

内部热耦合-上置隔壁塔的设计与优化

纪 玉, 陈海胜*

(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘要:为了提高化工分离过程的节能效果、扩展内部热耦合精馏塔以及隔壁塔的运用,提出了内部热耦合-上置隔壁塔(ITC-TDWC)的新结构。以甲醇-乙醇-正丙醇三元混合物系作为研究对象,选用进料比例为 0.5、0.25、0.25,以上置隔壁塔(TDWC)的结构为基础并结合发展内部热耦合(ITC)来设计 ITC-TDWC 的最优化结构。在最终确定 ITC-TDWC 的最优结构后,将该结构的回收年限、能耗等数据与 TDWC 进行了对比分析,结果表明,ITC-TDWC 在达到三元混合物分离要求的同时,回收年限会略有增加,但节能效果显著,比 TDWC 的分离过程节能约 30%。

关键词:内部热耦合;隔壁塔;Aspen;节能

中图分类号:TQ053.5

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)02-0215-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.02.040

Design and optimization of internal thermal coupling-top dividing wall column

Ji Yu, CHEN Hai-sheng*

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract:In order to improve the energy-saving effect of chemical separation process, and gradually expand the application of internal thermal coupling distillation column and dividing wall column, a new structure of internal thermal coupling-top dividing wall column (ITC-TDWC) is proposed, which is based on the structure of top dividing wall column and combined with the development of internal thermal coupling. Taking methanol-ethanol-N-propanol ternary mixture system as research object, the optimal structure of ITC-TDWC is designed with feeding ratios of 0.5, 0.25 and 0.25, respectively. After the optimal structure of ITC-TDWC is finally determined, the payback period and energy consumption of the structure are compared with that of TDWC. Comparison results show that the payback period of ITC-TDWC will increase slightly while meeting the requirements of ternary mixture separation, but the energy saving effect will be significant, which will save about 30% of energy than TDWC separation process.

Key words:internal thermal coupling; dividing wall column; Aspen; energy conservation

精馏过程是化工过程中应用最广泛的分离技术之一,在石油化工和其他化工过程中起着重要作用,据估计,化工过程中 40%~70% 的能耗用于分离,而精馏能耗又占其中的 95%^[1]。在当前能源日趋紧张的形势下,研究精馏分离的节能工作尤为重要。

在分离三元混合物时,为了合理、有效地利用能量达到节能目的,可以使用内部热耦合和隔壁塔。内部热耦合优点明确,不仅可以简化精馏流程,简化投资费用,还降低了精馏操作过程的不可逆性,提高了热力学效率,具有巨大的节能潜力,可节能 30%~60%^[2-4]。隔壁塔将预分馏塔与主塔组合在同一个精馏塔内,在设备上省去了 1 个再沸器和 1 个冷凝器,从而节省了设备投资,同时由于热量在同一个塔内重复循环利用,因此也节省了能耗^[5]。Errico 等^[6]指出,对于某些给定的物料,隔壁塔和常规精

馏塔相比,节能最高可达到 60% 以上,设备投资节省 30%,可见 ITC 和 DWC 是研究节能技术的 2 个重要领域。

本文中通过分离甲醇-乙醇-正丙醇三元混合物系,以年度投资成本 *TAC* 为目标函数,使用 Aspen Plus 模拟计算出上置隔壁塔蒸馏塔(TDWC)的最优结构,然后为其增加内部热耦合(ITC)来逐步优化模拟内部热耦合-上置隔壁塔结构(ITC-TDWC),研究分析对比了 ITC-TDWC 和 TDWC 分离的回收年限和节能效率,并验证 ITC-TDWC 节省能源的有效性,为内部热耦合、隔壁塔的多元应用提供基础,对今后应用于工业生产有着重要的意义。

1 上置隔壁塔分离三元混合物的工艺流程

采用上置隔壁塔的三元混合物分离流程如图 1 所示。

收稿日期:2022-03-10;修回日期:2022-12-26

作者简介:纪玉(1996-),女,硕士生;陈海胜(1986-),男,博士,副教授,研究方向为化工过程系统工程,通讯联系人,chenhs@mail.buct.edu.cn。

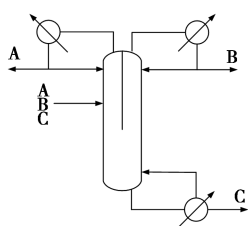


图 1 三元混合物分离的上置隔壁塔流程

首先选择进料组成,三元混合物的进料量为 100 kmol/h, 甲醇、乙醇、正丙醇的摩尔分数分别为 0.50、0.25、0.25, 采用仿真软件 Aspen Plus 作为稳态模拟环境, 物性方法选用 WILSON 热力学模型描述气液相平衡关系, 以最小年总成本 (TAC) 作为 TDWC 仿真设计的目标函数。 TAC 由设备总投资的成本 (CI) 和操作费用 (OC) 2 部分构成, 见式 (1)。

$$TAC = OC + CI/\beta \quad (1)$$

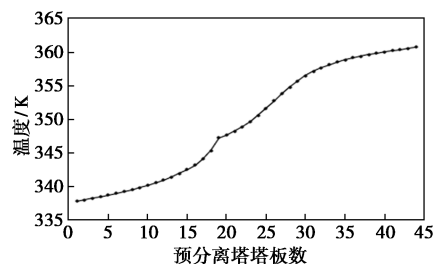
其中 CI 主要包含塔壳、塔板、热交换器以及压缩机的投资成本, OC 主要包含蒸汽、冷却水、催化剂以及电力消耗等费用, β 为设备总投资的回收期限, 计算时需要知道冷却水和蒸汽的价格, 在文献 [7] 中可以找出。

在总能量守恒中, 设置压缩机功率 (Q_{COMP}) 转换成热量的比例系数为 3, 见式 (2), 其中, Q_{TUC} 为总功耗, Q_{REB} 为再沸器的热负荷, 年有效操作时间设为 8 150 h/a^[8]。

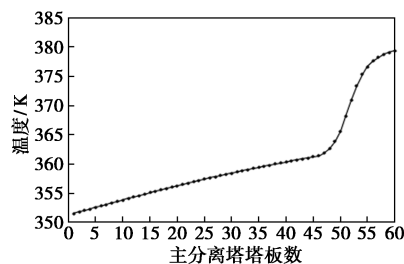
$$Q_{TUC} = Q_{REB} + 3Q_{COMP} \quad (2)$$

对于 TDWC, 有 4 个需要设计的结构变量和 3 个操作变量。需要设计的结构变量包括隔离壁两侧的塔板数 (相同)、公共提馏段塔板数、进料位置和气相分流比。需要设计的操作变量包括塔顶左侧产品回流比、塔顶右侧出料流率和塔底出料流率。由于分离的是窄沸点物系, 稳态结构的塔顶和塔底温差最多不能超过 30 K。以年总成本 TAC 为目标函数, 通过对隔离壁两侧的塔板数 (相同)、公共提馏段塔板数、进料位置和和气相分流比这 4 个需要设计的结构变量的调整, 得出 TDWC 的最优结构。图 2 为 TDWC 的预分离塔和主分离塔的塔板温度分布曲线, 从图 2 中可以看出塔顶到塔底的温度差在 30 K 以内, 符合窄沸点物系的分离规律^[9]。TDWC 的最优结构如图 3 所示, TDWC 的隔离壁两侧塔板数为 45 块, 公共提馏段塔板数为 15 块, 进料位置塔板数为第 19 块, 气相分流比为 0.76 时, 相对应的 TAC 值最小。除了气相分流比, 其他结构参数为变量增加时, TAC 曲线呈现先下降后增

加的态势, 在气相分流比模拟过程中结构变量增加, TAC 呈现增加趋势, 之所以选取 0.76, 是因为当气相分流比低于 0.76 时, 模拟过程出错, 此时 3 个出口的物质浓度不达标, 所以气相分流比选择 0.76。将回收年限设定为 3 a, CI 、 OC 和 TAC 分别为 $2\,051.985 \times 10^3$ 、 615.195×10^3 、 $1\,299.181 \times 10^3$ 美元。塔底再沸器的热负荷为 2 475.029 66 kW, 总能耗即为 2 475.029 66 kW。



(a) 预分离塔塔板温度分布图



(b) 主分离塔塔板温度分布图

图 2 上置隔壁塔的预分离塔和主分离塔的塔板温度分布曲线

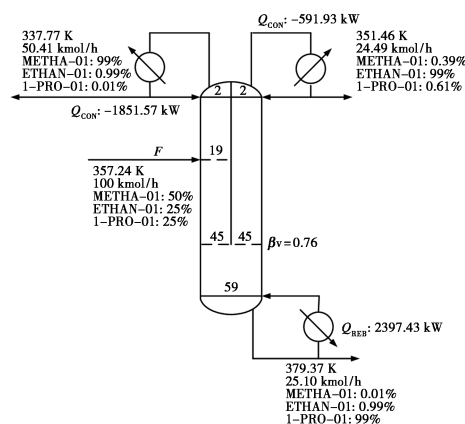


图 3 上置隔壁塔的最优结构

2 ITC-TDWC 的设计优化

图 4(a) 是上置隔壁塔示意图, 沿着图 4(a) 的虚线将其精馏塔分割为 3 部分, 分为了 3 个单塔, 然后将这 3 个塔组合成图 4(b), 其中 B1 对应的是隔板左侧, B2 对应的是隔板右侧, B3 对应的是公共提馏段。图 4(b) 为 ITC-TDWC 的初始结构。

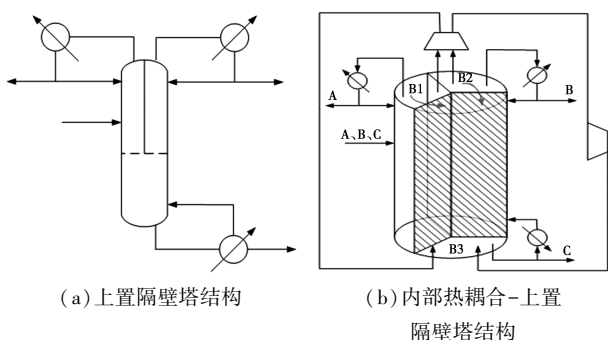
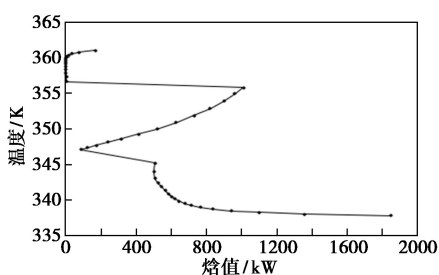


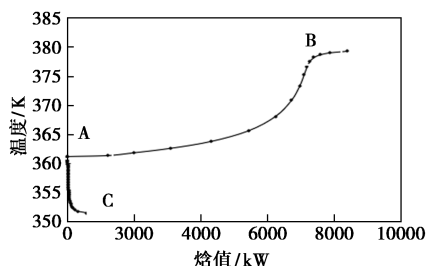
图4 内部热耦合-上置隔壁塔的设计图

2.1 ITC-TDWC 的设计思路

TDWC 的预分离塔和主分离塔的 T-H 曲线如图 5 所示。在进行 ITC-TDWC 的研究时,从预分离塔和主分离塔的 T-H 图中可以看到,TDWC 主分离塔的精馏段顶部(AC 段)有大量热量放出,同时 TDWC 提馏段下部(AB 段)的塔段能够吸收较多的热量。TDWC 的预分离塔也呈现出类似的现象,但其放热吸热的过程很复杂。根据能量平衡理论,可以利用塔顶放出的热量来弥补塔底吸收的热量来达到总能量的平衡。此时提出添加内部热耦合想法,可以在上置隔壁塔中应用内部热耦合来传递能量使得塔顶蒸汽放热量用于加热公共提馏段底端来节省能量的消耗。关于内部热耦合传热部分,可以把隔板右侧的能量传到公共提馏段,使公共提馏段能够吸收较多的热量,隔板左侧吸热放热情况比较复杂,针对这种情况先尝试左侧全部塔板进行传热到公共提馏段。



(a) 预分离塔的 T-H 图



(b) 主分离塔的 T-H 图

图5 上置隔壁塔的预分离塔和主分离塔的 T-H 曲线

需要延长公共提馏段的塔板数,以方便后续对应塔板进行传热。同时 3 个塔对应的塔板之间配有热交换器(可以是独立的换热器或者特殊形式的传热装置),实现隔板两侧精馏段的热量向公共提馏段传递。为保证顺利传递热量,需要在内部热耦合,上置隔壁塔需要安装压缩机,这样可以提高隔板两边精馏段的操作压力和温度。

2.2 ITC-TDWC 的初始优化

使用 Aspen Plus 研究模拟 ITC-TDWC 最优结构时,依然选用三元混合物系甲醇-乙醇-正丙醇,物性方法选用 WILSON,以能耗和 TAC 为目标函数,甲醇、乙醇、正丙醇的摩尔分数要求都设定为 0.99。由于是 2 个隔板传热,所以需要 2 个压缩机,传热量是从高温侧流向低温侧,通过调整压缩比调整 B1、B2 塔顶的塔压,使隔板两侧产生温差,传热量如式(3)所示。

$$Q = UA\Delta T \quad (3)$$

其中 U 为传热系数, A 为传热面积, ΔT 为隔板两侧温差,传热板的传热系数为 $1\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,使用 Fortran 模拟两侧传递的热量,需要调整三元混合物进料位置、气相分流比、2 个压缩机的压缩比以及传热面积来求得 ITC-TDWC 最优化。ITC-TDWC 的初始最优化如图 6 所示。从模拟结果可知,ITC-TDWC 的塔板数为 45,第 20 块塔板为进料位置,气相分流比为 0.77,B1 对应的压缩机的压缩比为 2,B2 对应的压缩比为 2.15,B1 向 B3 传热的每层隔板面积为 $40\ \text{m}^2$,B2 向 B3 传热的每层隔板面积为 $1\ \text{m}^2$,此时对应的 TAC 值最小。

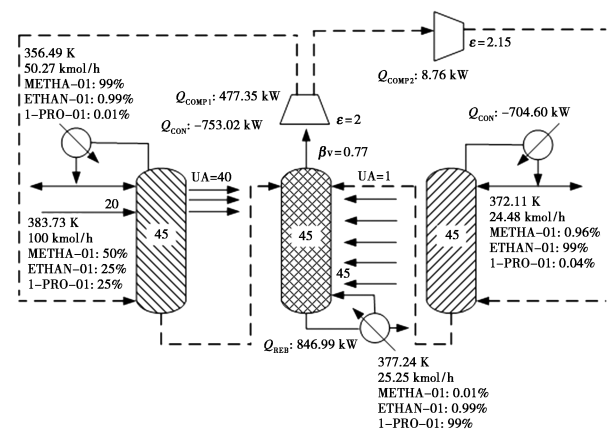


图6 内部热耦合-上置隔壁塔的优化结构 1

若将该塔的 TAC 与 TDWC 的 TAC 等价,求回收年限^[10],那么 ITC-TDWC 的回收年限为 6.1 a,CI、OC 和 TAC 分别为 $5\ 404.875 \times 10^3$ 、 412.364×10^3 、 $1\ 299.181 \times 10^3$ 美元。塔底再沸器的热负荷为

见表 4。

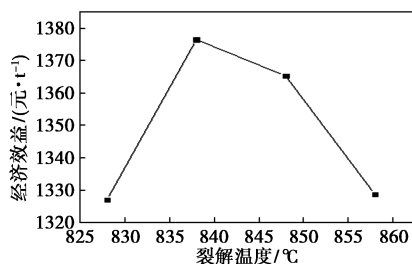


图 2 混合 C₄ 不同裂解温度下经济效益

表 4 加氢混合碳四在不同裂解温度下的裂解收益

经济性比较				
裂解温度/°C	828	838	848	858
经济效益/(元·t ⁻¹)	1327.1	1376.4	1365.2	1328.7
效益差/(元·t ⁻¹)	-49.3	0.0	-11.2	-47.7

从表 4 加氢混合 C₄ 在不同裂解温度下裂解评价产生的效益差可看出,加氢混合 C₄ 的最佳裂解温度是 838℃。

2.4 加氢混合 C₄ 作乙烯原料与其他原料经济分析对比

将加氢混合 C₄ 与其他几种轻质乙烯原料(分别为盘锦石脑油、大庆混合烃、一常蒸顶石脑油、一常常顶石脑油、辽阳抽余油)裂解经济分析进行对比,结果如图 3。

3 结论

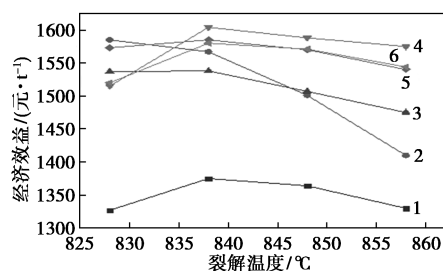
(1)随着乙烯裂解产能增加,原料短缺日益明显,因此开发 C₄ 加氢作为乙烯裂解原料,可以充分提高碳四利用率,提高公司经济效益。

(2)经过加氢处理后的 C₄,原料中不饱和烃明

(上接第 218 页)

参考文献

- [1] 孙兰义,李军,李青松.隔壁塔技术进展[J].现代化工,2008,23(9):38-41,43.
- [2] Takamatsu T, Lueprasitsakul V, Nakaiwa M. Modeling and design method for internal heat integrated packed distillation column[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1988, 21(6): 595-601.
- [3] 周宪田.内部热耦合反应精馏塔的设计与稳态分析[D].北京:中国石油大学,2011.
- [4] 黄克谨,钱积新,战德志,等.理想热耦合精馏塔及其稳态特性[J].石油炼制与化工,1997,(11):55-59.
- [5] Song E, Li Z, Wang E. A novel kind of multiple steady states characteristics in the dividing wall column[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(4): 869-876.



1—加氢 C₄; 2—辽阳抽余油; 3—一常常顶石脑油; 4—一常蒸顶石脑油; 5—大庆混合烃; 6—盘锦石脑油

图 3 不同种乙烯原料裂解经济性评价

显减少,烷烃质量分数增加至 60%以上,碳四加氢相比于未加氢 C₄ 更适宜作乙烯原料。

(3)加氢 C₄ 在稀释比为 0.55,裂解温度为 838℃条件下,经济效益最佳,每吨经济效益约 1 376.4 元。加氢 C₄ 相比于其他几种轻质乙烯原料,经济效益偏低,但可以缓解乙烯原料紧缺的现状。

参考文献

- [1] 刘剑,马立莉,朱丽娜,等.裂解 C₅ 加氢作乙烯原料的研究及经济分析[J].现代化工,2020,40(10):226-229.
- [2] 周鑫.国内外乙烯产业发展趋势研判[J].当代石油石化,2019,27(8):22-29.
- [3] 朱丽娜,马立莉,孙维,等.轻烃-碳四共裂解性能优化研究[J].石油炼制与化工,2021,52(8):23-27.
- [4] 赵立伟.碳四馏分综合利用现状及展望[J].化工管理,2019,(5):17-18.
- [5] 赵文明.对我国乙烯原料路线多元化发展现状及趋势探讨[J].化学工业,2018,36(2):1-13.
- [6] 陈浩,詹小燕,郭振宇.乙烯产业发展现状及趋势[J].石化技术与应用,2020,38(6):363-366.
- [7] 刘剑,朱丽娜,赵辉,等.C₄ 加氢产物作乙烯原料的研究及经济性分析[J].石油炼制与化工,2021,52(3):105-109. ■
- [6] Enrico M, Tola G, Rong B G, et al. Energy saving and capital cost evaluation in distillation column sequences with a divided wall column[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2009, 87(12): 1649-1657.
- [7] Seider W D, Seader J D, Lewin D R. Product and process design principles-synthesis, analysis, and evaluation [M]. New Jersey: Wiley, 2004.
- [8] 臧立静,黄克谨,苑杨,等.轻组分绝对占优的蒸汽再压缩隔壁蒸馏塔的最优拓扑结构[J].化工学报,2020,71(4):1696-1711.
- [9] Li S, Huang K, Wang S J, et al. Application of vapor recompression to heterogeneous azeotropic dividing-wall distillation columns[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(46): 30-38.
- [10] Jana A K. A new divided-wall heat integrated distillation column (HIDiC) for batch processing: Feasibility and analysis[J]. Applied Energy, 2016, 172: 199-206. ■