

TPI 型规整填料的流体力学及传质性能研究

田 馨¹ 魏宏大² 郭鑫宇¹ 汤效飞² 舒亚胜¹ 李群生^{1*}

(1. 北京化工大学 化学工程学院, 北京 100029; 2. 北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 设计开发了一种新型波纹脉冲型填料, 该填料结合直线结构和脉冲结构的优点, 有效地降低了塔压降, 并且显著提高了传质性能。实验采用氧解吸的方法对三折线脉冲(TPI)填料进行冷膜实验, 测定了3种不同比表面积 of TPI 型填料的流体力学以及传质性能, 并与传统的 CY 型填料进行了对比。相对于 CY700 型填料, TPI700 型填料的流体力学和传质性能均有较为显著的提高。以流量 $L = 22.49 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的情况为例, TPI700 型填料的塔压降比 CY700 型平均降低了约 39.4%, 等板高度平均降低了约 16.6%, 液泛气速提高了约 16.4%。结果表明, TPI 型填料的性能较为优良, 可以应用于高分离要求的行业。

关键词: TPI 型填料; 脉冲; 压降; 传质性能

中图分类号: TQ053 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2017.06.005

引 言

塔器作为一种重要的分离单元设备, 近年来被广泛应用于石油、化工、制药、生物等诸多行业中。自上世纪 70 年代初期以来, 填料塔发展越来越迅速, 由于其具有操作压降低、通量大、分离效率高和操作上限高等优点, 在很多领域已经完全改变了传统的以板式塔为主要分离设备的局面^[1]。填料主要分为规整填料和散堆填料两大类, 其中规整填料有着规则的几何结构, 规定了气液两相在填料内的流动通道, 可有效降低由于沟流和壁流而产生的压力降^[2-3]。

随着工业要求的日渐提高和人们需求量的不断增大, 研究开发出更高效、通量更大的新型填料成为了填料塔的一个主要研究方向^[3]。传统的 X 型和 Y 型填料是两种应用比较广泛的波纹填料, 它们与竖直方向的夹角分别为 30° 和 45°。在固定所有操作条件时, Y 型填料有着更低的操作压降, X 型填料有着更高的传质效率, 这也说明了压降和传质效率二者对立, 不可兼得^[4-5]。鉴于此, 为了尽可能地协调压降与传质性能之间的关系, 本文采用了一种新型的波纹脉冲型填料, 该填料改变了传统的波纹倾角, 3 种不同角度连续变化的设计形成了脉冲型缩

进流道, 有效地促进了液膜表面更新, 进而提高了填料的传质性能。文中测定了新型脉冲填料在 3 种比表面积下的流体力学性能和传质性能, 并与传统的 CY 型填料实验结果进行了对比。

1 实验部分

1.1 TPI 型填料

三折线脉冲(three-polygonal line-impulse, TPI)型填料的波纹结构主视图如图 1(a)所示, 波纹片结构俯视图如图 1(b)所示, 波纹顶角 α 约为 90°。填料安装时每两盘相邻填料呈垂直放置。每盘填料高约 166 mm, 上部直线段部分高 16 mm, 其余 3 段在竖直方向高均为 50 mm, 与水平方向角度成 45°-60°-30°。

TPI 填料的结构在结合传统的 X 和 Y 型填料的基础上, 在每盘填料的上部增加了小段直线段。因为在每两盘填料的相接处, 气液流动方向发生的变化会造成较高压降, 因而该部分填料结构可以有效地降低此处压降; 除此之外, TPI 型填料还增加了 60° 的新角度连接, 由图 1 可以看到, 新角度的增加使得填料的流道产生了一个缩进, 形成了脉冲填料的结构特点, 该结构可以有效地促进液相流动时在填料表面的更新速率, 从而更好地促进气液两相间的传质, 大大提高了填料的传质效率。本文实验中的 TPI 填料用高锰酸钾法^[6-7]进行表面处理, 改善了填料的润湿性能, 使液相流动时更易铺展成膜。

本文采用 3 种比表面积的 TPI 填料以及传统的 CY700 型填料进行了测定, 不同比表面积 a 的计算

收稿日期: 2017-07-18

基金项目: 国家“973”计划(2013CB733603)

第一作者: 女, 1993 年生, 硕士生

* 通讯联系人

E-mail: liqs1201@mail.buct.edu.cn

公式如式(1)所示

$$a = \frac{2s}{hB}(1 - \sigma) \tag{1}$$

式中 h 为峰高, $2B$ 为相邻两波峰之间的距离, σ 为开孔率^[1], s 为每个波峰与波谷之间的直线距离。4 种填料的几何特性参数如表 1 所示。

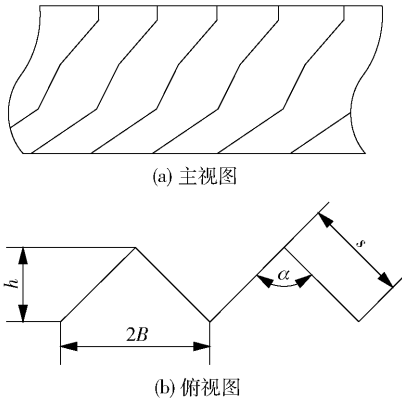


图1 TPI 型填料的几何结构
Fig. 1 Geometric construction of TPI type packing

表1 填料的几何特性参数

填料类型	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	公称直径/ mm	空隙率/%
TPI250	250	476	97.1
TPI500	500	476	95.8
TPI700	700	476	93.2
CY700	700	476	92.7

1.2 实验设备及流程

实验在常温常压下操作,以水-氧气-空气为介质,将填料装填在内径为 476 mm、装填高度约为 1 m 的有机玻璃塔内进行冷膜实验,塔顶采用塔盘式液体分布器,实验流程图如图 2 所示。

流体力学性能的测定包括干塔和湿塔压降两方面。首先测定干塔压降,结束后对填料进行预液泛 0.5 h 左右,再进行湿塔压降的测定;传质性能通过富水水解吸实验来测定,在液体进口和出口处分别取样,用 YSI550A 型溶氧仪(成都新锐仪器仪表有限公司)测得氧气浓度,计算出等板高度(HTP)。

2 结果与讨论

2.1 流体力学性能

2.1.1 干塔压降

实验中测定了 3 种不同比表面积的 TPI 型填料

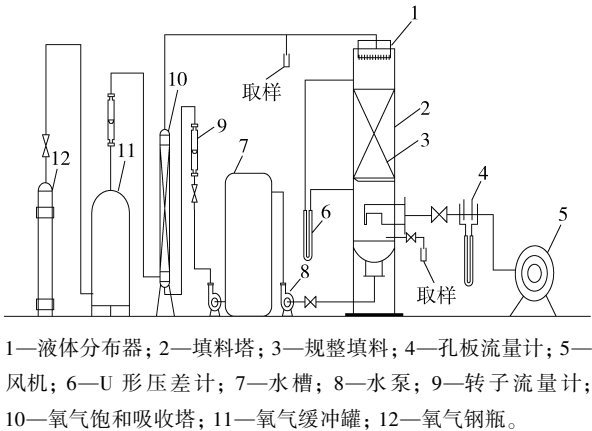


图2 实验流程图

Fig. 2 Flow diagram of the experiments
的干塔压降,并与 CY 填料进行对比,结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,4 种填料的干塔压降均随着气相动能因子 F 的增大而呈增大趋势,且流速越大,增大幅度越明显。对于 TPI 型填料,固定气相动能因子 F 时,可以看到填料比表面积越大,干塔压降越大,具体为: $(\Delta p/Z)_{\text{TPI700}} > (\Delta p/Z)_{\text{TPI500}} > (\Delta p/Z)_{\text{TPI250}}$ 。因为比表面积越大,气体在填料内流经的通道越窄,易与填料表面接触产生扰动,使阻力增加。对比 CY700 和 TPI700 的压降可以发现:TPI 型填料的干塔压降比 CY700 型平均降低约 20%。由此可以看出,新型 TPI 填料的竖直段结构在降低塔压降上有较为明显的作用。

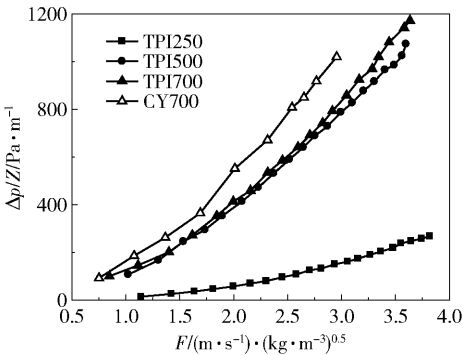


图3 4 种填料的干塔压降与 F 的关系图
Fig. 3 The relationship between dry pressure drop and F factor for four different packing materials

2.1.2 湿塔压降

采用 U 型压差计对 3 种不同比表面积的 TPI 型填料的湿塔压降进行了测定,从而得出 TPI 型填料湿塔压降与气相动能因子 F 关系图,如图 4 所示。

由图 4 可以看到,比表面积和喷淋密度 L 固定时,TPI 型填料的湿塔压降随 F 增大呈明显的上升

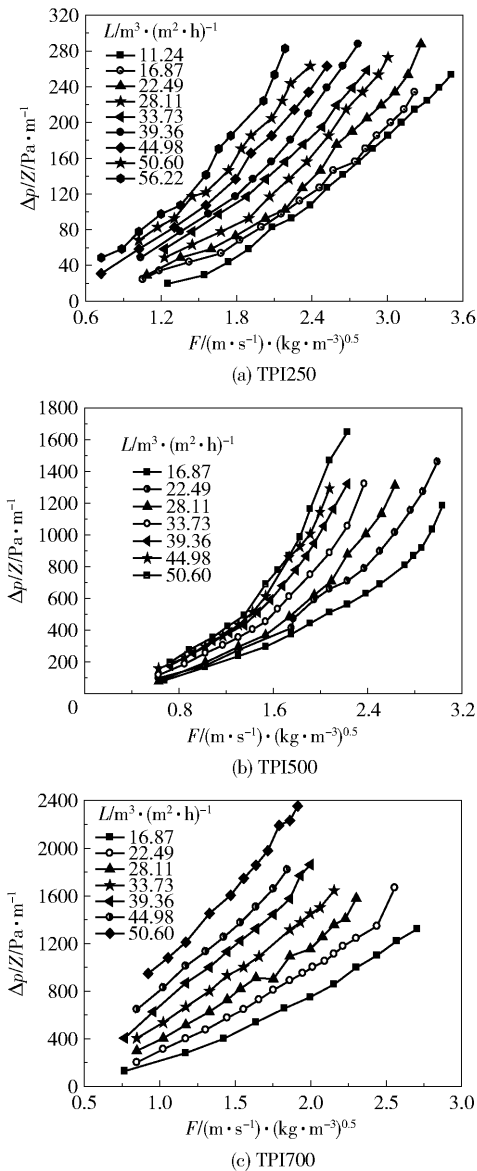


图 4 3 种 TPI 型填料的湿塔压降与 F 因子的关系图
Fig. 4 The relationship between wet pressure drop and F factor for three TPI packing materials

趋势。这是由于气速增大,导致两相接触更加剧烈,阻力变大,压降上升。以图 4(b)为例, L 固定时,可以看到,当 $F > 1.6 (\text{m/s}) \cdot (\text{kg/m}^3)^{0.5}$ 时,填料的湿塔压降上升速度明显加快,这是由于气速已经增大到一定程度,再继续增大气速会使两相的接触更加剧烈,气体更难通过填料层表面,因而压降迅速上升;当固定气速和比表面积时,TPI 填料的湿塔压降随着喷淋密度的增大而增大,在 F 较小时,增大幅度较小,当 $F > 1.6 (\text{m/s}) \cdot (\text{kg/m}^3)^{0.5}$ 时,湿塔压降增大较为明显,这是因为低气速时,下降的液相与气相接触不够充分,因此流量影响不大,当气速升高时,两相接触已较为充分,再继续增大液相流量时,

一方面液相下降的重力增大,另一方面液体占据的填料层通道变大,使得气相通道变小,阻力变大,压降迅速升高^[8]。

选取喷淋密度 $L = 22.49 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时 3 种 TPI 型填料和 CY700 型填料的湿塔压降进行对比,如图 5 所示。由图可以总结出如下结论:当气相动能因子 F 相同时,随着比表面积的增大,湿塔压降逐渐增大;因为填料的比表面积越大,填料的空隙率越小,气液两相在填料层中流动时通道越小,阻力越大,因而整个填料层压降增大。另外从图 5 中可以看到,TPI700 型填料相对于 CY700 型填料的压降有很大程度的降低,平均降低约 39.4% 左右,流体力学性能良好。

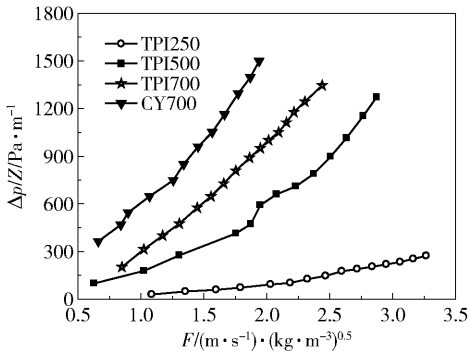


图 5 $L = 22.49 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时 4 种填料的湿塔压降对比
Fig. 5 Comparison of the wet pressure drop for four packing materials when $L = 22.49 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

2.1.3 液泛气速

除了塔压降和传质性能之外,液泛气速也是一个表征填料性能好坏的很重要的参数^[9]。液泛是塔的不正常现象之一,达到液泛气速时,气相阻力很高,导致液相不能正常下降,进而在填料层内堆积,液膜厚度逐渐增大,最终会充满填料空隙处,使得气体不能正常通过,塔压降会迅速增大,传质效率显著下降^[10]。

本文对比了 3 种比表面积的 TPI 型和 CY700 型填料的液泛气速 u_f ,如图 6 所示。固定比表面积时,填料的液泛气速随着喷淋密度的增大呈减小趋势;固定喷淋密度时,填料的液泛气速随着比表面积增大呈减小趋势。图中也将 TPI700 型填料与 CY700 型填料进行了对比,由图可以看出,比表面积同为 700 时,TPI 型填料比 CY 型填料的液泛气速高,这说明 TPI 型填料的垂直段起到了导流作用,同时脉冲部分的结构也使填料层的持液量增大,操作弹性因而增大。经计算可得,TPI700 型填料的液泛气速

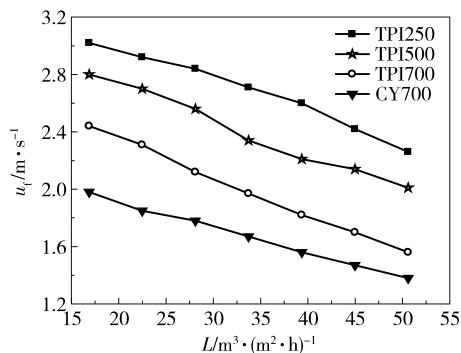


图6 4种填料的液泛气速对比

Fig. 6 Comparison of the u_f values for four different packing materials

比 CY700 型填料平均提高了约 16.4%。

2.2 传质性能

填料的传质性能可以用每米填料理论级数 N_L 或等板高度 HETP 来表征^[11]。下文选用等板高度来说明 TPI 型填料的传质效率。HETP 的计算公式如式(2)

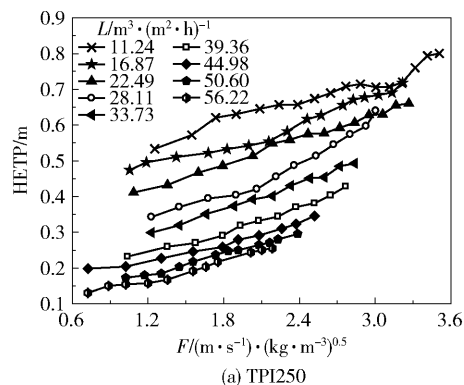
$$H = \frac{H_{OL} S \ln S}{S - 1} \quad (2)$$

式中, H 为等板高度, S 为解吸因子, $S = mG/L$, H_{OL} 为总的传质单元高度, m 为相平衡常数, G 和 L 为两相物质的量流量。

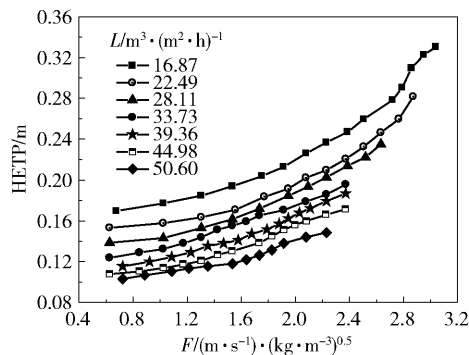
经计算得出 3 种比表面积的 TPI 型填料的等板高度 HETP 随气相动能因子 F 的变化, 如图 7 所示。由图可以看出, 固定喷淋密度 L 时, 等板高度 HETP 随着气相动能因子 F 的增大而增大, 说明传质效率有所下降。这是由于当气速变大时, 气液两相接触时间变短, 接触不充分, 传质效果变差。固定气速时, 等板高度 HETP 随着喷淋密度的增大而减小, 这是由于喷淋密度的增大使得液相能够更好地在填料表面润湿, 进而成膜, 为气液交换提供更多的场所。应注意到的是, 当气速很大时, HETP 增加趋势较为明显, 这是由于此时发生液泛, 使得传质效率急速下降, 所以 HETP 升高明显。

在喷淋密度 $L = 22.49 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时将 3 种 TPI 型填料和 CY700 型填料的等板高度 HETP 进行对比, 结果如图 8 所示。

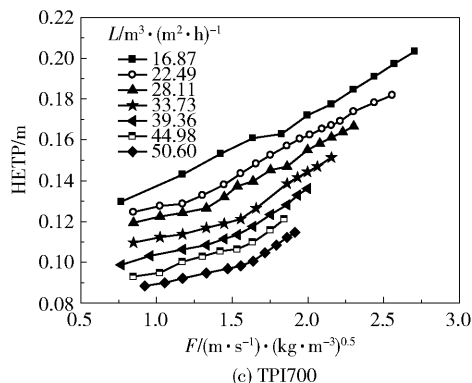
对比不同比表面积的填料, 填料的等板高度随着比表面积的增大而减小, 说明传质效率逐渐升高。这是因为随着比表面积的增大, 填料层能够为液相提供更多的面积使液相成膜, 为气液接触提供了更大的接触面积; 对比同一比表面积、同一喷淋密度下



(a) TPI250



(b) TPI500



(c) TPI700

图7 TPI 型填料等板高度与 F 的关系Fig. 7 The relationship between HETP and F for the TPI packing materials

TPI700 型和 CY700 型两种填料的等板高度, 可以看到 TPI700 型填料的 HETP 更小, 平均降低了约 16.6%, 说明新型的 TPI 结构的填料传质性能更高。这是因为 TPI 填料在结合原有 X、Y 型填料的基础上, 增加了脉冲式波纹结构, 这一设计使得液体在填料层表面流动时会产生流道的缩进, 表面更新速率加快, 气相能够充分地更多液相表面接触, 增大传质推动力, 进而提高了传质效率。

由图 8 应注意到的是, TPI250 型填料的 HETP 与表面积为 500、700 的 TPI 填料相比较, 这是由于其比表面积小, 提供的气液接触面积小造成的, 但

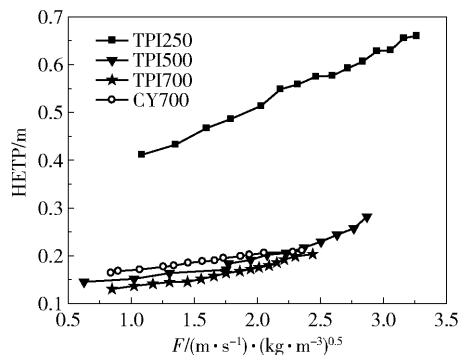


图8 $L = 22.49 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时4种填料 HETP 对比

Fig.8 Comparison of HETP for four different packing materials when $L = 22.49 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$

是 TPI250 的优势是压降小,因此在实际的工业应用中应当根据需要,权衡利弊,正确的选择适宜的比表面积。

3 结论

(1) TPI 型填料比已有的 CY 型填料有着更低的操作压降。以比表面积 700 为例, TPI700 型填料比 CY700 型填料的干塔压降平均降低了约 20%; 在喷淋密度 $L = 22.49 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时, TPI700 型填料比 CY700 型填料的湿塔压降平均降低了约 39.4%。

(2) TPI700 型填料比 CY700 型填料的液泛气速提高了约 16.4%, 操作弹性更大, 能够适用于处理量较大的场合。

(3) 比表面积和喷淋密度相同时, TPI 型填料比 CY 型填料的等板高度 HETP 平均下降了约 16.6%, 传质效率更高。

参考文献:

- [1] 王树楹. 现代填料塔技术指南[M]. 北京: 中国石化出版社, 1998.
Wang S Y. Technological guide of modern packing column [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1998. (in Chinese)
- [2] 王闯, 张客厅, 刘孟杰, 等. 填料塔发展与现状[J]. 河南科技, 2013(10): 92/142.
Wang C, Zhang K T, Liu M J, et al. Development and present situation of packing column[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013(10): 92/142. (in Chinese)
- [3] 王韬, 于丹, 胡晓丹, 等. 新型大通量规整填料的流体力学和传质性能研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2015, 42(4): 28-33.

Wang T, Yu D, Hu X D, et al. Hydrodynamic and mass-transfer performance of novel high capacity structured packings[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2015, 42(4): 28-33. (in Chinese)

- [4] 李群生, 李展展, 于丹, 等. HSX 型规整填料的流体力学和传质性能研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2017, 44(1): 1-6.
Li Q S, Li Z Z, Yu D, et al. The hydrodynamic and mass transfer performance of HSX type structured packing [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2017, 44(1): 1-6. (in Chinese)
- [5] 李群生, 张德志, 章慧芳, 等. HX 型高效规整填料的流体力学和传质性能研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2013, 40(2): 14-19.
Li Q S, Zhang D Z, Zhang H F, et al. The hydrodynamic and mass-transfer performance of HX type high efficiency structured packing[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2013, 40(2): 14-19. (in Chinese)
- [6] Li Q S, Chang Q L, Tian Y M, et al. Cold model test and industrial applications of high geometrical area packings for separation intensification [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009, 48(2): 389-395.
- [7] 李群生, 周士红, 胡晓丹, 等. S 型规整填料的流体力学与传质性能[J]. 化工进展, 2011, 30(10): 2167-2172.
Li Q S, Zhou S H, Hu X D, et al. Hydrodynamic and mass transfer performance of S type structured packing [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(10): 2167-2172. (in Chinese)
- [8] 周媛, 李群生, 张泽廷. 新型丝网波纹填料的流体力学特性研究[J]. 北京化工大学学报, 2005, 32(3): 13-15.
Zhou Y, Li Q S, Zhang Z Y. The hydrodynamic performance of novel corrugated web packing[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2005, 32(3): 13-15. (in Chinese)
- [9] 李群生, 章慧芳, 李通, 等. SY 型丝网波纹填料的流体力学及传质性能研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 14-19.
Li Q S, Zhang H F, Li T, et al. The hydrodynamic and mass-transfer performance of SY type wire gauze packing [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2014, 41(5): 14-19. (in Chinese)
- [10] Dai C N, Lei Z G, Li Q S, et al. Pressure drop and mass

transfer study in structured catalytic packings[J]. Separation & Purification Technology, 2012, 98: 78-87.

[11] Wang G Q, Yuan X G, Yu K T. Review of mass-transfer

correlations for packed columns[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44 (23): 8715 - 8729.

The hydrodynamic and mass transfer performance of TPI-type structured packing

TIAN Xin¹ WEI HongDa² GUO XinYu¹ TANG XiaoFei² SHU YaSheng¹ LI QunSheng^{1*}

(1. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: A new type of corrugated impulse packing combining the advantages of straight and impulse structures has been designed. The new packing can effectively reduce the pressure drop and improve the mass transfer performance during separation processes. Cold pilot model experiments were used to study the TPI packing by the method of oxygen desorption. The hydrodynamics and mass transfer properties of three type of TPI packing materials with different surface areas were studied and compared with the traditional CY type packing. Compared with CY700 type packing, the TPI700 type packing afforded a remarkable improvement in the fluid mechanics and mass transfer performance. When $L = 22.49 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, the tower drop with TPI700 was about 39.4% lower, the height equivalent of theoretical plate (HETP) was reduced by about 16.6% and the flooding gas velocity was about 16.4% higher on average, when compared with CY700. The results show that the performance of the TPI type packing is much better than the traditional material, and it should find applications in industries with high separation requirements.

Key words: TPI type packings; impulse; pressure drop; mass transfer performance

(责任编辑:吴万玲)