

# 二甲醚弛放气“吸收-双级精馏” 耦合工艺的模拟与优化

张杨<sup>1</sup>, 王坤<sup>2</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 朱磊<sup>1</sup>, 许多<sup>1</sup>, 赵云鹏<sup>2\*</sup>

(1. 安徽碳鑫科技有限公司, 安徽 淮北 235139; 2. 中国矿业大学化工学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 构建了二甲醚弛放气的“吸收-双级精馏”耦合工艺, 通过多级逆流吸收塔实现了二甲醚(DME)的高效捕集, 并结合双塔精馏装置提纯富集液, 最终在主精馏塔 T103 塔顶得到质量分数为 99.8% 的 DME 产品。通过模型分析工具中的灵敏度分析与多目标优化, 系统考察了吸收塔与精馏塔的理论塔板数、进料板位置及摩尔回流比等关键工况参数对 DME 分离效率的影响。对吸收-双级精馏工艺优化后, DME 回收率达 99.5%, 吸收剂甲醇的回收率为 99.8%, 同时实现废热梯级利用。

**关键词:** 二甲醚回收; 吸收-精馏耦合工艺; 流程模拟; 参数优化

中图分类号: TQ223

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)09-0229-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.09.040

## Simulation and optimization of “absorption-two-stage distillation” coupling process for dimethyl ether release gas

ZHANG Yang<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, ZHU Lei<sup>1</sup>, XU Duo<sup>1</sup>, ZHAO Yun-peng<sup>2\*</sup>

(1. Anhui Tanxin Technology Co., Ltd., Huaibei 235139, China; 2. School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** An “absorption-two-stage distillation” coupling process is established for dimethyl ether (DME) release gas, which realizes the high-efficiency capture of DME through the multistage countercurrent absorption tower. The enriched liquid is purified through combining with the double-column distillation unit, the DME product with a purity of 99.8% is finally obtained at the top of T103, the main distillation tower. Through the sensitivity analysis and multi-objective optimization in the model analysis tool, the influences of key working condition parameters such as theoretical plate number, feed plate position, and molar reflux ratios of the absorption and distillation columns on the separation efficiency of DME are systematically investigated. After the optimization, the recovery of DME reaches 99.5% and the recovery of methanol absorbent is 99.8%, while the cascade utilization of waste heat is achieved.

**Key words:** dimethyl ether recovery; absorption-distillation coupling process; process simulation; parameter optimization

二甲醚(DME)作为重要的化工中间体及清洁能源载体,应用十分广泛。它不仅可以替代氟氯烃,用作制冷剂、发泡剂和气雾剂,还能作为合成乙醇和低碳烯烃的关键原料<sup>[1]</sup>。此外,DME因优良的燃烧特性,可替代柴油和液化气作为清洁燃料使用,被誉为21世纪最具发展前景的绿色燃料之一<sup>[2]</sup>。随着资源循环利用需求的日益增长,工业尾气中高附加值组分的回收技术成为研究热点。在煤基DME制乙醇工艺中,DME工段弛放气含有较高浓度的DME,但由于其与CO、H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>等轻组分共存,传统冷凝法难以对其实现高效分离。目前,现有弛放气组分回收工艺普遍面临吸收剂损耗大、能耗过高技术瓶颈。因此,开发低能耗和高回收率的新型工艺具有重要的现实意义。

目前,工业生产过程弛放气的处理方法主要包括吸收法<sup>[3]</sup>、吸附法<sup>[4]</sup>和膜分离法<sup>[5]</sup>等技术,其中吸收法备受研究者的关注,原因是其对目标组分的选择性高、成本较低且工况操作简单等优点。胡松等<sup>[6]</sup>以工艺系统内循环甲醇为吸收介质,用于吸收过氧化氢化法制备环氧丙烷(PO)工艺尾气中的PO组分,并通过分离单元的精馏塔兼作解吸塔,显著提升了PO的回收效率。谢佳华等<sup>[7]</sup>针对氯醇化尾气多组分分离难题,基于物性差异创新性地构建了强/弱极性溶剂复配吸收体系,成功实现尾气中多种有用组分的同步回收。裴凯凯<sup>[8]</sup>通过对丁辛醇弛放气中C<sub>3</sub>组分回收流程的模拟和工艺参数优化,不仅保障了吸收塔的稳定运行,还显著降低了丁辛醇生产过程的CO<sub>2</sub>排放量。

收稿日期:2025-05-09;修回日期:2025-07-03

基金项目:安徽碳鑫科技有限公司-中国矿业大学校企融合项目(2024040021)

作者简介:张杨(1985-),男,本科,高级工程师,研究方向为煤制乙醇,1595670103@163.com;赵云鹏(1981-),男,博士,教授,研究方向为煤化工,通讯联系人,zhaoy@cumt.edu.cn。

在化工生产过程中,对于含 DME 蒸气冷凝后气相产物的高效分离,溶剂吸收法因操作灵活、能耗可控等特点成为主流技术路线。国内外众多研究学者及相关企业针对此问题展开了广泛研究,并提出多种技术方案。Guenter 等<sup>[9]</sup>提出一种基于甲醇溶剂的连续洗脱分离工艺,对 DME 合成反应产物冷凝气相中的 DME 进行选择吸收。洗涤后的气体返回合成反应器循环使用,洗涤塔底的液相流股则送去精馏工序进行处理。Bodil 等<sup>[10]</sup>开发的技术路线是将合成气合成 DME 的反应混合物进行冷却使其分离为气相和液相产物,气相产物随后进入甲醇梯度吸收体系实现 DME 选择性富集。吸收饱和的甲醇溶液送入反应器,在特定工艺条件下实现甲醇定向转化为 DME 和水,最终与精馏塔塔顶馏分混合得到燃料级别的 DME。刘佳等<sup>[1]</sup>运用 Aspen Plus 软件对合成气一步法生产 DME 工艺中的 DME 吸收塔进行了系统模拟,重点研究了压力、温度以及吸附剂种类和用量等工艺参数对 DME 回收率的影响,为工业化装置的设计提供了理论依据。吕永兴等<sup>[11]</sup>开发了一步法合成二甲醚气相中分离二甲醚的方法及装置,采用软水作为吸收液,并将吸收液输送至精馏塔进行精馏提纯。万里鹏等<sup>[12]</sup>提出了一种碳酸酯合成工艺尾气中 DME 的提取方法,但该方法分离得到的 DME 最终进入燃烧系统,未能实现有效回收。彭新文等<sup>[13]</sup>发明了一种丙烷和二甲醚混物流中脱除二甲醚的专有技术,萃取剂采用水溶液或有机含氧化合物,在脱除塔底部获得富 DME 的萃取剂。

本研究针对甲醇气相脱水制 DME 工艺中的弛放气组分复杂、DME 的含量高且回收难度大的特点,构建了“低温吸收-双塔精馏”耦合新工艺,通过采用 Aspen Plus 对关键操作参数进行优化,从而实现能耗最小化与 DME 高效回收的双重目标。

## 1 热力学模型选择

Aspen Plus 软件集生产装置设计、稳态模拟和优化于一体,具有完备的气液平衡数据库和物性模型<sup>[14]</sup>。本研究针对甲醇-DME-水体系的非理想特性,选用 UNIQUAC 物性方法进行相平衡计算。该模型通过引入二元交互参数,能够精确描述混合物的微观非随机分布特性,尤其适用于含醇类与水的复杂体系<sup>[15]</sup>。

## 2 工艺流程

如图 1 所示,工艺系统主要由吸收塔(T101)、

预精馏塔(T102)和主精馏塔(T103)组成。弛放气首先进入 T101,与低温甲醇溶剂逆流接触,从而实现 DME 选择性吸收;富 DME 吸收剂随后依次进入 T102 和 T103,通过温度梯度控制实现轻重组分的逐级分离。其中,T102 主要用于脱除丙烯和 CO<sub>2</sub> 等轻质组分,而 T103 用于完成 DME 与甲醇的深度分离,高纯度产品 DME 从塔顶产出,塔底吸收剂甲醇则循环返回吸收系统继续使用。弛放气的排放量为 1 085.73 kg/h,具体组成及质量流量如表 1 所示。

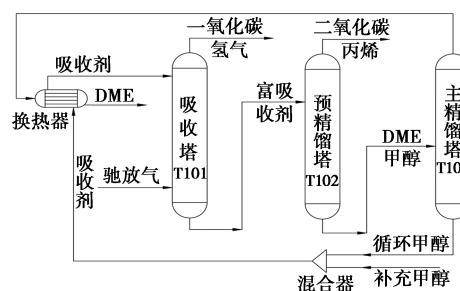


图 1 吸收-双级精馏耦合工艺流程

表 1 弛放气的组成及质量流量

组分	质量流量/(kg·h <sup>-1</sup> )	组分	质量流量/(kg·h <sup>-1</sup> )
CO	230.45	DME	470.77
H <sub>2</sub>	67.53	乙烯	13.70
CO <sub>2</sub>	265.62	丙烯	6.30
CH <sub>4</sub>	31.36	总计	1085.73

## 3 结果与讨论

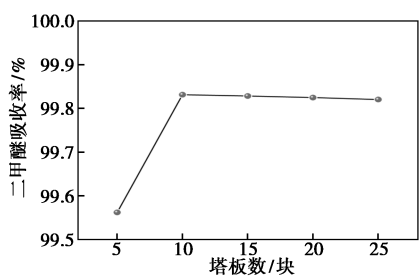
### 3.1 吸收塔 T101 工艺参数的影响

在模拟过程中,保持吸收剂(甲醇和水)的总进料量为 1 000 kg/h,其中甲醇和水质量比为 4:1,吸收剂的进料温度为-5℃。通过改变吸收塔 T101 的理论塔板数,研究其对 DME 吸收率的影响。如图 2(a)所示,DME 的吸收率随着塔板数的增加,呈现先升高后降低的趋势。由于尾气中的 DME 是有用组分,因此本研究以 DME 的吸收率作为评价吸收塔性能的主要指标。当吸收塔 T101 的塔板数小于 10 时,DME 的吸收率显著下降;而当塔板数大于 10 时,吸收率略有降低,因此,将吸收塔 T101 的理论塔板数优化设定为 10。

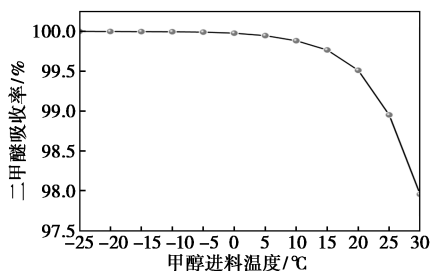
保持吸收塔 T101 的理论塔板数为 10,吸收剂 1 000 kg/h 进料的条件下,运用灵敏度分析模块模拟吸收剂温度的变化对 DME 吸收率的影响。如图 2(b)所示,吸收剂的温度升高反而不利于 DME 的吸收。当温度继续升高超过 5℃时,DME 的吸收率呈

现缓慢下降趋势。为确保 DME 吸收率超过 99.9%，吸收剂进入塔 T101 的温度需控制在 5℃ 以下。

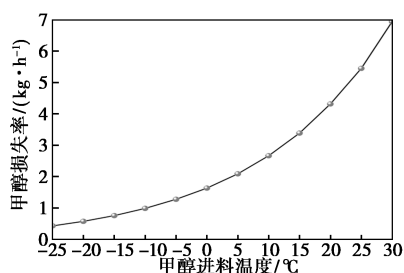
保持吸收塔 T101 的理论塔板数为 10，吸收剂 1 000 kg/h 进料的条件下，模拟分析吸收剂甲醇的损失量随进料温度的变化。如图 2(c) 所示，随着进料甲醇温度的升高，从塔顶排出的尾气夹带的甲醇流量增加。因此，吸收剂低温进料能够减少甲醇的损失，但同时也会增大进塔冷却器的负荷，导致冷冻液和循环水的消耗量增加，进而提高操作成本。综上所述，需从整体能耗和物料消耗 2 方面进行权衡，综合考虑 DME 的吸收率与运行经济性，建议将吸收



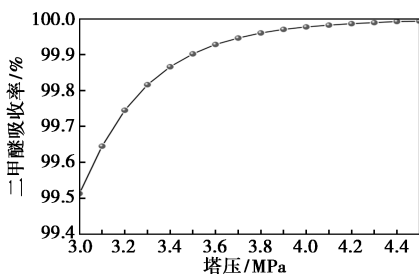
(a) 塔 T101 的理论塔板数对 DME 吸收率的影响



(b) 吸收剂的进料温度对 DME 吸收率的影响



(c) 吸收剂的进料温度对吸收剂损失量的影响



(d) 塔 T101 的压力对 DME 吸收率的影响

图 2 吸收塔 T101 的工况参数对二甲醚吸收率的影响

剂进料温度控制在 5℃ 以下，以实现效率和经济的最佳平衡。

保持吸收塔 T101 的理论塔板数为 10，吸收剂 1 000 kg/h 进料，温度为 -5℃ 的条件下，模拟分析 DME 的吸收率随吸收压力的变化。如图 2(d) 所示，DME 的吸收率随吸收压力的增大而增大。当吸收压力超过 3.5 MPa 时，继续增大吸收压力，DME 的吸收率逐渐趋于稳定。因此，若要确保二甲醚的吸收率超过 99.9%，需将吸收塔 T101 的操作压力维持在 3.5 MPa 以上。

### 3.2 预精馏塔 T102 工艺参数的影响

理论塔板数是精馏塔的重要工艺参数之一，对分离效果具有重要影响，因此精馏塔需要确定合适的理论塔板数。通过灵敏度分析，通过改变预精馏塔 T102 的理论塔板数，模拟分析其对 DME 吸收率和丙烯馏出率的影响。如图 3(a) 所示，DME 的吸收率随着理论塔板数的增加基本保持不变。然而，当理论塔板数小于 30 时，丙烯的馏出率随理论塔板数的减少而显著下降。由于预精馏塔的主要作用是脱除吸收剂中的丙烯，当塔板数大于 30 时，丙烯的馏出率可达到 99.9% 以上。因此，最终设定预精馏塔 T102 的理论塔板数为 35。

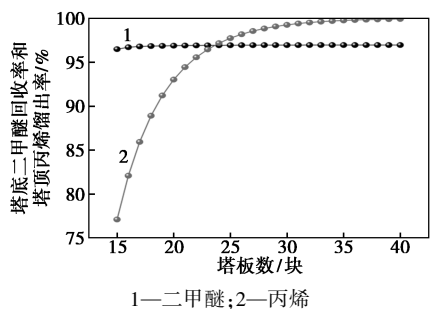
保持预精馏塔 T102 的理论塔板数为 35，模拟分析进料板位置对 DME 回收率和丙烯馏出率的影响。如图 3(b) 所示，DME 的回收率随着进料板位置逐渐下移基本维持稳定。当预精馏塔 T102 的进料板位置低于第 20 块板时，丙烯馏出率随进料板位置的下移而快速下降。为确保在维持二甲醚回收率的同时充分脱除丙烯，应将进料板位置设置在第 20 块板以上。

保持预精馏塔 T102 的理论塔板数为 35，模拟分析预精馏塔 T102 的进料板位置对能耗的影响。如图 3(c) 所示，在第 7~12 块板区间内进料，精馏效果最佳且预精馏塔 T102 的热负荷最低。既要保证二甲醚的回收率又要尽可能脱除丙烯，进料板的位置不可以低于第 20 块板，当第 8 块板进料时，丙烯的馏出率超过 99.9%。故确定第 8 块板为预精馏塔 T102 的进料板。

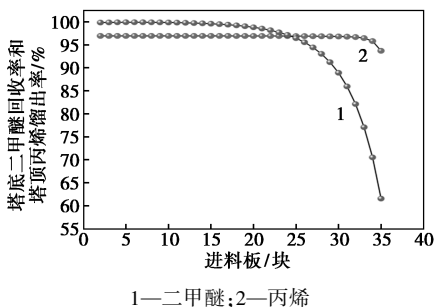
摩尔回流比( $R$ )是精馏塔运行过程中的关键参数，对分离效果具有重要影响。增大摩尔回流比可以提高塔顶产品的纯度，但同时会带来如下影响：①降低塔的生产能力；②增加冷量和热量的消耗；③回流比过大可能导致塔内物料循环量过大，甚至引起液泛现象，破坏塔的正常操作<sup>[16]</sup>。因此，选择

合适的摩尔回流比至关重要,既需要确保产品质量,又要兼顾经济效益的最优化。

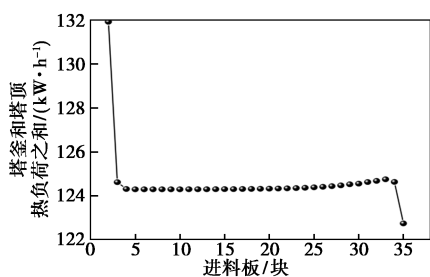
保持预精馏塔 T102 的理论塔板数为 35,第 8 块板进料,模拟分析预精馏塔 T102 的摩尔回流比对 DME 回收率和丙烯馏出率的影响。如图 3(d) 所示,塔顶丙烯的馏出率随着摩尔回流比的增大保持



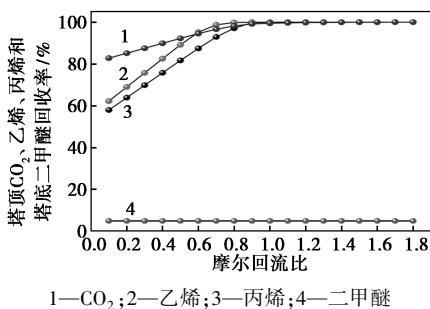
(a) 塔 T102 的理论塔板数对 DME 回收率、丙烯馏出率的影响



(b) 塔 T102 的进料板位置板数对 DME 回收率、丙烯馏出率的影响



(c) 塔 T102 的进料板位置板数对能耗的影响



(d) 塔 T102 的摩尔回流比对 DME 回收率和其他杂质组分馏出率的影响

图 3 预精馏塔 T102 的工况参数对二甲醚回收率的影响

不变,而塔顶  $\text{CO}_2$  和乙烯的馏出率以及塔顶 DME 的回收率均有所增加。当摩尔回流比超过 1 时,这三者的值趋于 100%。当摩尔回流比为 1.4 时,二甲醚的回收率超过 99.9%。因此,预精馏塔 T102 的摩尔回流比设定为 1.4。

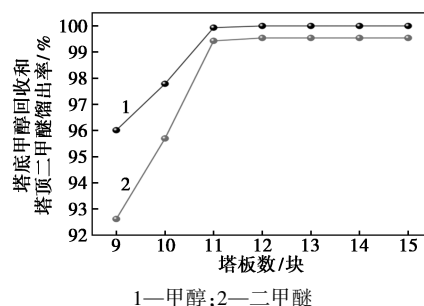
### 3.3 主精馏塔 T103 工艺参数的影响

通过灵敏度分析调整主精馏塔 T103 的理论塔板数,模拟分析理论塔板数对 DME 馏出率和甲醇回收率的影响。如图 4(a) 所示,DME 馏出率与甲醇回收率随着塔板数的增加均呈上升趋势。当塔板数低于 12 时,DME 的馏出率随塔板数的减少而显著下降;当塔板数超过 12 时,DME 的馏出率与甲醇的回收率均趋于稳定。综合考虑设备成本与分离效率,为最大化二甲醚产品收率,最终将主精馏塔 T103 的理论塔板数确定为 12。

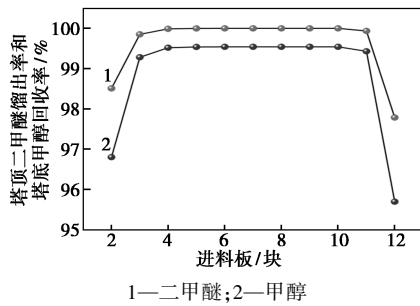
保持主精馏塔 T103 的理论塔板数为 12,模拟分析进料板位置对 DME 馏出率和甲醇回收率的影响。如图 4(b) 所示,随着进料板位置下移,DME 馏出率和甲醇回收率均呈先增大、后保持稳定,然后再降低的趋势。当进料位于第 5~10 块板区间时,二者的分离效果最佳,因此主精馏塔 T103 的进料板位置应设置在此区间。

保持主精馏塔 T103 的理论塔板数为 12,模拟分析进料板位置对能耗的影响。如图 4(c) 所示,当进料流股位于第 5~10 块板区间时,甲醇和 DME 的分离效果最佳且能耗最低。综合考虑二甲醚和甲醇的分离效果及能耗控制,最终确定主精馏塔 T103 的进料位置为第 7 块板。

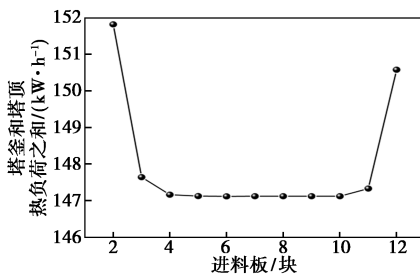
保持主精馏塔 T103 的理论塔板数为 12,第 7 块板进料,模拟分析摩尔回流比对 DME 馏出率和甲醇回收率的影响。如图 4(d) 所示,塔顶 DME 馏出率和塔底甲醇回收率随着摩尔回流比的增大而增大;当摩尔回流比超过 0.4 时,甲醇回收率达到接近 100%,同时 DME 馏出率趋于稳定。考虑到进一步增大回流比将导致能耗显著增加,最终确定主精馏塔 T103 的最佳摩尔回流比为 0.4。



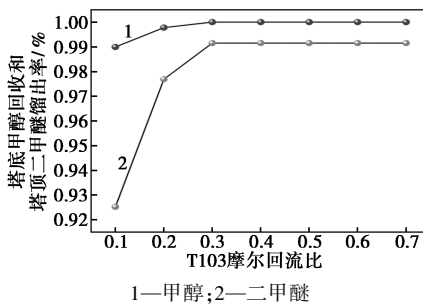
(a) 塔 T103 的理论塔板数对甲醇回收率、DME 馏出率的影响



(b) 塔 T103 的进料板位置对甲醇回收率、DME 馏出率的影响



(c) 塔 T103 的进料板位置对能耗的影响



(d) 塔 T103 的摩尔回流比对 DME 馏出率、甲醇回收率的影响

图 4 主精馏塔 T103 的工况参数对二甲醚回收率的影响

### 3.4 优化前后流股结果

表 2 为优化前后弛放气流股和 DME 流股的结果对比。可以看出,经优化后 DME 流量从 470.77 kg/h 略微下降至 468.865 kg/h(损失率约 0.4%),但质量分数从 43.36% 显著提升至 99.87%,表明该回收工艺能有效去除杂质,成功实现高纯度产品的生产目标。

表 2 弛放气流股和 DME 流股的具体组成

组分	弛放气/ (kg·h <sup>-1</sup> )	质量分数/ %	DME/ (kg·h <sup>-1</sup> )	质量分数/ %
CO	230.45	21.23	0	0
H <sub>2</sub>	67.53	6.22	0	0
CO <sub>2</sub>	265.62	24.46	0	0
CH <sub>4</sub>	31.36	2.89	0	0
DME	470.77	43.36	468.865	99.87
乙烯	13.70	1.26	0	0
丙烯	6.30	0.58	0.595	0.13
总计	1085.73	100.00	469.460	100.00

## 4 结论

针对煤制乙醇 DME 生产工段弛放气中 DME 含量过高的问题,构建了弛放气中 DME 的“吸收-双级精馏”耦合回收工艺,考察了吸收塔 T101 的理论塔板数、吸收剂的进料温度、吸收塔的压力以及精馏塔 T102 和 T103 的理论塔板数、进料板位置和摩尔回流比对二甲醚回收率的影响。吸收塔 T101 采用 10 块理论板,在 3.5 MPa 操作压力下,吸收剂进料温度为 -5℃ 时可实现弛放气中 DME 的高效回收。预精馏塔 T102 塔采用 35 块理论板、第 8 块板进料和 1.4 摩尔回流比时,丙烯脱除率超过 99.9%,同时确保 CO<sub>2</sub> 和乙烯完全馏出且热负荷最低。主精馏塔 T103 塔采用 12 块理论板、第 7 块板进料和 0.4 摩尔回流比时,塔顶二甲醚质量分数达 99.87%,塔底甲醇回收率趋近 100%。优化后的操作参数在保证产品纯度和回收率的同时,有效控制了能耗,实现了工艺效率与经济效益的最佳平衡。

## 参考文献

- [1] 刘佳,黄伟.合成气一步法制二甲醚吸收塔的模拟研究[J].煤化工,2009,37(3):7-10.
- [2] 李晓光,肖松.清洁燃料二甲醚的燃烧特性研究[J].应用能源技术,2021,(1):14-16.
- [3] 李木金,胡松,施德馨,等.环氧丁烷尾气溶剂吸收及精制工艺[J].化工学报,2023,74(4):1607-1618.
- [4] 韦光建,韩银群.高压变压吸附技术在甲醇弛放气回收氢气中的应用[J].石油化工设计,2020,37(3):43-46.
- [5] 杨永杰,冯传壮.焦炉气制甲醇中弛放气回收利用工艺的探讨[J].化学工程师,2021,35(11):82-86.
- [6] 胡松,李进龙,杨卫胜.环氧丙烷尾气甲醇吸收及纯化工艺[J].化工学报,2020,71(4):1657-1665.
- [7] 谢佳华,张杨,张舒乐,等.强弱极性联合吸收工艺处理氯醇化尾气的研究[J].中国氯碱,2022,(7):45-49.
- [8] 裴凯凯.丁辛醇尾气回收装置 C<sub>3</sub> 吸收塔的模拟优化[J].化工与医药工程,2021,42(1):1-6.
- [9] Guenter K, Karl B, Rainer H, et al. ethyl ether-from synthesis gas with controllable purity, useful for aerosols or for domestic and industrial heating; DE 4222655[P].1994-01-13.
- [10] Bodil V, Finn J, Bogild H J. Preparation of fuel grade dimethyl ether; US 5908963[P].1999-06-01.
- [11] 吕永兴,曾中华,潘贤齐,等.从一步法合成二甲醚气相中分离二甲醚的方法及装置;CN 101735025B[P].2013-11-06.
- [12] 万里鹏,杨柳.二甲醚提取系统;CN 212640337U[P].2021-03-02.
- [13] 彭新文,吕建宁,丁干红,等.一种从包含丙烷和二甲醚的原料物流中脱除二甲醚的方法;CN 107721829B[P].2020-09-18.
- [14] 李晓玲,贾欣,王辉,等.多相 Bunsen 反应中 SO<sub>2</sub> 溶于水和甲苯的模拟研究[J].现代化工,2020,40(S1):220-225.
- [15] Kiss A A, Suszwalak D. Innovative dimethyl ether synthesis in a reactive dividing-wall column[J]. Computers & Chemical Engineering, 2012, 38: 74-81.
- [16] 王俊杰.化工行业精馏高效节能技术的开发及应用[J].中国高科技,2023,(4):102-103. ■