

印染丝光淡碱液 MVR 蒸馏系统研究

沈九兵*, 谭牛高, 李志超, 肖艳萍, 骆礼梅, 周子晗

(江苏科技大学能源与动力学院, 江苏 镇江 212100)

摘要:基于 NaOH 碱溶液泡点温度随浓度变化明显的特性, 建立单效两级压缩、双蒸发器分级压缩和二效两级压缩 3 种 MVR 蒸馏系统, 并利用 Aspen Plus 软件进行了仿真研究。结果表明, 固定工况下, 双蒸发器分级压缩系统存在最优蒸汽压缩分配方案使系统新鲜蒸汽消耗量最低; 二效两级压缩 MVR 系统运行费用低于单效两级压缩和双蒸发器分级压缩 MVR 系统, 且蒸发水量越大优势越明显, 但蒸汽压缩机总体积流量大于双蒸发器分级压缩系统, 实际应用时需综合考虑蒸汽压缩机的投资成本进行系统选择。

关键词:两级压缩; 分级压缩; MVR 系统; Aspen Plus; 印染废水

中图分类号: TQ15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)06-0206-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.06.042

Study on MVR distillation system for treatment of alkali-containing wastewater from dyeing mercerizing process

SHEN Jiu-bing*, TAN Niu-gao, LI Zhi-chao, XIAO Yan-ping, LUO Li-mei, ZHOU Zi-han

(School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: Based on the characteristics that the bubble point temperature of NaOH alkali solution changes obviously with the concentration, three kinds of MVR distillation systems are established, including single effect two-stage compression system, double evaporator staged compression system and two effect two-stage compression system. They are simulated by means of Aspen Plus software. It is shown that under the fixed working conditions, there exists an optimal steam compression distribution scheme in double evaporator staged compression system, which makes the fresh steam consumption of the system the lowest. The operation cost of two effect two-stage compression MVR system is lower than those of single effect two-stage compression MVR system and double evaporator staged compression MVR system, and the larger the amount of evaporation water, the more obvious its advantage. However, total volume flow of the steam compressor of two effect two-stage compression MVR system is larger than that of double evaporator two-stage compression MVR system. In practical application, the investment cost of steam compressor shall be comprehensively considered in selecting the system.

Key words: two-stage compression; staged compression; MVR system; Aspen Plus; printing and dyeing wastewater

我国是纺织印染工业的第一大国, 纺织印染行业是废水排放大户, 约占整个工业废水排放量的 35%, 印染废水排放量为 $3 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[1]。纯棉、涤棉混纺织物氧(氯)漂染色印花生产工艺丝光淡碱液的回收和利用, 历来是印染行业 and 环境保护的一个重要科技攻关课题, 常规的方法是将淡碱液加热浓缩回用^[2]。传统单效或多效蒸馏的浓缩方法, 蒸汽消耗量大, 设备投资成本大, 经济性较差^[3]。

机械蒸汽再压缩(MVR)技术是一种通过机械压缩机压缩低温蒸汽提高压力与温度, 进而回收蒸发工序中二次蒸汽潜热、减小热源蒸汽消耗的节能技术, 诸多学者将 MVR 技术应用于海水淡化、废水处理、中药浓缩等领域, 提出了多种单效或多效 MVR 蒸馏系统^[4-6], MVR 系统仿真研究主要采用的

是 Aspen Plus 软件^[7-8]。

本文中首先分析了印染丝光淡碱液泡点温升随溶质浓度的变化规律, 进一步提出并建立了单效两级压缩、双蒸发器分级压缩和二效两级压缩 3 种 MVR 蒸馏系统的仿真模型, 利用 Aspen Plus 模拟软件对 3 种系统变工况性能及运行费用进行了对比分析, 旨在为印染丝光淡碱液 MVR 处理装置研发提供理论依据。

1 印染丝光淡碱液特性

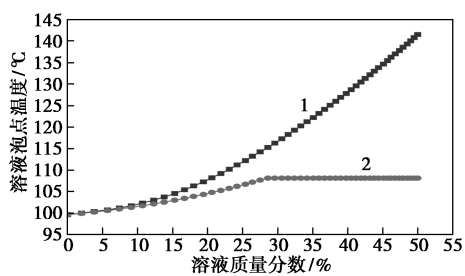
印染丝光淡碱液的主要溶质为 NaOH, 利用 Aspen Plus 查询 NaOH 碱溶液以及 NaCl 盐溶液的物性, 得到图 1 所示的常压下 2 种溶液泡点温度随溶质质量分数的变化关系, 可知: 与 NaCl 盐溶液不同, NaOH 溶质质量分数对泡点温度有明显的影响。

收稿日期: 2021-07-11; 修回日期: 2022-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52006092)

作者简介: 沈九兵(1987-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为暖通空调、螺杆压缩机、工业热回收与水处理, 通讯联系人, shenjiubing@just.edu.cn。

意味着随着溶液浓度的增加,蒸发器内热源温度与蒸发得到的二次蒸汽温差越大,对应的 MVR 蒸馏系统的压缩机所需压比也就越大,同时,在特定的压缩机吸、排气饱和温度条件下,NaOH 多效 MVR 蒸馏系统可设置的效数要比常规低沸点温升溶液处理系统的效数少。



1—NaOH 泡点温度;2—NaCl 泡点温度

图1 NaOH 和 NaCl 溶液泡点温度随质量分数的关系

2 模型的建立

基于 NaOH 碱溶液的上述特性,MVR 系统的蒸汽压缩压比较大,不适宜多效 MVR 蒸馏浓缩系统,蒸汽压缩适宜采用两级压缩中间冷却的方案,进而分别设计并建立了图 2~图 4 所示的单效两级压缩、双蒸发器分级压缩以及二效两级压缩 3 种 MVR 蒸馏系统模型。

2.1 单效两级压缩 MVR 系统模型

图 2 为单效两级压缩 MVR 系统模型,流程为:离心泵将稀溶液经换热器预热后泵入蒸发器,新鲜蒸汽加热蒸发器内的稀溶液至泡点温度,产生的二次蒸汽经一级压缩机压缩升温升压后,先经过热消除器消除过热,再进入二级压缩机继续被压缩,压缩后的蒸汽消除过热后与新鲜蒸汽混合进入蒸发器继续下一循环。浓溶液和蒸发器中蒸汽放热凝结得到

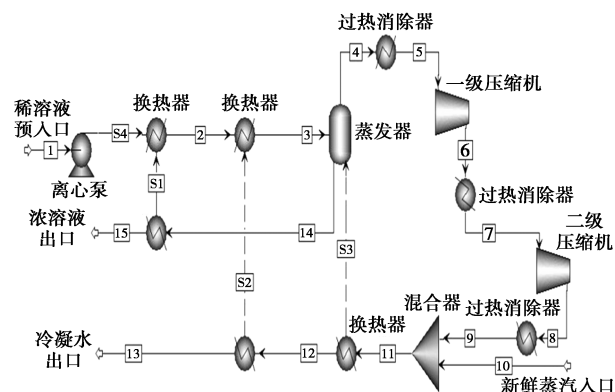


图2 单效两级压缩 MVR 系统模型

的冷凝水预热稀溶液后排出系统。在压缩机吸气口加入过热消除器,既可以体现蒸发器内溶液沸点随浓度增加导致沸点升高,又可以降低压缩机耗功^[9]。二级压缩机排气压力与新鲜蒸汽压力相同,在排气管路上加入过热消除器,将压缩蒸汽温度降低至新鲜饱和蒸汽温度,这是因为饱和蒸汽的传热系数大于过热蒸汽^[10]。

2.2 双蒸发器分级压缩 MVR 系统模型

图 3 为双蒸发器分级压缩 MVR 系统模型。离心泵将稀溶液经换热器预热后泵入第一蒸发器,稀溶液经第一蒸发器预浓缩后再进入第二蒸发器。第一蒸发器和第二蒸发器运行压力相同,所产生的二次蒸汽进入混合器混合后一同进入一级压缩机压缩,压缩后高温蒸汽先经过热消除器消除过热,再由分离器分成 2 股流体,一股进入混合器与新鲜蒸汽混合加热第一蒸发器,另一股则进入二级压缩机继续被压缩,然后经过热消除器后进入第二蒸发器加热其内的碱溶液。各蒸发器的浓溶液和冷凝水预热稀溶液后排出系统。

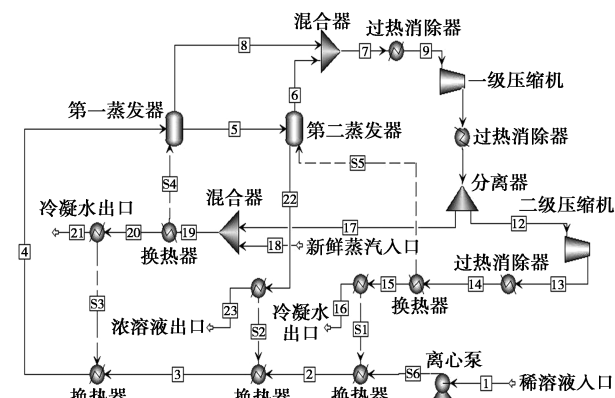


图3 双蒸发器分级压缩 MVR 系统模型

2.3 二效两级压缩 MVR 系统模型

图 4 为二效两级压缩 MVR 系统模型。该模型

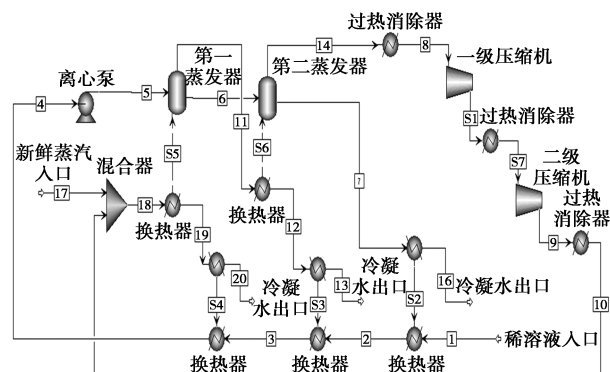


图4 二效两级压缩 MVR 系统模型

是在单效两级压缩 MVR 系统的基础上,增加了第二蒸发器。与图 3 的双蒸发器系统不同,图 4 中新增的第二蒸发器压力低于第一蒸发器压力,稀溶液进入第一蒸发器蒸发浓缩后,继续进入第二蒸发器内被第一蒸发器蒸发的蒸汽加热浓缩,第二蒸发器内蒸发的蒸汽二级压缩消除过热后再与新鲜蒸汽混合进入第一蒸发器内提供第一蒸发器溶液蒸发浓缩需要的热量。各效蒸发器内冷凝水以及第二蒸发器内的浓溶液预热稀溶液后排出系统。

3 仿真参数设定

模拟时,将印染丝光淡碱液简化为 NaOH 和水的理想溶液,即 NaOH 溶液,用 Aspen Plus 模拟时选择电解质向导,可以快速生成电解质体系的组分和反应。物性计算可在 Aspen Plus 中选择 ELECNRTL 物性方法。表 1 列出了各系统仿真时的主要参数设定值。

表 1 仿真过程主要的参数设定值

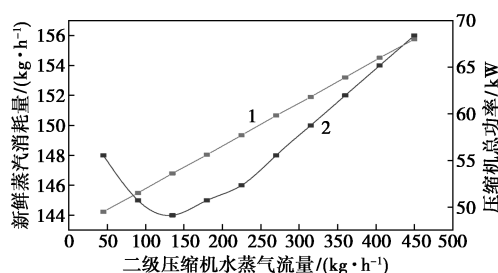
参数	单效	分级压缩	二效
	MVR 系统	MVR 系统	MVR 系统
稀溶液质量分数/%	4	4	4
溶液流量/(kg·h ⁻¹)	1000	1000	1000
第一蒸发器压力/kPa	100	200	200
第二蒸发器压力/kPa	—	200	100
一级压缩机压缩比	2	2	2
二级压缩机压缩比	2	1.8	2
稀溶液入口温度/℃	25	25	25
新鲜饱和蒸汽温度/℃	144	144	144
新鲜饱和蒸汽压力/kPa	400	400	400
换热器最小温差/℃	>4	>4	>4

4 模拟结果分析

4.1 流股分离器设定对双蒸发器分级压缩 MVR 系统的影响

流股分离器设定值是双蒸发器分级压缩 MVR 系统运行工况的主要参数,为了分析流股分离器对双蒸发器分级压缩 MVR 系统运行性能的影响,设定浓溶液出口质量分数为 44%,改变流股分离器设定值,调整进入二级压缩机的水蒸汽流量,计算得到图 5 所示的系统新鲜蒸汽消耗及压缩机总功耗的变化关系。可知:新鲜蒸汽消耗量随二级压缩机水蒸

汽流量增加先减小后增大,压缩机总功率随二级压缩机水蒸汽流量增加而增大。



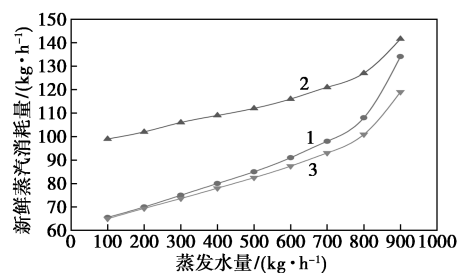
1—新鲜蒸汽消耗量;2—压缩机总功率

图 5 二级压缩机水蒸汽流量与新鲜蒸汽消耗量和压缩机总功率的关系

根据图 3 所示的系统流程,新鲜蒸汽及部分一级压缩后的蒸汽仅用于第一蒸发器内稀溶液的预浓缩,增大二级蒸汽压缩机的蒸汽量,会减少进入第一蒸发器内的蒸汽量,但能增加第二蒸发器内的供热量。一定浓度范围内,溶液沸点温升不大,增加进入第二蒸发器的蒸汽量能有效增大蒸发水量,第一蒸发器内蒸发的蒸汽量随之减小,因而新鲜蒸汽消耗量减小;但当溶液浓度达到一定值后,由于沸点温升提升明显,增加第二蒸发器压缩蒸汽供给量所能增加的溶液蒸发量减小,需要增加第一蒸发器内新鲜蒸汽供给量,增大其内的溶液蒸发量,进而保障一级压缩机的吸气量。第一和第二蒸发器产生的二次蒸汽都通过一级压缩机,所以调整流股分离器不影响一级压缩机的功率,二级压缩机功率随着二次蒸汽流量的增加而增大,所以压缩机总功率增大。

4.2 蒸发水量对各系统性能的影响

蒸发水量是系统设计与设备选型且影响系统性能的重要设计参数,通过设定末效蒸发器出口浓溶液质量分数,双蒸发器分级压缩 MVR 系统流股分离器按新鲜蒸汽消耗量最小来设定,仿真得到了图 6、图 7 所示系统蒸发水量对各系统新鲜蒸汽消



1—单效两级压缩系统;2—双蒸发器分级压缩系统;
3—二效两级压缩系统

图 6 蒸发水量与新鲜蒸汽消耗量的关系

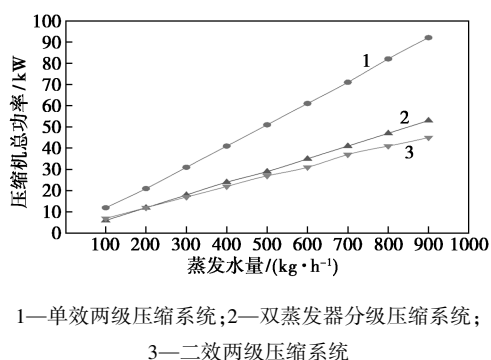


图7 各系统水蒸发量与压缩机耗功的关系

耗量及压缩机总功率的影响规律。

由图6可知,随着蒸发水量的增加,各系统的新鲜蒸汽消耗量都增加。蒸发相同水量时双蒸发器分级压缩MVR系统消耗的新鲜蒸汽量最大,二效两级压缩MVR系统消耗的蒸汽量最小。这是由于双蒸发器分级压缩MVR系统第一蒸发器蒸发的水量主要依靠新鲜蒸汽提供热量,单效和二效两级压缩MVR系统蒸发水量主要依靠压缩蒸汽提供热量,且二效两级压缩MVR系统利用一效与二效蒸发器之间的压差回收自身系统的热量实现溶液蒸发和蒸汽冷凝,进而减小新鲜蒸汽的消耗量。当蒸发水量达到800 kg/h时,各系统新鲜蒸汽消耗量迅速上升,这是因为当蒸发水量为800 kg/h时,NaOH溶液的溶度达到20%,由图1可见此时溶液的沸点温升随浓度的变化幅度急剧增大,造成蒸发器产生的二次蒸汽过热度增大,进而压缩机吸气口的过热消除器散发的热量损失增大,造成新鲜蒸汽消耗量急速增大。

由图7可知,随着蒸发水量的增加,各系统的压缩机总功率都增加,单效两级压缩MVR系统增加幅度最大。这是由于单效两级压缩MVR系统蒸发水量主要依靠压缩机对二次水蒸汽进行升温升压提供热量;双蒸发器分级压缩MVR系统压缩机总功率随蒸发水量增加而增大的趋势高于对应二效两级压缩MVR系统的变化趋势。依据计算结果,蒸发水量低于200 kg/h时,双蒸发器分级压缩MVR系统压缩机总功率比二效两级压缩MVR系统小。

4.3 各系统运行费用的对比和压缩机总体积流量分析

系统运行费用是企业评估印染废水蒸馏系统所关注的重要指标,设定水蒸汽价格为200元/t,工业

电价为1元/kWh,得到:系统运行费用=新鲜蒸汽消耗量×200元/t+压缩机功率×1元/kWh。根据仿真结果,计算得到图8所示的各系统运行费用随蒸发水量的变化关系。

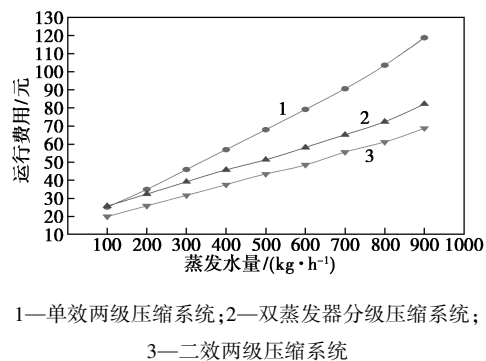


图8 不同蒸发水量各系统运行费用对比

由图8可知,各系统运行费用随着蒸发水量的增加而增大,单效两级压缩系统增长趋势最大,二效两级压缩系统增长趋势最低,意味着系统蒸发水量越大,二效两级压缩的运行费用优势越明显,但二效两级压缩系统运行费用与双蒸发器分级压缩系统的运行费用差距不是特别大。当蒸发水量为200 kg/h时,二效两级压缩系统分别比单效两级压缩和分级压缩系统节约9.1、6.5元/h;蒸发水量900 kg/h时,对应节约的运行费用分别为50.0、13.4元/h。

虽然二效两级压缩系统运行费用最低,但其和分级压缩系统差异不是很大,实际系统设计时还得考虑设备占地面积和投资成本。水蒸汽比容较大,90℃时达到了2.36 m³/kg,而标准状态下空气的比容只有0.77 m³/kg,所以压缩一定气体质量流量时,水蒸汽压缩机要求的容积流量会比较高。MVR系统最大的设备投资为水蒸汽压缩机,水蒸汽压缩机占地面积及成本主要与体积流量有关。图9为蒸汽压缩机总体积流量随蒸发水量的变化关系,可知单

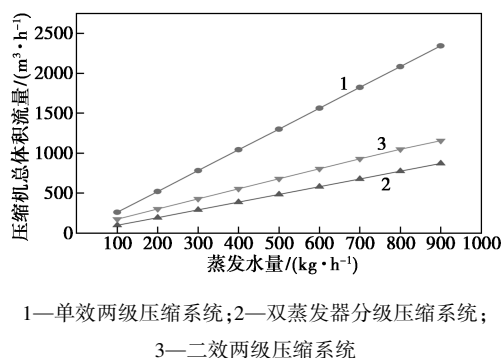


图9 蒸发水量与压缩机总体积流量的关系

效两级压缩系统总体积流量最大,二效两级压缩系统蒸汽压缩机总吸气体积流量也明显大于分级压缩系统,且随着蒸发水量的增大,它们之间的差值越大,这是实际应用时系统选择的必要考虑因素。

5 结论

将印染丝光碱液废水简化为 NaOH 和水的理想溶液,利用 Aspen Plus 软件对单效两级压缩 MVR、双蒸发器分级压缩 MVR 和二效两级压缩 MVR 废水处理系统进行了仿真研究,根据研究结果得出以下结论。

(1) 双蒸发器分级压缩系统存在最优蒸汽压缩分配方案使系统新鲜蒸汽消耗量最低。

(2) 各 MVR 系统的新鲜蒸汽消耗量和压缩机功率随蒸发水量的增大而增大。各 MVR 系统运行费用随蒸发水量增加而增大,二效两级压缩 MVR 系统运行费用最低,但和双蒸发器分级压缩 MVR 系统运行费用差值不是很大。

(3) 虽然二效两级压缩机系统运行费用最低,但蒸汽压缩机总体积流量大于双蒸发器分级压缩机

系统,且随蒸发水量增加,两者差值增大,实际系统设计时需结合投资回收进行综合选择。

参考文献

- [1] 肖永清. 节能减排废水治理开拓纺织印染企业新天地[J]. 染整技术, 2015, 37(11): 49-54.
- [2] 沈来云, 马培华. 棉织物印染企业的清洁生产技术——丝光碱液回用新方法[J]. 云南环境科学, 1997, 16(3): 44-45.
- [3] Al-Sahali M, Ettouney H. Developments in thermal desalination processes: Design, energy, and costing aspects [J]. Desalination, 2007, 214(1/2/3): 227-240.
- [4] 张军, 宋萌萌, 高兴, 等. 以 MVR 为核心的含盐废水处理工艺设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(24): 109-114.
- [5] Han D, He W F, Yue C, et al. Energy saving analysis for a solution evaporation system with high boiling point elevation based on self-heat recuperation theory [J]. Desalination, 2015, 355: 197-203.
- [6] Yang D, Leng B, Li T, et al. Energy saving research on multi-effect evaporation crystallization process of bittern based on MVR and TVR heat pump technology [J]. American Journal of Chemical Engineering, 2020, 8(3): 54.
- [7] 李志新, 王亚雄. 三效 MVR 系统的流程模拟及性能研究[J]. 现代化工, 2019, 39(10): 200-204, 207.
- [8] 史航, 施云海, 陈迎, 等. MVR 与多效蒸发联用的有效能分析[J]. 节能技术, 2018, (3): 270-275.
- [9] 梁林. 处理高浓度含盐废水的机械蒸汽再压缩系统设计及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 16-22.
- [10] 周根明, 程颖. 过热蒸汽饱和器的多种方案设计研究[J]. 流体机械, 2011, 39(1): 36-38, 41. ■
- [11] 单彤文, 宋鹏飞, 李又武, 等. 国际氢供应链与氢贸易的储运技术支持[J]. 现代化工, 2020, 40(1): 8-13.
- [12] 杨静怡. 储氢材料的研究及其进展[J]. 现代化工, 2019, 39(10): 51-55.
- [13] 张立岩. 氢能载体甲基环己烷在 Ni/γ-Al₂O₃ 催化剂上的脱氢反应研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2010.
- [14] 胡云霞. 环己烷催化多相连续脱氢过程研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [15] 李兴. 十氢萘催化脱氢过程研究: 碳载体及反应加热方式的影响[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- [16] 韩超群. 新型储氢分子 N-乙基吡啶储氢性能研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [17] 蔡卫权, 陈进富. 有机液态氢化物可逆储放氢技术进展[J]. 现代化工, 2001, 21(11): 21-23, 25.
- [8] Rao P C, Yoon M, 杨润泽. 液体有机氢载体 (LOHC) 储氢系统最新研究进展[J]. 石油科技动态, 2021, (4): 69-81.
- [9] Newson E, Haueter Th, Hottinger P, et al. Seasonal storage of hydrogen in stationary systems with liquid organic hydrides [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1998, 23(10): 905-909.
- [10] 中国化工报. 国内首个液体储氢材料项目投产 [N/OL]. [2019-03-14]. <http://m.ccin.com.cn/#/news/detail?id=230628&type=news>.
- [11] 4G 光元. 液体有机氢载体储氢 (LOHC) 的新合作和新发展 [N/OL]. [2019-03-10]. https://www.sohu.com/a/300226385_825427.
- [12] 贤集网. 世界首条文莱至日本的有机液体储氢供应链建成揭幕 [N/OL]. [2019-12-06]. https://www.xianjichina.com/special/detail_434609.html.
- [13] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书 2020 [R/OL]. 北京. [2021-04-21].
- [14] 马雪飞. 液态有机氢载体技术经济分析与 Pt/Al₂O₃ 催化脱氢性能研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2021.
- [15] 陈晓敏, 冯兆路, 白雪峰. 液体有机氢载体脱氢催化剂研究进展[J]. 化学与粘合, 2020, 42(2): 126-130, 143.
- [16] 司徒, 于栋. 氢气成本能降到几何? —储运篇 [R/OL]. [2019-08-19]. https://www.sohu.com/a/334833486_354900.
- [17] 宋鹏飞, 侯建国, 穆祥宇, 等. 液体有机氢载体储氢体系筛选及应用场景分析[J]. 天然气化工: C1 化学与化工, 2021, 46(1): 1-5, 33. ■

(上接第 205 页)

运输,但前者运输 500 km 时的氢气总成本(包含加/脱氢及运输)仅为 8.86 元/kg, 低于同样距离运输的液氢方式(为 11.21 元/kg), 也低于气氢拖车和气氢管道—利用率 20% 这 2 种储运氢方式, 因此, 以萘/十氢萘体系为代表的有机液体储运氢技术在经济性上具有明显优势, 值得大力推广。

参考文献