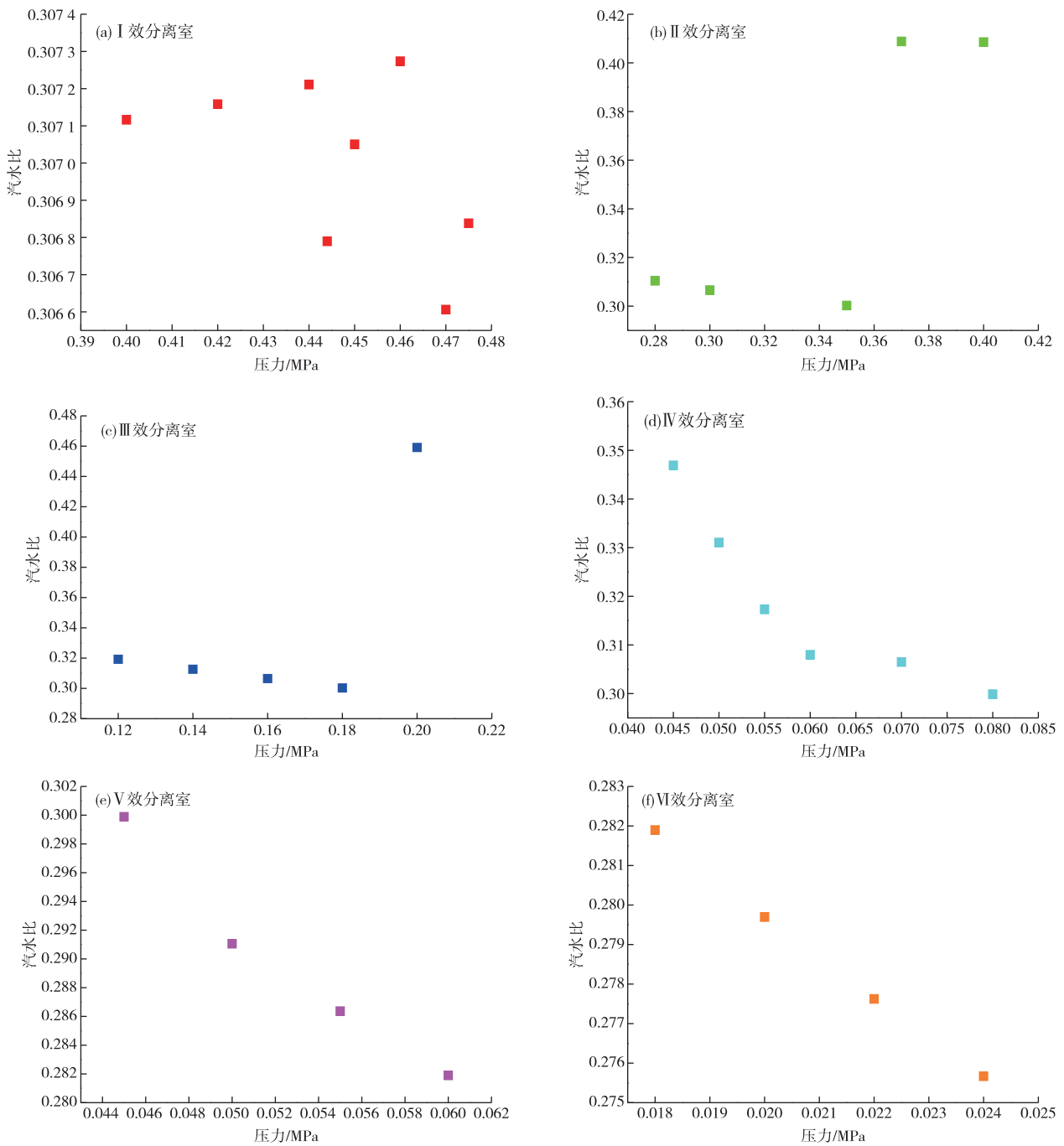


图 6 蒸发器分离室操作压力对蒸发系统蒸发效果的影响

Fig. 6 Effects of operational pressure in evaporators on the efficiency of evaporator

4 结论

基于建模仿真手段对氧化铝生产逆流多效浆膜蒸发器进行建模仿真,以工业常用的铝酸钠溶液密度计算经验关系式计算密度为参照,选择合适的物性计算模型,并在此基础上进行流程等效模型搭建与分析。结果显示,氧化铝多效蒸发系统为强耦合系统,在进行工艺节能减排操作优化

时,不能仅凭经验和常规理论操作,应该结合模拟仿真手段,对整个工艺流程进行仿真分析,实现真正的最有操作,使蒸发工序达到节能减排的目的,同时还要结合整个氧化铝生产工序和热电工序进行综合考量。

参考文献

[1] 毕诗文. 氧化铝生产工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

- BI S W. The technology of alumina production[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2006.
- [2] 陈蓉,满永国. 高效蒸发节能技术在氧化铝生产中的应用[J]. 有色冶金节能,2014,30(6):4-6.
- CHEN R, MAN Y G. Application of evaporation energy saving technology in alumina production[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy,2014,30(6):4-6.
- [3] 彭小奇,伍雁鹏,李时民,等. 氧化铝生产蒸发工序能耗分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(1):362-366.
- PENG X Q,WU Y P,LI S M,et al. Energy consumption analysis for evaporation process in alumina refinery[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2013,44(1):362-366.
- [4] LIU L R, LU A Y, LU Z W, et al. Analysis of the overall energy intensity of alumina refinery process using unit process energy intensity and product ratio method[J]. Energy,2006,31(8/9):1167-1176.
- [5] 李春焕,曹阿林. 氧化铝工业碳排放核算方法[J]. 有色金属(冶炼部分),2023(5):26-31,91.
- LI C H, CAO A L. Carbon emission accounting methods of alumina industry[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2023(5):26-31,91.
- [6] 郭旺,李艳军,高鹏,等. 棒销式搅拌磨机流场的数值模拟分析[J]. 有色金属工程,2018,8(6):63-68.
- GUO W, LI Y J, GAO P, et al. Numerical simulation analysis on flow field of pin-stirred mill[J]. Nonferrous Metals Engineering,2018,8(6):63-68.
- [7] 熊杰明,李江保. 化工流程模拟 Aspen plus 实例教程[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2016.
- XIONG J M, LI J B. Chemical process simulation: Aspen plus tutorial examples [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press,2016.
- [8] 孙兰义. 化工流程模拟实训: Aspen plus 教程[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- SUN L Y. Chemical process simulation training Aspen plus examples [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [9] 贾晓华. Aspen plus 在真空制盐蒸发中的模拟应用[J]. 盐科学与化工,2017,46(3):8-13.
- JIA X H. Application of Aspen plus in vacuum salt evaporation[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry,2017,46(3):8-13.
- [10] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M]. 北京:冶金工业出版社,1982:112-116.
- YANG Z Y. Alumina production technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1998:112-116.