

丙烯酸分离装置流程模拟优化及经济效益分析

孙 林 (中海油惠州石化有限公司, 广东 惠州 516086)

摘要: 本文基于气相中丙烯酸、醋酸缔合作用分析, 采用 NRTL-NTH 模型模拟分析丙烯酸分离及提纯的详细过程, 尤其是分离装置中的急冷塔等部分操作原理。同时, 本文根据模拟分析结果对丙烯酸分离装置流程参数进行优化。研究结果表明, 优化后的工艺参数能够显著提高丙烯酸的分离效率和产品质量, 并降低了能耗和生产成本。

关键词: 丙烯酸; 丙烯酸分离装置; 分离装置流程模拟; 经济效益

中图分类号: TQ225.13 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 022-0049-03

Process simulation optimization and economic benefit analysis of acrylic acid separation plant

Sun Lin (CNOOC Huizhou Petrochemical Co., LTD., Huizhou Guangdong 516086, China)

Abstract: This paper analyzes the co-deposition of acrylic acid and acetic acid in gas phase, using the NRTL-NTH model to simulate and analyze the detailed process of acrylic acid separation and purification, particularly the operating principles of the quench tower in the separation unit. Additionally, this paper optimizes the process parameters of the acrylic acid separation unit based on the simulation results. The study shows that the optimized process parameters significantly improve the separation efficiency and product quality of acrylic acid, while reducing energy consumption and production costs.

Key words: acrylic acid; acrylic acid separation device; separation process simulation; economic benefit

丙烯酸作为涂料、纺织、胶黏剂等多个领域中的重要原材料, 在化工行业中属于重点研发原料之一。随着丙烯酸的市场需求不断增加, 其生产技术在不断优化和完善。从丙烯酸生产过程上看, 丙烯酸分离和提纯过程是影响其产品质量及其经济效益的关键环节。因此, 若要进一步提高丙烯酸生产技术、提升质量品质, 需充分了解其生产流程以制定优化方案, 此时对其分离装置利用最新模拟软件实施流程模拟具有重要意义。本文对丙烯酸分离装置的各个单元进行了详细的模拟分析, 并提出了相应的工艺参数优化方案, 旨在为提高丙烯酸的分离效率和产品质量提供借鉴与参考。

1 丙烯酸分离装置流程模拟

1.1 急冷塔模拟

模拟参数: 吸收剂纯水流量温度 38 °C, 压力 202.66kPa, 进料流量 81229.8kg/h, 压力 125.5kPa; 急冷塔塔顶的温度是六十摄氏度, 塔底的温度为七十三摄氏度, 塔顶与塔底压力分别为 114kPa、123kPa, 散堆填料 30m 阶梯环。

急冷塔主要通过吸收剂水吸收丙烯酸, 处理的原料包括水、丙烯酸、醋酸等。基于丙烯酸与醋酸的缔合作用分析, 选择 NRTL-NTH 模型进行模拟分析。在急冷塔的运行过程中, 塔顶和塔底的物流组分起着至关重要的作用。在具体的操作中, 发现塔顶物流里丙烯酸组分质量的分数是 106PPM, 低于所设定的丙烯酸指标要求。此外, 同样作为塔底物流主要成分的

丙烯酸, 其质量分数为 6.2%。在急冷塔流程中以优化该问题为主要研究方向, 并提出丙烯酸在塔顶流物中质量分数的形式降低其损耗, 以此达到急冷塔吸收期望标准^[1]。通过软件的急冷塔模拟结果得出: 模拟值与实际值具有较高吻合度, 提示可将该方案应用于实际生产中, 可生产良好的可行性和有效性, 保证了生产稳定以及工作效率的提升。

为了充分优化丙烯酸的急冷塔吸收, 可进一步分析急冷塔气相、液相中丙烯酸、醋酸和水组的分布。在气相塔内, 丙烯酸和醋酸的质量分数从塔顶开始一直到塔釜会陆续升高。在液相塔中, 理论板数第 39 块前, 丙烯酸、醋酸质量分数变化情况与气相塔相同, 第 40 块时急剧降低, 其原因是回流液里存在一定量的丙烯酸, 这样会使丙烯酸组分的质量分数立即升高, 还会使水组分立即降低。

1.2 脱轻组分塔模拟

模拟参数: 脱轻组分塔塔顶温度为 45 °C, 塔底温度为 90 °C, 塔顶压力为 15.46kPa, 塔底压力 23.45kPa, 实际塔板数 30。

脱轻组分塔处理的原料包括丙烯酸、醋酸、甲苯、水等。其中, 水与甲苯共沸, 且会出现夜夜分层的情况^[2]。另外, 在气相过程中, 醋酸、丙烯酸会缔合。基于上述变化, 通过 NRTL-NTH 热力学模型进行脱轻组分塔的模拟完成, 全面利用共沸精馏技术把三元体系里存在的各组分实施分离, 此时把各组分结

合在一起，从而合成二元共沸物（如甲苯-水等），以此将进料中水组分进行彻底清除、将部分醋酸成分清除，达到提升产本质量的目的。在此过程中，原料物流水组分质量需低于 10PPM，且醋酸质量分数需超过 4.67%。实验结果显示，脱轻组分塔对物流处理效果良好，水的质量分数是 94.05%，醋酸质量的分数是 5.60%，满足了分离要求；物流中基本完全清除水组分且丙烯酸质量分数达到 83.41%，满足脱轻组分塔的分离标准。与实际数值相对比，脱轻组分塔模拟计算结果具有较高吻合度，能够满足实际生产工况，表明该操作方案在实践中具有良好的可行性和有效性^[3]。

为充分了解脱轻组分塔分离的效率，再对气相、液相中丙烯酸、醋酸、甲苯和水组的进行研究分布，结果显示，在气相塔内，丙烯酸的质量分数从顶部逐渐增加至底部，水的质量分数在顶部到底部先基本保持不变，然后急剧减少，直至底部几乎不含水。在液相塔中，丙烯酸组分逐渐增加，水组分先增加后急剧减少，醋酸的质量分数在顶部到底部先增加后减少，而甲苯的质量分数则在顶部到底部先减少后增加，最后急剧减少。

1.3 醋酸塔模拟

模拟参数：醋酸塔塔顶温度为 63℃，塔底温度为 90℃，塔顶压力为 5.5kPa，塔底压力 15.5kPa，实际塔板数 34。

醋酸塔处理原料包括甲苯、丙烯酸、醋酸等。在气相塔内，醋酸与丙烯酸会缩合。因此，应用 NRTL-NTH 热力学模型对醋酸塔进行模拟。同时，醋酸塔作为一种提溜塔，一般情况下，醋酸塔的分离主要是为了保证塔盖物流里醋酸质量分数为 10PPM 以下。实验结果显示，醋酸塔的物流里丙烯酸的质量分数升为 97.34%，另外，醋酸质量分数只是 1PPM，这样就保证了塔盖分离条件，成功实现了去除醋酸的目标。实验结果表明，在醋酸塔中，通过有效的物流设计和实验验证，成功实现了对醋酸的高效去除。

为了提高醋酸塔分离的效率，考察丙烯酸、醋酸以及甲苯的气液相组成的分布问题。结果显示，在气相塔中，第 1 到 24 个理论板上，甲苯和醋酸质量分数呈现先急剧下降、后平稳不变的变化形势，且第 5 个理论板开始维持不变。在塔盖气相中基本未检测到甲苯和醋酸。而从塔顶一直到塔底，丙烯酸质量分数都出现了先上升后下降的情况。液相塔中的丙烯酸、醋酸、甲苯组分质量分布情况与气相塔相同。

1.4 丙烯酸提纯塔模拟

模拟参数：丙烯酸丙烯塔塔顶温度为 53℃，塔底温度为 85℃，塔顶压力为 2.92kPa，塔底压力 9.06kPa，

实际塔板数 21。

在提纯塔中的提纯原料主要为极性特征较强的二聚物、丙烯酸、对苯二酚、卤酸及己酸等。其中，丙烯酸在气相中以缔合作用为主要表现形式。此时，主要采取 NRIX-NTH 热力学模型模拟丙烯酸提纯塔过程中^[4]。实验结果显示：丙烯酸在提纯塔顶部物流中分数高达 99.94%，以此达到塔顶产品分离的条件，可以顺利进行丙烯酸提纯塔的分离目的。

相关的研究人员为进一步的证实丙烯酸提纯塔的分离效率，对丙烯酸、丙烯酸二聚物、巴豆酸组分分布进行研究。结果显示，在气相塔内，丙烯酸的质量分数从第 1 块一直到第 12 块理论板陆续下降，但是在第 13 块至第 15 块理论板开始会出现急速降低的情况。与此同时，两蹄酸二聚物和巴豆酸的质量分数则呈逐渐增加的趋势，第 1 至第 12 块的理论板提高，第 13 块开始急速提高，到第 15 块理论板。在塔顶气相里基本完成清除丙烯酸二聚物、巴豆酸等组分。

2 丙烯酸分离装置工艺参数优化

2.1 急冷塔工艺参数优化

为达到分离要求，需要增加理论板数，在全面分析分离要求及设备费用后确定急冷塔理论板数为 36 块。在 135PPM 下，塔顶物流中丙烯酸的质量分数保持在 60%，液气比为 103 左右。中部循环液温度设在 35℃、循环液质量流量是每小时 134200kg；在急冷塔中部循环液进料位置的下移，丙烯酸在塔顶物流中质量分数逐步提升，可以肯定在第 34 块理论板是急冷塔中部循环液的进料位置。

2.2 脱轻组分塔工艺参数优化

结合分离效果及成本预算，确定脱轻组分塔理论板数是 19 块。塔顶触出率约为 0.52，共沸剂进料比约为 1.45。通过上述实验分析发现，在进料位置在第 10 块时，物流中水的质量分数低于 10PPM，而物流中醋酸组分的质量分数为 5.03%，能够有效满足分离要求，且可以有效降低成本。因此可以证明进料位置为第 10 块理论板。

2.3 醋酸塔工艺参数优化

为确保塔顶物流中醋酸的质量分数达到 10PPM 的要求，增加醋酸塔的理论板数至 22 块。由于塔顶馏出率对丙烯酸的分离效果有影响，若馏出率太小，会导致脱轻组分塔顶物流中丙稀酸的质量分数过高，易发生聚合反应。同时，塔顶物流中醋酸的质量分数也会过高，其原因在于丙烯酸中存在醋酸。如果塔顶馏出率比较高，此时就会增加能量消耗。

2.4 丙烯酸提纯塔参数优化

实验分析发现，当模拟中理论板数 ≥ 17 块后，

增加理论板数，所需回流比减小趋势将变得不明显，但设备复用预算将会升高且塔顶热负荷将会提升。基于此获得如下结论：理论板数设置的小回流比较大这样会提升能耗，如果设置理论板数多就会提高成本的投入。因为思考设备以及运营的费用，确定丙烯酸提纯塔的理论板数为 18 块。丙烯酸提纯塔的回流比控制在 1.20 左右。进料处从第 11 块和第 14 块的位置，提溜段板数明显不够，进料处发生上移，导致提触段板的数量在逐步增长，以此使重组分在塔内富集，降低塔顶重组分质量分数，从而保证丙烯酸提纯塔进料处在第 10 块理论板的位置^[5]。

3 丙烯酸分离装置流程模拟优化的经济效益分析

3.1 降低成本

通过对急冷塔工艺参数的优化，使急冷塔的运行效率得以提高，包括理论板数的合理设置、中间循环液的温度和流量以及进料位置等，例如，将中间的循环液温度设定在 35℃，每小时循环液的质量流量为 134200 kg，这种优化减少了不必要的能量消耗，原本在急冷塔内可能需要更多的能量来维持反应和物质传输，如今能源输入在优化参数下有所减少。确定脱轻组分塔理论板数 19 块，优化进料位置为塔顶触出率约 0.52，共沸剂进料比约 1.45 的第 10 块理论板，这些优化措施使脱轻组分塔能够以更高效的方式运行，在分离水和醋酸等组分时减少额外的能量投入，从而降低能耗成本达到分离效果，同理，醋酸塔理论板数提高至 22 块，使塔顶馏出率得到优化，适当的塔顶馏出率避免了过小的聚合反应风险，以及过大的能耗提升，这一优化措施也直接降低了醋酸塔的能耗成本。

另外，由于优化了各塔的工艺参数，使得分离效率得到了提高，同时原料的浪费也得以减少，原本可能因分离效果不佳而损失的聚丙酸，如今可更多地转化为合格产品，使生产单位的聚丙酸产品所需的原料量减少，原料成本也随之降低。优化后的参数在脱轻组分塔中，可以对水组分进行更彻底的清除，对醋酸质量分数进行控制，从而使原料得到更充分的利用，物流中的水组分基本完全清除，而丙烯酸的质量分达到了 83.41%，这意味着在满足分离标准的同时，原料的有效利用率提高，减少了原料的额外投入。

3.2 产量与质量提升带来的收益

优化后的工艺参数使聚丙酸分离效率得到了明显的提高，所有杆塔的优化，使整个 PRC 分离装置的运转效率更高，优化脱轻组分塔，优化醋酸塔和聚丙酸提纯塔，对提高产量也有积极效果，脱光组分塔有效地分离水和醋酸，高效地去除醋酸塔和高纯度提纯聚丙酸，都有助于提高整个生产过程中聚丙酸的产出量。

在提纯塔顶部物流中，经过优化的聚丙酸的得分高达 99.94%，市场上这款高纯度聚丙酸的价值更高，在涂料、纺织、粘合剂等应用领域，高纯度的聚丙酸能改善产品的性能，如在涂料中能改善涂层的粘结性和耐久性，在纺织中能改善纤维的染色效果和强度等，因此，企业提高企业经济效益，使产品的附加值在市场上获得更高的价格，从而获得更高的产品质量和更高的产品附加值。

3.3 设备运营与维护成本效益

优化后的工艺参数减少了设备在不良运行条件下的运行时间，例如在醋酸塔中，适当的塔顶馏出率避免了可能造成腐蚀、阻塞设备等损害的发生，装备的使用寿命可以通过防止这些问题的出现而延长，各塔在优化参数下运行，降低设备磨损和故障，不需经常修理更换部件，也降低了设备的维护费用和更换频率，节省了设备运营与维护成本。同时，这些投入在整体效益方面带来了显著回报，尽管在工艺参数优化过程中可能会涉及到一些设备的改造调整，比如理论板数的增加，设备经过优化后运行效率更高，生产出质量更高的聚丙酸产品，使设备投资在较短的时间内获得收益，例如，丙烯酸提纯塔虽然在确定理论参数时考虑了设备费用，但最终通过提高产品质量和产量，提高了设备的投资回报率。

综上所述，经过研究人员对丙烯酸分离装置的流程模拟以及详细的研究分析，确定了各塔的最优操作条件，有效提高了丙烯酸的分离效率，对提升丙烯酸产品质量等具有积极作用。具体而言，改进以后的急冷塔、脱轻组分塔、醋酸塔以及丙烯酸提纯塔的工艺参数在丙烯酸生产过程中的能耗和成本明显地出现下降的情况。在未来研究实践中，将进一步探索更高效的丙烯酸分离技术和设备，以实现更高的经济效益和环境效益。

参考文献：

- [1] 李剑光, 陈凤壮. 7 万 t/a 甲基丙烯酸甲酯装置首次开工运行优化与实践 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(10):77-79.
- [2] 刘志刚. 丙烯酸及酯装置区内 VOCs 排放及控制措施 [J]. 化工安全与环境, 2023, 36(10):74-77.
- [3] 叶启亮, 韩银召, 李玉安, 孙浩, 齐鸣斋. 丙烯酸分离装置的流程模拟与优化 [J]. 化学工程, 2016, 44(07):69-74.
- [4] 周永敏, 黄贵洪. 影响丙烯酸分离装置长周期运行的因素及对策 [J]. 化工管理, 2020(13):179-180.
- [5] 郭钦生. 影响高压聚乙烯装置长周期运行的原因分析及对策 [J]. 广东化工, 2017(10):178-179.