

一步法蒸发冷凝水脱单塔设计优化研究

任健¹, 梅诗宇¹, 李健辉², 章渊昶², 祝铃钰², 姚克俭^{2*}

(1. 中国石化上海石油化工股份有限公司腈纶事业部, 上海 200540;

2. 浙江工业大学化学工程与材料学院, 杭州 310032)

摘要:建立了脱单塔系统的费用模型, 确定影响脱单塔设计优化的关键变量为废水进料温度、塔内件型式和丙烯腈脱除率, 对一步法蒸发冷凝水脱单塔系统的操作与设备费用进行分析。以总成本最小为目标, 完成三个关键变量与系统总成本的关联, 以操作费用和设备成本最小确定关键变量的选择方案, 并对工业设计进行指导。结果表明, 当选择圆筒型散装填料作为塔内件时, 系统的总费用比选择板式塔要低。将理论计算结果用于工业设计, 优化设计点是若干设计工况中的最佳点。

关键词:丙烯腈; 设计优化; 一步法蒸发冷凝水

中图分类号: TQ051.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2013)03-0094-03

Optimal design of acrylonitrile removal column for one-step condensate

REN Jian¹, MEI Shi-yu¹, LI Jian-hui², ZHANG Yuan-chang², ZHU Ling-yu², YAO Ke-jian^{2*}

(1. Sinopec Shanghai Petrochemical Industry Co., Ltd., Acrylic Fiber Business Department, Shanghai 200540,

China; 2. College of Chemical Engineering and Material Science, Zhejiang University of Technology,

Hangzhou 310032, China)

Abstract: A cost model of the single tower is established, in which feed temperature of wastewater, column internal and acrylonitrile recovery are determined as key variables to analyze the operation and capital costs of acrylonitrile removal system for one-step condensate. To obtain the minimum total cost, the correlations between these three key variables and the total cost are analyzed. The operation and capital costs are minimized to choose the optimal case which could conduct industrial design. The results show that the total cost of the plant using random cylindrical packing column is lower than that using tray column. Applying the optimization results to industrial design, the optimized point is the best circumstance of several design conditions.

Key words: acrylonitrile; optimization; one-step condensate

环境保护项目往往收益较少而成本较高, 如果在过程设计中充分体现优化的概念, 在保证环境排放合格和一定收益的前提下, 尽量降低项目成本, 环保技术的推广将会日益顺利。目前, 国内丙烯腈废水的处理成本昂贵, 而效果不尽人意, 给企业生产经营带来一定的负担^[1]。所以, 在满足排放要求的同时进行总成本最小的优化就显得十分必要, 既有效地保护生态环境, 又能使防治污染费和污染带来的损失费之和最小, 这对企业是很有吸引力的。一步法蒸发冷凝水为丙烯腈 (AN) 生产过程中一步法溶剂净化蒸发产生的冷凝水, 其中含有少量的丙烯腈, 直接排放对环境污染严重^[2-3]。汽提 (吹脱) 是采用空气与废水逆流接触的方法, 将溶解于废水中的杂质解吸到空气中予以脱除^[4]。要对化工过程设计的费用进行优化, 需要首先在复杂的工业过程中提取出对目标函数有较大影响的关键变量, 并且建立过程和经济模型^[5]。汽提脱除丙烯腈工艺总成本的影响因素很多, 不同的 AN 脱除率, 不同的废水进料温度, 不同的塔内件型式都会对过程的成本产

生影响。本文建立了一步法蒸发冷凝水脱单塔的总成本数学模型, 探讨了一步法蒸发冷凝水脱单塔进行污水处理的效果及总成本与各个变量的关系, 对汽提脱除丙烯腈工艺在不同条件下的操作费用、投资以及能耗进行简要对比, 考虑了装置的能量回收效益, 确定汽提脱单过程的最佳操作参数, 并与工业设计方案的成本做了比较, 为工业优化设计提出了努力方向。

1 工业装置流程及经济评价

1.1 工业装置流程简介

工业装置采用汽提法脱除一步法蒸发冷凝水中的 AN、醋酸等杂质, 可以通过带压汽提将水的单体浓度从 60 mg/L 左右降到 5 mg/L 以下。工业旁路实验^[4]中曾经对圆筒型散装填料、复合塔板以及固定阀塔板的传质和水力学性质进行对比, 最后从流体力学性能确定采用圆筒型散装填料^[6]和固定阀塔板^[7]进行工业过程设计方案筛选, 本文将对汽提塔的操作条件和投资费用进行评价。与一步法冷凝

水汽提脱丙烯腈的相关流程如图1所示。

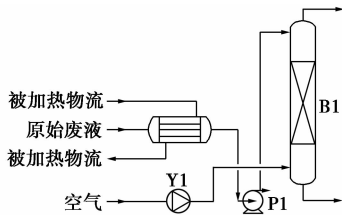


图1 汽提脱丙烯腈流程

一步冷凝废水经换热器回收余热后由泵 P1 送至汽提塔 B1 塔顶,压缩空气经风机 Y1 增压后由下而上与塔顶冷凝水逆流传质,汽提冷凝水中的丙烯腈。蒸发冷凝废水的水量为 90 ~ 120 m³/h,水温为 80 ~ 90℃,经余热利用换热后为 40 ~ 50℃。水质情况如表 1 所示。

表 1 蒸发冷凝废水的水质情况

AN/ (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	NaSCN/ (mg·L ⁻¹)	CH ₃ COOH 质量分数/ %	HCOONa 质量分 数/%	Na ₂ SO ₄ 质量分 数/%	其他
40 ~ 50	700 ~ 800	~ 10	0.5	0.002	0.002	少量

1.2 工业装置经济评价

汽提脱除丙烯腈工业装置流程的投资估算主要包括设备成本和操作成本,其中设备成本包括高压风机、泵和塔的投资;操作成本则体现在换热器的余热利用、高压风机能耗及泵的能耗上。高压风机是汽提塔的一部分,它的功率与鼓入空气量、出口风压有关,而鼓入空气量、出口风压由废水进料温度、汽提塔内件型式和丙烯腈脱除率确定。泵及其能耗由废水的进料流量决定,由于废水流量固定,所以泵的相关费用一定。汽提塔的投资与塔径和塔高有关,取决于鼓入气体量和废水进料量。因此设备与操作费用和设计压力、设计温度、设备直径、设备高度、操作介质、设备材质以及环境等因素都有关系,可以将一步法蒸发冷凝水脱单塔成本优化的目标函数写成如下形式:

$$\min Z = C_Y + C_T + aQ_1 + bQ_2$$

式中, Z 为总成本,元/a; C 为设备成本,元/a;下标 Y、T 为设备类型,分别表示压缩机和塔; a 为与附加蒸汽价格相关的一个固定常数,元/(a·kW); Q_1 为换热器的换热量,kW; b 为与当地电单价相关的一个固定常数,元/(a·kW); Q_2 为高压风机能耗,kW。

2 优化结果与讨论

在 10 m 塔高,0.5 m 板间距,4 块理论板的板式塔中,塔顶 AN 脱除率 R 为 0.91 时,废水的进料温

度由 41℃ 升至 69℃,废水热量利用率由 0.9 降至 0.4。同时,换热器中废水换热量减少,附加蒸汽换热量 Q_1 由 2.05×10^6 kJ/h 增至 1.22×10^7 kJ/h,蒸汽费用 aQ_1 增加。由于汽提塔废水进料温度升高,汽提塔所需空气量减少,即高压风机 Y1 的排气量减少,其能耗 Q_2 减少,风机电费 bQ_2 减小,风机设备费用减小;又空气进料流量减少导致所需塔径减小,因而塔的设备费用减少。以年(8 000 h)为时间单位,废水进料温度 T 和丙烯腈脱除率 R 为变量对工艺流程总成本作图。板式塔总成本与废水进料温度和丙烯腈脱除率之间的关系见图 2。

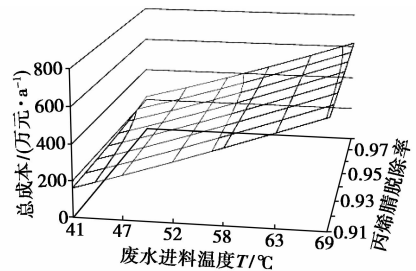


图 2 板式塔总成本与废水进料温度和丙烯腈脱除率之间的关系

在 10 m 塔高,0.5 m 等板高度的填料塔中,塔顶 AN 脱除率 R 和废水进料温度的改变对废水热量利用率、换热器的影响与上述的板式塔中的描述是一致的。由于填料塔压降约为板式塔压降的 1/5,故废水进料状态不变时填料塔中 Y1 的排气压力要小,其操作费比板式塔的少;风机选型时压力要求小,相比板式塔的高压风机设备费用要小。另一方面,在相同 AN 脱除率、相同废水进料温度下,填料塔的塔径、内件费用都比板式塔的高。对风机成本和塔设备成本求和计算,结果显示填料塔系统的设备总成本比板式塔的更小。填料塔总成本与废水进料温度和丙烯腈脱除率之间的关系见图 3。而系统总成本的比较可以通过图 2 和图 3 进行,可以发现相同的条件下,采用填料塔的系统年总成本比采用板式塔的更低。

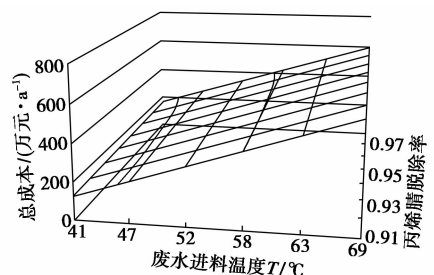


图 3 填料塔总成本与废水进料温度和丙烯腈脱除率之间的关系

从图2和图3可看出,不管是板式塔还是填料塔,年总成本都是随废水进料温度、AN脱除率的增加而增大,而废水进料温度的改变明显比AN脱除率的改变对年总本的影响程度大。上述比较中各中间数据点的设备费用由理论关联式计算得到,并不是实际制造费用,因此计算结果会与实际结果有一定的偏差。但是,关键参数的确定方案和费用的数量级变化对实际的工业设计具有指导意义。

3 工业设计方案

经济评价的理论分析可以用于初步优化,帮助设计者从复杂的变量中进行对比方案遴选,减少投资分析工作量。本文将以上述3个关键变量对实际费用的影响来确定工业设计对比方案,并验证实际设计与理论分析结果是否相符,设备费为实际购置所需费用。

(1): 冷凝水 40 ~ 50℃ 进料, DJ-5(固阀)型塔板, 出料 AN 质量含量 5 mg/L 以下。冷凝水换热后约 40 ~ 50℃ 进料, 汽提后丙烯腈质量含量 5 mg/L 以下, 内件选用 DJ-5 型固定阀塔板。

(2): 冷凝水 80℃ 进料, DJ-5(固阀)型塔板, 出料 AN 质量含量 5 mg/L 以下。冷凝水 80℃ 进料, 汽提后丙烯腈质量含量 5 mg/L 以下, 内件选用 DJ-5 型固阀塔板。

(3): 冷凝水 40 ~ 50℃ 进料, DJ-5(固阀)型塔板, 出料 AN 质量含量 10 mg/L 以下。冷凝水 40 ~ 50℃ 进料, 出料控制在 AN 质量含量 10 mg/L 以下, 内件选用 DJ-5 型固阀塔板。

(4): 冷凝水 40 ~ 50℃ 进料, 圆筒型散装填料, 出料 AN 质量含量 5 mg/L 以下。冷凝水换热后 40 ~ 50℃ 进料, 汽提后丙烯腈质量含量 5 mg/L 以下, 内件选用圆筒型散装填料。

从表2看出,在4个方案中,年操作费用在年总成本中所占比例较大,为74%~96%,所以,在同类型的塔系统中,年操作费用基本就决定了年总成本的大小。方案二、三、四在方案一的基础上分别改变了废水进料温度、丙烯腈脱除率和塔内件型式。比较各方案可以发现,当废水余热利用充分时,虽然进口废水温度较低导致设备费较高,但年操作费低,所以年总成本较低;丙烯腈脱除率低时,年操作费用和年总成本都较低,因此环保项目要确定合理的回收目标。而采用填料塔时,虽然塔内件费用较高,但由于压降低,系统中风机设备费比板式塔系统低很多,因此总费用反而低。这些结果与理论分析的结果是一致的,由于能耗单价提高,系统中单台设备的投资

费用高并不一定会让总费用增加,低压降和低能耗对过程设计优化更有效。

表2 4种方案的工艺计算结果

参数	方案1	方案2	方案3	方案4
废水进料温度/℃	40~50	80	40~50	40~50
丙烯腈脱除率/%	95	95	90	95
压缩空气设计量/(m ³ ·h ⁻¹)	20000	6000	16800	20000
塔顶出料				
流量/(kg·h ⁻¹)	27353	10177	21474	27353
温度/℃	48.1	76.3	48.8	48.1
压力/kPa	115	115	115	115
塔底出料				
流量/(kg·h ⁻¹)	88479	87555	88798	88479
温度/℃	38.5	63.2	40.7	38.5
压力/kPa	135	135	135	135
塔体切线高/m	14.5	14.5	14.5	14.5
塔径/m	2.6	1.8	2.2	2.6
塔板压降/kPa	20~30	20~30	20~30	2~3
出口风压/kPa	≥30	≥30	≥30	≥7
年操作费/(万元·a ⁻¹)	132.6	785.3	118.3	104.1
年设备费用/(万元·a ⁻¹)	41.0	28.3	35.5	35.0
年总成本/(万元·a ⁻¹)	173.6	813.6	153.8	139.1

4 结语

本文对脱除一步法蒸发冷凝水中丙烯腈的汽提塔进行了工艺模拟和塔内件水力学计算,并以废水进料温度、丙烯腈脱除率和塔内件型式为关键参数对整个废水处理过程进行了经济分析,通过4种不同工业设计方案的比较结果对比,验证了关键参数对实际费用的影响。本文对4种不同的工艺方案进行了研究,得出了各方案下的工艺设计数据、水力学数据以及不同材质下的设备费用。

参考文献

- [1] 刘宝田,林殿广,王建凯. 丙烯腈废水处理技术研究[J]. 环境科学与管理,2012,37(4):132-134.
- [2] 彭鹤威,闫光绪,郭绍辉,等. 丙烯腈生产废水处理技术研究进展[J]. 合成纤维,2008,(2):9-13.
- [3] 倪明. 丙烯腈生产废水处理技术研究进展[J]. 水处理技术,2010,36(6):1-4.
- [4] 梅诗宇,任健,祝铃钰,等. 汽提法脱除废水中的丙烯腈[J]. 化工进展,2010,29(7):1201-1204.
- [5] 托马斯F埃德加,戴维M希梅尔布劳,利昂S拉斯东. 化工过程优化[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [6] 王良华,姚克俭,李育敏,等. 新型固定阀塔板的流体力学和传质性能研究[J]. 化学工程,2005,33(2):4-8.
- [7] 姚克俭,王良华. 圆筒型散装填料:中国,200710069414[P]. 2008-06-11. ■