

金属丝网规整填料的传质性能

魏峰^{1,2}, 张卫江¹, 韩莉果¹, 张雪梅¹, 贺亮²

(1. 天津大学化工学院, 天津 300072; 2. 河北工业大学化工学院, 天津 300130)

摘要: 为了研究金属丝网规整填料性能, 在不同回流比条件下, 考察了 CDG1700Y 和 CDG2500Y 型金属丝网规整填料在两种不同二元测试物系的传质性能. 实验结果表明, 这两种填料的压降随着液体流量的增大而增大, 单位填料层高度的 HETP 变化趋势则相反; 测试物系对传质效率有一定的影响; CDG1700Y 和 CDG2500Y 型填料具有较高的理论板数, 且 CDG1700Y 型填料具有较大的操作弹性. 在 SRP(II) 模型的基础上, 获得了实验室条件下测试填料的气液传质系数的经验关联式, 其预测值与实验结果吻合较好, 可以为工业化设计提供指导.

关键词: 规整填料; 填料塔; 金属丝网波纹填料; 传质性能; 传质系数

中图分类号: TL25 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2007)08-0916-05

Mass Transfer Performance of Metal Wire Gauze Structured Packing

WEI Feng^{1,2}, ZHANG Wei-jiang¹, HAN Li-guo¹, ZHANG Xue-mei¹, HE Liang²

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: To test the performance of metal wire gauze structured packing, the mass transfer performance of CDG1700Y and CDG2500Y metal gauze structured packing was studied in two kinds of two-component systems under different reflux ratios. The results show that the pressure drop rises with the increase in liquid flow rate and the adverse change happens for height equivalent of theoretical plate. The tested systems have certain influence on mass transfer efficiency. And both the two kinds of packing demonstrate more numbers of the theoretical plate, and CDG1700Y packing has much operating flexibility. Empirical correlations of the gas and liquid mass transfer coefficient based on the SRP(II) model were fitted by the experimental data, which can be used as a reference to industrial design.

Keywords: structured packing; packed column; metal wire gauze structured packing; mass transfer performance; mass transfer coefficient

规整填料具有高效、低阻力、高通量和便于放大的特点, 已在化工、石油化工等许多行业中广泛应用^[1-2]. 目前规整填料种类多, 形状不同, 性能各异. Mellapak 填料是瑞士 Sulzer 公司 20 世纪 70 年代的专利产品, 它的问世是规整填料史上一座重要的里程碑. 如今, Mellapak 的换代产品已经出现, 如瑞士 KUHN 公司的 Rombopak 填料、德国 RASCHIG 公司的 Raschig-Superpak 填料、瑞士 Sulzer 公司的 Optiflow 填料、中国上海化工研究院的 (SM、SW、SC、SB) 系列新型规

整填料、中国天津大学的 Zupak 填料、中国南京大学的 SINOPAK 填料等^[3]. 新型规整填料的大量涌现推动了传质与分离技术的发展, 为许多精密分离过程如同位素分离等提供了更多的选择.

金属丝网波纹填料应用广泛, 通常认为提高其比表面积可以提高它的传质性能, 因此适用于许多精密精馏过程. CDG1700Y 和 CDG2500Y 规整填料是两种新型的高密度丝网波纹填料, 该类型填料被认为具有较高的分离效率, 尤其适用于需要理论板数特高的场

合,使用该填料不仅能获得高纯度的精馏产品,而且能大幅度降低塔的高度.目前对高比表面积金属丝网填料研究较少,相关文献报道稀有.为此,实验将对这两种新型填料的性能进行研究,同时为课题组开发的化学交换法分离硼同位素的工业化提供可靠的设计数据.

1 实验装置与流程

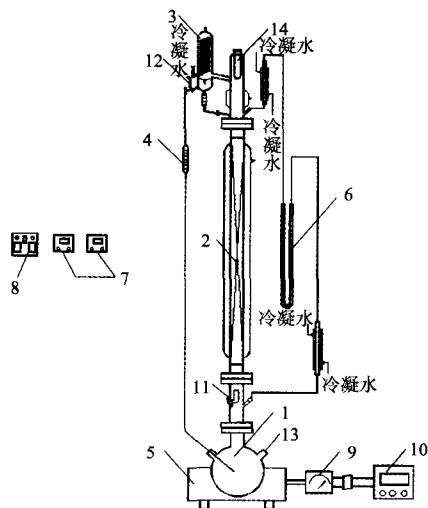
1.1 实验装置

实验中采用 CDG1700Y 和 CDG2500Y 两种新型的高密度丝网波纹填料,其具体参数如表 1 所示;塔身采用玻璃精馏柱,内径为 50 mm,填料层高度为 900 mm,实验装置如图 1 所示.

表 1 测试填料的参数

Tab.1 Structural parameters of tested packing

填料名称	填料比表面积 $a_v / (\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$	波纹倾角/ ($^\circ$)	填料波长 S/m	填料峰高 h/m	填料空隙率 $\varepsilon/\%$
CDG2500Y	2 500	45	0.002 8	0.001 0	79
CDG1700Y	1 700	45	0.003 2	0.001 2	85



1—烧瓶;2—填料层;3—冷凝器;4—测速管;5—电热套;6—U型压差计;7—热电阻温度显示仪;8—回流比控制仪;9—电压表;10—调节变压器;11—塔底取料口;12—电磁线圈;13—热电阻温度计

图 1 实验装置

Fig.1 Experimental apparatus

1.2 实验流程

采用环己烷-正庚烷及正庚烷-甲苯两种二元混合物作为测试物系,在常压条件下,采用全回流及回流比分别为 1 和 5 的条件进行热膜实验来测试填料性能.

将二元测试物系加入蒸馏瓶内,启动加热设备,将釜内料液加热至沸腾;然后预液泛一次,使填料完全润湿;回流 1 h 以上,分析塔顶馏分含量,若在一定时间内保持不变,即操作状态稳定,记录塔压降、塔顶和塔釜的温度和回流液流量,并取样分析;改变塔釜加热电压,开始第 2 个点的实验,重复上述操作.对塔顶和塔釜的样品采用 SP-2100 型气相色谱进行分析,色谱柱采用 OV-225 石英毛细管柱 $\Phi 0.25 \text{ mm} \times 30 \text{ m}$.

1.3 数据处理与计算

全回流下等板高度 HETP 的计算:在全回流条件下,二元混合物系下填料的理论板数用 Fenske(芬克斯)公式计算^[4],即

$$N = \left\{ \frac{[x/(1-x)]_{\text{top}}}{[x/(1-x)]_{\text{btm}}} \right\} / \lg \alpha_m \quad (1)$$

$$\alpha_m = \sqrt{\alpha_{\text{top}} \alpha_{\text{btm}}} \quad (2)$$

式中: x 为测试物系中轻组分的摩尔分率; α_m 为平均相对挥发度,一般取塔顶和塔釜相对挥发度的几何平均值,top 和 btm 分别表示为塔顶和塔底.

一定回流比下等板高度的计算^[5]为

$$\text{HEPT} = Z/N_T \quad (3)$$

式中: Z 为填料高度; N_T 为填料塔的理论板数.

2 实验结果与讨论

2.1 传质性能研究

图 2、图 3 为不同测试物系下填料的 HETP 与气相动能因子 F 的变化曲线.从图 2、图 3 可以看出,这两种填料的 HETP 变化规律与其他金属丝网填料的性能曲线是一致的,HETP 均随气相动能因子 F 的增加而加大,相应的理论板数下降.当金属丝网波纹填料 CDG2500Y 的气体动能因子 F 值在 0.75 左右,金属丝网波纹填料 CDG1700Y 的气体动能因子 F 值在 1 左右时填料的等板高度值变化开始加剧,传质效率明显下降,对比这两种填料可以看出金属丝网波纹填料 CDG1700Y 的操作弹性要大于金属丝网波纹填料 CDG2500Y 的操作弹性.

2.1.1 液体流量的影响

对比不同液体流量下的单位填料层高度的等板高度 HETP,如图 2、图 3 所示,可以看出随着液体流量的增大 HETP 值随之减小.图 2、图 3 中曲线开始变平缓,当填料的 F 值在 1 左右及 F 值在 0.75 左右时, HETP 急剧上升.这是由于在逆流操作的填料内,液体从塔顶喷淋下来,依靠重力在填料表面作膜状流动,液膜的厚度直接影响到气体通过填料层的压降、持液量和传质

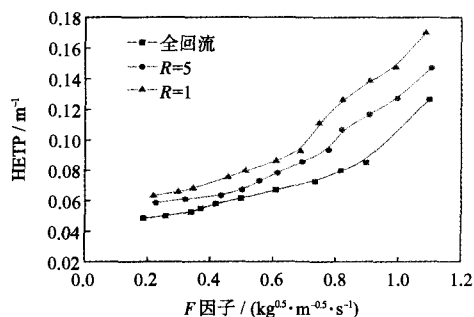


图 2 环己烷-庚烷测试物系下 HETP 与 F 因子的关系
Fig. 2 Relation between height equivalent and F factor in cyclohexane-heptane system

效率等. 当蒸发速率一定时, 回流比增加, 塔内液相负荷增加, 液相流率增加, 下降液膜加厚, 传质效率下降, 当液膜厚度增加到一定程度时, 液相浓度响应缓慢, 导致传质效率急剧下降. 当液相负荷不变时, 蒸发速度加大, 即气速加大, 上升气流与下降液体间的摩擦力开始阻碍液体下流, 回流比减少, 在此情况下, 气相传质阻力相应减少, 效率增加.

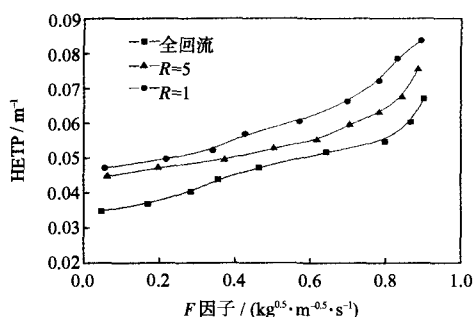


图 3 庚烷-甲苯测试物系下 HETP 与 F 因子的关系
Fig. 3 Relation between height equivalent and F factor in n-heptane-methylbenzene system

2.1.2 比表面积的影响

图 4 给出了比表面积对传质性能的影响情况, 在同样条件下, 填料 CDG1700Y 要比填料 CDG2500Y 需要更多的理论板数, 这就说明对于结构相同、不同比表面积的两填料, 比表面积大的填料可以有更高的传质效率.

2.1.3 测试物系的影响

图 5 给出了同一型号填料在不同测试物系的 HETP 的对比情况. 填料 CDG2500Y 在相同的气体动能因子 F 条件下, 用环己烷和正庚烷二元测试物系测试的等板高度 HETP 比正庚烷和甲苯要小一些. 说明用不同的测试物系测出的填料塔具有不同的传质效率, 即填料的等板高度不同. 这是由于不同的测试物系

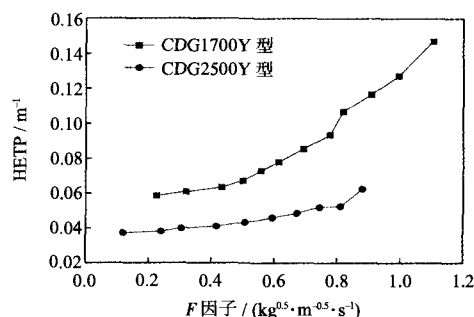


图 4 环己烷-庚烷测试物系下回流比 $R=5$ 时 HETP 与 F 因子的关系

Fig. 4 Relation between height equivalent and F factor in cyclohexane-heptane system under $R=5$

具有不同的表面张力, 表面张力的大小会造成不同填料的润湿效果^[6-7], 物系的表面张力越小, 对填料的润湿效果越好, 传质效率提高, 等板高度降低, 所需填料板数也随之减少, 反之也成立. 环己烷和正庚烷物系的表面张力为 14×10^{-3} 小于正庚烷和甲苯的表面张力 17.1×10^{-3} , 所以用环己烷和正庚烷物系测试的填料等板高度 HETP 值要小于用正庚烷和甲苯物系测试的结果.

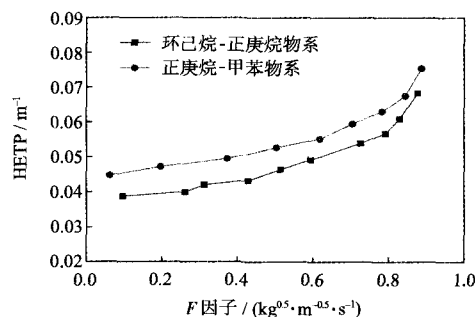


图 5 CDG2500Y 填料在回流比 $R=1$ 时 HETP 与 F 因子的关系
Fig. 5 Relation between height equivalent and F factor of CDG2500Y under $R=1$

2.2 实验经验关联式

实验模型在 SRP(II) 模型^[8-14]的基础上, 考虑了液膜传质阻力的影响, 假设填料完全润湿^[15], 塔板的上气液两相均是恒摩尔流动, 且气液两相接触后迅速达到平衡状态, 采用传质单元高度 HTU 来计算 HETP 的值, 即

$$\text{HEPT} = \text{HTU} \left[\frac{\ln\left(m\left(\frac{L}{V}\right)\right)}{m\left(\frac{V}{L}\right) - 1} \right] \quad (4)$$

式中: m 为平衡线的斜率; L 为气体摩尔流率; V 为液

体摩尔流率.

若考虑液膜传质阻力,则气相 Sherwood 准数为

$$Sh_g = \alpha_g Re_g^{0.5} Sc_g^{1/3} \quad (5)$$

液相 Sherwood 准数为

$$Sh_l = \alpha_l Re_l^{0.5} Sc_l^{1/2} \quad (6)$$

式中: α_g 、 α_l 是与液膜阻力相关的参数; Re 为雷诺数; Sc 为 Schmidt 准数, g 和 l 表示气相和液相.

于是气相和液相传质系数相应地变为

$$k_g = \alpha_g \left(\frac{v_g u_g}{S} \right)^{0.5} Sc_g^{-2/3} \quad (7)$$

$$k_l = \alpha_l \left(\frac{v_l u_l}{S} \right)^{0.5} Sc_l^{-1/2} \quad (8)$$

式中: v 为运动黏度; u 为表观速度; S 为填料的波纹边长.

如果 $L = V, u_g \rho_g = u_l \rho_l$,由 HTU 的定义式可得

$$HTU = \frac{u_g}{\alpha_g} \left(\frac{1}{k_g} + m \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{1}{k_l} \right) \quad (9)$$

将式(7)、式(8)代入式(9),并进行简化可得

$$HTU = \frac{S^{0.5}}{\alpha_g \alpha} \frac{Sc_g^{1/6}}{\rho^{0.25} D_g^{0.5}} \left(1 + m \frac{\alpha_g}{\alpha_l} \left(\frac{\rho_g D_g}{\rho_l D_l} \right)^{0.5} \frac{1}{Sc_g^{1/6}} \right) F^{0.5} \quad (10)$$

式中: α 为填料波纹倾角; D 为扩散系数; F 为气体动能因子; ρ 为密度.

由上式可推知

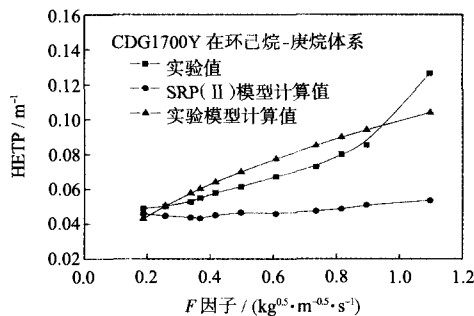
$$\frac{HTU}{F^{0.5}} = f(1/\alpha_g, 1/\alpha_l)$$

实验模型以这两种填料的实验数据为基础,采用最小二乘法拟合求解 α_g 和 α_l 的值,求得 α_g 的值为 0.101 8 和 α_l 的值为 0.428 9. 则规整填料的气相和液相传质系数分别为

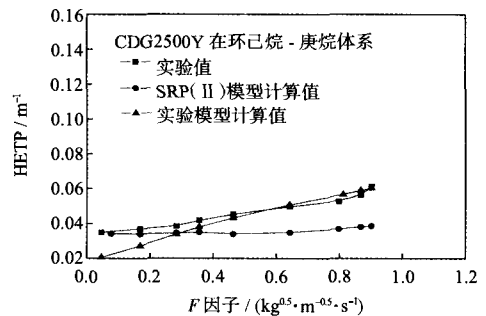
$$k_g = 0.1018 \left(\frac{v_g u_g}{S} \right)^{0.5} Sc_g^{-2/3}$$

$$k_l = 0.4289 \left(\frac{v_l u_l}{S} \right)^{0.5} Sc_l^{-1/2}$$

预测结果如图 6 所示,在环己烷-庚烷测试物系下,实验模型的预测值和 SRP(II)模型的预测值与实验值平均误差分别为 11.15% 和 21.53%;在庚烷-甲苯体系下,实验模型的预测值和 SRP(II)模型的预测值与实验值的平均百分数误差分别为 15.8% 和 20.46%,说明实验模型在考虑了液膜传质阻力的情况下,要比 SRP(II)模型具有更好的预测效果.



(a) CDG1700Y 填料的 HEPT 实验值与模型计算值比较



(b) CDG2500Y 填料的 HEPT 实验值与模型计算值比较

图 6 HEPT 的实验值与模型计算值比较

Fig. 6 Comparisons between experimental and calculated HETP

3 结论

(1)对于这两种规整填料的传质性能,不同液体流量下的等板高度 HETP 随着液体流量的增大而减小.比较 CDG1700Y 和 CDG2500Y 型填料,当气体动能因子 F 分别为 1 和 0.75 左右时,等板高度 HETP 值突然变化,塔内出现液泛现象;比表面积较大的填料具有较高的传质效率;测试物系对传质效率有一定的影响;实验证明 CDG1700Y 和 CDG2500Y 具有较高的理论板数,且 CDG1700Y 型金属丝网波纹填料具有较大

的操作弹性.

(2)在 SRP(II)模型的基础上,建立了实验室条件下新型填料的传质性能模型,获得了气相和液相传质系数的实验关联式.用该模型预测填料 CDG1700Y 和 CDG2500Y 的传质性能,其计算值与实验值吻合较好,可为今后的填料塔设计提供指导.

(3)通过实验证明,CDG1700Y 和 CDG2500Y 型新型金属丝网波纹填料具有较高的理论板数,其流体力学性能和传质性能较好,可以应用到化学交换法分离硼同位素的工业化设计中.

参考文献

- [1] 刘乃鸿. 工业塔新型规整填料应用手册[M]. 天津:天津大学出版社,1993.
Liu Naihong. *Application Manual On New Structured Packing in Industrial Tower* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1993 (in Chinese) .
- [2] 莱恩哈特·毕力特. 填料塔[M]. 魏建华,译. 北京:化学工业出版社,1998.
Billet R. *Packed Towers* [M]. Wei Jianhua, Trans. Beijing: Chemical Industry Press, 1998 (in Chinese) .
- [3] 高碧霞,李好管. 新型规整填料及填料塔内件[J]. 化学工业与工程技术,2000,21(5):18-20.
Gao Bixia, Li Haoguan. New regular filler and inner parts of packing tower [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2000, 21(5): 18-20 (in Chinese) .
- [4] 姚玉英,陈常贵,曾敏静,等. 化工原理[M]. 天津:天津科学技术出版社,1992.
Yao Yuying, Chen Changgui, Zeng Minjing, et al. *Basic Principles in Chemical Engineering* [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1992 (in Chinese) .
- [5] 贾绍义,李锡源,王恩祥. 金属填料表面处理对润湿及传质性能的影响[J]. 化工学报,1995,46(1):112-116.
Jia Shaoyi, Li Xiyuan, Wang Enxiang. Influence of surface treatment metallic packings on its wettability and mass transfer performance [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 1995, 46(1): 112-116 (in Chinese) .
- [6] 周 伟. 新型规整填料的开发[D]. 天津:天津大学化工学院,2001.
Zhou Wei. Development of New Structured Packing [D]. Tianjin: School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, 2001 (in Chinese) .
- [7] 王维德. 表面张力对传质过程的影响[J]. 化学工程,2004,32(2):14-18.
Wang Weide. Effect of surface tension on mass transfer process [J]. *Chemical Engineering*, 2004, 32(2): 14-18 (in Chinese) .
- [8] Bravo J L, Rocha J A. Pressure drop in structured packings [J]. *Hydrocarbon Process*, 1986, 65(3): 45-49.
- [9] Sherwood T K, Pigford R L, Wilke C R. *Mass Transfer* [M]. New York: McGraw-Hill, 1975.
- [10] Bravo J L, Fair J R. Generalized correlation for mass transfer in packed distillation columns [J]. *Ind Eng Chem Process Des Dev*, 1982, 21(1): 162-170.
- [11] Blum J M, Marteau S. Separation of boron isotopes [J]. *Energ Nucl (France)*, 1972, 14(1): 33-37.
- [12] Segado A R, de la Fuente F C, Aguilar A M. Laboratory data of structured gauze packings as a base for scale-up in distillation [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2002,189(11):1470-1484.
- [13] Murrieta C R, Seibert A F, Fair J R. Liquid-side mass-transfer resistance of structured packings[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2004,43(22):7113-7120.
- [14] Xu Z P, Afacan A, Chuang K T. Predicting mass transfer in packed columns containing structured packings[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2000,78(A1):91-98.
- [15] Olujic Z, Behrens M, Colli L, et al. Predicting the efficiency of corrugated sheet structured packings with large specific surface area [J]. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 2004, 18(2):89-96.