

# 水力喷射空气旋流器吹脱处理 挥发性有机物废水

李 勇<sup>1</sup>, 程治良<sup>2,3\*</sup>, 全学军<sup>2,3</sup>, 罗 丹<sup>1</sup>

(1. 国家电投远达环保工程有限公司重庆科技分公司, 重庆 401122; 2. 重庆理工大学化学化工学院, 重庆 400054; 3. 重庆市生活垃圾资源化协同创新中心, 重庆 401331)

**摘要:**采用超重力气液传质设备水力喷射空气旋流器(WSA)对乙苯模拟的 VOC 废水进行吹脱处理,考察了废水初始浓度、进口气速、射流流速、废水温度等因素对处理过程传质效率的影响。结果表明,进口气速越大、废水温度越高,VOC 吹脱去除传质效率越高;射流流速加大,VOC 的吹脱处理效率先增大后保持不变;废水初始浓度对 VOC 的吹脱去除效率影响较小。初始浓度为 45 mg/L 的 VOC 废水,采用 WSA 吹脱处理 3 min 后,VOC 的去除率可高达 99%以上,气液传质效率是曝气柱等传统设备的 2 倍以上。

**关键词:**乙苯;废水处理;空气吹脱;气体旋流器

中图分类号:X505

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)09-0176-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.09.037

## Treatment of VOCs-containing wastewater by hydraulic jet air cyclone

Li Yong<sup>1</sup>, CHENG Zhi-liang<sup>2,3\*</sup>, QUAN Xue-jun<sup>2,3</sup>, LUO Dan<sup>1</sup>

(1.Chongqing Science & Technology Branch, SPIC Yuanda Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China; 2.College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 3.Chongqing Collaborative Innovation Center for Resource Utilization & Treatment of Household Garbage, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** Water-sparged aerocyclone (WSA), a high efficiency supergravity gas-liquid mass transfer equipment, is used to treat with the simulated VOC wastewater of ethylbenzene solution. The effects of VOC initial concentration, inlet gas velocity, jet velocity, wastewater temperature on the air stripping process and mass transfer efficiency are studied. The results show that the removal rate of VOC gets higher with the increase of the inlet gas velocity and wastewater temperature; the removal rate of VOC increases obviously with the increase of jet velocity at first, but then it keeps constant. VOC initial concentration has little effect on the removal rate of VOC. The removal efficiency of VOC can reach as high as 99% when VOC initial concentration is 45 mg·L<sup>-1</sup> and the wastewater has been treated by WSA for 3 min. The gas-liquid mass transfer efficiency of WSA is more than double that of the aeration column and other traditional equipment.

**Key words:** ethylbenzene; wastewater treatment; air stripping; gas cyclone

化工、制药、农药、橡胶、塑料、石化等工业生产中会产生大量的挥发性有机物废水(VOCs),石油、化工产品贮运过程中的泄露,也会引起 VOCs 对地表水或地下水的污染<sup>[1]</sup>。绝大部分的 VOCs 具有毒性,部分还具有致癌性,如不进行妥善处理,不仅污染环境危害人体健康,还会挥发进入大气以及产生 O<sub>3</sub> 引起新的空气污染<sup>[2-3]</sup>。

目前,处理 VOCs 废水的方法有生物法<sup>[4-5]</sup>、吸

附法<sup>[6]</sup>、高级氧化法<sup>[7-9]</sup>、空气吹脱法<sup>[10-12]</sup>、组合工艺<sup>[13-14]</sup>等,与其他方法相比,吹脱法的主要优势在于过程简单、吹脱效率高、处理成本低,适合低浓度 VOCs 废水等。但传统的填料塔、板式塔等气液传质设备存在设备庞大、易于堵塞、气液传质效率低等问题<sup>[11,15]</sup>。为此,学者们采用超重力强化气液传质,主要有动态超重力设备旋转填充床<sup>[16]</sup>和静态超重力设备旋流器<sup>[17]</sup>,可提高气液传质效率。本工作

收稿日期:2018-11-07;修回日期:2019-07-12

基金项目:重庆市生活垃圾资源化协同创新中心资助项目(Shljzyh2017-003);重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA20005);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1600927)

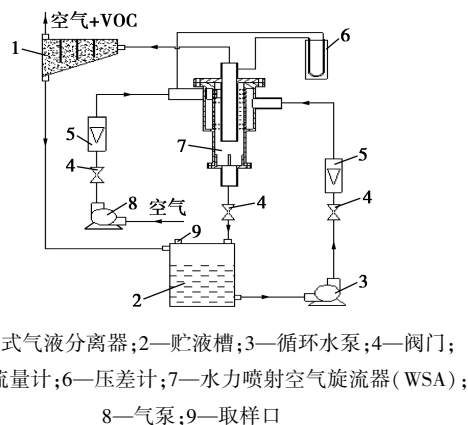
作者简介:李勇(1970-),男,本科,高级工程师,主要从事环境治理技术研发,liyong03@spic.com.cn;程治良(1987-),男,博士,副教授,研究方向为环境及资源化工,通讯联系人,purper@cqut.edu.cn。

采用超重力气液传质设备水力喷射空气旋流器(WSA)处理 VOCs 废水,考察了 VOC 废水初始浓度、进口气速、循环液速等因素对吹脱过程传质效率的影响,为探索低浓度 VOC 废水处理新工艺提供新思路。

## 1 实验部分

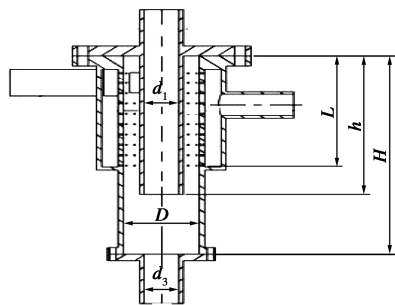
### 1.1 实验装置

实验用 WSA 以传统圆柱旋风分离器为基础,采用透明有机玻璃制作,主要设计尺寸如下:主筒体内径  $D$  为 70 mm,总长  $H$  为 300 mm;中心排气管内径  $d_1$  为 32 mm;中心排气管插入主筒体深度  $h = 210$  mm;主筒体侧壁上开有射流喷孔,喷孔采用正方形排列方式,开孔区域占排气管插入深度 78%<sup>[18]</sup>。主要喷孔结构参数为:喷孔共 10 层,喷孔起始线距离主筒体顶部 30 mm,喷孔区域长度  $L$  为 140.4 mm,每层沿筒体外壁均匀排布 16 个,总数为 154 个<sup>[19]</sup>;气相进口采用矩形直线切向进气方式,宽  $a$  为 15.75 mm,高  $b$  为 31.50 mm;底流口内径  $d_3$  为 32 mm,底流口上部设置有 4 块挡板以破坏底部旋涡,如图 1 所示。



1—筛板式气液分离器;2—贮液槽;3—循环水泵;4—阀门;  
5—转子流量计;6—压差计;7—水力喷射空气旋流器(WSA);  
8—气泵;9—取样口

(a)



(b)

图 1 实验装置

### 1.2 实验流程

实验时,首先配制 6 L 一定初始浓度的乙苯模

拟的 VOC 废水。然后将 VOC 废水倒入 WSA 贮液槽中,开启循环液泵,调节阀门使废水射流流速达到预设值。待废水循环 5 min 稳定后取初始样品。然后再打开气泵进行吹脱实验,此时作为实验计时零点,每隔一定时间间隔取样一次,所取样品采用高效液相色谱仪(岛津 LC20AD)检测 VOC 浓度。相同条件实验重复 3 次以上,实验结果采用平均值。

### 1.3 实验测定的色谱条件

实验采用色谱柱规格为 Boston Green ODS ( $5 \mu\text{m}, 4.6 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ ),通过紫外-可见分光光度计扫描乙苯溶液最大吸收峰后,确定紫外检测器的波长为 206 nm。流动相为甲醇/水(体积比为 80:20),流动相流速为 1.0 mL/min,进样量为 15  $\mu\text{L}$ ,出峰保留时间为 8.36 min,色谱停止时间为 10 min。

### 1.4 体积传质系数的计算

从废水中吹脱去除挥发性有机物,体积传质系数一般可按式计算<sup>[20]</sup>:

$$-\ln c_t/c_0 = K_L a t \quad (1)$$

式中, $c_0$  和  $c_t$  为废水中初始和  $t$  时刻挥发性有机物浓度,mg/L; $K_L a$  为吹脱传质系数, $\text{min}^{-1}$ ;  $t$  为吹脱时间,min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 废水初始浓度 $c_0$ 对 VOC 吹脱处理过程的影响

在室温为 25℃,进口气速  $u_c$  为 22.40 m/s,射流流速  $u_L$  为 1.15 m/s,液相温度  $t_L$  为 23.5~25℃,考察废水初始浓度  $c_0$  对 WSA 吹脱处理 VOC 废水的效率影响,结果如图 2 所示。由图 2 可知,初始浓度为 15~45 mg/L 的 VOC 废水,采用 WSA 处理 3 min,VOC 去除率可达 99.5%以上,效果良好。废水初始浓度对 WSA 吹脱气液传质系数  $K_L a$  影响较小,与吹脱氨研究结果一致<sup>[17]</sup>。这是由于吹脱法处理 VOC 废水的气液传质效率主要受到液膜侧传质阻力和两相接触面积控制,后者又主要与两相接触方式和接触条件有关<sup>[21]</sup>,与 VOC 初始浓度无关。但 VOC 初始浓度会影响吹脱速率,初始浓度低的 VOC 废水所需吹脱时间更短,且低浓度 VOC 废水采用吸附等其他方法效果较差,故在随后实验中采取 VOC 废水浓度为 15 mg/L。

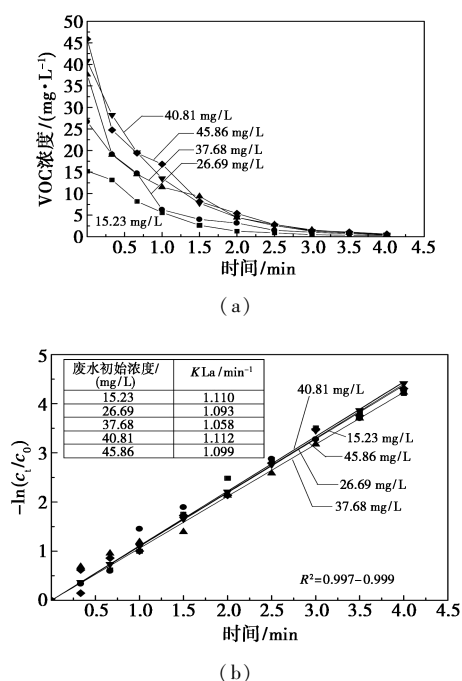


图 2 废水初始浓度对水力喷射空气旋流器吹脱处理 VOC 过程的影响

### 2.2 进口气速 $u_G$ 对 VOC 吹脱处理过程的影响

在废水初始浓度为 15 mg/L, 射流流速  $u_L$  为 1.15 m/s, 液相温度  $t_L$  为 24~25℃ 时, 考察进口气速对 VOC 废水在 WSA 中吹脱处理效率的影响, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 随着进口气速  $u_G$  的增大, VOC 在 WSA 中吹脱去除效率越高, 气液传质系

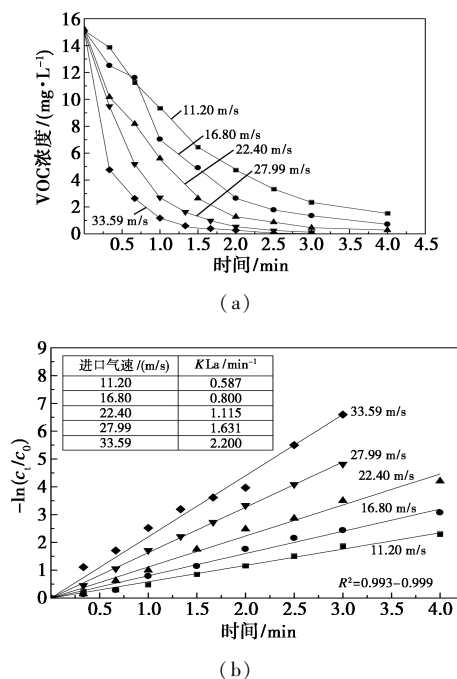


图 3 进口气速对水力喷射空气旋流器吹脱处理 VOC 过程的影响

数  $K_La$  也不断增大。这是由于进口气速增大, 使得气液两相作用更加剧烈, 巨大动能的气相旋流对液相射流柱剪切力增大, 使得液相射流柱流型由稳态射流逐步转变为变形射流、破碎射流, 甚至是雾化旋流射流, 这将极大地增加气液两相比传质面积<sup>[22]</sup>, 并有大量的气液作用表面的更新<sup>[20]</sup>, 使得气液传质效率大大增加, 从而导致 VOC 吹脱效果的提高。WSA 内部气相压降主要来自于旋流场与器壁之间的摩擦损失和内部气相旋流场与液相射流场之间的耦合作用, 即气相压降反映了气液两相作用的激烈程度, 所以进口气速越大, 气液两相作用越剧烈, VOC 吹脱处理效率越高<sup>[23]</sup>。

### 2.3 废水射流流速 $u_L$ 对 VOC 吹脱处理过程的影响

在废水初始浓度为 15 mg/L, 进口气速  $u_G$  为 33.59 m/s, 液相温度  $t_L$  为 24~25℃ 的实验条件下, 研究考察了废水射流流速  $u_L$  对 WSA 吹脱处理 VOC 废水效率的影响, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 当射流流速  $u_L$  由 0.86 m/s 增大至 1.44 m/s 时, 传质系数增加约 50%, 而当  $u_L$  由 1.44 m/s 继续增大至 1.64 m/s 时, 传质系数  $K_La$  几乎不变。这是液相射流流速的增大, 液相湍动程度增大, 液膜厚度降低即  $K_L$  增大, 从而提高了气液传质效率。另一方面, 当液体射流流速增大, 更多的液相将进入气相, 与单位

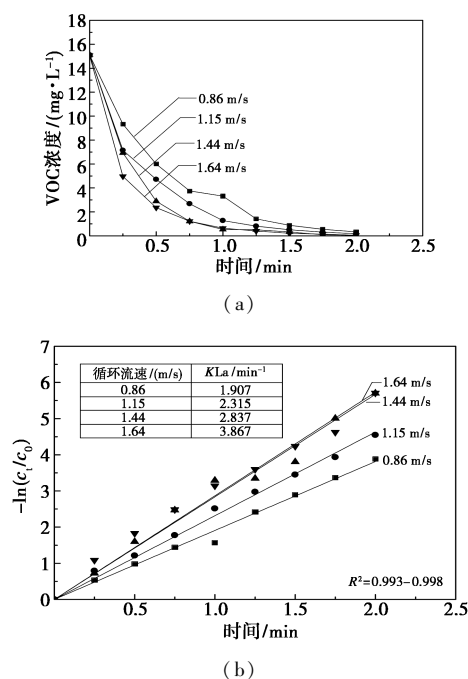


图 4 废水射流流速对水力喷射空气旋流器吹脱处理 VOC 过程的影响

体积气体接触的液体体积增加,从而有效相界面面积  $a$  增大。另外,前期流型研究也表明,当废水射流流速增大,有利于形成雾化旋流射流而不形成贴壁雾化射流<sup>[22]</sup>,后者将降低气液传质效率。但当废水射流流速增大至一定值,如本研究中 1.44 m/s 时,由射流流速增大引起的  $K_L$  和比传质面积增大的效果不明显,使得气液传质效率变化不大,且射流流速的增大还会导致液泵负荷和能耗的增加。因此液相射流存在一个较优值为 1.44 m/s。

#### 2.4 废水温度 $t_L$ 对 VOC 吹脱处理过程的影响

当废水初始浓度为 15 mg/L,进口气速  $u_C$  为 33.59 m/s,废水射流流速为 1.44 m/s 时,考察废水温度  $t_L$  对 VOC 废水在 WSA 中吹脱处理效率的影响,结果如图 5 所示。随着废水温度  $t_L$  的升高,VOC 在 WSA 中吹脱处理效率越高,气液传质系数越大。这是由于温度升高,VOC 废水的内能随之增加,水的黏性阻力减小,VOC 扩散系数增大,亨利常数增加,有利于 VOC 的吹脱气液传质,吹脱效率增大<sup>[17]</sup>。此外,液相温度的升高,使 VOC 分子运动加快,有利于其从液相运动转移至气相,提高气液传质效率,提高 VOC 吹脱处理效果。但液相温度越高耗能越大,需综合考虑进行抉择。

#### 2.5 不同 VOC 废水吹脱处理设备传质性能对比

VOC 废水吹脱处理通常在填料塔、吹脱槽等常规设备中进行,为了进一步比较 WSA 和其他设备吹

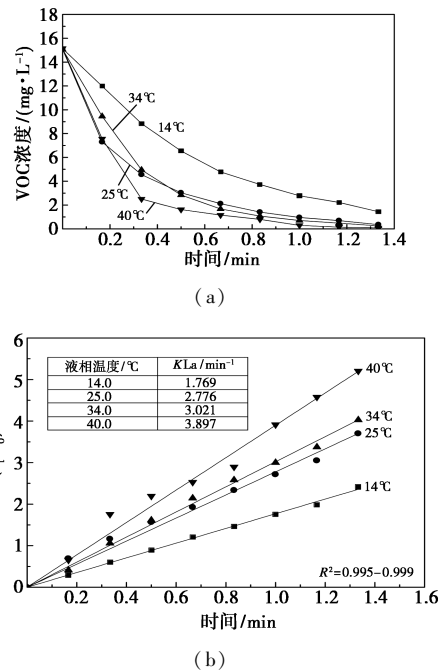


图5 废水温度对水力喷射空气旋流器吹脱处理 VOC 过程的影响

脱处理 VOC 的传质性能,参考相关研究文献,结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,水力喷射空气旋流器(WSA)的气液传质效率分别是吹脱槽、曝气柱、真空纤维膜吹脱设备的 3.70、2.04、154.22 倍。由此可知,WSA 是一种高效气液传质设备,适宜用于 VOC 的吹脱处理,在工业上有一定的应用前景。

表 1 不同吹脱设备的气液传质系数对比

设备	吹脱对象	吹脱条件	体积传质系数 $K_L a / \text{min}^{-1}$
WSA	乙苯	$V_L = 6.0 \text{ L}, c_0 = 15 \text{ mg/L}, Q_C = 33.59 \text{ m/s}, t_L = 25^\circ\text{C}$	2.776
吹脱槽 <sup>[24]</sup>	氯苯	$V_L = 0.5 \text{ L}, c_0 = 7 \text{ mg/L}, Q_C = 0.015 \text{ m/s}, t_L = 25^\circ\text{C}$	0.750
曝气柱 <sup>[12]</sup>	四氯乙烯	$V_L = 2.55 \text{ L}, c_0 = 0.29 \text{ mg/L}, t_L = 21.5^\circ\text{C}, Q_C = 0.0071 \text{ m/s}$	1.361
真空纤维膜吹脱 <sup>[10]</sup>	二甲基二硫醚	$V_L = 30 \text{ L}, c_0 = 20 \text{ mg/L}, t_L = 25^\circ\text{C}, Q_C = 0.37 \text{ m/s}$	0.018

### 3 结论

采用超重力气液传质设备水力喷射空气旋流器(WSA)对乙苯模拟的挥发性有机物(VOC)废水进行了处理,得到如下结论。

(1) WSA 的进口气速越大、废水温度越高,VOC 废水在 WSA 中吹脱去除传质效率越高;但废水初始浓度对 VOC 废水在 WSA 中吹脱去除效率影响较小。

(2) 废水射流流速存在一个较优值为 1.44 m/s,当射流流速低于此值时,流速的增大会导致 VOC 在

WSA 中吹脱去除传质效率增高;当射流流速高于此值时,流速对 VOC 在 WSA 中吹脱去除效率影响不大。

(3) 与曝气柱、吹脱槽等常规设备相比,WSA 吹脱处理 VOC 废水具有更高的气液传质效率,并适宜采取相对较高的进口气速、废水温度和适中的射流流速,有一定的工业化应用前景。

#### 参考文献

- [1] Huang Binbin, Lei Chao, Wei Chaohai, et al. Chlorinated volatile organic compounds (Cl-VOCs) in environment—sources, potential

- human health impacts, and current remediation technologies [J]. *Environment International*, 2014, 71: 118-138.
- [2] 郭斌, 律国黎, 任爱玲, 等. 维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性 [J]. *环境科学*, 2013, 34(12): 4654-4660.
- [3] Shin H, Mckone T E, Bennett D H. Volatilization of low vapor pressure volatile organic compounds (LVPeVOCs) during three cleaning products-associated activities: Potential contributions to ozone formation [J]. *Chemosphere*, 2016, 153: 130-137.
- [4] 王玉芬, 张肇铭, 胡筱敏. SBR 处理模拟氯苯废水 [J]. *环境工程学报*, 2013, 50(7): 1709-1716.
- [5] Priya V S, Philip L. Treatment of volatile organic compounds in pharmaceutical wastewater using submerged aerated biological filter [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 266: 309-319.
- [6] 李朝宇, 张潇, 吕佳佳, 等. 石墨烯/SiO<sub>2</sub> 气溶胶对苯、甲苯水溶液的吸附 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3): 972-979.
- [7] 张璇, 廖银念, 罗云, 等. 花状氧化铜催化降解甲苯的性能研究 [J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(8): 30-35.
- [8] Eberle D, Ball R, Boving T B. Peroxone activated persulfate treatment of 1,4-dioxane in the presence of chlorinated solvent co-contaminants [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 728-735.
- [9] Kambhu A, Gren M, Tang W, *et al.* Remediating 1,4-dioxane-contaminated water with slow-release persulfate and zerovalent iron [J]. *Chemosphere*, 2017, 175: 170-177.
- [10] Viladomat F G, Souchon I, Athès V, *et al.* Membrane air-stripping of aroma compounds [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 277: 129-136.
- [11] 吴方同, 苏秋霞, 吴淑娟. 空气吹脱法去除饮用水中的三卤甲烷 [J]. *给水排水*, 2009, 35(12): 26-30.
- [12] 张伟. 曝气吹脱去除水源水中挥发性有机物的应急处理技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [13] Feng C, Khulbe K C, Tabe S. Volatile organic compound removal by membrane gas stripping using Electro-spun nanofiber membrane [J]. *Desalination*, 2012, 287: 98-102.
- [14] Ayyildiz O, Anderson P R, Peters R W. Laboratory batch experiments of the combined effects of ultrasound and air stripping in removing CCl<sub>4</sub> and 1,1,1-TCA from water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 120: 149-156.
- [15] Libralato G, Ghirardini A V, Avezzù F. Evaporation and air-stripping to assess and reduce ethanalamines toxicity in oily wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153(3): 928-936.
- [16] 刘有智. 超重力化工过程与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [17] Quan Xuejun, Wang Fuping, Zhao Qinghua, *et al.* Air stripping of ammonia in a water-sparged aerocyclone reactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 170(2/3): 983-988.
- [18] 程治良, 全学军, 代黎, 等. 水力喷射空气旋流器喷孔分布优化 [J]. *化工学报*, 2013, 64(9): 3182-3188.
- [19] 徐飞, 罗丹, 全学军, 等. 底部挡板与进气位置对水力喷射空气旋流器传质性能的影响 [J]. *化工进展*, 2015, 34(11): 3864-3868.
- [20] 赵清华, 全学军, 程治良, 等. 水力喷射-空气旋流器中气液传质特性及其机理 [J]. *化工学报*, 2013, 64(10): 3653-3657.
- [21] Joanna K, Sophie C, Wojciech K. Highly hydrophobic ceramic membranes applied to the removal of volatile organic compounds in pervaporation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 260: 43-54.
- [22] 程治良, 全学军, 晏云鹏, 等. 水力喷射空气旋流器中射流流型及其对传质面积和气相压降的影响 [J]. *化工学报*, 2014, 65(8): 2914-2920.
- [23] 赵清华, 全学军, 项锦欣, 等. 水力喷射空气旋流器的气相压降特性 [J]. *化工学报*, 2011, 62(9): 7-11.
- [24] 汪艳. 曝气吹脱技术去除水源水氯苯的初步研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. ■

## (上接第 175 页)

- [10] 王小尚, 刘景俊, 李玉星, 等. LNG 接收站 BOG 处理工艺改进——以青岛 LNG 接收站为例 [J]. *天然气工业*, 2014, 34(4): 125-130.
- [11] 杨志国, 李亚军. 液化天然气接收站蒸发气体再冷凝工艺的优化 [J]. *化工学报*, 2009, 60(11): 2876-2881.
- [12] Cui M, Yuan Z, Song R, *et al.* Performance improvement of a boil-off gas Re-condensation process with Pre-cooling at LNG terminals [J]. *International Journal of Thermodynamics*, 2015, 18(2): 74-80.
- [13] 薛倩, 刘名瑞, 肖文涛, 等. LNG 接收站 BOG 处理工艺改进及功耗分析 [J]. *油气储运*, 2016, 35(4): 376-380.
- [14] Li Y, Chen X, Chein M H. Flexible and cost-effective optimization of BOG (boil-off gas) recondensation process at LNG receiving terminals [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2012, 90(10): 1500-1505.
- [15] 李亚军, 夏岩. LNG 接收站 BOG 蒸发量的影响因素及稳定性 [J]. *低温工程*, 2012, (4): 38-43.
- [16] 孔令海, 黎文锋, 邓文源, 等. LNG 接收站储罐冷却过程中蒸发气体的零排放技术 [J]. *天然气工业*, 2017, 37(5): 81-87.
- [17] 付子航. LNG 接收站蒸发气处理系统静态设计计算模型 [J]. *天然气工业*, 2011, 31(6): 85-88.
- [18] 鹿晓斌, 郭雷, 曲顺利. 利用 Hysys 模拟计算接收站 BOG 蒸发量 [J]. *化工进展*, 2015, 34(S1): 47-50.
- [19] Battistelli A. Investigation of a concept for simultaneous reliquefaction of boil-off-gas and vaporization of LNG for marine atmospheric LNG fuel tanks [J]. *Plastic & Reconstructive Surgery*, 2014, 45(5): 820-824.
- [20] 孙宪航, 陈保东, 张莉莉, 等. 液化天然气 BOG 的计算方法与处理工艺 [J]. *油气储运*, 2012, 31(12): 931-933. ■