

塔器内件填料选型指南

Tower Internal Packing Selection Guide

—— 油气地面工程设计参考 ——

涵盖设备：

原油稳定塔 | 脱乙烷塔 | 脱丙烷塔 | 脱丁烷塔
重接触塔 | TEG 吸收塔 | TEG 再生塔
MDEA 吸收塔 | MDEA 再生塔

技术参考文件

2026 年 3 月

目录

(在 Word 中打开后更新域代码以生成目录)

1 塔器内件选型总则

塔器内件的选择——规整填料、散装填料或板式塔盘——是塔器设计中的关键决策，直接影响分离效率、水力学通量、压降、抗结垢性能、弹性调节能力以及安装总费用。本文针对油气地面工程设计中常见的 9 种塔器服务，提供详细的内件选型建议及注意事项。

1.1 规整填料 vs 散装填料 vs 塔盘对比

比较项目	规整填料	散装填料	板式塔盘（浮阀/筛板）
压降	最低（0.1–0.4 mbar/m）	低–中（0.3–1.0 mbar/m）	最高（5–12 mbar/层）
分离效率	高，HETP 0.2–0.5 m	中等，HETP 0.4–0.8 m	由塔盘效率决定
抗结垢性	差（窄小流道易堵塞）	中等–良好	良好（易于清洗）
通量（C 因子）	最高	高	中等
弹性调节比	~2:1	~2:1	~4:1（浮阀塔盘）
单位体积成本	最高	最低	中等

1.2 关键选型因素

工程师在选择内件时必须综合考虑以下因素：**(a)** 操作压力及其对相对挥发度的影响；**(b)** 气液负荷及液气比（L/V）；**(c)** 工质介质的结垢倾向；**(d)** 起泡倾向；**(e)** 腐蚀环境与材料兼容性；**(f)** 弹性调节要求；**(g)** 对液体分布不均的敏感性；**(h)** 总压降预算，尤其在真空或低压工况下尤为关键。

1.3 液体分布要求

无论选用何种填料，液体分布质量是决定填料分离效率的最关键因素。高性能分布器应使变异系数（CV） $\leq 10\%$ （规整填料服务）。散装填料可接受 CV $\leq 15\text{--}20\%$ 。再分布器应每隔 6–10 m（或规整填料每 5–8 个理论板）安装一次，以抑制壁流效应。

2 原油稳定塔 (Crude Oil Stabilizer)

2.1 工况描述

原油稳定塔用于脱除原油中的轻烃组分 (C1–C4)，使其雷德蒸气压 (RVP) 满足管输或储存规格，通常 10–12 psia (69–83 kPa)。塔器一般在 100–200 kPa 运行，底部设重沸器提供热量。塔器处理的液相介质较重、粘度较高，且可能含有石蜡、胶质、砂粒或腐蚀产物，具有一定的结垢倾向。

2.2 推荐内件

首选方案：浮阀塔盘（如 Glitsch V-1、Koch-Glitsch VG-0、Nutter Float Valve 等）

浮阀塔盘是原油稳定塔的首选，主要原因如下：

- 优异的抗结垢性能——浮阀帽的运动具有自清洁作用，可耐受中等程度的固体污染；
- 良好的弹性调节能力，可达 4:1 或更高，这对于原油产量在油田生命周期内变化的工况至关重要；
- 对于这种相对容易的分离（理论板数通常 8–15 块），塔盘效率已足够；
- 可通过人孔进行检查和清洗，这对含蜡原油工况至关重要。

备选方案：对于小直径塔器 (<600 mm ID)，塔盘安装不切实际时，可采用散装填料，如 50 mm 金属鲍尔环或 IMTP #40/#50。但必须认真评估结垢风险，并设置冲洗/排污接管。

2.3 特别注意事项

- 结垢防护：对于含蜡原油工况，应采用可拆卸塔盘面板或盒式塔盘。建议在进料塔盘上游设置进料过滤器或入口装置以截留固体和段塞流。
- 进料入口：在进料点下方采用闪蒸区烟囱塔盘或合理设计的进料入口装置（如 Schoepentoeter）处理两相进料，防止液体夹带至上部精馏段。
- 重沸器回流：确保重沸器回流接管上方有足够的气液分离空间。建议采用蒸气角分布器或导流挡板。
- 腐蚀：对于含 H₂S 原油（顶部蒸气中 H₂S > 50 ppm），塔盘材质应采用 SS316L 或 Inconel 625 堆焊。甜性原油可用碳钢。
- 起泡：原油稳定塔具有中等起泡倾向。浮阀塔盘设计应取溢流点的 70%–80%。
- 压降：总压降通常 5–8 kPa 可接受；该塔非真空操作，塔盘压降不是控制因素。

3 脱乙烷塔 (Deethanizer)

3.1 工况描述

脱乙烷塔将乙烷 (C2) 及更轻组分从塔顶分离, 塔釜产出 C3+ 液相产品。通常在高压下操作 (2.0–3.5 MPaG), 以保持乙烷处于可凝状态用于回流或送入管道。塔顶温度通常为 -30 至 +10°C, 塔釜温度 80–120°C。C2/C3 间相对挥发度中等, 通常需要 25–35 块理论板。

3.2 推荐内件

首选方案: 规整填料 (如 Sulzer Mellapak 250.Y、Koch-Glitsch FLEXIPAC 1Y/2Y、Raschig Super-Pak 250)

规整填料是脱乙烷塔的有力推荐选择, 原因如下:

- 高压操作下相对挥发度被压缩, 需要单位高度内更多的理论板数——规整填料提供最低的 HETP (250 系列为 0.25–0.45 m);
- 每个理论板的低压降有助于避免塔釜温度过度升高;
- 高通量 (高 C 因子) 允许采用更小的塔径;
- 天然气凝析液 (NGL) 工况通常清洁, 结垢倾向低。

备选方案: 当需要较大弹性调节范围, 或进料中含有微量胺液夹带或压缩机油可能污染规整填料时, 可采用浮阀塔盘。塔盘设计应采用高通量塔盘 (如 Nye 塔盘、UOP MD 塔盘), 塔盘间距 600 mm。

3.3 特别注意事项

- 液体分布: 这是高压、高流量工况。应采用高性能槽式或管臂式分布器, 滴点密度 ≥ 100 点/m² (配合 250.Y 填料)。在高 L/V 比下分布不均会严重恶化 HETP。
- 压力对 HETP 的影响: HETP 随压力升高而增大。在 3.0+ MPaG 下, Mellapak 250.Y 的 HETP 预期为 0.40–0.50 m, 而非低压值 0.25–0.30 m。设计时必须进行相应的降额修正。
- 填料规格选择: 主体精馏段和提馏段采用 250.Y (或等效比表面积 ~ 250 m²/m³)。在进料点附近气液负荷最大的闪蒸区, 可考虑采用更高通量的 125.Y 或 170.Y。
- 填料床层高度限制: 单个填料床层高度应限制 6–8 m。床层间安装收集/再分布组件。
- 材质: NGL 工况标准采用 SS304 或 SS316L。需根据 ASME/GB 标准验证最低设计金属温度下的夹刃冲击韧性。
- 热影响: 塔顶至塔釜温差大 ($\Delta T = 80$ – 130°C), 可能导致填料支撑环和床层的差异热膨胀。应采用浮动式床层限位器而非固定压紧格栅。

4 脱丙烷塔 (Depropanizer)

4.1 工况描述

脱丙烷塔将丙烷 (C3) 从塔顶分离，塔釜产出 C4+ 组分。操作压力通常 1.5–2.5 MPaG，塔顶温度 40–60°C，塔釜温度 100–140°C。由于 C3/C4 沸点接近 (尤其是 C3/iC4)，分离难度较大，通常需要 30–45 块理论板。该塔通常是 NGL 分馏序列中理论板数最多的塔器。

4.2 推荐内件

首选方案：规整填料 (主体段采用 Mellapak 350.Y / FLEXIPAC 1.6Y；高负荷区采用 250.Y)

脱丙烷塔采用规整填料的理由与脱乙烷塔相同，且由于理论板数更多，优势更加突出。采用 350.Y 填料 (比表面积~350 m²/m³，HETP ~0.20–0.35 m) 可以显著降低塔高，对 30–45 块理论板的塔器节省可观的资本投资。

备选方案：高性能浮阀塔盘仍然可行，尤其是在弹性调节要求高或进料可能偶尔夹带污染物的场合。混合设计——精馏段采用规整填料、提馏段采用浮阀塔盘——可兼顾填料的高效率与塔盘在重沸器附近的抗结垢性。

4.3 特别注意事项

- **iC4/nC4 分离：**若脱丙烷塔釜产品对 C3 含量规格要求严格，或塔器还需从侧线抽出较纯 iC4，则分离难度极大。可考虑在关键区域采用更高效率的 350.Y 甚至 500.Y 填料。
- **热集成：**脱丙烷塔常设置中间重沸器和/或中间冷凝器以提高能效。必须确保填料床层设计能满足这些换热点处额外的液相/气相再分布需求。
- **提馏段高液量：**脱丙烷塔提馏段可能具有非常高的液相负荷。应验证所选填料的液相处理能力未被超过；当液量过大时，底部可能需要采用 X 型交叉流规整填料 (60°波纹) 以提高液相通量，但会牺牲部分分离效率。
- **分布器质量：**使用 350.Y 填料时，滴点密度应 ≥ 150 点/m²。填料比表面积越高，分布不均的不利影响越显著。

5 脱丁烷塔 (Debutanizer)

5.1 工况描述

脱丁烷塔将丁烷 (C4) 从塔顶分离，塔釜产出 C5+天然汽油或凝析液。操作压力较低，通常 0.5–1.0 MPaG，塔顶温度 50–70°C，塔釜温度 150–200°C。C4/C5 分离相对容易 ($\alpha \approx 2.5\text{--}3.5$)，通常只需要 20–30 块理论板。塔釜产品为较重烃组分，可能含有微量重质石蜡或稳定原油组分。

5.2 推荐内件

首选方案：规整填料 250.Y 或浮阀塔盘 —— 两者均适用

脱丁烷塔是内件选型灵活度最高的塔器之一。规整填料 (250.Y) 可提供更低压降和更短塔高，当塔釜产品对温度敏感或重沸器热负荷受限时尤为有利。浮阀塔盘在结垢风险较高 (如 C5+塔釜产品含有重组分) 或弹性调节要求较大时同样适用。

5.3 特别注意事项

- **塔釜温度：**在 150–200°C 下，较重烃的热降解可能产生胶质和聚合物而污染填料。若塔釜产品含有显著的 C8+或芳烃组分，提馏段应倾向采用浮阀塔盘。
- **腐蚀：**在这些温度下，若原油衍生进料的全酸值 (TAN) 超过 0.5 mg KOH/g，可能发生环烷酸腐蚀。应采用 SS316/SS317 或合金堆焊内件。
- **低压操作优势：**在 0.5–1.0 MPaG 下，相对挥发度较为有利。塔器可以用较少的理论板数和更简单的内件实现足够的分离。

6 重接触塔 (Heavy Contact Tower)

6.1 工况描述

重接触塔（也称吸收塔或脱甲烷回流接触塔）用于透平膨胀机流程的天然气处理装置中，使冷残余气与 C3+或 C5+贫油/NGL 接触以回收重烃。操作条件通常为高压（5–8 MPaG）、低温（–30 至 –80°C）。传质方式为吸收（气相向液相传质），仅需要 3–8 块理论板。水力学特征为高气量、低液量（低 L/V 比）。

6.2 推荐内件

首选方案：规整填料 250.X 或 350.X（交叉流/60°波纹角）

X 型（60°波纹角）规整填料为首选，原因如下：

- 提供极高的气相处理能力，这在高压下气体密度很大的工况下至关重要；
- 所需理论板数少，不要求极低的 HETP，但接触区的低压降对保持透平膨胀机效率和整体装置回收率至关重要；
- X 型填料的通量比 Y 型高 40%–50%，仅以较小 HETP 增加为代价；
- 低温清洁工况，结垢风险可忽略。

备选方案：在某些设计中采用烟囱塔盘或简单筛板塔盘（2–4 层），这是回收率要求不高时的低成本可行方案。

6.3 特别注意事项

- **低温材料：**所有内件、支撑环、液体分布器和紧固件必须适用于低温工况。强制采用 SS304L 或 SS316L，不得使用碳钢。所有焊接必须满足低温夹矾冲击韧性要求。
- **低液量分布：**在 L/V 比低于 0.01（质量基准）时，在填料截面上实现均匀液体分布极其困难。应采用高质量管臂式或 V 型槽式分布器，滴点密度 ≥ 120 点/m²，并精心设计溢流堵高度。可考虑在主分布器上方增设预分布装置。
- **雾沫夹带：**高气速下，接触区顶部的液滴夹带至塔顶残余气中是关注重点。必须在顶部填料床上方安装丝网除雾器或叶片式除雾器。
- **热冲击：**塔器在开停车过程中可能经受快速温度波动。支撑硬件必须能够适应差异的冷缩变形。

7 TEG 吸收塔 (三甘醇接触塔)

7.1 工况描述

TEG 吸收塔用贫 TEG 与湿天然气接触以脱除水蒸气，实现露点压降 30–60°C。操作压力通常 3–10 MPaG，温度 20–50°C。气相流量大，液相（TEG）流量极小（典型循环量：15–40 L TEG/kg H₂O）。大多数应用仅需要 2–4 块理论板（深度脱水则需 6 块）。

7.2 推荐内件

首选方案：规整填料（Mellapak 250.Y 或 350.Y / FLEXIPAC 2Y 或 1.6Y）

规整填料是现代气体处理装置 TEG 吸收塔的标准选择：

- 在极短的填料床高度（通常 2–4 m）内即可提供所需的 2–4 块理论板，这对海上和模块化设计至关重要；
- 极低压降（总压降 ≤ 0.5–1.0 kPa），有利于减少压缩功率消耗；
- 高气相处理能力允许采用更小的塔径；
- TEG 是清洁、不结垢的液体。

备选方案：泡罩塔盘是传统选择，目前仍被广泛采用，尤其适用于陆上装置。其优势包括极佳的弹性调节能力（可达 10:1）、在低气量下零漏液（对防止 TEG 损失至关重要）、以及物理塔盘级间设计简化过程控制。散装填料（25–50 mm 鲍尔环、IMTP #25/#40）也用于小直径接触塔。

7.3 特别注意事项

- 低液量分布——最关键设计挑战：TEG 循环量产生的液体喷淋密度极低（常 < 5 m³/m²·h）。液体分布器必须在如此低的流量下实现均匀涂湿。应采用小孔径（≤ 3 mm）滴管或合理孔径的管臂式分布器。规整填料的最低推荐喷淋密度通常 2–5 m³/m²·h；若低于填料厂家的最低湿润率，则强烈推荐采用泡罩塔盘。
- 起泡：TEG 吸收塔极易起泡，尤其当气体含有凝析液雾沫、压缩机油或井口处理化学品时。设计应取溢流点的 60%–70%。必须在上游设置带聚结元件的高效入口分离器。可考虑注入消泡剂。
- BTEX 吸收：规整填料增加了气液接触面积，从而增加了 TEG 对 BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）的吸收量，这会增加再生塔的 VOC 排放。若 BTEX 排放受限，可考虑采用塔盘（BTEX 吸收量略低）或降低 TEG 循环量。
- 雾沫夹带：TEG 随处理气夹带损失既昂贵又有环保问题。应在顶部填料床上方安装丝网或叶片式除雾器（必要时带聚结功能）。目标 TEG 夹带量 < 0.01 L/10⁶ Sm³。
- 材质：甜性气体工况采用碳钢。含 H₂S 气体（H₂S > 50 ppm）应采用 SS316L，尤其是下部富液区 pH 可能较低的区域。

8 TEG 再生塔 (三甘醇蒸餾塔)

8.1 工况描述

TEG 再生塔用于通过加热从富 TEG 中汽提吸收的水分（以及 BTEX/烃）。它由重沸器（标准再生时通常 200–206°C，增强 Stahl 柱设计可达 210°C）和其上方的蒸餾柱组成。操作压力基本为常压（0–20 kPaG）。蒸餾柱主体段通常仅需要 1–2 块理论板；若采用 Stahl 柱或汽提气配置进行深度再生（>99.0% TEG 纯度），则需额外理论板。

8.2 推荐内件

首选方案：散装填料（25–50 mm 陶瓷或金属鲍尔环，或陶瓷矩鞍填料）

散装填料是 TEG 再生塔蒸餾柱的传统且最实用的选择：

- 柱体直径通常较小（150–600 mm ID），塔盘安装不切实际；
- 仅需要 1–2 块理论板，短床层散装填料（1–2 m）即可满足；
- 陶瓷填料对高温、潜在腐蚀性（溶解 H₂S、CO₂、有机酸）环境具有优异的耐受性；
- 成本低，检修时更换方便。

备选方案：对于较大的再生塔，可采用规整填料（金属或陶瓷 250.Y）以提高效率，尤其是在需要 3–5 块理论板的 Stahl 柱设计中。

8.3 特别注意事项

- **温度限制：**TEG 在常压下 206°C 以上会迅速降解。必须确保重沸器换热管束附近无热点。火管式重沸器必须严格控制热流密（平均 < 25 kW/m²，峰值 < 32 kW/m²）。
- **Stahl 柱/汽提气：**若采用 Stahl 柱设计（在重沸器下方用干气或燃料气进行逆流汽提），该段也需要填料。采用 25 mm 陶瓷鲍尔环或陶瓷规整填料（如 Sulzer Mellapak 陶瓷 250.Y）1–2 m。汽提气量很小（通常为处理气量的 1%–3%），柱径由湍相负荷决定。
- **回流与冷凝：**蒸餾柱顶部蒸气含水、BTEX 和轻烃。塔顶部分冷凝器（回流盘管）将部分液体作为回流返回以洗涤蒸气中夹带的 TEG。填料设计必须考虑这部分额外内回流量。
- **陶瓷 vs 金属：**陶瓷填料因其耐腐蚀性和热稳定性为首选。SS316L 作为金属填料可接受，但在高温、含硫、含水环境下腐蚀率会高于陶瓷。避免使用碳钢。
- **顶部排放：**再生塔顶部的 BTEX 和 VOC 排放受到日益严格的法规约束。应考虑设置冷凝/分离装置回收 BTEX，或将排放引入热氧化器。

9 MDEA 吸收塔 (胺法脱酸接触塔)

9.1 工况描述

MDEA 吸收塔用贫 MDEA (甲基二乙醇胺) 溶液与含 H_2S 和/或 CO_2 的酸性气体接触以脱除酸性气体。操作压力 2–10 MPaG, 温度 30–60°C。MDEA 浓度通常 40–50 wt%。深度脱 H_2S 需要 15–25 块理论板, 批量 CO_2 脱除需要 4–10 块 (MDEA 对 H_2S 具有选择性)。

9.2 推荐内件

首选方案: 规整填料 (Mellapak 250.Y / FLEXIPAC 2Y) 用于标准工况; 浮阀塔盘用于结垢高风险或高弹性调节工况

MDEA 吸收塔中规整填料与塔盘的选择是胺系统设计中讨论最多的话题。两者均被广泛采用, 选择在很大程度上取决于具体应用和操作经验。

规整填料优势:

- 比塔盘低 30%–50% 的压降, 对于高压吸收塔 (压降直接影响下游压缩成本) 至关重要;
- 同等气相通量下塔径可缩小 20%–40%;
- HETP 控制良好时可缩短填料床高度;
- 使用 MDEA 进行选择性脱 H_2S 时, 填料的短气湍接触时间有利于通过动力学选择性减少 CO_2 的共吸收。

浮阀塔盘优势:

- 远优于填料的抗结垢性——胺系统因胺降解产物 (热稳定盐/HSAS、硫代硫酸盐)、FeS 颗粒、烃污染和起泡剂而臭名昭著的结垢问题;
- 更好的弹性调节 (4:1 vs 2:1);
- 物理分级防止严重的分布不均效应;
- 更易于检查和清洗;
- 运行业绩记录丰富。

9.3 特别注意事项

- 起泡——最关键问题: 胺系统是气体处理中最易起泡的工况。FeS、烃污染、胺降解产物、井口处理化学品或甘醇污染均可触发起泡。无论采用何种内件, 设计应取溢流点的 65%–75%。规整填料在起泡高风险时应进一步降额至 60%–65%。应设置消泡剂注入点。
- 富胺闪蒸: 若吸收塔底部操作压力远高于富胺闪蒸压力, CO_2 在降液管或底部塔盘下方闪蒸可导致水力学不稳定。应确保充足的湍体持液量, 并考虑在富胺出口设置闪蒸罐。
- 选择性脱 H_2S : 若 MDEA 用于选择性脱除 H_2S (将 CO_2 保留在处理气中), 规整填料为首选, 因为每层理论板上较短的湍体停留时间可减少 CO_2 的吸收。但必须注意: 若理论板数不足, 可能出现 H_2S 滑离。必须采用准确的传质速率模型 (而非平衡级模型) 进行模拟。
- 入口气体质量: 吸收塔上游必须设置带聚结内件的高效入口分离器, 以去除游离湍体、雾沫和固体。烃污染是胺系统起泡和填料结垢的首要原因。
- 水洗段: 若处理气离开吸收塔时饱和胺蒸气, 可在胺接触区上方设置水洗段 (1–2 层填料或塔盘,

循环水) 以减少胺损失并满足排放要求。

- 材质: 所有内件标准采用 SS304 或 SS316L。碳钢内件在胺工况下腐蚀迅速, 尤其在富胺区。

10 MDEA 再生塔 (胺汽提塔)

10.1 工况描述

MDEA 再生塔通过重沸器加热从富胺中汽提已吸收的酸性气体 (H_2S 、 CO_2)。操作压力通常 50–100 kPaG (低压以最大化酸性气体释放)，重沸器温度 115–125°C。塔顶产出酸性气体 (送硫磺回收装置、热氧化器或焚烧炉)。塔器需要 15–25 块理论板。液相流量大 (全部胺循环量)，气相流量从塔顶到塔釜显著增大。

10.2 推荐内件

首选方案：浮阀塔盘 (标准设计推荐)；规整填料 250.Y 为新建装置的有力替代

浮阀塔盘是胺再生塔的传统选择，因为：

- 胺再生塔是胺系统中结垢最严重的容器——富胺从塔顶进入时携带最高浓度的降解产物、FeS 和污染物；
- 塔盘对结垢具有强健的机械耐受性；
- 低压操作下塔盘压降是关注点但不是决定性因素；
- 弹性调节可适应不同酸气负荷。

规整填料 (250.Y) 在以下情况下越来越多地被采用：

- 胺系统包含良好的过滤和活性炭处理以维护胺液质量；
- 需要更低压降以降低重沸器温度或热负荷；
- 现有塔器需要扩能——更换为规整填料是最有效的扩容策略之一。

10.3 特别注意事项

- 结垢管理：若采用规整填料，必须建立完善的胺液质量维护体系：全流量机械过滤 (10 μm 滤筒)、活性炭床、定期监测热稳定盐 ($\text{HSS} < 1.0 \text{ wt}\%$ 当量) 和铁含量 ($< 10 \text{ ppm}$)。缺乏这些措施，规整填料将 1–3 年内结垢和沟流。
- 进料入口：富胺从顶部或近顶部进入。烟囱塔盘或进料分布器必须能够处理大液量并均匀分布。若进料已经部分闪蒸 (来自富胺闪蒸罐)，则需要合理的两相进料入口装置。
- 重沸器回流：与原油稳定塔类似，必须确保重沸器回流处有充足的气相分离空间。建议采用蒸气角或切向接管配合导流挡板。
- 顶部冷凝和回流：再生塔设有部分冷凝器冷却顶部酸性气体并回收水分作为回流。回流比 (通常 1.0–1.5 mol 回流/mol 酸气) 影响顶部酸气质量和上部段水力学。确保塔顶部设计能处理酸性气体 + 水蒸气的组合气相负荷。
- 腐蚀：再生塔底部 (高温富胺) 和顶部 (高温酸气 + 凝结水) 是胺系统中腐蚀最严重的位置。内件必须采用 SS304/SS316L。底部 3–5 层塔盘或底部填料床可考虑升级为 SS316L 或双相不锈钢。
- 压降与重沸器温度：再生塔每增加 10 kPa 压降，重沸器温度约升高 2–3°C，这会加速 MDEA 的热降解。这是支持采用规整填料的强有力论据 (前提是胺液质量可维护)。

11 汇总对比表

设备	推荐内件	压降敏感度	结垢风险	弹性比	操作压力
原油稳定塔	浮阀塔盘	中等	高（含蜡原油）	4:1+	~100–200 kPaG
脱乙烷塔	规整填料 250.Y	低	低（清洁 NGL）	~2:1	2.0–3.5 MPaG
脱丙烷塔	规整填料 350.Y/250.Y	最低	低	~2:1	1.5–2.5 MPaG
脱丁烷塔	规整填料 250.Y 或浮阀塔盘	低–中等	低–中等	2–4:1	0.5–1.0 MPaG
重接触塔	规整填料 250.X/350.X	最低	极低	~2:1	5–8 MPaG
TEG 吸收塔	规整填料 250.Y/350.Y 或泡罩塔盘	低	低（入口分离良好时）	2–10:1	3–10 MPaG
TEG 再生塔	散装填料（陶瓷）	低	低–中等	N/A	~常压
MDEA 吸收塔	规整填料 250.Y 或浮阀塔盘	低–中等	高（胺降解）	2–4:1	2–10 MPaG
MDEA 再生塔	浮阀塔盘或规整填料 250.Y	中等	高	2–4:1	50–100 kPaG

12 主要参考文献与标准

- GPSA Engineering Data Book, 14th/15th Edition — 分馏、气体处理和脱水相关章节
- Kister, H.Z., 《Distillation Design》(McGraw-Hill) — 填料和塔盘设计综合指南
- Kister, H.Z., 《Distillation Troubleshooting》(Wiley) — 填料故障、分布不均和结垢的实践经验
- Campbell, J.M., 《Gas Conditioning and Processing》, Vol. 2 — TEG 脱水和胺处理系统设计
- Shell DEP 31.22.05.11 — 填料塔设计
- Shell DEP 31.22.05.12 — 塔盘塔设计
- API 2004 / GPSA — NGL 分馏设计实践
- Sulzer Chemtech、Koch-Glitsch、Raschig — 规整填料技术资料 and HETP 数据
- GPA Technical Publication TP-18 — 胺系统设计指南
- SY/T 0076 — 天然气脱水设计规范（中国行业标准）
- GB 50316 — 工业金属管道设计规范