

# 新型大通量规整填料的流体力学和传质性能研究

王 韬 于 丹 胡晓丹 崔 侨 何 馨 李群生\*

(北京化工大学 化学工程学院, 北京 100029)

**摘 要:** 设计开发了 A、B、C 3 种比表面积为  $125 \text{ m}^2/\text{m}^3$  的新型大通量规整填料。以空气-水为介质对填料进行冷模实验, 研究其流体力学和传质性能, 并在相同实验条件下与传统大通量填料 Mellapak125X 进行对比。实验结果表明, 3 种新型填料的塔压降均低于 Mellapak125X, A、B 两种填料的传质效率高于 Mellapak125X; 在喷淋密度  $L = 33.72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时, A、B、C 3 种大通量填料的湿塔压降平均比 Mellapak125X 分别下降了 26.7%、34.2%、40.3%, 液泛气速平均分别比 Mellapak125X 大 7.5%、11.3%、15.1%, A 型填料等板高度平均比 Mellapak125X 低 20%, B 型填料的等板高度与 Mellapak125X 相似, C 型填料的等板高度高于 Mellapak125X。上述结果表明新型填料在增大通量的同时还保持了较高的分离效率。

**关键词:** 大通量规整填料; 流体力学性能; 传质效率

**中图分类号:** TQ053

## 引 言

自从上世纪 60 年代第一座工业化的丝网波纹填料塔投入生产以来, 规整填料以其压降低、传质效率高、工业放大效应小等优点, 在炼油工业、精细化工、化肥等众多领域得到了广泛的应用, 不同种类规格的规整填料层出不穷<sup>[1]</sup>。随着工业水平的不断提高以及对化学品需求量的不断增大, 如何提高填料的通量, 研制高效大通量的填料显得非常重要<sup>[2-3]</sup>。X 型和 Y 型填料是两种传统的直线型填料, 它们的波纹与竖直方向的夹角分别为  $30^\circ$  和  $45^\circ$ 。实验结果表明, 在相同操作条件下, X 型填料相对于 Y 型填料具有更小的压降和较大的操作弹性, 但是传质效率却有很大程度的下降<sup>[4]</sup>。因此, 单纯的改变波纹的倾斜角很难满足填料高效大通量的发展需求。

根据 Delft 模型, 产生填料塔压降的主要原因有 4 个方面<sup>[5]</sup>: (1) 气流在上下两盘填料交界处发生流动方向的改变产生的阻力; (2) 由于填料通道与壁面呈一定角度使得气体与填料壁面发生“撞击”而产生阻力; (3) 填料塔内气液两相逆流流动在相界面上产生摩擦、剪切等相互作用产生的阻力; (4) 在

填料相邻交错的流动通道间气相混合-再分散的交互作用而产生的阻力。传统直线型填料在相邻填料层交界处会形成 Z 形通道, 使气相流通方向发生大角度的改变, 不仅导致气相流通受阻, 引起较大压降, 还会由于气相流通不畅, 对逆流而下的液相产生阻碍作用。在气速较大、接近液泛的区域, 阻碍作用更为明显, 使得填料塔很容易发生液泛现象, 大大减小了填料的操作弹性<sup>[6-7]</sup>。

在填料塔压降产生机理和本课题组前期研究成果<sup>[8-9]</sup>的基础上, 针对工业大通量填料的应用需求, 本文研制开发了 3 种波纹角度不同的新型大通量规整填料, 对 3 种新型大通量填料进行了流体力学和氧解吸实验, 研究其流体力学和传质性能, 并在相同的实验条件下与传统的大通量填料 Mellapak125X 进行了对比。

## 1 实验部分

### 1.1 新型大通量填料

新型大通量填料由上下两段竖直的直线段和中间倾角不断变化的波纹板构成。按照填料中间波纹板部分变化倾角的不同, 分为 A、B、C 3 种, 波纹倾角变化分别为  $30^\circ - 40^\circ - 30^\circ$ 、 $30^\circ - 37.5^\circ - 30^\circ$ 、 $30^\circ - 35^\circ - 30^\circ$ , 其 2D 及 3D 几何结构如图 1 中 (a)、(b) 所示 (以 A 型填料为例)。3 种填料上下两端直线段的高度为填料层高度的  $1/8$ , 中间部分每一段波纹对应的竖直高度为填料层高度的  $2/8$ , 各

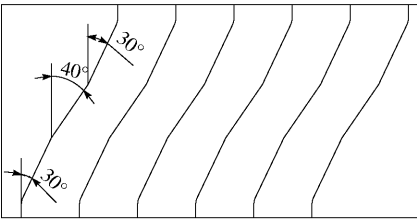
收稿日期: 2015-01-06

第一作者: 男, 1989 年生, 硕士生

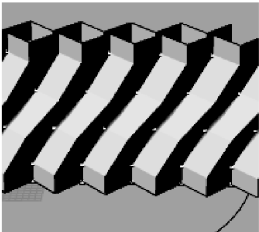
\* 通讯联系人

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

折线连接处用光滑圆弧连接。通过改变填料上下两端波纹的形状,可以有效改善相邻两层填料之间气液的流通状况,减小气液流通阻力。与此同时,不断变化的波纹倾角增强了气液流动的湍动程度,强化了传质过程,使得新型填料在增大通量的同时仍保持了较高的传质效率。



(a) 波纹结构



(b) 3D结构

图 1 新型大流量填料(A 型)的波纹结构和 3D 结构  
Fig. 1 2D and 3D structure of high capacity structured packing (type A)  
3 种新型大流量规整填料以及传统的 Mellapak125X 填料的几何特性如表 1 所示。

表 1 填料的几何特性参数

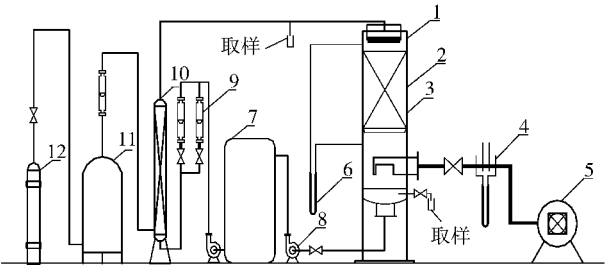
Table 1 Characteristic geometric parameters of the packings

填料类型	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	公称直径/mm	孔隙率/%
A	125	476	98.8
B	125	476	98.9
C	125	476	98.8
Mellapak125X	125	476	98.6

1.2 实验流程

常温常压条件下,以水和空气作为两相操作介质,在内径为 476 mm 的填料塔内对新型填料进行流体力学和传质性能实验,实验中每组填料的装填高度均为 1 m,空气和水分别按照规定流速进行逆流操作。实验中测定填料的压降、泛点气速的数值来表征填料的流体力学性能;通过氧解吸实验计算填料的等板高度 (HETP) 值来比较填料的传质性能。压降由 U 型压差计测量,水中溶氧量采用 YSI550A 型溶氧仪测定。

具体实验流程如图 2 所示。



1—液体分布器;2—填料塔;3—填料;4—孔板流量计;5—风机;  
6—U 型压差计;7—水槽;8—泵;9—转子流量计;10—氧气饱和  
和吸收塔;11—缓冲罐;12—氧气钢瓶。

图 2 填料流体力学及传质性能实验流程图

Fig. 2 Flow diagram of the experimental apparatus for hydrodynamic performance and mass-transfer efficiency tests of the packings

2 结果与讨论

2.1 填料的流体力学性能

2.1.1 干塔压降

由于 4 种测试填料的比表面积相同,其压降的不同完全由填料结构的不同所决定。4 种填料的干塔压降与气相动能因子  $F$  关系图如图 3 所示。对于每一组填料而言,其干塔压降均随气速的增大而增加。对比 3 种新型填料,在相同  $F$  因子下,A 型填料的干塔压降最大,B 型次之,C 型最小。

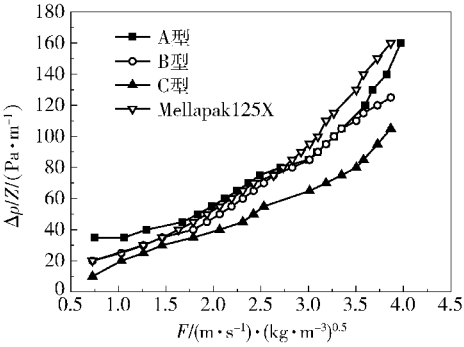


图 3 4 种填料的干塔压降与  $F$  因子关系图

Fig. 3 The relationship between dry pressure drop and  $F$ -factor for the tested packings

从图 3 还可以看出,在全部测量范围内,相同  $F$  因子下,B、C 两种填料的压降小于 Mellapak125X,尤其是 C 型填料的压降明显小于 Mellapak125X,平均压降下降了 35%。当  $F < 2.5 (\text{m/s}) \cdot (\text{kg/m}^3)^{0.5}$  时,A 型填料的压降略大于 Mellapak125X,当  $F > 2.5 (\text{m/s}) \cdot (\text{kg/m}^3)^{0.5}$ ,A 型填料的压降小于 Mellapak125X。这表明新型填料的波纹结构对气相通过的阻力更小,而在气速较大的情况下,效果尤为明显。

2.1.2 湿塔压降

A、B、C 3 种新型大流量填料的湿塔压降与气相动能因子  $F$  的关系如图 4 所示。从图中可以看出 3 种类型填料湿塔压降随  $F$  因子的变化具有相似性。在同一喷淋密度下,湿塔压降数值均随  $F$  因子的增大而增加。这是由于流速增大时,填料结构对气相的阻力增大,气相与气相、气相与液相之间的相互作用也愈发明显,动能损耗增加。而在同一  $F$  因子下,随着喷淋密度的增大,湿塔压降逐渐增大。这是由于逐渐增加的液相减小了气流流通通道的体积,使得气相通过填料层所受的阻力增加。值得注意的是,3 种新型大流量填料的湿塔压降在泛点附近并没有表现出十分明显的增大趋势

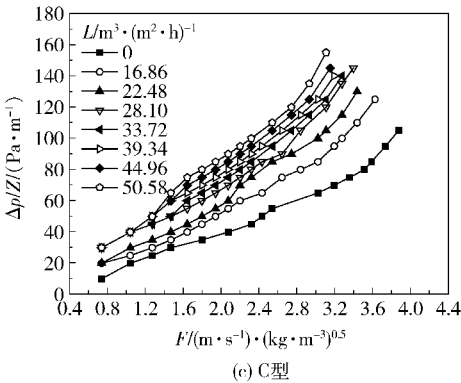
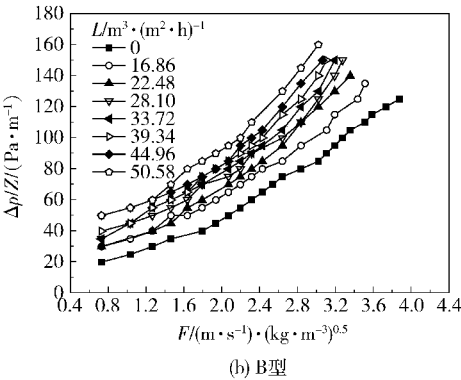
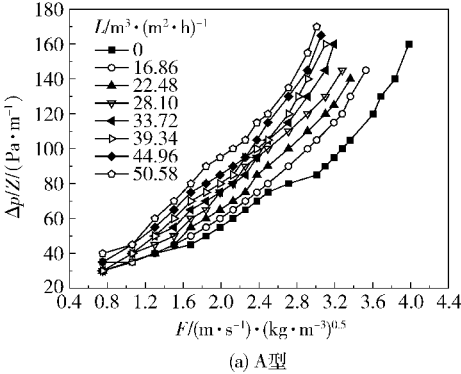


图 4 3 种大流量填料的填料湿塔压降与  $F$  因子关系图  
Fig. 4 The relationship between wet pressure drop and  $F$ -factor for the three high capacity structured packings

势,而是存在一个平缓的上升曲线。从图 4 还可以看出,代表不同喷淋密度的曲线非常接近,且随着喷淋密度的增加湿塔压降增加得比较缓慢,表明新型填料对大喷淋密度的操作条件具有良好的适应性,体现了新型填料优良的流体力学性能。

图 5 对比了在相同喷淋密度  $L = 33.72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  下 3 种新型大流量填料与 Mellapak125X 的湿塔压降。从图中可以看出,当流速较低时,4 种填料的湿塔压降数值比较接近;当  $F$  因子逐渐增大时,新型填料压降低的优势逐渐显现出来,在大气速的操作条件下,3 种新型填料的湿塔压降比 Mellapak125X 均有显著的下降。经计算,A、B、C 3 种类型的大流量填料的湿塔压降平均分别比 Mellapak125X 下降了 26.7%、34.2%、40.3%。

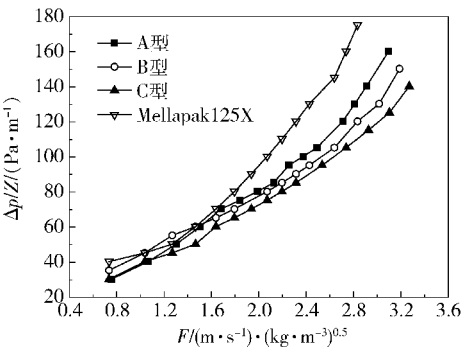


图 5  $L = 33.72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时 3 种大流量填料与 Mellapak125X 的湿塔压降对比  
Fig. 5 Comparison of wet pressure drop for three types of high capacity structured packings and Mellapak125X when  $L = 33.72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

2.1.3 液泛气速

液泛气速是填料塔操作极限的表征,反映了填料通量的大小。图 6 给出了 4 种实验填料液泛气速与喷淋密度的关系。对于同一种填料而言,液泛气速随着液体喷淋密度的增大而减小。对比同一喷淋密度下 4 种填料的液泛气速可知,3 种新型大流量填料的液泛气速均大于传统的 Mellapak125X 填料,当喷淋密度为  $33.72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,A、B、C 3 种大流量填料的液泛气速平均分别比 Mellapak125X 大 7.5%、11.3%、15.1%。实验结果表明新型填料的操作弹性要大于传统的 Mellapak125X 填料。

2.2 填料的传质性能

本文采用等板高度 (HETP) 表征填料的传质性能,等板高度值越小表明填料的传质性能越高。等板高度  $H$  的值用以下公式计算

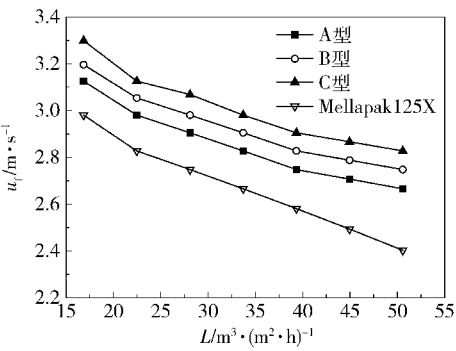


图 6 3 种大流量填料及 Mellapak125X 在不同喷淋密度下填料的液泛气速

Fig. 6 The  $u_f$  values of three types of high capacity structured packings and Mellapak125X at different liquid loads

$$H = \frac{H_{OL} S \ln S}{S - 1} \tag{1}$$

式中,  $S = mG/L$  为解吸因子, 其中  $m$  为相平衡常数,  $G$ 、 $L$  分别为气液两相物质的量流量,  $H_{OL}$  表示液相总传质单元高度, 计算公式为

$$H_{OL} = Z / \ln [(x_2 - x_2^*) / (x_1 - x_1^*)] \tag{2}$$

其中,  $x_1$ 、 $x_2$  分别为实验中塔顶和塔釜的溶氧量,  $x_1^*$ 、 $x_2^*$  分别为实验条件下的平衡溶氧量,  $Z$  为填料层高度。

A、B、C 3 种大流量规整填料在不同喷淋密度下的等板高度与气相动能因子  $F$  的关系如图 7 所示。由图可知, 喷淋密度一定时, 等板高度随气相动能因子  $F$  的增大而逐渐增加; 而当气相动能因子  $F$  一定时, 等板高度随喷淋密度增大而减小。由图还可以看出, 喷淋密度一定时, 在  $F$  因子逐渐增大的过程中, 起初等板高度增加的比较缓慢, 当接近泛点附近时, 等板高度有比较明显的增大趋势。

关于填料塔的正常操作范围, 前人把填料的操作状况分为 3 个区域<sup>[10]</sup>: (1) 气速很低时, 两相传质的主要形式为扩散传质, 分离效果极差, HETP 值较大; (2) 气速在一定范围内逐渐增大时, 一方面促进了液相在填料内部的均匀分布, 强化了相际传质, 另一方面又有使得液膜增厚的趋势, 不利于相际传质, 该范围内填料的等板高度值保持稳定; (3) 气速接近液泛气速时, 填料塔内两相交作用强烈, 返混或夹带现象严重, 分离效率急剧下降, 填料的等板高度会有一个明显的增大趋势。在本文实验中, 由于初始的气速比较大, 因此没有观察到区域 (1) 中描述的情形。为了进一步研究填料的结构与传质效率的

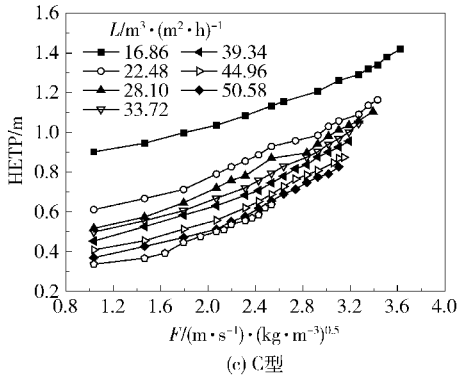
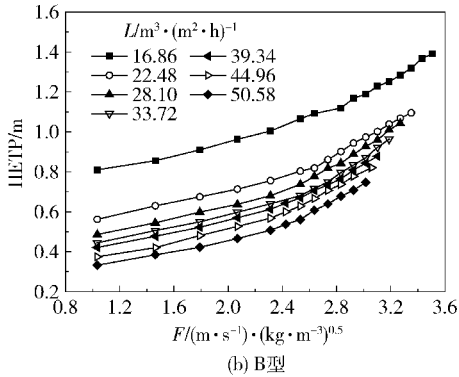
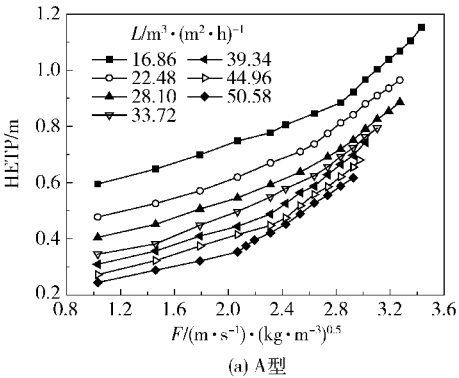


图 7 3 种新型大流量填料的等板高度与  $F$  因子的关系图

Fig. 7 The relationship between wet HETP values and  $F$ -factor for the three high capacity structured packings

关系, 图 8 对比了  $L = 33.72 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时, 3 种大流量填料与 Mellapak125X 的等板高度。从图中可以看出, 4 种填料的等板高度随  $F$  因子变化趋势与上述理论分析相吻合。气速相同时, A 型填料的等板高度最小, B 型次之, C 型最大, 即在相同条件下, A 型填料的传质效率最高, C 型填料的传质效率最差, B 型填料的传质效率在二者之间。在相同条件下, Mellapak125X 的等板高度值与 B 型填料接近, 大于 A 型填料, 小于 C 型填料, 说明 Mellapak125X 的传质效率与 B 型填料接近, 小于 A 型填料, 大于 C 型填料。其中, A 型填料的等板高度比 Mellapak125X



平均小 20%。结合流体力学实验结果可以看出,A、B 两种大流量填料具有比传统 Mellapak125X 更大的液泛气速和更高的传质效率,而 C 型填料虽然具有最大的流量,但传质效率却有一定程度的下降。因此在工业应用中,应按照实际需求权衡流量和传质效率从而选择合适的填料。

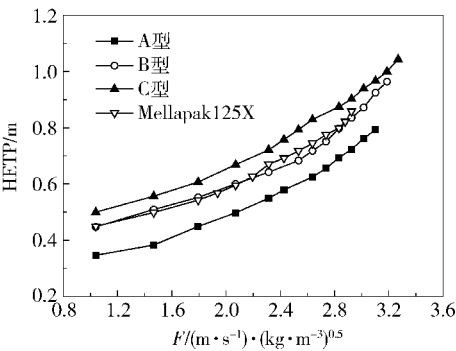


图 8  $L=33.72\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  时 4 种填料的 HETP 值比较  
Fig. 8 Comparison of HETP values for different packings when  $L=33.72\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$

3 干塔压降关联式拟合

将填料层内气体流通通道假设为圆形,则干塔压降可以表示为气相通过填料层的压头损失,即

$$\frac{\Delta p_d}{Z} = \lambda \frac{L_e}{d_e} \frac{u_{sg} \rho_G^{0.5}}{2} \tag{3}$$

其中, $L_e$ 、 $d_e$ 、 $\lambda$ 、 $u_{sg}$ 、 $\rho_G$  分别为填料层的当量长度、当量直径、气相摩擦因数、气速以及气体密度。填料层的当量长度和当量直径均与填料的尺寸相关,因此填料的结构和尺寸一定时,式(3)可以简化为

$$\frac{\Delta p_d}{Z} = \alpha (u_{sg} \rho_G^{0.5})^\beta = \alpha F^\beta \tag{4}$$

用式(4)对 3 种新型填料的干塔压降和气相动能因子进行关联拟合,得到参数  $\alpha$ 、 $\beta$ ,具体拟合结果见表 2。

表 2 实验填料的干塔压降拟合结果

Table 2 Fitting results of dry pressure drop for experimental packings

填料类型	拟合方程	相关度 $R^2$
A	$\frac{\Delta p_d}{Z} = 20.685 \times F^{1.391}$	0.989
B	$\frac{\Delta p_d}{Z} = 19.303 \times F^{1.381}$	0.992
C	$\frac{\Delta p_d}{Z} = 15.464 \times F^{1.348}$	0.991

将压降的计算值与实验值进行比较,除个别点

误差较大以外,拟合的相对误差均在 10% 以内。

4 结论

(1) 本文设计的 3 种新型填料的干塔压降比传统填料 Mellapak125X 均有不同程度的降低,其中 C 型填料的干塔压降最低,平均比 Mellapak125X 低 35%;在液体喷淋密度为  $33.72\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  的条件下,A、B、C 3 种填料的湿塔压降比 Mellapak125X 分别平均下降了 26.7%、34.2%、40.3%。

(2) 与 Mellapak125X 填料相比,3 种新型填料的液泛气速更高,操作弹性更大。在液体喷淋密度为  $33.72\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  时,A、B、C 3 种大流量填料的液泛气速分别比 Mellapak125X 大 7.5%、11.3%、15.1%。其中 C 型填料的流量最大,B 型次之,A 型最小。

(3) A 型填料的等板高度平均比 Mellapak125X 低 20%,在 3 种新型填料里具有最高的传质效率;B 型填料的等板高度与 Mellapak125X 相似;C 型填料的等板高度高于 Mellapak125X,虽然其具有很高的流量,但传质效率较差。在工业应用中,应按照实际需求权衡流量和传质效率选择合适的填料。

(4) 对干塔压降数据进行了拟合,得到了更具实用价值的关联式。经计算,除个别点误差较大外,拟合的相对误差均小于 10%。

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: 24-38.  
Wang S Y. Technological guide of the modern packing column[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1998: 24-38. (in Chinese)

[2] Olujić Ž, Rietfort T, Jansen H, et al. Experimental characterization and modeling of high performance structured packings[J]. Ind Eng Chem Res, 2012, 51(11): 4414-4423.

[3] 王闯,张客厅,刘孟杰,等. 填料塔发展与现状[J]. 河南科技, 2013(5): 92/142.  
Wang C, Zhang K T, Liu M J, et al. The development of packing column[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013(5): 92/142. (in Chinese)

[4] Olujić Ž, Jansen H, Kaibel B, et al. Stretching the capacity of structured packings[J]. Ind Eng Chem Res, 2001, 40(26): 6172-6180.

[5] Olujić Ž, Seibert A F, Fair J R. Influence of corrugation geometry on the performance of structured packings; an

- experimental study[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2000, 39(4): 335–342.
- [6] 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)
- [7] Schultes M, Chambers S. How to surpass conventional and high capacity structured packings with raschig superpak [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85(1): 118–129.
- [8] 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(1): 389–395.
- [9] 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)
- [10] 兰州石油机械研究所. 现代塔器技术[M]. 2版. 北京: 中国石化出版社, 2005: 346–372.
- Lanzhou Petroleum Machinery Research Institute. Modern tower technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Petrochemical Press, 2005: 346–372. (in Chinese)

## Hydrodynamic and mass-transfer performance of novel high capacity structured packings

WANG Tao YU Dan HU XiaoDan CUI Qiao HE Xin LI QunSheng\*

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A series of high capacity structured packing materials is proposed based on our previous work. The hydrodynamic performance and mass-transfer efficiency of the new packing materials was tested in a 500 mm diameter column using an air–water–oxygen system at ambient pressure and temperature and the results are compared with those for Mellapak125X. As expected, the new packing materials have a much larger capacity and higher mass-transfer efficiency. When  $L = 33.72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , the wet pressure drops for type A, type B and type C decreased by 26.7%, 34.2% and 40.3% respectively, compared with that of Mellapak125X. The flooding gas velocities of type A, type B and type C were 7.5%, 11.3% and 15.1% higher than that of Mellapak125X. Under the same experimental conditions, the HETP values for type A are 20% lower than that for Mellapak125X. The HETP values for type B are almost the same as that of Mellapak125X while the HETP values for type C are higher than that of Mellapak125X. As a consequence of geometry modification, the capacity of the new packing materials is increased without any adverse effect on mass-transfer efficiency.

**Key words:** high capacity structured packings; hydrodynamic performance; mass-transfer efficiency