

发酵法溶剂生产中醪塔的节能减排模拟

王洪海,李春利,王荣良,张 鹏
(河北工业大学化工学院,天津 300130)

摘要:利用流程模拟软件 PRO/II 对发酵法制取丙酮、丁醇和乙醇过程中的醪塔进行了节能减排模拟优化。考察了理论板数、进料位置等对蒸汽消耗量及废水排放的影响;研究了增加侧采工艺和热泵回收工艺对节能减排的促进作用。结果表明:醪塔较优的理论板数为 40 块,进料位置位于第 19 块理论板;增加侧采工艺后能使后续精馏系统中的水循环量减少 50% 以上;增加热泵回收工艺后,可节约新鲜蒸汽消耗 45% 以上,并可提高废水排放标准 20% 以上。模拟计算结果被推广到实际生产中,生产数据与模拟数据吻合良好,节能减排效果明显。

关键词:醪塔;节能减排;侧采;热泵;模拟

中图分类号:TQ018

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2009)06-0063-03

Simulation of energy conservation and emission reduction of prefractionator in menstruum fermentation

WANG Hong-hai, LI Chun-li, WANG Rong-liang, ZHANG Peng

(School of Chemical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Energy conservation and emission reduction of prefractionator in menstruum (acetone, butanol and ethanol or ABE) production by the fermentation is studied using processing simulative software-PRO/II. The effects of vapor consumption and residual solvent content in wastewater are observed when the theoretical stage number and feed position are changed. Promotion of added side withdrawing technology and heat pump recovery process for energy conservation and emission reduction of the prefractionator is made. The results show that the suitable theoretical stage number is 40 and the optimal feed position is at 19. It is also indicate that the circulation of water volume in the latter distillation system has been reduced by over 50% when the side withdrawing technology is added. The consumption of fresh vapor has been saved by more than 45% and the residual solvent content in wastewater has been reduced by over 20% when the heat pump recovery process is introduced. The numerical simulative result has been applied into industrial production. The data of simulation and production inosculate well. The effect of energy conservation and emission reduction is obvious.

Key words: prefractionator; energy conservation and emission reduction; side withdrawing; heat pump; simulation

丙酮和丁醇是优良的有机溶剂,还是涂料、塑料和橡胶等产品的主要原料。广泛应用于有机合成、塑料、树脂、油漆、医药和国防工业。近年来由于石油价格的飞速上涨,加之石油资源的日益紧缺,发酵法生产丙酮、丁醇的技术显示出其优势,尤其是以非粮作物为原材料生产生物丁醇是未来发展的方向,符合国家能源安全的长远战略考虑。

国内溶剂生产使用的四塔流程是从国外引进过来的,有较多的蒸发、加热、冷却等设施,投资费用较高。近年来国内外众多学者对发酵法溶媒生产中发酵菌方面的研究颇多^[1-6],对废气回收,塔顶温度控制等也有之^[7-9],而从设备及工艺方面着手进行节能减排研究的极少^[10]。因过程中涉及的精馏塔多且复杂,整体模拟计算困难。

笔者利用流程模拟软件 PRO/II 对国内常用的发酵法溶剂生产工艺中的醪塔进行了模拟计算,在忽略众多含量极低的复杂成分的情况下,考察了理论板数、进料位置、增加侧采工艺及热泵回收工艺对蒸汽消耗、废水排放的影响,并将优化模拟结果推广到工程实践中进行了验证,节能减排效果明显。

1 节能减排思路

我国现在主要采用的发酵醪精馏生产流程如图 1 所示。含总溶剂质量分数约 2% 的发酵醪首先进入醪塔,塔顶分离出质量分数约为 50% 的总溶剂进入丁醇塔进行精馏。丁醇塔分离出来的水层因含有少量溶剂而重新进入醪塔进行精馏。从该流程可以看出,醪塔顶部分离出来总溶剂中含的这部分水进

收稿日期:2009-02-16;修回日期:2009-04-21

作者简介:王洪海(1974-),男,博士生,讲师,主要从事传质与分离工程方面的研究,022-26582246,ctstwhh@hebut.edu.cn;李春利(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事传质与分离工程方面的研究,通讯联系人,ctstlcl@163.com。

行了多次精馏,而每次精馏都会消耗蒸汽。因此应该尽量提高醪塔顶部总溶剂的浓度来降低后续流程中水的反复精馏。

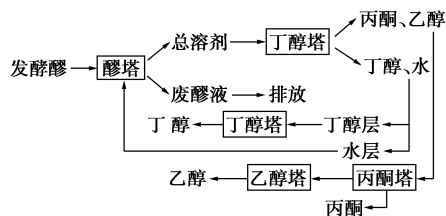


图 1 发酵醪精馏生产流程图

醪塔对溶剂的分离效果较差,混有丙酮、乙醇和丁醇的溶液一起进入丁醇塔,丁醇含量较低,质量分数只有 30% 左右,没有拉开分离溶剂的空间。

醪塔底部废醪达到排放标准后直接排放,其质量分数 99% 的成分是水。因塔釜具有一定的压力,因此这部分水的温度超过 100℃,若直接进行原料的预热则温差太大,故可以通过闪蒸的方式提出一部分二次蒸汽重复利用,以节省新鲜蒸汽的消耗量,并可降低废水中溶剂的含量。

2 节能减排措施

2.1 进料板位置

原工艺中醪塔的实际塔板数为 43 块,塔高 23 m。根据实际操作数据,利用 PRO/II 软件进行模拟,确定其理论板数为 22 块,进料位置为第 3 块理论板。在其他参数不变的情况下,改变进料板位置,考察蒸汽消耗量及塔底所排废水中溶剂含量的变化,结果如图 2、图 3 所示。

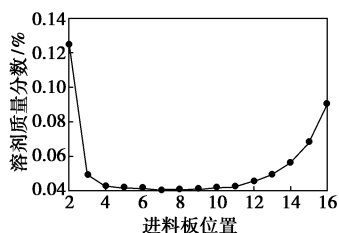


图 2 进料板位置与废水中溶剂含量的关系

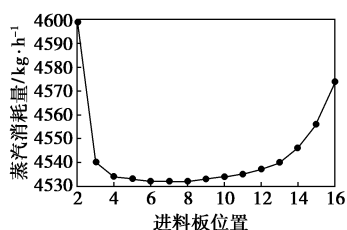


图 3 进料板位置与蒸汽消耗量的关系

从图 2、图 3 可以看出,进料板位置由第 2 块理

论板到第 16 块理论板变化时,塔底废水中溶剂的含量及蒸汽消耗量都是先下降后上升。当进料位置为第 8 块理论板时,蒸汽消耗量最小,塔底排放的废水中溶剂含量也是最小。因此,原进料位置在第 3 块理论板是不合理的,需要进行调整,适宜的进料位置应该在醪塔中部附近。

2.2 理论板数

理论上讲,在其他操作条件不变的情况下,理论板数越多,所得产品质量就越高。当理论板数变化时,适宜进料板位置也可能变化。因此,利用模拟软件对原醪塔进行增加理论板数计算,考察对塔底废水中溶剂含量及进料位置的影响,如图 4、图 5 所示。

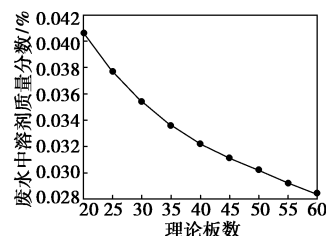


图 4 废水中溶剂含量与理论板的关系

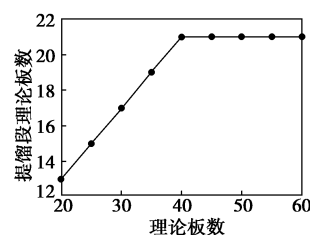


图 5 提馏段理论板数与总理论板数的关系

从图 4 可以看出,理论板数增加,塔底排放的废水中残余溶剂含量降低,且下降速度由快到慢。从图 5 可以看出,醪塔所需提馏段理论板数与总理论板数有一定关系。当理论板数超过 40 块以后,其提馏段所需理论板数固定在 21 块不变。因此确定 40 块理论板数为适宜选择。

原工艺设计因为考虑消防要求,塔高一般控制在 24 m 以下。因此为了满足增加理论板的要求,加设一个实际板数为 40 块左右的塔与原塔串联使用。这样既可满足消防要求,又可使得理论板数基本达到 40 块的要求。

2.3 增加侧采工艺

原醪塔理论板数较少,没有拉开溶剂分离的空间^[11]。因此可以考虑通过侧采来达到分离和提纯的目的。对总理论板数为 40 块的醪塔内丁醇与水在每层塔板上的浓度分布可以看出(如图 6),在第 8~9 块理论板附近,塔内丁醇含量最高。因此在

第8块理论板附近加设侧采口,并利用 PRO/II 软件进行模拟计算确定侧采量。通过中间冷凝,使得侧采出来的液体进行适当冷却并分层,轻相即富丁醇相进入丁醇塔,重相即水相回醪塔。

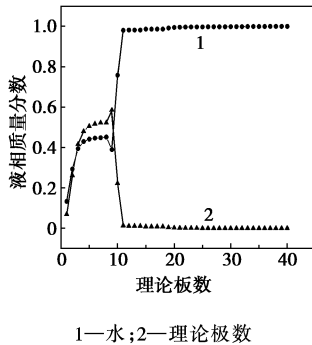


图6 醪塔内液相浓度分布图

2.4 热泵回收系统

从醪塔底部排放的废水中还有质量分数为万分之几的溶剂,可进一步提纯。另外,塔底废水温度大约为 110℃,适于闪蒸出一定量的二次蒸汽。因此在原工艺基础上,增加热泵回收工艺,对塔底排出的废液先利用热泵进行闪蒸,将水温降低到 90℃左右,再输送到下一环节进行原料预热。闪蒸出的二次蒸汽与新鲜蒸汽一起,通过热泵混合后用于加热醪塔。

综合考虑以上几点,利用 PRO/II 软件进行了模拟计算,计算结果如表 1。

表 1 结果比较

	原数据	优化数据
产量/kg·h ⁻¹	50000	50000
理论板数/块	22	40
进料板位置/块	3	19
侧采位置/块		9
侧采流量/kg·h ⁻¹		1190
馏分溶剂质量分数/%	52.7	71.5
后续精馏系统中的水循环量/kg·h ⁻¹	876	356
蒸汽消耗量/kg·h ⁻¹	4537	2490
废水排放量/kg·h ⁻¹	52687	51164
废水中残余溶剂质量分数/%	0.0495	0.0359

3 工业验证

将模拟结果推广到某处理量为 50 000 kg/h 的溶剂厂。原工艺每生产 1 000 kg 总溶剂需消耗新鲜蒸汽 14 150 kg(其中醪塔消耗 8 250 kg),改造后新工艺每生产 1 000 kg 总溶剂需新鲜蒸汽 8 390 kg(其中醪塔消耗 5 055 kg)。废水中残余溶剂质量分数从原

来的 0.07%降低为 0.04%,节能减排效果明显。实际蒸汽消耗与表 1 中计算值之间的差别是因为热量损失引起的。

4 结论

(1)采用流程模拟软件 PRO/II 对发酵法溶剂生产中的主要成分进行模拟分析计算是可行的。

(2)模拟计算结果表明,原工艺存在理论板数不足、进料位置不合适等问题。较适宜的理论板数为 40 块,最佳进料板位置为第 19 块理论板。

(3)增加侧采工艺可降低后续精馏系统中的水循环量 50%以上,增加热泵回收工艺可降低新鲜蒸汽消耗量 45%以上,降低废水中残余溶剂质量分数 20%以上。

参考文献

- [1] Nasib Qureshi, Ezeji Thaddeus C, Jennifer Ebener, et al. Butanol production by *Clostridium beijerinckii*; Part I. Use of acid and enzyme hydrolyzed corn fiber[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(13): 5915 - 5922.
- [2] Badr H R, Toledo R, Hamdy M K. Continuous acetone-ethanol-butanol fermentation by immobilized cells of *Clostridium acetobutylicum* [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2001, 20(2): 119 - 132.
- [3] Qureshi N, Meagher M M, Huang Jicai, et al. Acetone butanol ethanol (ABE) recovery by pervaporation using silicalite-silicone composite membrane from fed-batch reactor of *Clostridium acetobutylicum* [J]. *Journal of Membrane Science*, 2001, 187(1): 93 - 102.
- [4] Grube M, Gapes J R, Schuster K C. Application of quantitative IR spectral analysis of bacterial cells to acetone-butanol-ethanol fermentation monitoring[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2002, 471(1): 127 - 133.
- [5] Ezeji T C, Qureshi N, Blaschek H P. Continuous butanol fermentation and feed starch retrogradation: Butanol fermentation sustainability using *Clostridium beijerinckii* BA101[J]. *Journal of Biotechnology*, 2005, 115(2): 179 - 187.
- [6] Liu Fangfang, Liu Li, Feng Xianshe. Separation of acetone-butanol-ethanol (ABE) from dilute aqueous solutions by pervaporation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2005, 42(3): 273 - 282.
- [7] 张禹生. 溶剂醪塔顶温的过程控制[J]. *辽宁化工*, 2002, 31(12): 534 - 536.
- [8] 王晓军. 发酵法生产丙丁溶剂废气的回收利用[J]. *内蒙古民族大学学报*, 2008, 14(2): 15 - 16.
- [9] 许文友. 碳酸钾分离乙醇-丙酮-丁醇-水体系[J]. *过程工程学报*, 2001(3): 318 - 320.
- [10] Pucci A, Mikitenko P, Asselineau L. Three-phase distillation simulation and application to the separation of fermentation products[J]. *Chemical Engineering Science*, 1986, 41(3): 485 - 494.
- [11] 张鹏. 丙丁蒸馏工艺过程研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2008.