

填料类型对小型精馏塔传质效率的影响分析

禤广健

(佛山市和利环保科技有限公司, 广东 佛山 528138)

摘要 小型精馏塔由于结构紧凑、能耗低及操作灵活等特点, 广泛应用于精细化工、制药、环保及实验室研发等各个领域。传质效率是决定其分离性能的关键指标, 而填料作为小型精馏塔内气液接触的载体, 其类型直接决定了气液两相接触面积、传质系数和流体力学性能。本文以规整填料、散堆填料及新型复合填料为研究对象, 通过实验测试与模拟分析, 系统比较了三者在比表面积、空隙率、液体分布均匀性等方面差异, 重点探究了其对传质单元高度(HTU)、等板高度(HETP)、液泛速度等传质效率评价指标的影响规律, 旨在为小型精馏塔的填料选型、结构优化及传质效率提高提供参考。

关键词 填料类型; 小型精馏塔; 传质效率

中图分类号:TQ051.5

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.034

0 引言

精馏技术在化工分离过程中占据核心地位。其中, 小型精馏塔由于体积小、投资低、适应性强等特点, 在少量物料分离、新产品开发及现场应急处理等场合具有不可替代的地位。传质效率是评价精馏塔分离效果的重要指标, 传质效率的高低直接影响分离纯度、能耗水平、生产效率等。填料是精馏塔实现高效传质的核心构件。目前, 工业及实验室中使用的填料种类繁杂, 不同填料在结构设计以及性能参数方面存在较大差异, 导致其在小型精馏塔中的传质效果大相径庭。然而, 针对不同填料类型在小型塔内的传质机理对比研究尚不充分, 缺乏针对特定场景的精准选型指导。因此, 系统研究填料类型对小型精馏塔传质效率的影响, 明确不同的填料的适用条件与优化方向, 对推动小型精馏技术向高效化、低成本化发展具有重要的现实意义。

1 研究填料类型对小型精馏塔传质效率的意义

1.1 完善小型精馏塔传质理论体系

小型精馏塔因为塔径小、高径比大等结构特点, 其内部流体力学行为和传质规律与大型精馏塔有较大差别, 传统的传质理论难以完全适应。填料是传质过程的核心载体, 其类型决定了气液两相接触方式以及传质路径。通过对不同填料类型对传质效率的影响进行系统比较, 可以揭示小型塔内“填料结构—流体力学性能—传质效率”之间的内在关联机制, 弥补现有理论对于小型塔传质规律研究的不足, 完善精馏传质理论体系, 为传质模型的优化与创新提供理论基础^[1]。

1.2 指导小型精馏塔填料精准选型

在精细化工、制药及生物工程等行业里, 小型精馏塔经常被用于高附加值、小批量物料的分离提纯, 对分离效率以及产品纯度有着非常高的要求。不同的生产场景中物料性质(如黏度、表面张力、腐蚀性等)及操作条件(如温度、压力、气液流速)各异, 对填料性能的要求也不同^[2]。研究填料类型对传质效率的影响, 有助于明确不同填料的性能优势和适用范围, 为企业依据实际生产需求科学选型提供依据, 避免由于填料选择不当造成的分离效率低下、能耗偏高等问题。

1.3 降低能耗与提升资源利用率

精馏是典型的高能耗过程, 小型精馏塔的能耗总量虽然比大型塔少, 但单位物料的能耗比例更高。传质效率的提高可以缩短分离流程、减小塔体高度, 进而减少加热蒸汽和冷却水量的消耗, 实现节能降耗。不同的填料类型其传质效率也存在着差异, 选择合适的填料类型可以在保证分离效果的同时, 最大程度地降低能耗。高效的传质过程可以提高物料分离纯度与回收率, 降低资源浪费和污染排放, 符合节能减排、绿色环保的发展要求, 有明显的经济效益和环保效益^[3]。

2 填料类型对小型精馏塔传质效率的影响

2.1 规整填料对小型精馏塔传质效率的影响

规整填料采用有序结构设计, 常见的有波纹填料、丝网填料、板片式填料等, 其特点是比表面积大、空隙率高、气液流动路径规整。小型精馏塔中规整填料可以改善液体分布的均匀性, 避免由于塔径小造成的液体偏流, 使气液两相在塔内充分均匀接触, 提高传质推

动力。同时规整填料阻力小，气液流动能耗低，液泛速度高，在高气液负荷下仍能保持稳定的传质效率^[4]。

研究表明，在相同的操作条件下，规整填料的等板高度（HETP）较传统散堆填料可降低 30%~50%，传质单元高度（HTU）可以降低 20%~40%，特别适合分离效率高、物料处理量小的精细分离场合。然而，规整填料加工成本高，且对物料中的杂质耐受性差，容易堵塞，这限制了它在含有固体颗粒或高黏度物料分离中的应用^[5]。

2.2 散堆填料对小型精馏塔传质效率的影响

散堆填料为颗粒状填料，在塔内随机堆积，常见类型有拉西环、鲍尔环、阶梯环、矩鞍环等，具有结构简单、成本低廉、拆装方便等优势。在小型精馏塔内，散堆填料随机堆积形成的气液两相剧烈湍动接触，提高了传质系数，但是液体分布不均匀，容易产生沟流、壁流现象，尤其当塔径较小时（一般小于 50 mm），壁流效应更明显，造成局部传质效率降低。

散堆填料的比表面积和空隙率较规整填料低，等板高度（HETP）大，传质效率低。但其操作弹性大，对气液负荷的适应性强，耐物料中杂质，不易堵塞，维护成本低。因此，分离要求不高、物料成分复杂和含少量杂质的小型精馏塔更适宜采用散堆填料，如实验室常规样品分离、工业废液简单提纯等场合^[6]。

2.3 新型复合填料对小型精馏塔传质效率的影响

新型复合填料是对传统填料结构进行改良或者将不同材料复合而成，常见类型有金属—陶瓷复合填料、多孔涂层填料、梯度结构填料等，其主要优点在于实现了传质性能、流体力学性能与耐腐蚀性三者之间的协同优化。在小型精馏塔里，新型复合填料按照传质需求来改变结构参数，可通过梯度孔隙结构设计优化气液分布，利用多孔涂层能加强表面润湿性，进而提升气液接触^[7]。金属—陶瓷复合填料具有金属填料的高机械强度和陶瓷填料的高耐腐蚀性，比表面积比传统散堆填料提高 20%~30%，空隙率比单一材料填料提高 15%~25%，传质效率比单一材料填料提高 10%~20%。此外，新型复合填料在抗堵塞、操作弹性等方面表现出色，很好地弥补了规整填料和散堆填料的不足，适用于高腐蚀、高黏度、含杂质等复杂工况下的小型精馏分离，有广阔的应用前景，但是其研发成本较高，大规模应用还须进一步推广^[8]。

3 提升小型精馏塔传质效率的填料选型与优化策略

3.1 基于分离需求的填料类型精准选型策略

1. 依据物料性质：对高纯度、低黏度、无杂质的物料，宜选择规整填料（丝网波纹填料等），利用其

高传质效率的特点来实现精准分离；对高黏度、含固体颗粒的物料，则选择空隙率大、抗堵塞能力强的散堆填料（阶梯环、矩鞍环等）；对腐蚀性物料，则选用陶瓷、聚四氟乙烯等耐腐材料制成的填料，或金属—陶瓷复合填料。

2. 依据操作条件：在低压、低气速且对分离效率要求高的场合，规整填料因其有序结构和低阻力特性更为适用；在操作负荷波动大的场合，应优先选择操作弹性好的散堆填料；若追求低能耗，则可选用阻力小、空隙率高的规整填料或新型复合填料。

3. 依据塔体结构：对于塔径小于 50 mm 的微型塔，为减弱壁流效应，应选用结构紧凑、液体分布均匀的小型规整填料（如微型波纹填料）；对于塔径在 50~200 mm 的小型塔，可根据需求采用组合形式，如上段使用规整填料保证纯度，下段使用散堆填料增强操作弹性^[9]。

3.2 填料结构参数优化策略

1. 比表面积优化：比表面积决定气液接触面积，增大比表面积可以提高传质效率，但是过量增大会导致流动阻力增大。小型精馏塔应根据物料扩散系数和操作流速来选择比表面积在 100~500 m²/m³ 之间的填料，在传质效率和流动阻力之间找到平衡。比如易分离的物料可选比表面积小一些（100~200 m²/m³）的填料来降低能耗，难分离的物料则选比表面积大一些（300~500 m²/m³）的填料提高传质效率。

2. 空隙率优化：空隙率越高，气液流动阻力越小，液泛速度越高，有利于提高操作负荷和传质稳定性。优化填料空隙率要结合塔内气液流速，保证空隙率在 0.7~0.95 之间。高气液负荷工况下采用空隙率大于 0.9 的填料（大孔径规整填料），防止液泛；低负荷工况下适当降低空隙率，增大比表面积。

3. 几何形状优化：改善填料的几何形状可以改善液体分布和气液接触状态。例如：把散装填料的圆形截面改为鞍形、环形与鞍形复合结构（矩鞍环、鲍尔环等），可减少液体沟流；对规整填料的波纹倾角进行优化（一般选择 30° 到 45°），既能保证液体停留时间，又能保证流动速度，提高传质效率^[10]。

3.3 操作参数与填料性能的匹配优化策略

1. 气液流速匹配：气液流速影响气液接触时间和湍动程度，填料类型不同，气液流速也不同。对于规整填料，适宜操作气速一般为 0.2~0.8 m/s，液气比宜控制在 0.5~2.0，防止气速过高引起液泛或者气速过低造成传质推动力不足；对于散堆填料，适宜气速

为 $0.1 \sim 0.6 \text{ m/s}$, 液气比为 $0.3 \sim 1.5$, 保证气液两相能够充分湍动接触。

2. 温度与压力适配: 温度影响物料蒸气压及扩散系数, 压力影响气液平衡关系, 需根据填料传质特性来调节操作参数。对传质系数受温度影响较大的填料(如丝网填料), 可以适当提高塔釜温度来增大扩散系数; 在高压操作场合, 应选用抗压强度高、空隙率稳定的规整填料或金属复合填料, 防止压力变化造成填料结构变形。

3. 液体分布器匹配: 分布器的性能直接影响液体分布的均匀性。规整填料宜采用槽式或孔式分布器, 保证液体均匀喷淋到填料表面; 散堆填料则可采用喷淋式分布器, 增大液体覆盖面积, 减少沟流。同时, 分布器的布液点密度应与填料比表面积相适应, 一般布液点密度为 $100 \sim 300 \text{ 点/m}^2$ 。

3.4 基于应用场景的填料组合与维护优化策略

1. 多类型填料组合使用: 根据分离任务进行优化组合, 可改善传质效果。例如: 在精细化工产品提纯中, 塔上段用高效的丝网规整填料保证产品纯度, 塔下段用耐负荷的鲍尔环散堆填料提高操作弹性, 既保证分离效率, 又保证运行稳定。

2. 填料预处理与定期维护: 金属填料采用酸洗、钝化处理去除表面油污、氧化层, 提高表面润湿性, 陶瓷填料做耐温、耐压测试, 保证性能稳定。运行过程中定期检查填料的状态, 散堆填料及时清理堆积的杂质和结块, 防止堵塞。规整填料检查有无变形、移位, 及时调整, 保证气液流动通道畅通。

3. 配套高效塔内构件: 适配新型塔内构件配合使用高效液体分布器、再分布器、除沫器等塔内构件, 可进一步提升整体传质效率。例如: 在填料层间装设液体再分布器, 可遏制壁流效应, 对高径比大的小型精馏塔效果明显; 选用高效除沫器以削减雾沫夹带, 防止气相中夹带的液体干扰传质过程。

3.5 智能化调控与能效适配优化策略

智能化调控、能效适配属于小型精馏塔填料高效运转的有益补充, 以工况匹配和精准控制能耗为手段, 继续发挥填料传质的潜力。

1. 实时检测、调节, 装有温度传感器、压力传感器、气液流速传感器等在线传感器, PLC控制系统可获得工况变化。根据规整填料的高灵敏度特性, 自动调节气液比、回流比等参数, 防止超出最佳传质区间; 对散堆填料系统重点检测压降变化, 及时预警堵塞风险并调节操作负荷。

2. 能效优化适配, 根据填料传质效率曲线来建立

能耗和分离效率之间的关联模型。在满足分离要求的基础上, 从再沸器热负荷、冷凝器冷却效率两方面入手, 减少单位产品的能耗。对低黏度物料精馏过程, 配合丝网规整填料的高效特性, 用变回流比调节, 降低无效能耗。

3. 用 Aspen Plus、COMSOL 等软件来建立小型精馏塔的数字模型, 在不同的填料、不同的操作参数下进行传质效果的模拟。经过仿真预估填料适配性, 预先改良组合方案及操作区间, 削减实际调试周期与资源耗费, 尤其适宜小批量、多品种的精细化工生产情形。

4 结束语

填料类型是影响小型精馏塔传质效率的主要因素, 其结构特征与性能参数直接影响气液两相接触质量和传质效果。合理的填料选择与优化是实现小型精馏塔高效、节能、稳定运行的核心所在。本文通过比较规整填料、散堆填料、新型复合填料对传质效率的影响来确定不同的填料性能优势、适用范围及局限性, 并从精准选型、结构优化、操作匹配及组合维护四个方面系统提出提高传质效率的方法。研究发现, 规整填料传质效率高, 散堆填料性价比高、操作弹性大, 而新型复合填料为复杂工况分离开拓了新途径。

参考文献:

- [1] 李璟, 邓国平, 刘宋然, 等. 双效变压精馏分离乙腈-正丙醇二元共沸物的工艺研究 [J]. 石油化工技术与经济, 2024, 40(06):18-22.
- [2] 戴遥龙. 精馏塔回流比优化与能源消耗关系分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(23):117-118, 121.
- [3] 朱迎臣, 刘艳. 年产 3.7 万吨异丙醇项目的异丙醇精馏塔模拟优化 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(11):21-24.
- [4] 刘杨, 孙于涵, 杨鹏举. 煤制乙二醇精馏系统节能增效分析 [J]. 氮肥与合成气, 2024, 52(11):35-37.
- [5] 杨纪. Aspen Plus 在精馏塔操作培训中的应用 [J]. 广州化工, 2024, 52(20):135-137.
- [6] 葛长斌. 人工智能技术在甲醇精馏装置控制系统中的应用 [J]. 化肥设计, 2024, 62(05):52-55.
- [7] 高晓新, 王稚蒙, 陆凯锐, 等. 基于决策变量的多目标评价在教学中的应用: 萃取精馏分离异丁烯/异丁烷的优化设计 [J]. 实验技术与管理, 2024, 41(10):220-226.
- [8] 凌盈, 张鸿鹏, 辛华, 等. 离子液体萃取精馏分离乙腈-异丙醇共沸体系工艺模拟 [J]. 沈阳化工大学学报, 2024, 38(05):418-423.
- [9] 叶启亮, 徐超洋, 王丽涛, 等. 隔壁精馏塔分离氯丙烯工艺模拟优化 [J]. 化学工程, 2024, 52(10):52-57.
- [10] 陈杨. 乙烯装置丙烯精馏塔模拟研究 [J]. 石化技术, 2024, 31(09):6-7.