

透水型分子筛膜在生物燃料乙醇生产中应用的经济性分析

余从立*, 郭海超, 纪祖焕

(江苏九天科技股份有限公司, 江苏 南京 211808)

摘要:针对生物燃料乙醇生产过程, 提出精馏-分子筛膜耦合工艺(膜工艺)进行脱水, 并与精馏-分子筛变压吸附工艺进行了比较, 结果表明, 采用膜工艺可节约蒸汽 0.3 t/t。以年产 20 万 t 生物燃料乙醇项目为例, 分析了膜通量、膜单价和蒸汽价格对膜工艺综合运行成本的影响, 为膜工艺在生物燃料乙醇生产过程中的应用提供了指导。

关键词:生物燃料乙醇; 分子筛膜; 脱水; 经济性; 精馏; 吸附

中图分类号: TQ41

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)09-0192-03

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.09.041

Economic feasibility analysis on application of zeolite membrane in bio-based fuel ethanol production

YU Cong-li*, GUO Hai-chao, JI Zu-huan

(Jiangsu Nine Heaven High-Tech Co., Ltd., Nanjing 211808, China)

Abstract: In the light of bio-based fuel ethanol production process, a distillation-zeolite membrane coupling dehydration process (membrane process) is proposed and compared with traditional distillation-pressure swing adsorption (PSA) process. It is shown that the membrane process can save 0.3 tons steam per ton ethanol product. Taking a 200 000 t/a ethanol production plant as an example, the influences of membrane flux, membrane price and steam price on economic feasibility are investigated, which supplies a promising application of the membrane process on bio-based fuel ethanol production.

Key words: bio-based fuel ethanol; zeolite membrane; dehydration; economic feasibility; distillation; adsorption

生物燃料乙醇作为一种可再生能源, 在美国、巴西等国家已广泛使用, 在我国部分省份也已推广使用多年^[1]。2017 年, 国家发展改革委、国家能源局等 15 部门联合印发《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案》, 要求到 2020 年, 在全国范围内推广使用车用乙醇汽油, 基本实现全覆盖。按当前乙醇添加比例为 10% 计, 生物燃料乙醇需求量将达到 1 200 万 t/a, 而 2016 年我国生物燃料乙醇产量仅 260 万 t/a, 市场缺口达 940 万 t/a, 生物燃料乙醇产业具有广阔的发展前景^[2]。

尽管采用不同生物质(粮食、非粮农作物、纤维素等)发酵所得到的发酵液乙醇浓度相差较大(3%~15%, 质量分数, 除特别说明外下同), 但对于发酵液的乙醇提浓过程目前基本都是采用多塔差压精馏-分子筛吸附耦合脱水工艺^[3-4], 在精馏单元出口获得~93%乙醇, 以气相进入分子筛吸附系统进一步脱水, 最终获得 99.2% 以上的无水燃料乙醇。该工艺能够将各操作单元热量充分耦合利用, 节约整体能耗^[5]; 缺点是再生液(淡酒)占比达到 15%~20%, 需返回精馏单元再次处理, 增加能耗与设备投资。

渗透气化膜分离技术用于有机溶剂脱水具有显著的节能减排优势, 特别适合于共沸、近沸混合物的

分离; 其中 NaA 型分子筛膜材料具有通量大、分离系数高、热化学稳定性好等优点, 已实现了规模化工业应用。江苏九天科技股份有限公司依托南京工业大学膜科学技术研究所开发的 NaA 型分子筛膜分离技术, 自实现分子筛膜用于有机溶剂脱水工业应用以来, 已建成 200 多套工程装置, 总溶剂处理量超过 100 万 t/a, 膜使用寿命达 5 a 以上。尽管该技术在医药化工、精细化工等行业已得到广泛应用, 但在生物燃料乙醇行业要取代分子筛吸附工艺实现大规模应用, 除了单纯与分子筛吸附工段比较外, 还需考虑与精馏工段的耦合, 实现整体工艺优化。本文中以淀粉发酵、年产 20 万 t 燃料乙醇为例, 对 2 种工艺的投资和运行经济性两方面进行核算分析, 旨在为分子筛膜技术在该领域的应用提供指导。

1 精馏-分子筛吸附工艺与精馏-膜工艺流程

1.1 精馏-分子筛吸附耦合工艺(吸附工艺)

乙醇发酵液(乙醇~10%)分成 2 股, 一股进入低压塔进行提馏, 塔顶获得质量分数 26% 的料液。另一股进入高压塔进行精馏, 塔顶获得质量分数 80% 的料液。2 股料液进入中压塔进行精馏, 中压塔塔顶采出质量分数 92%~93% 的乙醇料液, 以蒸气形式进入分

子筛吸附塔进行脱水,脱水成品蒸气返回至塔原料预热,吸附塔解吸时产生质量分数60%~70%的淡酒,返回至中压塔进行精馏回收。工艺流程简图见图1。

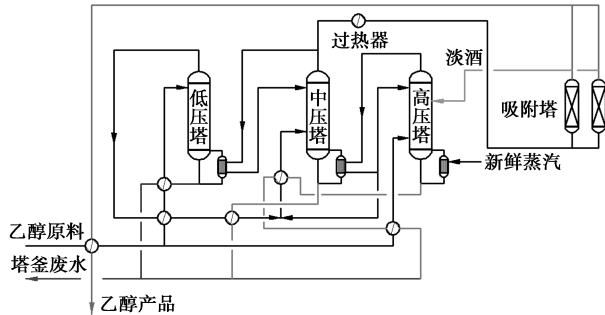


图1 精馏-分子筛吸附耦合工艺流程简图

1.2 精馏-分子筛膜分离耦合工艺(膜工艺)

乙醇发酵液(乙醇~10%)分成2股,一股进入低压塔进行提馏,塔顶获得质量分数26%的料液。另一股进入高压塔进行精馏,塔顶获得质量分数80%的料液。2股料液进入中压塔进行精馏,中压塔塔顶采出质量分数90%~93%的乙醇料液,经冷凝后再由膜进料泵输送至分子筛膜系统,由膜蒸发器加热气化,以蒸气形式进入分子筛膜组件进行脱水,脱水成品蒸气返回至中压塔塔釜,用于中压塔塔釜加热。同时,分子筛膜系统脱除的渗透液经冷凝后直接送入废水处理,不需回塔处理。工艺流程简图见图2。

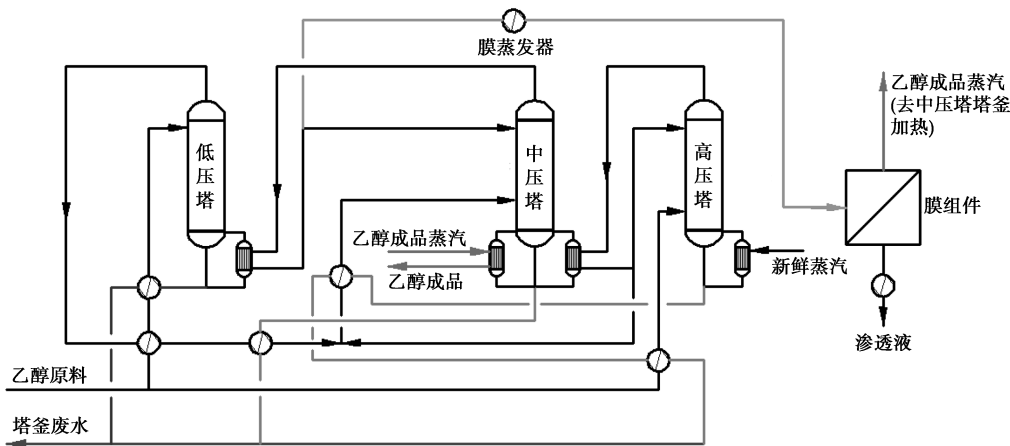


图2 精馏-分子筛膜耦合工艺流程简图

1.3 吸附工艺与膜工艺的运行能耗比较

通过表1可以看出,在蒸汽消耗方面,膜工艺较吸附工艺节约0.3 t/t乙醇产品,在水、电消耗方面,吸附工艺与膜工艺大体相当。为简化计算,经济性分析仅按膜工艺节约0.3 t/t蒸汽计。

表1 吸附工艺与膜工艺的运行能耗

	吸附工艺(PSA)	膜工艺(M)
蒸汽消耗/(t·t ⁻¹)	1.61	1.31
循环水用量/(m ³ ·t ⁻¹)	80	65
电耗/(kWh·t ⁻¹)	10	12

2 吸附工艺与膜工艺的运行经济性分析

对于不同规模的燃料乙醇生产装置,吸附工艺技术较为成熟,分子筛单价也基本稳定,因而设备总投资和运行费用比较明确;对年产20万t燃料乙醇项目,吸附设备总投资约1100万元,其中分子筛约600万元,单价为2万元/t,一般使用寿命按5a计(分子筛更换费用120万元/a)。膜工艺投资运行成本影响因素较多,如膜通量、寿命、膜单价、蒸汽单价等;但装置配套价格基本固定为500万元(含不

锈钢膜组件,不含膜)。表2列出了20万t/a燃料乙醇采用吸附工艺(PSA)与膜工艺(M)进行经济性比较的基本设定,后续计算中仅对分子筛/膜投资费用、运行费用及更换费用进行比较,不计设备折旧及财务费用。

表2 吸附工艺与膜工艺的运行经济性比较基本设定

	吸附工艺(PSA)	膜工艺(M)
配套投资	500万元	500万元
分子筛/膜投资(PI/MI)	600万元	膜面积MA×膜单价MP
换分子筛/膜费用(PR/MR)	120万元/a	膜投资MI/5万元/a
运行费用节约(AS)	—	0.3 t/t×蒸汽单价×20万t/a
投资回收期(RT)	—	(MI-PI)/AS
年总节约费用(TAS)	—	AS-MR+PR

2.1 膜通量的影响

膜面积是膜脱水工艺成本的关键影响因素;尽可能提高膜通量、降低膜面积可显著减少膜设备投资及换膜费用。对于将~93%乙醇提浓至99.2%以上,图3显示了在不同平均通量下所需膜面积与投资回收期、年总节约费用的关系。

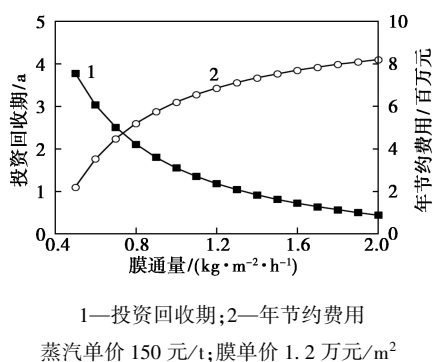


图 3 膜通量对脱水过程经济性的影响

可以看出,随着膜脱水平均通量的上升,设备投资将显著降低,使得投资回收期显著下降。当膜脱水平均通量达到 2 kg/(m²·h) 时,在蒸汽单价为 150 元/t、膜单价为 1.2 万元/m² 情况下投资回收期仅为 0.45 a,即设备运行仅不到半年可回收比分子筛吸附工艺增加的成本,而之后每年总节约费用可达 800 万元以上。按当前市场上分子筛膜平均通量 1 kg/(m²·h) 计,投资回收期为 1.56 a,之后每年总节约费用为 620 万元,效益同样十分可观。

2.2 膜单价的影响

膜单价与膜脱水通量价格同样重要;由于分子筛膜尚未在燃料乙醇行业形成大规模应用,各供应商的制膜成本和定价策略不统一,当前市场价格基本在 1 万~2 万元/m²,实现大规模应用后可望进一步降低。图 4 列举了膜单价在 0.5~2.0 万元/m² 之间对投资回收期、年总节约费用的影响。当膜单价从 0.5 万元/m² 提高至 2.0 万元/m² 时,设备投资回收期从 0.26 a 上升至 3.04 a,而年节约费用从 850 万元降低至 350 万元,可见膜单价对整体经济性影响十分显著。

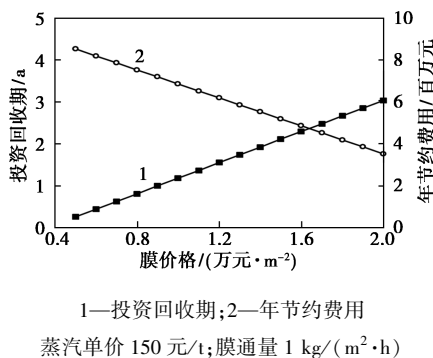


图 4 膜单价对脱水过程经济性的影响

2.3 蒸汽单价的影响

膜工艺的主要经济优势体现在节约蒸汽,我国生物乙醇生产企业分布广泛,蒸汽成本各不相同,但基本单价在 60~200 元/t。图 5 显示了按膜工艺节

约 0.3 t/t 条件下不同蒸汽成本对膜工艺经济性的影响。当蒸汽单价仅为 60 元/t 时,设备投资回收期达 3.89 a,与吸附工艺难以竞争;而当蒸汽单价为 200 元/t 时,投资回收期为 1.16 a。当前蒸汽单价主流为 150 元/t 左右,此时设备投资回收期为 1.56 a。

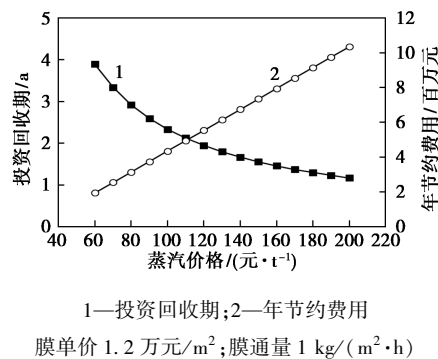


图 5 蒸汽单价对脱水过程经济性的影响

3 结论与展望

采用精馏-分子筛膜工艺用于生物燃料乙醇生产过程进行了流程设计,并与传统精馏-分子筛吸附工艺进行了比较,结果表明,膜工艺整体可节约蒸汽消耗 0.3 t/t 乙醇产品。分子筛膜通量、单价对膜工艺的经济性具有决定性的影响;在膜通量为 1 kg/(m²·h)、膜单价为 1.2 万元/m²、蒸汽单价为 150 元/t 时,对 20 万 t/a 生物乙醇脱水项目,膜设备投资回收期为 1.56 a,之后每年总节约费用为 620 万元,具有较强的市场竞争力。

当前市场主要分子筛膜产品为管式分子筛膜;据文献报道中空纤维分子筛膜具有更高的通量,可达管式膜的 2~3 倍^[6-7];若中空纤维分子筛膜能够成功实现工业化应用,将进一步提升分子筛膜脱水工艺的市场竞争力,降低整个生物燃料乙醇产业生产成本。

参考文献

- [1] 王成军. 燃料乙醇在美国和巴西的发展[J]. 国际石油经济, 2005, (5): 51-53.
- [2] 周爱萍. 国内外燃料乙醇的生产与研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, (20): 24-26.
- [3] 刘玉琪. 燃料乙醇脱水工艺的研究与展望[J]. 化工设计通讯, 2016, (4): 104-105.
- [4] 李沫林, 陈砾, 严宗诚, 等. 燃料乙醇脱水工艺的研究与展望[J]. 食品工业科技, 2010, (5): 410-413.
- [5] 李鹏辉. 燃料乙醇三塔差压蒸馏工艺模拟优化及塔器工艺设计[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- [6] Ge Qinqin, Wang Zhengbao, Yan Yushan. High-performance zeolite NaA membranes on polymer-zeolite composite hollow fiber supports [J]. Journal of American Chemical Society, 2009, (31): 17056-17057.
- [7] Liu Dezhong, Zhang Yuting, Jiang Ji, et al. High-performance NaA zeolite membranessupported on four-channel ceramic hollow fibersfor ethanol dehydration [J]. RSC Advances, 2015, (5): 95866-95871. ■