

胺法脱碳吸收塔工艺设计与效率优化

岳瑞明

天津亚长技术开发有限公司 天津 300041

【摘要】 胺法脱碳技术因脱碳效率高、适应性强，成为工业烟气与天然气中二氧化碳捕集的核心技术，吸收塔作为该技术的关键设备，其工艺设计与运行效率直接决定脱碳效果与能耗水平。当前吸收塔运行普遍存在溶剂损耗大、操作参数匹配性差、系统协同性不足等问题，制约脱碳效率提升。本文以吸收塔效率优化为核心，从工艺设计基础入手，系统分析系统操作参数调控、溶剂类型筛选及系统耦合优化对脱碳效率的影响机制，提出针对性的优化设计方案，为提升胺法脱碳系统性能、降低运行成本提供理论支撑与实践参考。

【关键词】 胺法脱碳；吸收塔；工艺设计；操作参数

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.062

引言

“双碳”目标下，工业领域二氧化碳减排成为绿色发展的核心任务，胺法脱碳技术凭借成熟可靠的优势，在火电、石化等行业广泛应用。吸收塔作为胺法脱碳系统中二氧化碳与胺溶液反应的核心场所，其结构设计合理性与运行参数科学性，直接影响二氧化碳吸收率与系统能耗。传统吸收塔常因操作参数失衡、溶剂性能适配性差等问题，出现脱碳效率波动、溶剂损耗超标等情况。本文聚焦吸收塔效率优化，重点探讨操作参数、溶剂类型及系统耦合的影响，对推动胺法脱碳技术升级具有重要现实意义。

1 胺法脱碳吸收塔工艺设计基础

1.1 核心工作原理

胺法脱碳吸收塔的核心原理是利用胺类溶剂的碱性与二氧化碳的酸性发生可逆化学反应，实现二氧化碳的选择性吸收。含二氧化碳的原料气从吸收塔底部进入，与塔顶喷淋而下的胺溶液在填料层或塔盘上充分接触，胺分子中的氨基与二氧化碳结合形成氨基甲酸酯或碳酸氢盐，完成二氧化碳的捕集；脱除二氧化碳后的净化气从塔顶排出，富液则从塔底送至再生塔解析再生，再生后的贫液循环回吸收塔重复使用。整个过程中，吸收塔内气液接触效果、反应动力学特性直接决定脱碳效率。

1.2 工艺设计核心要素

吸收塔工艺设计需围绕气液传质效率与反应条件优化，核心要素包括塔体结构、内件类型、气液接触方式及工艺参数区间。塔体结构需根据处理气量与脱碳要求确定直径与高度，确保气液在塔内有足够的接触时间；内件选择需兼顾传质效率与压降，常用的填料塔与板式塔各有优势，填料塔传质面积大、压降小，适用于处理量大的场景，板式塔操作弹性大、抗堵塞能力强，适用于含杂质较多的原料气。气液接触方式通过喷淋装置与分布器实现，需确保胺溶液在塔内均匀分布，避免出现沟流、壁流等现象^[1]。

1.3 效率评价指标体系

吸收塔脱碳效率评价需建立多维度指标体系，核心指标包括二氧化碳吸收率、溶剂损耗率、单位脱碳能耗及气液传质系数。二氧化碳吸收率直接反映脱碳效果，是评价吸收塔性能的核心指标；溶剂损耗率关系到运行成本，主要包括随净化气夹带损失与化学降解损失；单位脱碳能耗涵盖胺溶液循环泵功耗、再生塔加热能耗等，是衡量系统经济性的关键；气液传质系数则从机理层面反映塔内传质效率，直接关联吸收速率与反应效果。

2 系统操作参数对吸收塔效率的影响及调控

系统操作参数通过影响气液传质过程与反应动力学特性，直接决定吸收塔脱碳效率，需结合胺法脱碳反应机理，优化参数匹配关系，实现效率与能耗的平衡。

2.1 温度参数调控

吸收塔内温度是影响胺与二氧化碳反应平衡的关键参数。胺法脱碳反应为放热反应，低温环境有利于反应正向进行，提升二氧化碳吸收率，但温度过低会增加胺溶液粘度，降低分子扩散速率，减少气液接触面积，反而导致传质效率下降。不同胺溶剂的最优反应温度存在差异，对于常用的甲基二乙醇胺（MDEA），吸收塔操作温度控制在 40-50℃ 为宜，此温度区间既能保证反应正向进行，又能维持较低的溶液粘度，确保良好的气液传质效果。

温度调控需采用分段控制策略，塔底因反应剧烈释放大量反应热，需通过塔底冷却装置将温度控制在上限范围内；塔顶则通过控制贫液入塔温度，为气液接触提供适宜的初始反应条件。

2.2 压力参数优化

压力升高可增加二氧化碳在胺溶液中的溶解度，促进反应正向进行，提升吸收速率，因此高压环境有利于吸收塔脱碳效率提升。但压力过高会增加塔体设备强度要求与原料气压缩能耗，需结合原料气压力与脱碳要求确定最优操作压力。对于天

然气脱碳场景，吸收塔操作压力通常与原料气输送压力匹配，控制在 3-10MPa；对于火电烟气脱碳，因烟气压力较低，吸收塔多采用常压或微正压操作，通过优化气液接触方式提升传质效率。

压力调控需与气速参数协同，高压环境下需适当降低气速，避免气液接触时间不足；低压环境下则可提高气速，增加气液扰动强度，弥补压力不足对溶解度的影响。

2.3 气液比与液气分布调控

气液比（原料气流量与胺溶液循环量比值）是决定气液接触充分性的核心参数。液气比过低时，胺溶液中活性组分不足，无法完全吸收原料气中的二氧化碳，导致吸收率下降；液气比过高则会增加溶液循环泵功耗与再生能耗，同时可能引发塔内液泛，增加压降。最优液气比需根据原料气中二氧化碳浓度与胺溶液浓度确定，通常情况下，液气比控制在 5-10L/m³ 范围内，可实现脱碳效率与能耗的平衡。

气液分布均匀性直接影响传质效率，需通过优化内件设计与操作参数实现。气体分布方面，通过塔底气体分布器确保原料气均匀进入塔内，避免局部气速过高；液体分布方面，采用槽式或盘式液体分布器，将胺溶液均匀分布至填料层或塔盘，同时控制喷淋密度在适宜范围，避免喷淋不均导致的传质死体积。

2.4 胺溶液浓度与再生度控制

胺溶液浓度直接决定单位体积溶液的二氧化碳吸收容量，浓度升高可提升吸收能力，减少溶液循环量与能耗。但浓度过高会增加溶液粘度与腐蚀性，降低传质速率，同时可能导致溶液结晶，堵塞设备与管线。常用 MDEA 溶液浓度控制在 30%-50%（质量分数），此浓度区间既能保证较高的吸收容量，又能维持较低的粘度与腐蚀性。

胺溶液再生度（贫液中二氧化碳负荷与富液中二氧化碳负荷的比值）反映再生效果，再生度越高，贫液吸收能力越强，吸收塔脱碳效率越高。再生度不足会导致贫液携带大量二氧化碳进入吸收塔，降低有效吸收容量，需通过优化再生塔操作参数提升再生度，同时控制贫液入塔温度，避免再生过程中带入的热量影响吸收塔内反应平衡^[2]。

3 溶剂类型筛选与改性优化对吸收塔效率的提升作用

溶剂是胺法脱碳技术的核心，其性能直接影响吸收塔反应效率与系统运行成本，需结合吸收塔工艺特点，筛选适配的溶剂类型并进行改性优化，提升综合性能。

3.1 传统胺溶剂性能对比与选型

工业常用胺溶剂包括一乙醇胺（MEA）、二乙醇胺（DEA）、MDEA 及二异丙醇胺（DIPA），各溶剂性能差异显著，需结

合吸收塔操作条件与脱碳要求选型。MEA 碱性强、反应活性高，与二氧化碳反应速率快，适用于低浓度二氧化碳原料气脱碳，但溶剂损耗大、腐蚀性强，再生能耗高，需在吸收塔设计中强化防腐措施与溶剂回收系统。

DEA 反应活性略低于 MEA，吸收容量更高，溶剂损耗与腐蚀性相对较低，适用于中浓度二氧化碳脱碳场景，但其再生能耗仍较高，需优化再生塔与吸收塔的参数匹配。MDEA 作为叔胺，与二氧化碳反应为间接反应，反应速率较慢，但吸收容量大、再生能耗低、溶剂稳定性好，是当前应用最广泛的溶剂类型，尤其适用于高压、高浓度二氧化碳脱碳，在吸收塔设计中可通过优化气液接触方式弥补反应速率不足的问题。DIPA 则具有较强的选择性，适用于同时含有硫化氢与二氧化碳的原料气脱碳，可在吸收塔内实现二氧化碳与硫化氢的选择性分离。

3.2 新型混合胺溶剂的协同优化效果

单一胺溶剂存在性能短板，新型混合胺溶剂通过不同类型胺的协同作用，实现性能互补，显著提升吸收塔脱碳效率。常见的混合体系包括“主胺+活化剂”组合，以 MDEA 为主胺提供高吸收容量与低再生能耗，搭配 MEA 或哌嗪（PZ）等活化剂提升反应速率。活化剂可与二氧化碳快速反应形成中间产物，中间产物再与 MDEA 反应实现活性组分再生，既保证了吸收塔内的快速反应，又降低了整体再生能耗。

混合胺溶剂的配比需精准优化，主胺与活化剂的比例直接影响反应速率与吸收容量，通常活化剂添加量控制在 5%-15%（质量分数）。

3.3 溶剂改性技术与性能提升路径

溶剂改性技术通过化学改性或物理改性，提升胺溶剂的综合性能，为吸收塔效率优化提供新路径。化学改性主要通过在胺分子结构中引入特定官能团，增强反应活性与选择性，例如在 MDEA 分子中引入羟基可提升其水溶性与反应速率，引入烷基则可降低挥发性，减少溶剂损耗。物理改性则通过添加纳米颗粒等物质，改善溶剂传质性能，纳米颗粒可作为传质载体，促进二氧化碳在溶剂中的扩散，提升气液传质系数。

溶剂改性需与吸收塔工艺设计适配，例如化学改性后的高活性胺溶剂，可适当降低吸收塔操作温度与液气比，减少能耗；添加纳米颗粒的改性溶剂，需优化吸收塔内搅拌与喷淋装置，确保纳米颗粒均匀分散，避免团聚影响传质效果。

4 吸收塔与系统的耦合优化设计

吸收塔并非孤立运行，其效率提升需与胺法脱碳系统中的再生塔、换热器、溶剂回收系统等设备协同优化，通过系统耦合减少能量损失与物料损耗，实现整体性能提升。

4.1 吸收塔与再生塔的参数耦合优化

吸收塔与再生塔构成胺法脱碳系统的核心循环，两者参数存在强耦合关系，需同步优化实现整体效率最大化。吸收塔的贫液入塔温度直接受再生塔塔顶冷凝器出口温度影响，过高的贫液温度会降低吸收塔反应效率，需通过优化再生塔冷凝器冷却负荷，将贫液温度控制在适宜范围。

两者的压力参数也需协同匹配，吸收塔操作压力升高可提升脱碳效率，但会增加富液输送至再生塔的能耗，需结合原料气条件确定最优压力组合。此外，再生塔的再生度调控需与吸收塔液气比协同，当吸收塔处理气量增加时，需同步提升再生塔再生度，确保贫液吸收能力满足需求，避免因再生不足导致吸收塔效率下降^[3]。

4.2 换热网络的集成优化与能量回收

胺法脱碳系统存在大量能量交换环节，通过换热网络集成优化，可实现能量梯级利用，降低系统能耗，同时提升吸收塔操作稳定性。核心换热环节包括吸收塔富液与再生塔贫液的热交换，利用富液携带的反应热预热贫液，减少再生塔加热能耗；吸收塔塔顶净化气与原料气的热交换，利用净化气的低温冷却原料气，降低吸收塔冷却负荷。

换热网络优化需采用夹点技术，确定系统最小传热温差，优化换热器面积与数量，避免能量浪费。例如，将吸收塔塔底富液分为两路，分别与再生塔贫液和原料气进行热交换，实现热量的梯级利用。

4.3 溶剂回收系统与吸收塔的协同设计

溶剂损耗是胺法脱碳系统的主要运行成本之一，溶剂回收系统与吸收塔的协同设计可显著降低损耗率。吸收塔塔顶净化

气携带大量胺雾滴，需在塔顶设置高效除雾器，减少雾沫夹带损失，除雾器类型需结合气速与胺溶液特性选择，常用的丝网除雾器与折流板除雾器可去除 99%以上的雾滴。

除雾器捕获的胺液需通过回流装置返回吸收塔，避免溶剂流失；同时，在吸收塔进料管线与循环泵密封处设置溶剂回收装置，收集泄漏的胺溶液。溶剂回收系统的运行参数需与吸收塔气速、压力协同，当吸收塔气速升高时，需提升除雾器操作压力，确保除雾效果，避免因气速过高导致雾沫夹带量增加。

4.4 智能化控制系统的构建与应用

智能化控制系统是实现吸收塔与系统耦合优化的核心手段，通过实时监测与精准调控，确保各设备参数协同匹配，提升系统运行稳定性与效率。控制系统需集成吸收塔内温度、压力、液位、二氧化碳浓度等关键参数的实时监测，采用分布式控制系统（DCS）实现集中控制。

基于监测数据，利用模糊控制或 PID 控制算法，实现操作参数的自动调控，例如当吸收塔塔顶二氧化碳浓度升高时，系统自动提升胺溶液循环量或降低原料气处理量；当再生塔再生度下降时，自动增加再生塔加热蒸汽量。

5 结语

胺法脱碳吸收塔效率优化是一项系统工程，需从操作参数调控、溶剂优化、系统耦合等多维度协同发力。合理调控温度、压力、液气比等操作参数，可优化塔内气液传质与反应条件；选用混合胺溶剂并进行改性处理，能提升溶剂综合性能；通过吸收塔与再生塔、换热网络的耦合优化，可实现系统能量与物料的高效利用。未来，随着新型溶剂研发与智能化技术应用，吸收塔效率优化将向精准化、低能耗方向发展，为工业二氧化碳捕集提供更有力的技术支撑。

参考文献：

- [1] 刘晓君,胡雨婷.天然气分流解吸技术在脱碳过程中的应用研究[J].当代化工,2024,53(11):2526-2530.
- [2] 张生安,温欣,陈星,等.天然气脱硫脱碳和脱水工艺的节能模拟与优化[J].石化技术与应用,2024,42(5):364-370.
- [3] 张天娇,刘欣,刘永铎,等.分流吸收-级间循环冷却耦合脱碳工艺研究[J].现代化工,2024,44(12):215-219.