

立体传质塔板 CTST 研究和应用现状

王治红^{1*}, 胡红¹, 彭琳², 黄华伦³

(1. 西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石油工程建设公司大连设计分公司, 辽宁 大连 116000; 3. 北京兴油工程项目管理有限公司, 北京 100000)

摘要:综述了立体传质塔板 CTST 在石油炼制、污水处理、化工生产和天然气化工工艺的过程改造现状和 CTST 塔板的理论研究现状。工业应用表明, CTST 塔板确实具有抗堵、消泡、提效、增产、节能和降耗等方面的优势。凭借实验手段和 CFD 模拟, 理论经验研究主要集中在板上气、液相流动及两相流动和喷射罩内流动, 但有关于流动和传质结合的研究尚少。未来 CTST 塔板将主要朝着增加气液两相界面面积和增长界面更新速率, 改善液体流动和浓度分布, 增加气液传质推动力方向进一步提高其传质性能。

关键词: CTST 塔板; 过程改造; CFD; 两相流动

中图分类号: TQ053.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)06-0148-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.06.036

Current status of research and application of combined trapezoid spray tray

WANG Zhi-hong^{1*}, HU Hong¹, PENG Lin², HUANG Hua-lun³

(1. Chemistry and Chemical Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. CPECC Dalian Design Branch, Dalian 116000, China;

3. Beijing Xingyou Engineering Project Management Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: The current situation of the application of combined trapezoid spray tray (CTST) in petroleum refining, sweage treatment, chemical production and nature gas processing transformation. The development of theory about CTST is also reviewed. The industrial application shows that CTST tray has a large number of advantages such as anti-blocking, anti-forming, efficiency improving, production increasing, energy saving and waste discharging. Based on the CFD simulation and experiments, theoretical researches are mainly focused on gas flow, liquid flow, two-phase flow and injection flow. However, the researches on the combination of flow and mass transfer are less. The countermeasures to further improve the mass transfer performance in the futures are also proposed, including the increase of interfacial area, making the interface update faster, improvement of concentration distribution of liquid and increasing the driving force for mass transfer of gas-liquid.

Key words: CTST; processing transformation; CFD; two-phase state

塔板是板式塔最重要的内构件, 直接影响塔设备传质和操作性能。目前国内外已研发出许多新型塔板广泛应用于工业生产, 如日本的 NEW-VST 塔板、河北工业大学开发的 CTST 塔板、Norton 公司的 Triton 型塔板、Koch-Gilitsch 公司的 Superfrac 型塔板和 BiFrac 型塔板、美国联合碳化公司开发的 MD 塔板、清华大学泽华化学工程有限公司的 ADV 微分浮阀塔板、英国诺丁汉大学开发的 Flow Contral 型塔板、南京大学开发的 95 型大通量塔板等^[1]。其中, CTST 塔板因消泡性能好、操作弹性大、处理量大、压降低、抗堵性能强、效率高而广泛应用于国内石油炼制、污水处理及化工生产的旧塔改造, 以满足日益提高的环保、节能、增效要求^[2-3]。

1 CTST 塔板应用现状

CTST 作为立体传质塔板在降低塔板压降、增大

处理量、提高操作弹性和增加传质效率等方面均优于 F1 浮阀塔板、筛孔塔板等。目前, CTST 广泛应用于传统以浮阀塔板为主要传质设备的化工工艺, 如常减压蒸馏工艺、催化裂化工艺、污水处理等。CTST 塔板上高速气液对喷射孔的冲刷, 直接降低了喷射孔的堵塞。对易堵塞物系而言, 如污水, CTST 的应用将减少设备的停产检修频率, 增加设备的运行周期, 为车间带来直接的经济效益。使用 CTST 改造原塔设备通常不会对塔直径和其他附属内件做改动, 大大缩短了施工周期, 有效降低物力和人力成本。

随着环境友好和资源节约型社会的转型成功, 许多高能耗、低效的塔板会被新型塔板或新型传质设备替代, 如 CTST、超重力设备等。例如天然气净化过程的脱硫脱碳塔, 工业应用数据表明醇胺是易发泡体系, 且从地下上来的天然气掺杂了部分固体

收稿日期: 2015-11-20; 修回日期: 2016-04-07

作者简介: 王治红(1974-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为天然气处理与加工、石油炼制与加工, 通讯联系人, 02883037308, wzhsupu@swpu.edu.cn。

颗粒易堵塞塔板,使用 CTST 改造天然气净化工艺的吸收塔和再生塔可明显减轻物系发泡和堵塞问题。

1.1 石油炼制

立体传质塔板在降低塔板压降、增大处理量和操作弹性、增加传质效率的优势,使其频繁应用于原油蒸馏和催化裂化浮阀塔板改造,以最小的改动实现炼油厂节能降耗。①2001 年中国石油天然气股份有限公司大连公司常减压蒸馏装置^[4]、②2004 年

中油集团庆阳炼化原油常压蒸馏浮阀塔^[5]、③2001 年东明石化集团公司催化裂化主分馏塔^[6]、④2006 年中国石油华北石化分公司Ⅲ催化裂化裂化装置分馏塔^[7]、⑤2012 年湛江东兴石化 I 和 II 催化裂化塔^[8]、⑥2002 山东石达科技集团有限公司催化裂化装置蝶形浮阀塔板^[9]均使用 CTST 塔板改造浮阀塔板。大量实践证明,改造可大幅提升塔板性能,具体情况如表 1^[4-9]所示。

表 1 CTST 塔板改造效果

公司序号	压降	处理量	操作弹性	传质分离效率
①	单板压降降低 20% ~ 30%	增加 80% ~ 100%	提高 100%	增加 10% ~ 40%
②	常压塔压降降低 17.24%	46 万 ~ 120 万 t/a	大于 200%	塔板全塔效率由 50% 增加到 60%
③	全塔压降下降 2 kPa	增加 11%	12.5 ~ 21.0 t/h	粗汽油和轻柴油六分脱空 4℃
④	全塔压降 24 kPa	增加 60%	70% ~ 120%	液化气收率增加 4%;汽柴油分离精度提高,汽油 95% 点和柴油 5% 点,脱空 5℃
⑤	全塔压降小于 15 ~ 20 Pa	增加 25% ~ 66.7%	50% ~ 120%	效果明显,汽油中无 C ₅ + 组分
⑥	全塔压降减少 6 kPa	增加 3 t/h	70% ~ 120%	液化气收率提高 4%

1.2 污水处理

立体传质塔板用于污水处理塔改造,不仅可增加污水处理量、提高污水净化度、增加装置的抗堵塞性能,还可降低停工维修频率、延长装置的运行周期。

2001 年某厂降含硫污水汽提浮阀塔改造为 CTST 塔盘,降低蒸汽单耗 5 ~ 10 kg、降低侧线抽出比、升高氨浓度、提高净化水纯度、增加塔的操作弹性到 2.6。处理量在 25 ~ 65 t/h 波动,塔设备运行正常^[10]。当处理量增加 42.86% 时,塔板压降进一步降低。

2007 年湛江东兴石油企业将含硫污水汽提塔的 45 层浮阀塔板全部更换为 CTST 塔板^[11]。实现处理量提高 50%,降低净化水中 NH₃ 质量浓度小于 50 mg/mL、H₂S 质量浓度小于 20 mg/mL。

锦西石化分公司将净化车间含硫污水气体装置进行改造,将原有的浮阀塔板改造为 CTST 塔板^[12]。实现处理量增加 1.8 倍,净化水中氨氮质量浓度下降 33.3%,全塔压降降低 50%,装置运行周期延长至少 8 个月。

1.3 化工生产

2001 年中石油锦州石化分公司将气体分流装置的异丁烯塔扩能改造,使用 CTST 塔板代替原有的 F1 浮阀塔板。提升处理量高于设计上限 9.091%,高于实际处理能力 36.7%。塔的操作弹性由 17 增加到 34,以应对原料气进料的波动工况。改造大大提高分离效率,并明显降低能耗^[13]。

湖南省湘维有限公司^[14]使用 CTST 改造 PVA 装置的萃取精馏塔和共沸精馏泡罩塔。生产能力分别提高 80%、70%,萃取精馏塔回流比下降 0.04,

(上接第 147 页)

[4] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration[J]. Water Research, 2003, 37: 1371 - 1377.

[5] 张小玲,王志盈. 低溶解氧下 SBR 内短程硝化影响因素试验研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(1): 163 - 166.

[6] 陈英文,陈祥,沈树宝. 膜生物反应器同步硝化反硝化系统的研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(7): 902 - 905.

[7] 陈金声,史家梁,徐亚同. 硝化速率测定和硝化细菌技术考察脱氮效果的应用[J]. 上海环境科学, 1996. 15(3): 18 - 20.

[8] 国家环保总局编. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境出版社, 1997.

[9] 李振高,骆永明,腾应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[10] 余敦耀,邱雁临,朱影. 高效硝化菌的分离与鉴定[J]. 化学与生物工程, 2008, 25(4): 60 - 63.

[11] 张建丰. 活性污泥法工艺控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[12] 张子健,吴伟伟,王建龙. 全自养硝化污泥的颗粒化过程研究[J]. 环境科学, 2010, 31(1): 140 - 145. ■

降低单位生产能耗。

2001 年天津联华使用 CTST 改造乙二醇装置扩产^[15]。改造解决了原 EO 吸收塔严重发泡,关闭了消泡剂的注入管线,实现了 EO 扩产、提效、节能降耗。

1.4 天然气化工

CTST 在天然气化工改造应用较少,但 CTST 塔板发泡和抗堵性能有待被进一步挖掘。目前,CTST 已用于酸气中硫化物的回收。2006 年湛江东兴石油企业^[11]将硫磺回收装置脱硫剂再生塔板改造为 CTST 塔板,增加处理量 50%、提高操作弹性大于 66%、提高溶剂再生效率。

此外,中国石化仪征化纤股份分公司^[16]将 PTA 装置尾气常压吸收塔改造为 CTST-填料的复合塔板,提高 AcOH、MA 吸收率。山西天脊化工集团在不变动塔径及附属内件使用 CTST 塔板替换低温甲醇洗装置脱硫塔的浮阀塔板,增加处理量 50%、降低净化气 H₂S 和 CH₃OH^[17]。

2 塔板的研究现状

CTST 板上气液两相流动复杂,难以用实验得到准确的气液流动状况,目前的研究手段都是实验与 CFD 模拟相结合。通过 CFD 仿真流动过程,配合实验数据,检验 CTST 模型的准确性,以期获得可靠的 CTST 塔板两相流动模型。塔板模型参数主要有喷射罩压降、液膜高度、液体提升量、清液层高度及梯度。这些参数的研究基本是通过数据拟合得到经验关联式,例如喷射罩压降是板孔动能因子和清液层高度的关联,而清液层高度是塔板结构参数和板孔动能因子的关联。总而言之,由于塔板的构造不同,如塔径、帽罩的排列等,会使塔板参数经验关联式系数发生改变,这使要获得一个稳定可靠的解析式比较困难。越来越多的研究倾向于构造 CTST 塔板的数学模型,通过输入某些因变量得到塔板数值解,还原真实的 CTST 流动模型。此外,随着数值计算的发展,将降液管和 CTST 塔板作为整体模型还原真实的单块塔板的气液流动也会越来越受重视。目前,CSCT 塔板的研究重点在喷射罩压降、液膜高度、液体提升量、清液层高度及梯度、板上两相流动等方面。

2.1 喷射罩压降

喷射罩压降是 CTST 塔板重要的性能指标,它反映气液帽罩内动压能和静压能之间的转换,影响罩内气液流动、液滴分布和提升量多少。目前,国内

学者一致认为帽罩内的干板和湿板压力呈现“两头大、中间小”特点。气体在板孔处进行缩流流动,气体压力迅速降低,进入罩后,流道变宽,气体速度降低,动压能转换为静压能,降低干板压降。罩内提升液体时形成液膜,压降回升较少;气液离开帽罩后湿板压力进一步回升。刘继东等^[18]将帽罩内湿板压力关联为板孔动能因子 F_0 、清液层高度 h_l 的表达式:

罩体底隙:

$$p_w = -134.7 + 11.4F_0 + 8.6h_l$$

喷射孔区域:

$$p_w = 82.6 + 8.7F_0 + 2.2h_l$$

2.2 液膜高度和液体提升量

液体在帽罩内的流动直接影响气液两相传质,其研究主要是液膜高度和液体提升量。液膜高度是液体在帽罩内以液膜形式存在的最高高度。液膜是重要的传质场所,研究液膜的高度为进一步确定液膜传质面积提供了基础数据。陈华艳^[19]将气液体在提升罩内的流动划分为拟环状流。减少板上清液层高度、增加板孔动能因子,均增加液膜高度,其实验经验式如下:液体提升量是单位时间内被帽罩提升并喷射出帽罩的相对液体量,直接反映了 CSCT 塔板的处理能力,影响液体破碎程度、气液传质面积、CSCT 板效率和点效率,是研究塔板内两相传质过程的重点。陈华艳^[19]研究了板上清液层高度 h_l 、板孔气速 u_0 、板孔宽度 w 、罩体底隙 H 和 $x(y)$ —罩体结构对 CTST 液体提升量 q 的影响。

此外,刘继东等^[18]将物性参数(气相密度 ρ_c 、液相密度 ρ_L 、液相表面张力 σ)、帽罩结构参数(帽罩喷射区域面积 A_s 、罩体底隙长度 l 、液体被提升的平均高度 h_m 、罩体底隙高度 h_g)、塔板结构参数(板孔面积 A_0 、帽罩个数 n)和操作条件参数(板孔气速 u_0 、板上清液层高度 h_l)都考虑进液体提升量中,得到如下的关联式:

$$A = \varepsilon_g \rho_c A_0^3 u_0^3 / 2n^2 l^2 h_g^2 \rho_L^2$$

$$B = \varepsilon \rho_c A_0^3 u_0^3 / 2A_s^2 + [6\sigma / \rho_L d_m + g(h_m + h_g/2 - h_l)] \rho_c A_0 u_0 C = \varepsilon (\rho_c A_0^3 u_0^3 / 2A_s^2) - 0.5 \rho_c A_0 u_0^3$$

式中, ε_g 为底隙处的局部阻力系数; ε 为气液拟均相流的流动阻力校正系数和罩内气液流动及喷出的流动阻力系数之和。

刘继东等^[20]通过实验得出其他形式的液体提升量的经验关联式:

$$q = 397.47F_0^{-1.42} (1 - \varphi)^{0.143} h_l^{0.4}$$

式中, φ 为板上气体体积分。

2.3 板上清液层高度及梯度

板上清液层高度直接影响湿板压降和气体分布。清液层越高,越易发生漏液。在实际操作中通过易测参数的关联,得到塔板的清液层高度分布,避免设备的非正常操作,对设备的良好操作管理至关重要。王志英^[21]将塔板分为①进口区、②帽罩中间区、③出口区、弓形区区域(图1所示)。通过实验得到清液层高度 h_{11} 、 h_{12} 、 h_{13} 、 h_{14} ,液面平均高度 h_{1e} 及进口到帽罩、出口到帽罩、进口到出口的液面梯度 Δh_{11} 、 Δh_{12} 、 Δh_{1L} 的经验关联式:

$$h = C_0 L_w^{C_1} F_0^{C_2} h_w^{C_3}$$

式中, L_w 为溢流强度, $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$; F_0 为板孔动能因子, $\text{m/s}(\text{kg}/\text{m}^3)$; h_w 为堰高, m 。

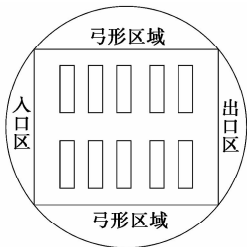


图1 塔板的4个分区

各参数的关联系数如表2所示,在此基础上,可以轻易预测塔板的液面大致分布,方便及时应对漏液现象。

表2 关联式系数

	h_{11}	h_{12}	h_{13}	h_{14}
C_0	2.249	3.39	2.26	1.83
C_1	0.425	0.2192	0.3413	0.3702
C_2	-0.1132	-0.2767	-0.0965	-0.1081
C_3	0.4063	0.7087	0.5314	0.4217
	h_{1e}	Δh_{11}	Δh_{12}	Δh_{1L}
C_0	1.933	4.7×10^{-5}	3.677×10^{-5}	9.5×10^{-5}
C_1	0.3461	0.5879	0.6238	0.5246
C_2	-0.1089	1.4775	2.0248	0.6385
C_3	0.4729	-1.0949	-0.7176	-2.2979

2.4 塔板上的两相流动

塔板上的两相流动直接关系塔板的处理量、传质效率、漏液、液泛和塔板的运行周期。合理的两相流动可以延长塔设备运行周期,增加全塔效率。通过实验和模拟提早发现塔板上的不利流态,对改善塔板布置、提高塔板的流体力学性能、强化传质过程十分重要。

塔板上的液相流动直接影响液相浓度分布,进而影响传质推动力大小和传质效率。前人研究表明,液相在塔板上返混越大,气液传质效率越差。孙玉春^[22]发现塔板无开孔时,回流区主要集中于塔壁附近的弓形区。液体流量越大,在溢流堰附近的回流面积越大。当塔板上存在矩形开孔时,塔板的弓形区和降液管出口处的回流明显改善,此时,塔板的回流区域主要集中在矩形孔的边缘区域(参见图2)。刘继东^[2]进一步发现塔板伸入罩内长度 W_b 越长,回流面积越大,回流强度越小; W_b 越小,回流面积越小,回流强度越大。

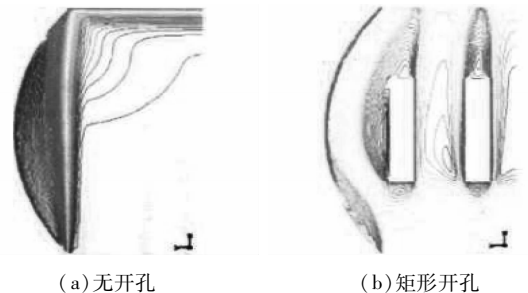


图2 液相流动回流区域

塔板上的气相流动主要集中在喷射罩内和罩间,气相在帽罩内实现液膜的提升和破碎,在罩间互喷不断更新的液滴表面,提高传质效率。

刘建慈^[23]认为塔板分离板上方的两相流动直接影响塔板的雾沫夹带。分离板上方的速度过大,则液滴无法随液流向下流动,造成液体的返混,降低塔板的传质和操作性能。根据其实验数据和模拟数据处理图(图3、图4),在帽罩和塔壁之间气液竖直向上的速度分量 u_z 较大,雾沫夹带量最大。

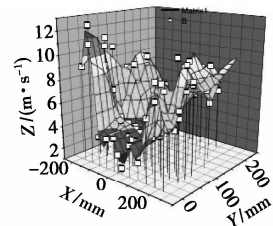


图3 实验数据处理图

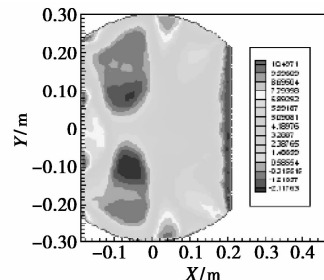


图4 模拟结果图

3 展望

CTST 作为优质塔板其工业应用价值正逐渐被开发,所涉及的旧塔改造领域也会逐步拓宽。但 CTST 的消泡能力还有待进一步提高。CTST 与填料复合虽然能降低雾沫夹带,但却明显增加了板压降^[24]。此外,对于气量波动较大的物系,其分离效率和操作性能都不高^[25]。

在科技日新月异的今天,塔板主要的研发手段—实验分析将会被 CFD 模拟所替代。事实使用 CFD 模拟一次就相当于做一项实验,可以降低实验工作的烦琐性、重复性,还可以更深刻地分析气液两相传质机理,与此同时还直接省掉用户的数据处理,将研究结果以更直观的形式输出,如云图。此外,对于某些复杂的过程,实验成本过高或难以进行实验,CFD 研究就更为重要。立体传质塔板目前的传质研究较少,大部分研究都只是针对于气液两相流场,并不涉及传质过程。随着 CFD 技术的成熟,对 CTST 传质模型机理的研究将是重点。

立体传质塔板的塔板传质性能改进主要从 2 个方面进行:①增加气液两相界面面积和增快界面更新速率;②改善液体流动和浓度分布,增加气液传质推动力。气液接触面积的增大,主要通过获得更多、直径更小的液滴,即通过优化塔板上帽罩开孔、分离板布置和帽罩之间排列位置。立体传质塔板主要靠液膜湍动传质,其加快界面更新的主要途径是提高液膜湍动的程度。目前,较为普遍的液体流动即相邻两层塔板液体逆流。事实上 Lewis W K 在 1963 年已经提出,相邻两层塔板同向流动是提高板效率 20% 以上的唯一途径^[26]。目前,随着各项环保降耗指标的提高,CTST 塔板想进一步提高其传质效率,与 Lewis 同向流效应的结合将会是一个重要方向。

参考文献

[1] 董军,李建波.塔板技术的发展现状与研究展望[J].石油炼制与化工,2007,38(11):46-50.

[2] 刘继东.立体传质塔板罩内气液两相流动及传质过程的研究[D].天津:天津大学,2008.

[3] 刘继东,谢振山,贺亮,等.立体传质塔板 CTST 喷射特性的研究[J].高校化学工程学报,2014,28(3):518-523.

[4] 张文林,吕建华,李柏春,等.立体传质塔板在常压蒸馏装置扩改中的应用[J].天然气化工,2005,30(6):30-34.

[5] 吕建华,魏志忠,繆西平,等.立体传质塔板在常压蒸馏装置扩

能改造中的应用[J].应用广场,2005,(4):44-47.

[6] 薄慕涛,李书璞,赵赞立,等.立体传质塔板在催化裂化装置主分馏塔上的应用[J].山东化工,2003,32(1):23-25.

[7] 李春利,吕建华,刘景华,等.新型双层喷射立体传质塔板在催化裂化装置各塔的应用[J].化工进展,2007,26(s1):176-178.

[8] 孙立军,李柏春,巢飞. CTST 塔板在吸收稳定系统改造中的应用[J].炼油技术与工程,2015,45(6):40-42.

[9] 贾少磊.采用立体传质塔板 CTST 技术改造催化裂化分馏塔[J].长春工程学院学报:自然科学版,2013,14(4):122-124,128.

[10] 杨开书.立体传质塔板在污水汽提塔上的应用[J].石油加工设备技术,2002,23(2):11-12,15.

[11] 孙立军,李春利,李柏春.立体传质塔板在硫磺回收装置中的应用[J].现代化工,2008,28(s1):18-20.

[12] 游少辉,苏志远,吴玉海.含硫污水汽提装置的扩能改造[J].工业用水与废水,2002,33(6):59-61.

[13] 刘文权,张文林,孙莉君,等.立体传质塔板在气体分馏装置扩改中的应用[J].天津理工学院学报,2004,20(2):20-24.

[14] 张剑波.立体传质塔板在 PVA 装置萃取精馏及共沸精馏塔中的应用[J].现代化工,1998,(4):18-20.

[15] 张文林,吕建华,李春利,等.立体传质塔板在环氧乙烷/乙二醇装置扩改中的应用[J].石油与天然气化工,2003,32(4):216-218.

[16] 於扣红,吕建华.立体传质塔板在 PTA 装置尾气常压吸收塔的应用[J].聚酯工业,2012,25(4):8-10.

[17] 刘继东,张竞平,李春利,等.导向立体传质塔板在低温甲醇洗装置中开发应用[J].化学工程,2007,35(3):10-13.

[18] 刘继东,李春利,王志英,等.立体传质塔板相对液体提升量的计算[J].高校化学工程学报,2007,21(1):163-167.

[19] 陈华艳.立体传质塔板 CTST 液体提升机理的研究[D].天津:河北工业大学,2013.

[20] 刘继东,孟爽,钟宏伟,等.板上充气状态下立体传质塔板液体提升量研究[J].化学工程,2010,38(8):1-3.

[21] 王志英.立体传质塔板 CTST 喷射特性的研究[D].天津:河北工业大学,2002.

[22] 孙玉春.立体传质塔板上液相流场的三维模拟研究[D].天津:河北工业大学,2005.

[23] 刘建慈.立体传质塔板 CTST 分离板上气相速度分布的研究[D].天津:河北工业大学,2007.

[24] 吕娜. CTST-F1 复合塔板流体力学性能的研究[D].天津:河北工业大学,2008.

[25] 郭艾康,刘继东,田志亮. CTST-MD 复合型塔板降液管流体力学性能的实验研究[J].现代化工,2014,34(10):139-142.

[26] 王胜坤,张继军,张少峰.液体并流塔板技术进展[J].化学工程,2010,38(10):42-45. ■