

# 硫酸铵溶液三效并流蒸发系统的 动态模拟

李秋荣<sup>1</sup>, 徐永卫<sup>1</sup>, 刘 燕<sup>2</sup>, 张 伟<sup>2</sup>, 张少峰<sup>1, 2\*</sup>

(1. 河北工业大学化工学院, 天津 300130;

2. 河北工业大学海水资源高效利用化工技术教育部工程研究中心, 天津 300130)

**摘要:**以江苏某化工厂三效并流蒸发含有一定浓度氨气的硫酸铵溶液为例, 采用 Aspen Plus 软件进行稳态模拟, 以稳态模拟结果作为动态模拟的初始条件, 建立三效并流蒸发系统的动态模型, 利用 Aspen Dynamics 软件对带有基本控制结构的三效蒸发溶液浓缩系统进行研究, 分析进料流量、温度和组成发生变化时系统其他参数的变化规律。结果表明, 当进料流量、温度及组成发生变化时, 液相出口浓度阶跃性变化。为使液相出口浓度保持恒定, 制定了 2 种控制方案, 进料流量串级控制和加热蒸汽流量串级控制, 并对其控制效果进行比较。动态分析表明 2 种控制方案均能稳定液相出口浓度, 但加热蒸汽流量串级控制方案超调量更小、恢复时间更短。动态模拟结果对实际生产操作的多效蒸发溶液浓缩系统的控制提供一定的指导作用。

**关键词:**三效蒸发; 溶液浓缩; Aspen Plus; 动态模拟

**中图分类号:** TQ124.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2016)07-0189-04

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2016.07.047

## Dynamic simulation of three effect concurrent evaporation system of ammonium sulfate solution

LI Qiu-rong<sup>1</sup>, XU Yong-wei<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, ZHANG Shao-feng<sup>1, 2\*</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin 300130, China; 2. Engineering Research Center of Seawater Utilization Technology of Ministry of Education, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** Taking three effect evaporation system of ammonium sulfate solution (containing a concentration of ammonia) of a chemical factory in Jiangsu as an example, the steady state simulation is performed by using Aspen Plus software. With the steady state simulation results as initial conditions of dynamic simulation, a dynamic model of three effect concurrent evaporation system is established. Three effect evaporation-condensation system with basic control structures is studied with Aspen Dynamics software. When the feed flow, temperature and composition are changed, the change of other parameters in the system is also analyzed. The results show that the outlet concentration of liquid phase has a step change with the change of the feed flow rate, temperature or composition. In order to make the outlet concentration of liquid remains constant, two kinds of control schemes, feed flow cascade control and heating steam cascade control, are put forward. Their control effects are compared. Dynamic simulations show that two kinds of control scheme both can achieve the stable liquid concentration of export, but the control scheme with heating steam flow cascade control has a smaller overshoot volume and a shorter recovery time. Dynamic simulation results provide some guidance for the control of the multi-effect evaporation system for the practical production operations.

**Key words:** multi-effect evaporation; solution condensation; Aspen Plus; dynamic simulation

多效蒸发在降低能耗、系统稳定运行方面有独特的优势<sup>[1-3]</sup>。近年来, 学者对多效蒸发系统进行的研究主要集中在化工过程设计、分析及优化<sup>[4-6]</sup>等方面。姜凤银<sup>[7]</sup>应用多效蒸发技术对油田污水深度脱盐处理进行了工艺研究; Al-mutaz 等<sup>[8]</sup>对多效蒸发海水淡化过程的 3 种不同进料方式进行了绩效评估; Druetta 等<sup>[9]</sup>对海水淡化多效蒸发系统的总成本最小化进行了研究。在实际生产过程中, 过程参数会有较大波动, 其理想状态也仅是一种动态平衡, 该动态平衡状态若仅使用稳态模拟是不可能完

全实现的<sup>[10-12]</sup>。而动态模拟可以用来预测当某个干扰出现时, 系统各工艺参数的变化规律; 生产过程中参数波动对产品产量及质量的影响; 当过程变量如进料组成、温度及压力等发生变化时, 可以确定系统需要多长时间能够恢复到稳定状态<sup>[13-16]</sup>。Gregory 等<sup>[17]</sup>利用 Aspen Dynamics 对加氢脱烷基化反应的控制方案进行了动态模拟及改进, 模拟结果表明, 控制方案具有更好的抗干扰能力。徐智迅<sup>[18]</sup>针对多级闪蒸分离过程进行了灵敏度分析、控制结构和策略的研究; Ahn 等<sup>[19]</sup>基于动态模拟对海水淡

收稿日期: 2015-12-07; 修回日期: 2016-04-28

基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划(12276711D); 河北省自然科学基金(D2014202074)

作者简介: 李秋荣(1990-), 女, 硕士生; 张少峰(1965-), 男, 教授, 主要从事化工过程强化与优化研究, 通讯联系人, 022-60204293, shfzhang@hebut.edu.cn。

化多级闪蒸过程进行了故障诊断分析。动态模拟的应用十分广泛,对多效蒸发系统进行动态模拟研究具有较大的实际意义。

本文中应用 Aspen Dynamics 对江苏某化工厂含有一定浓度氨气的硫酸铵溶液三效并流蒸发系统进行动态模拟,分析进料过程发生变化时溶液出口浓度的动态响应过程,为多效蒸发系统的生产操作和控制方案制定提供一些指导作用。

## 1 稳态模型和动态模型的建立

本文中所研究的江苏某化工厂含有一定浓度氨气的硫酸铵蒸发过程为三效并流蒸发,其工艺流程如图 1 所示。在实际工业生产过程中,系统的进料参数不断发生变化影响产品的出口浓度,为了保证产品满足要求、系统能够相对稳定地运行,需要对工艺进行深入分析,结合实际工艺过程,进行动态模拟并制定合理的控制方案。

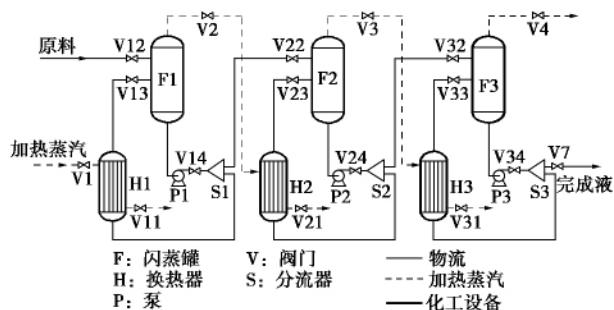


图 1 三效并流工艺流程图

### 1.1 稳态模型的建立

利用 Aspen Plus 对硫酸铵三效并流蒸发工艺流程进行稳态模拟的目的是为动态模拟提供初始条件。稳态模拟过程中进料流量  $8.2 \text{ m}^3/\text{h}$ , 压力  $200 \text{ kPa}$ , 温度  $100^\circ\text{C}$ , 蒸汽压力  $300 \text{ kPa}$ , 物料组分中  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  质量分数  $20\%$ ,  $\text{NH}_3$  质量分数  $6.5\%$ 。模拟过程中, 选用 ELECNRTL 进行组分定义, 换热器设计中热流股出口与冷流股进口温差为  $4^\circ\text{C}$ , 各

效分流器的循环质量分率为  $0.9$ , 各效闪蒸罐的热负荷为零<sup>[20]</sup>。

### 1.2 动态模型的建立

动态模拟是在稳态模拟的基础之上, 稳态模拟的结果作为动态模拟的初始条件, 经过蒸发器尺寸的设计、压力驱动的检测方可转入动态模拟过程<sup>[21-22]</sup>。蒸发器设计采用立式安装、椭圆形封头, 规定蒸发器的直径和高分别为  $1 \text{ m}$  和  $2 \text{ m}$ ; 阀门的压降为  $10 \text{ kPa}$ , 换热器的压降为  $10 \text{ kPa}$ , 泵的出口压力为  $300 \text{ kPa}$ , 建立完全压力驱动模型; 导入 Aspen Dynamics 软件中进行动态模拟仿真。带基本控制结构的硫酸铵三效并流蒸发工艺流程如图 2 所示。

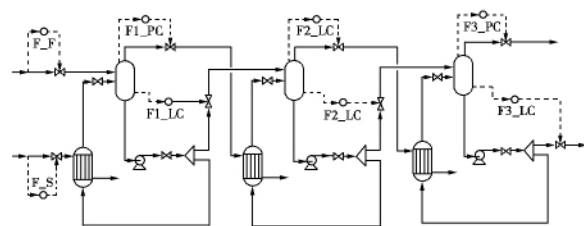


图 2 带基本控制结构的三效并流系统工艺流程图

## 2 动态模拟分析

### 2.1 进料流量阶跃变化

图 3 为进料流量发生  $\pm 5\%$  阶跃变化时系统的动态响应。由于压力调节阀和液位调节阀的响应有滞后性, 第一效的压力和液位迅速发生变化, 通过压力和液位调节阀的控制, 压力约  $10 \text{ min}$  恢复稳定, 液位约  $20 \text{ min}$  恢复稳定。当进料流量发生正向阶跃时, 由于加热蒸汽流量恒定, 系统提供的总热量不变导致蒸发的水分占进料流量的比例下降, 液相出口流量增加, 浓度降低。反之, 当进料流量发生负向阶跃时, 由于加热蒸汽流量恒定, 系统提供的总热量不变导致蒸发的水分占进料流量的比例上升, 液相

(上接第 188 页)

- [2] Buzad G, Doherty M. New tools for the design of kinetically controlled reactive distillation columns for ternary mixtures [J]. Computers and Chemical Engineering, 1995, 19(4): 395-408.
- [3] Malone M F, Doherty M F. Reactive distillation [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2000, 39(13): 3953-3957.
- [4] 陈根社, 陈新海. 遗传算法的研究与进展 [J]. 信息与控制, 1994, 23(4): 215-222.
- [5] Luyben W L. Economic and dynamic impact of the use of excess reactant in reactive distillation systems [J]. Industrial and Engineering

Chemistry Research 2000, 39(8): 2935-2946.

- [6] 刘清芝, 胡仰栋. 面向对象的软件集成技术研究 [J]. 计算机应用研究, 2004, 21(8): 76-79.
- [7] 耿大钊, 陈曦, 邵之江. 基于 COM 技术的 MATLAB 与 Aspen Plus 接口及高级应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(3): 30-34.
- [8] Kejin Huang, Haisheng Chen, Liang Zhang. Effective arrangement of an external recycle in reactive distillation columns [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2014, 53: 1986-1998.
- [9] 李萍. 一种通用的反应蒸馏塔过程强化型综合与设计方法 [D]. 北京: 北京化工大学, 2011. ■

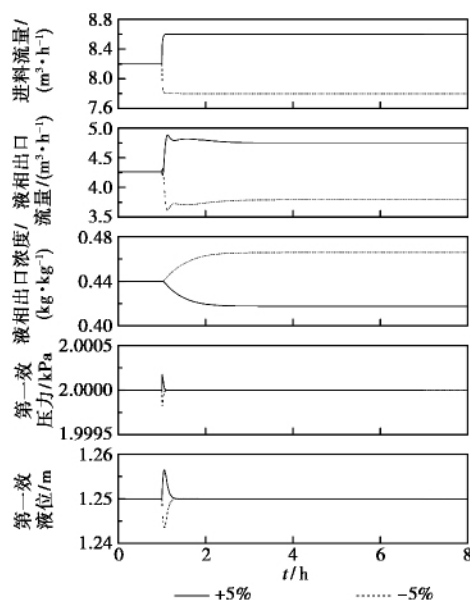


图3 基本控制结构的蒸发系统对于进料流量变化的动态响应

出口流量减少,浓度升高。

## 2.2 进料温度阶跃变化

当进料温度发生阶跃变化时系统的动态响应如图4所示。进料温度发生正向阶跃时,物料自身带入的热量增加导致蒸发的水分占进料流量的比例增加,液相出口流量减少,液相出口浓度升高。反之,进料温度发生负向阶跃时,物料自身带入的热量减少导致蒸发的水分占进料流量的比例减少,液相出口流量增加,浓度降低。

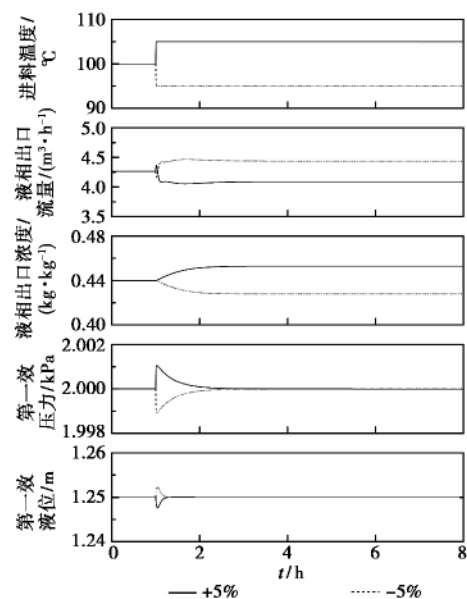


图4 基本控制结构的蒸发系统对于进料温度变化的动态响应

## 2.3 进料组分阶跃变化

三效并流蒸发动态运行中,进料中 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 质量分数发生阶跃变化时系统参数动态响应如图5所示,当其发生正向阶跃时,溶液浓度的升高导致沸点升高,整个系统蒸发除去的水分略有减少,液相出口流量略有增加,浓度升高。反之,溶液浓度的降低导致沸点降低,整个系统蒸发除去的水分略有增加,液相出口流量略有减少,浓度降低。

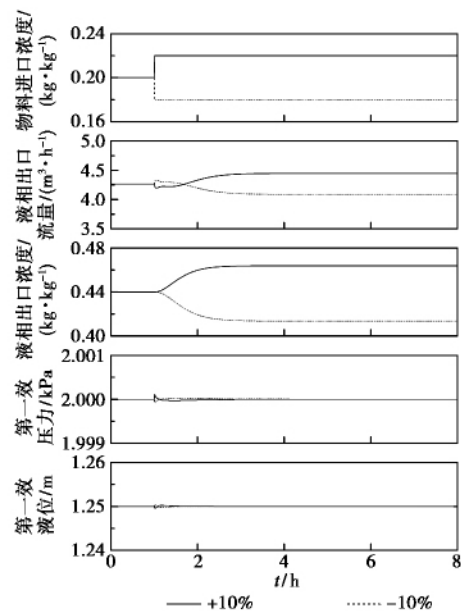


图5 基本控制结构的蒸发系统对于进料 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浓度变化的动态响应

## 3 2种控制策略

从前面研究结果明显看出,当进料流量、温度和组分发生阶跃变化时,带基本控制结构三效并流蒸发系统的液相出口 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浓度均出现较大幅度阶跃。为了实现液相出口 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浓度保持恒定,提出2种串级控制方案。一种是在基本控制器上添加进料流量串级控制液相出口 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浓度,即CS1控制方案;另一种是在基本控制器上添加蒸汽流量串级控制液相出口 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浓度,即CS2控制方案。

分别对2种控制方案进行动态模拟研究,均能保证液相出口 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浓度经波动后恢复至原稳定值。基于目标超调量和恢复时间对2种控制方案进行对比如表1所示。当进料流量、进料温度及进料组分含量发生变化时,CS2控制方案的超调量略小于CS1控制方案的超调量;CS2控制方案的恢复时间小于CS1控制方案的恢复时间;因此,本文中认为采用加热蒸汽串级控制方案的控制效果要比

采用进料流量串级控制方案的控制效果好。

表 1 不同控制方案的控制效果

进料扰动	控制方案	目标超调量/%	恢复时间/h
进料流量增加 5%	CS1	1.784	6.61
	CS2	1.676	6.32
进料流量减少 5%	CS1	1.829	6.01
	CS2	1.719	5.53
进料温度增加 5%	CS1	0.885	5.37
	CS2	0.828	4.91
进料温度减少 5%	CS1	0.853	5.76
	CS2	0.808	5.50
硫酸铵组分增加 2%	CS1	1.565	6.68
	CS2	1.369	5.92
硫酸铵组分减少 2%	CS1	1.436	6.56
	CS2	1.393	6.45

## 4 结论

(1) 建立硫酸铵溶液三效并流蒸发系统稳态模型的模拟结果,为 Aspen Dynamics 中进行动态模拟提供了良好的初值条件。

(2) 在进料流量、进料温度及进料  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  浓度阶跃变化时,带基本控制结构的蒸发系统液相出口浓度发生较大幅度变化,该控制方案不够稳定。

(3) 为实现液相出口  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  浓度保持恒定,提出了 2 种串级控制方案。CS1 控制方案通过进料流量串级控制液相出口  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  浓度,CS2 控制方案通过加热蒸汽流量串级控制液相出口  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  浓度。经对比分析,CS2 控制方案超调量较小,恢复时间更短,工程应用中应采用 CS2 控制方案。

## 参考文献

- [1] Al-sahali M, Ettoune H. Developments in thermal desalination processes: design, energy, and costing aspects [J]. *Desalination*, 2007, 214(1/2/3): 227–240.
- [2] Ruan Q, Jiang H, Nian M L *et al.* Mathematical modeling and simulation of countercurrent multiple effect evaporation for fruit juice concentration [J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 146(1): 243–251.
- [3] 张连山, 邓先和, 杨志平. 糖厂蒸发器的强化传热及多效蒸发的节能优化 [J]. *现代化工*, 2014, 34(4): 116–119.
- [4] Baudrez E, Heynderickx G J, Marin G B. Accuracy and convergence rate of steady-state simulation of one-dimensional reactive gas flow with molar expansion [J]. *Computer and Chemical Engineering*, 2011, 35(6): 1020–1037.
- [5] Gupta A, Subba R D. Effect of feed atomization on FCC performance: Simulation of entire unit [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(20): 4567–4579.
- [6] Joana L F, Carlai C P, Nunom C O *et al.* Steady-state multiplicity in an UOP FCC unit with high-efficiency regenerator [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(22): 6308–6322.
- [7] 姜凤银. 多效蒸发油田污水脱盐系统的热力性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [8] Al-mutaz I S, Wazeer I. Comparative performance evaluation of conventional multi-effect evaporation desalination processes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1): 1194–1203.
- [9] Druetta P, Aguirre P, Mussati S. Minimizing the total cost of multi-effect evaporation systems for seawater desalination [J]. *Desalination*, 2014, 344(1): 431–445.
- [10] 高晓新, 王颖, 陶阳, 等. 稳态及动态模拟在丙烷-异丁烷分离中的应用 [J]. *现代化工*, 2014, 34(5): 154–156.
- [11] Casavant T E, Cote R P. Using chemical process simulation to design industrial ecosystems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12(8/9/10): 901–908.
- [12] 罗娜, 叶贞成, 钟伟民, 等. 聚酯装置酯化生产过程动态模拟 [J]. *化工学报*, 2010, 61(8): 1933–1941.
- [13] Kiss A A, Bildea C A. Integrated reactive absorption process for synthesis of fatty esters [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 490–498.
- [14] 刘柱彬, 邱彤, 赵劲松. 气相卧式搅拌釜聚丙烯反应器的模拟及多稳态分析 [J]. *化工学报*, 2014, 65(11): 4451–4458.
- [15] Jang N, Shin M W, Choi S H *et al.* Dynamic simulation and optimization of the operation of boil-off gas compressors in a liquefied natural gas gasification plant [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2011, 28(5): 1166–1171.
- [16] Tarifa E E, Scenna N J. Fault diagnosis for MSF dynamic states using a SDG and fuzzy logic [J]. *Desalination*, 2004, 166(1/2/3): 93–101.
- [17] Gregory R B, Willian L L. Optimum economic design and control of a gas permeation membrane coupled with the hydrodealkylation (HDA) process [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2008, 47(4): 1221–1237.
- [18] 徐智迅. 多效蒸发分离过程的节能优化与控制 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [19] Ahn S J, Lee C J, Jung Y *et al.* Fault diagnosis of the multi-stage flash desalination process based on signed digraph and dynamic partial least square [J]. *Desalination*, 2008, 228(1): 68–83.
- [20] 包宗宏, 武文良. 化工计算与软件应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 138–141.
- [21] 胡建清, 伍联营. 多效蒸发海水淡化系统的动态模拟 [J]. *计算机与应用化学*, 2014, 31(12): 1423–1427.
- [22] 李小飞, 王淑娟, 陈昌和. 胺法脱碳系统动态特性及控制策略研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(8): 1215–1223. ■