

中国电机工程学报
Proceedings of the CSEE
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

《中国电机工程学报》网络首发论文

题目: 碳捕集吸收塔改性塑料填料的传质性能研究
作者: 吴宇涛, 顾永正, 赵瑞, 黄艳, 方梦祥, 余学海, 董文峰, 王涛, 王勤辉
DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.213166
收稿日期: 2021-12-13
网络首发日期: 2022-07-29
引用格式: 吴宇涛, 顾永正, 赵瑞, 黄艳, 方梦祥, 余学海, 董文峰, 王涛, 王勤辉. 碳捕集吸收塔改性塑料填料的传质性能研究[J/OL]. 中国电机工程学报. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.213166>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

碳捕集吸收塔改性塑料填料的传质性能研究

吴宇涛, 顾永正, 赵瑞, 黄艳, 方梦祥*, 余学海, 董文峰, 王涛, 王勤辉

(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310027)

Research on Mass Transfer Performance of Modified Plastic Packing for Carbon Capture Absorber

WU Yutao, GU Yongzheng, ZHAO Rui, HUANG Yan, FANG Mengxiang*, YU Xuehai, DONG Wenfeng,

WANG Tao, WANG Qinghui

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Using plastic packing instead of stainless steel packing can significantly reduce the investment cost of carbon capture absorber. In order to improve the mass transfer efficiency of packing, it is necessary to evaluate its mass transfer performance in different solvents systems. Based on CO₂(air) – NaOH solution system, different solvents properties was simulated. The surface tension of the solution was changed by adding non-ionic surfactant and the viscosity was changed by adding polyethylene glycol. The mass transfer performance and characteristics of ST 250Y hydrophilic modified plastic packing and stainless steel packing were tested and compared in a packed column with an inner diameter of 300mm and a packing height of 2000mm. The experimental results show that the mass transfer properties of modified plastic packing and stainless steel packing have similar characteristics under various conditions, and modified plastic packing has more advantages in solvents with low surface tension. Based on the experiment, the prediction correlation of the two kinds of packing is fitted, which can accurately predict the effective mass transfer area of the packing under different gas velocity, liquid surface tension and viscosity. The predicted results are in good agreement with the experimental values.

KEY WORDS: chemical absorption; hydrophilic modified plastic structured packing; surface tension; gas velocity; viscosity; effective mass transfer area

摘要: 用塑料填料代替不锈钢填料能显著降低碳捕集吸收塔的投资成本, 为了提高填料传质效率, 需要评估其不同吸收剂环境下的传质性能。以 CO₂ (空气)-NaOH 水溶液体系为基础, 添加非离子表面活性剂改变溶液表面张力和添加聚乙二醇改变溶液粘度来模拟不同的吸收剂环境。在内径为 300mm、填料高度为 2000mm 的填料塔中, 测试并比较了 ST 250Y 亲水改性塑料填料和不锈钢填料的传质性能和

特点。实验结果表明: 亲水改性塑料填料与不锈钢填料传质性能在多种工况条件下都表现出相似特性, 塑料填料在低表面张力的吸收剂环境中更具优势。在实验的基础上, 拟合了 2 种填料的预测关联式, 能够有效预测在不同气速、液体表面张力和粘度条件下填料的有效传质面积, 预测值与实验值较吻合。

关键词: 化学吸收; 亲水改性塑料规整填料; 表面张力; 气速; 粘度; 有效传质面积

0 引言

随着“双碳目标”设立, CO₂ 减排工作的迫切性与日俱增。作为目前最有效的碳减排措施之一^[1], 碳捕集、利用和封存技术被认为是 2050 年前一些重要工业部门脱碳的唯一途径^[2]。化学吸收法是目前应用最广泛的碳捕集技术^[3], 通常采用规整填料作为吸收塔中气液传质的设备^[4]。目前碳捕集技术的应用仍有一定门槛, 对填料性能的研究改进, 有助于降低碳捕集成本并促进技术普及^[5]。

规整填料应用于传质过程的优势在于其较低的压降和较高的传质比表面积^[6], 其中应用最广泛的是孔板波纹规整填料, 典型的有苏尔寿公司生产的 Mellapak 系列^[7], 包括 Mellapak 125Y、250Y 和 500Y 等, 型号中的数字代表填料的比表面积。随着技术发展, 填料比表面积不断增加, 但同时压降也在提高^[8], 根据填料经济性分析, 碳捕集吸收塔的最优成本随填料比表面积的提高先减小后增大^[9]。经过比较, Mellapak 250Y 不锈钢规整填料相对适用于碳捕集吸收过程, 其流道结构规整合理, 配合打孔等改进手段使其压降和传质性能优良^[10]。

不锈钢规整填料的强度高, 加工性好, 单板厚度可降低至 0.1mm, 且表面润湿性极佳, 性能优异,

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0603300)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2017YFB0603300).

但它的价格高昂且重量较大,导致不锈钢填料的制作、安装和运输成本相对较高。因此,以聚丙烯为代表的塑料填料开始受到关注,用其替代不锈钢填料能显著降低相关成本^[11]。相较而言,塑料填料质轻、易加工成型且耐腐蚀性能优良^[12],在加工运输等方面具有优势,但塑料强度偏低,需要加固以长期使用,因此单板相对较厚,压降性能不理想,且在高温下易变形,一般适用于中低温(120 °C)环境。同时非极性的塑料表面亲水性较差、难润湿,影响了传质效果^[13]。因此需要对塑料填料进行相应改进以促进其工业应用。相关研究表明,采用熔融共混等方式对聚丙烯塑料填料改性,能降低其表面接触角至 55°左右,显著改善亲水性能^[11],而防壁流圈的改良也增加了其强度,但亲水改性塑料填料的传质性能相关的研究目前仍然较少且不全面,尤其是缺乏适用于塑料填料的传质模型和比表面积预测关联式,导致工业应用时缺少相关设计标准。

对填料性能的研究是近年来的热点, Tsai 等^[14]对填料的传质模型进行了深入研究,解决了之前的关联式使用的特定参数不连续的问题; Wang 等^[15]对解耦填料的传质系数进行了全面研究,提出了混合点理论,但他的研究缺少溶液性质的变化; Song 等^[16]尝试对粘性液体中的传质过程进行研究,且扩展了适用填料的范围;然而这些研究都只针对不锈钢填料。对填料传质性能的研究多集中于有效比表面积(a_e , m^2/m^3)的影响因素上, Tsai 等^[17]探究了规整填料结构参数及表面张力等对 a_e 的影响,拟合了 a_e 的预测模型;在此基础上, Wang 等^[18]修正了模型,扩大其适用范围至散装填料。但他们忽视了气速的影响,模型不够精准;童川等^[19]通过向液相添加甘油以探究粘度对 a_e 的影响,但没有考虑甘油对表面张力的改变;目前,针对改性塑料填料的性能特别是不同吸收环境下的对比研究较为缺乏。

针对 ST 250Y 亲水改性塑料和不锈钢填料,本文采用 CO₂ (空气)—NaOH 水溶液(0.1mol/L)体系测试了不同条件下填料的传质性能,探究了气速、液体表面张力和粘度条件的影响,拟合了两种填料有效比表面积的预测公式,为改性塑料填料的工业应用提供依据,并比较了两种填料的性能特点,分析了改性塑料填料经济性以外的技术优势。

1 实验材料和系统

1.1 材料与试剂

本实验测试的 ST 250Y 不锈钢和亲水改性塑料规整填料如图 1 所示。两款填料以及 Mellapak 250Y 不锈钢规整填料的结构参数如表 1 所示^[17],其中 δ 为填料板片厚度, a_p 为结构比表面积, S 为波纹斜边长, B 为波距, h 为波峰高度。

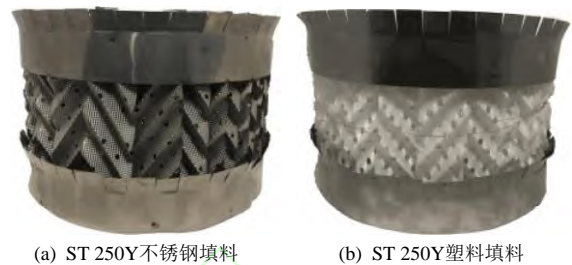


图 1 填料形态和材质

Fig. 1 Packing form and material

表 1 测试填料结构参数

Table 1 Test packing structure parameters

填料种类	材质	δ/mm	$a_p/(m^2/m^3)$	S/mm	B/mm	h/mm
ST-250Y	不锈钢	0.2	250	15.7	20.0	12.1
ST-250Y PP	改性塑料	1.0	250	14.8	21.5	10.2
Mellapak 250Y	不锈钢	0.2	250	17	24.1	11.9

不同吸收剂的表面张力和粘度等性质差别较大^[20],表面张力会影响吸收剂在填料表面的铺展,粘度则会影响填料表面形成液膜的厚度和持液量,两者均会影响填料的有效传质面积 a_e ^[14],在研究中通常用吸收法来测量填料的 a_e 。CO₂ (空气)—NaOH 水溶液体系测试法是目前广泛采用的填料比表面积测试方法^[21],能通过添加不同试剂来直接有效地研究吸收剂单一性质对填料传质性能的影响^[17,22]。

本实验添加非离子表面活性剂 TERGITOL (NP-7,阿拉丁)以降低溶液表面张力,添加聚乙二醇(分子量约七百万,罗恩)以提高液体粘度。实验溶液参数如表 2 所示, μ_L 为液相粘度, σ 为液相表面张力。除基准工况都另外添加浓度 50~100g/m³ 的有机硅消泡剂(生工生物工程(上海))以避免产生泡沫对实验结果造成影响^[17]。溶液表面张力通过视频光学接触角测量仪 OCA 20 (德国 Dataphysic 公司)进行测定,粘度条件通过 BROOKFIELD VISCOMETER 仪器进行测定。

1.2 实验系统

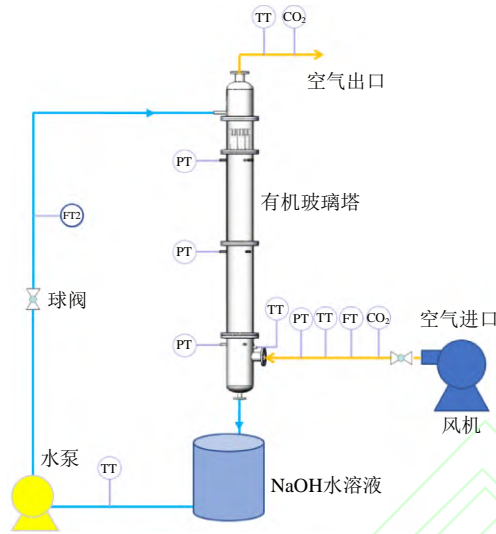
本实验在一套填料性能测试实验平台上完成,其主要用于测试填料的流体力学和传质性能,包括不同气速、液体负荷下填料的压降、持液量和化学吸收中填料的有效比表面积 a_e 。主体为有机玻璃塔,内径 300mm,最高可装填 2000mm 填料。设备

装置如图 2 所示，图中圆圈包含字母的符号代表不同参数传感器。

表 2 实验溶液及参数

Table 2 Experimental solution and parameters

实验溶液	$\mu_L/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	$\sigma/(\text{mN/m})$
0.1kmol/m ³ NaOH (基准工况)	0.90	72.0
0.1kmol/m ³ NaOH+125 ppmv TERGITOL NP-7		30.8
0.1kmol/m ³ NaOH+180 ppmv TERGITOL NP-7		13.0
0.1kmol/m ³ NaOH+0.05 wt% 聚乙二醇	1.50	
0.1kmol/m ³ NaOH+0.10 wt% 聚乙二醇	2.25	



CO₂: CO₂分析仪; PT: 压力传感器; FT: V锥流量计;

FT2: 电磁流量计; TT: 温度传感器

CO₂: CO₂ analyzer; PT: pressure sensor; FT: V cone flowmeter;

FT2: electromagnetic flowmeter; TT: temperature sensor

图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental device

实验中，NaOH 溶液通过离心泵抽至吸收塔顶部，经液体分布器均匀分布后流过填料层；空气通过风机送入塔底，从顶端排出，气液两相在塔内逆向接触传质。测试时通过调节球阀来调控液体负荷，通过调节风机阀门来控制风速，用电磁流量计、V 锥流量计、温度和压力传感器来监测实时液气流量、压力和温度。液体负荷范围和风速调控范围分别是 0~70m³/(m² h)和 0.5~4m/s。进出口气体中 CO₂ 浓度通过 LI-840A CO₂/H₂O 分析仪(美国 LI-COR 公司)测定，测量范围为 0~20,000μmol/mol，精度优于读数的 1%。

2 实验原理与模型

在实验条件下，气侧传质阻力一般仅占总传质阻力的 1%~2%，可忽略不计^[23]，因此根据 Tsai 的

研究， a_e 与液侧传质系数 k'_g 相关，其表达式^[17]为

$$a_e = \frac{u_G \ln\left(\frac{y_{\text{CO}_2,\text{in}}}{y_{\text{CO}_2,\text{out}}}\right)}{ZRTk'_g} = \frac{u_G \ln\left(\frac{y_{\text{CO}_2,\text{in}}}{y_{\text{CO}_2,\text{out}}}\right)}{ZRT} \times \frac{H_{\text{CO}_2}}{\sqrt{k_{\text{OH}^-}[\text{OH}^-]D_{\text{CO}_2,\text{L}}}} \quad (1)$$

式中： u_G 为空塔风速，m/s； $y_{\text{CO}_2,\text{in/out}}$ 为进出口气体中 CO₂ 浓度，ppm； Z 为填料高度，m； R 为理想气体常数，8.314J/(mol K)； T 为塔内温度，K； H_{CO_2} 为 CO₂ 亨利系数，m³ Pa/kmol； k_{OH^-} 为反应速率常数，m³/(kmol s)； $[\text{OH}^-]$ 为 OH⁻ 浓度，mol/L； $D_{\text{CO}_2,\text{L}}$ 为 CO₂ 扩散系数。亨利系数 H_{CO_2} 和反应速率常数 k_{OH^-} 参考 Rocha 等^[24]、Pohorecki 等^[25] 的研究、扩散系数 $D_{\text{CO}_2,\text{L}}$ 参考 Lohse 等^[14] 的研究计算。

本实验填料有效传质面积的预测经验公式在 Tsai 等的无量纲关联式的基础上建立。根据其研究，有效比表面积是液体流量、密度和表面张力的函数。针对国产不锈钢和改性塑料填料，需要验证其基础关联式的适用性并修正。同时，Tsai 并未区分不同空塔风速对填料有效传质面积的影响，总包了不同风速条件下的测试结果，结合 Wang 等^[18] 的研究以及本实验的测试结果，认为空塔风速对有效传质面积会产生明显影响，关联式能进一步修正细化。

Tsai 的无量纲关联式如式(2)^[17]所示：

$$\frac{a_e}{a_p} = a_f = C_1[(We_L)(Fr_L)^{-1/3}]^{C_2} \quad (2)$$

$$C_1 = 1.34, C_2 = 0.116$$

式中： a_p 为填料的结构比表面积，m²/m³； a_f 为传质比； We_L 为液相韦伯数， $\rho_L u_L^2 \delta_L / \sigma$ ； Fr_L 为液相弗劳德数， $u_L^2 / (g \delta_L)$ ； ρ_L 为液相粘度，mPa s； u_L 为液相流速，m/s； δ_L 为液膜厚度，m； σ 为表面张力，mN/m； g 为重力常数，9.81m/s²。 C_1 和 C_2 分别为无量纲关联式的系数和指数，根据实验值拟合得到，根据预测对象和工况条件的不同会发生变化。

3 数据处理与分析

3.1 填料流体力学性能测试

ST 250Y 不锈钢和亲水改性塑料规整填料在不同液体负荷下的压降性能如图 3 所示。根据流体力学性能测试的结果，不锈钢填料和改性塑料填料的

液泛气速 u_F 大致为 3.75m/s 和 2.70m/s, 结合泛点率对应的要求^[26], 选择传质实验的空塔气速, 不锈钢填料为 1.5m/s 和 2.0m/s, 改性塑料填料为 1.0m/s 和 1.5m/s。

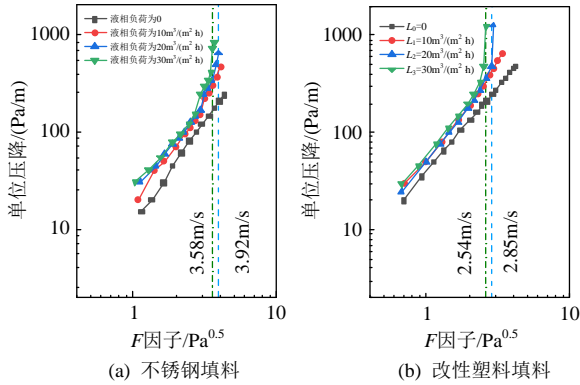


图3 干塔和不同液体负荷下填料的压降性能

Fig. 3 Pressure drop performance of packing under dry tower and different liquid loads

3.2 气速与液体表面张力对填料传质性能的影响

为了验证基础关联式的有效性并针对测试填料进行参数修正, 探究空塔气速和液体表面张力对传质性能的影响, 本实验测试了 2 种填料在两种不同空塔气速以及 3 种不同液体表面张力条件下的传质性能。

3.2.1 ST 250Y 不锈钢填料

不锈钢填料的不同表面张力工况中(13~72mN/m), 1.5m/s 和 2.0m/s 气速下的测试结果如图 4 所示, 根据测试数据拟合出的曲线走势与 Tsai 的模型曲线(图中的 Tsai)相似, 验证了基础模型对测试填料的适用性, 而不同空塔气速下的关联式系数有着明显差异, 这应该是由于气速的提高增强了气体对气液接触界面的扰动, 进而增强了传质过程, 根据基础关联式拟合出的不同气速下的无量纲方程分别为:

$$\frac{a_e}{a_p} = 1.41[(We_L)(Fr_L)^{-1/3}]^{0.111} \quad (\text{气速 } 1.5\text{m/s}) \quad (3)$$

$$\frac{a_e}{a_p} = 1.63[(We_L)(Fr_L)^{-1/3}]^{0.111} \quad (\text{气速 } 2.0\text{m/s}) \quad (4)$$

式(3)、(4)中无量纲数指数 C_2 偏差很小, 这是因为不同气速条件下溶液密度、表面张力及溶液流量等参数没有改变, 反映了实验结果与原关联式的一致性, 且指数 C_2 的值与 Tsai 原式中非常接近, 存在的细微差别来源于填料结构参数和实验装置的差异。而空塔气速对模型的显著影响, 体现在关联式系数 C_1 上。

空塔气速对系数 C_1 的影响在不同表面张力工

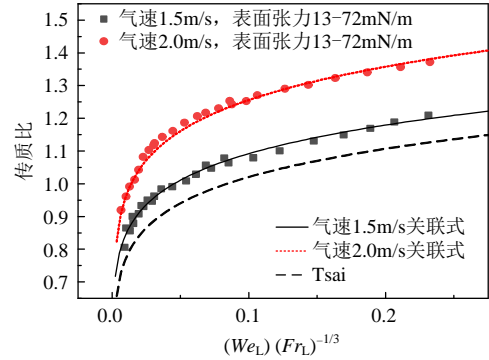


图4 表面张力为 13~72mN/m 条件下不同气速不锈钢填料传质比及关联式曲线

Fig. 4 Mass transfer ratio and correlation curve of stainless steel packing with different gas velocity at surface tension of 13~72mN/m

况中表现出近似线性的关系, 考虑到空塔气速根据填料的液泛气速选定, 填料结构差异会影响液泛气速^[27]。因此, 为了将气速的影响引入关联式中, 结合 Wang 等^[18]拟合的关联式系数 C_1 , 将无量纲形式的参数泛率(u_g/u_F)拟合到系数 C_1 中, 得到式(5):

$$\frac{a_e}{a_p} = a_f = (1.65 \frac{u_g}{u_F} + 0.75)[(We_L)(Fr_L)^{-1/3}]^{0.111} \quad (5)$$

将传质比预测结果(a_e/a_p)_{pre} 与实验结果(a_e/a_p)_{exp} 对比, 结果如图 5, 偏差均在 ±4% 以内, 验证了式(5)对不锈钢规整填料在不同气速和表面张力条件下传质面积预测的可靠性, 可以进一步以该关联式拟合适用于 ST 250Y 亲水改性塑料填料的经验公式。

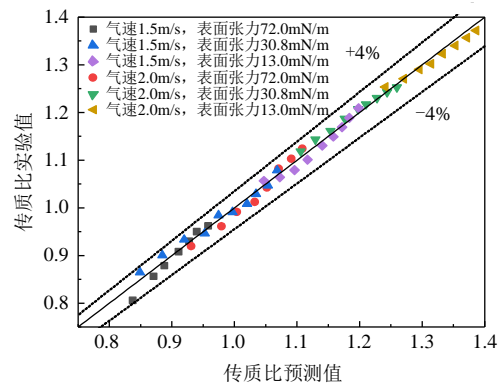


图5 不同表面张力和气速条件下不锈钢填料模型预测与实验结果对比

Fig. 5 Comparison between model prediction and experimental results of stainless steel packing under different surface tension and gas velocity

3.2.2 ST 250Y 亲水改性塑料填料

改性塑料填料的不同表面张力工况中(13~72mN/m), 1.0m/s 和 1.5m/s 气速下的测试结果如图 6 所示, 根据基础关联式拟合出的无量纲方程

分别为：

$$a_e/a_p = 1.54[(We_L)(Fr_L)^{-1/3}]^{0.132}, \text{ 气速 } 1.0\text{m/s} \quad (6)$$

$$a_e/a_p = 1.78[(We_L)(Fr_L)^{-1/3}]^{0.132}, \text{ 气速 } 1.5\text{m/s} \quad (7)$$

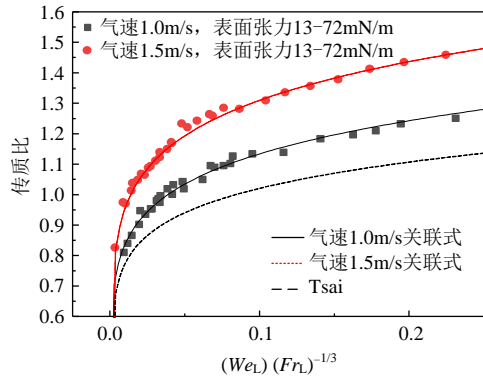


图6 表面张力为13-72mN/m条件下不同气速改性塑料填料传质比及关联式曲线

Fig. 6 Mass transfer ratio and correlation curve of modified plastic packing with different gas velocity at surface tension of 13-72mN/m

与不锈钢填料相似，不同气速下的关联式中无量纲数指数 C_2 较接近，系数 C_1 的值也表现出与气速的相关性，符合上文分析。无量纲数指数 C_2 的值与 Tsai 原式以及关联式(5)中有所差异，这主要是改性塑料和不锈钢填料本身存在的材质结构差异以及实验装置的不同所造成的。通过将泛率 u_g/u_F 拟合到无量纲数系数 C_1 中，把气速的影响引入经验公式，得到式(8)：

$$\frac{a_e}{a_p} = a_f = (1.30 \frac{u_g}{u_F} + 0.75)[(We_L)(Fr_L)^{-1/3}]^{0.132} \quad (8)$$

将预测结果与实验结果进行对比，结果如图7，偏差均在±4%以内，验证了关联式(8)对改性塑料填料在相应条件下传质面积预测的准确性和

可靠性。

3.2.3 不同气速和表面张力条件下填料传质性能对比

填料传质性能的比较要在尽可能相似的工况中，本实验测试的不锈钢和改性塑料填料有不同的液泛气速，导致选取的空塔气速也不同，需要控制不同填料测试时的泛率(u_g/u_F)相同进行对比。因此选取不锈钢填料 1.5m/s 和 2.0m/s 空塔气速下的传质比测试结果分别与改性塑料填料 1.0m/s 和 1.5m/s 空塔气速下的结果比较，如图8所示。

基准工况如图8(a)，不同泛率下两种填料都表现出相似的传质性能，在低泛率条件下尤为明显，传质比差异很小。而高泛率工况条件下，2者的差异相对明显：改性塑料填料在低液相负荷表现出比不锈钢填料更好的传质性能，而随着液相负荷上升，其传质比上升速度不及后者，在液相负荷超过 $22.5\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 后，改性塑料填料的传质比就低于不锈钢，且差距随液体负荷上升而扩大。这应该是塑

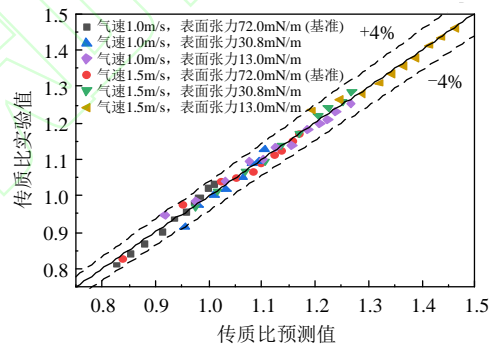


图7 不同表面张力和气速条件下改性塑料填料模型预测与实验结果对比

Fig. 7 Comparison between model prediction and experimental results of modified plastic packing under different surface tension and gas velocity

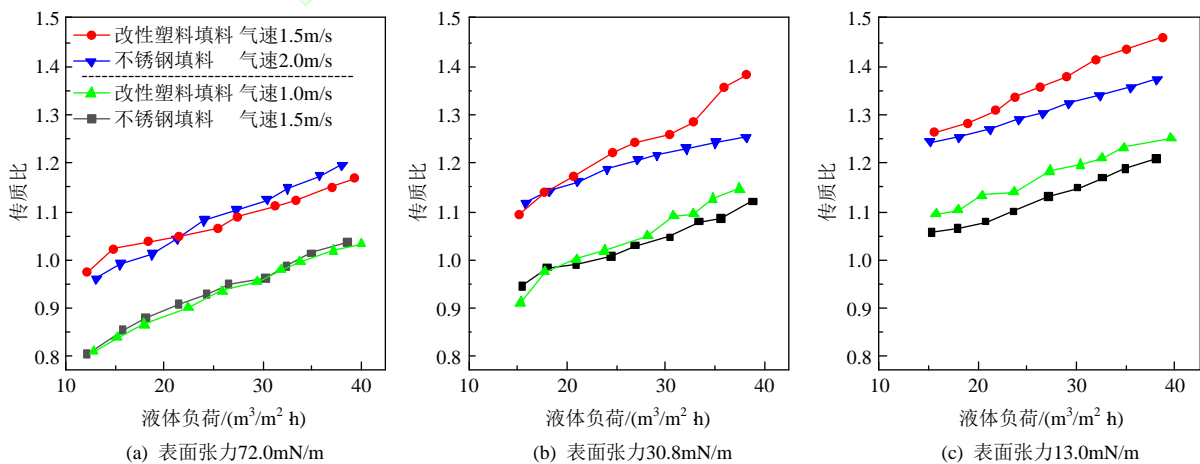


图8 表面张力为13-72mN/m条件下不同气速填料传质性能对比

Fig. 8 Comparison of mass transfer performance of packing at different gas velocities at surface tension of 13-72mN/m

料填料经改性后亲水状态改善导致的^[13]。高泛率工况中,塑料填料由于亲水性能提升,在低液体负荷时表面有更好的铺展和传质效果,而随着液体负荷上升,液体在表面铺展完全后,塑料填料的厚度较高等特点导致形成的液膜厚度和塔内持液量逐渐小于不锈钢填料,传质效果也慢慢弱于后者。而较低的操作气速对液体铺展和成膜影响有限,因此在低气速工况中这种现象不明显。

图 8(b)、(c)是低表面张力工况下不同气速两种填料的传质性能对比。不锈钢填料和亲水改性塑料填料在溶液表面张力下降后,传质性能都有所提高,这在拟合的预测模型中也有所体现,是由于表面张力降低后液体能更好的在填料表面铺展导致的。但同时,溶液表面张力降低后,两种填料传质性能的差异也更明显。在低溶液表面张力的条件下,改性塑料填料传质比随液体负荷提升的速度快于不锈钢填料,表面张力越低趋势越明显。这是由于亲水改性后,塑料填料对表面张力的变化更敏感,铺展成膜好的优势随着表面张力降低而扩大所导致的。相较于不锈钢填料,改性塑料填料在低表面张力的吸收剂环境下更有优势。

3.3 液体粘度对填料传质性能的影响

为了探究液体粘度对填料传质性能的影响,本文测试了 3 种不同溶液粘度以及不同空塔气速条件下填料的传质性能。

3.3.1 ST 250Y 不锈钢填料

不同粘度条件下(0.9~2.25mPa s) ST 250Y 不锈钢填料的传质比如图 9 所示。随液体负荷和操作气速的提高,不锈钢填料的传质比有明显的增加,这

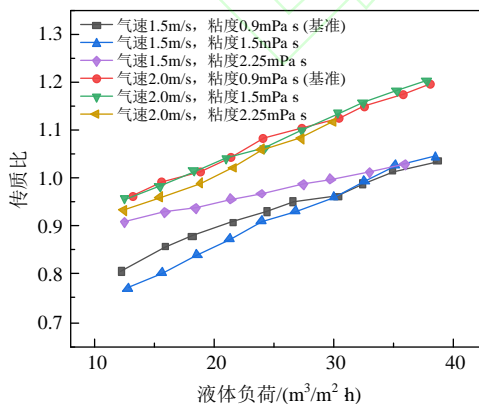


图 9 粘度 0.9–2.25mPa s 条件下不同气速不锈钢填料传质比

Fig. 9 Mass transfer ratio of stainless steel packing with different gas velocity when solution viscosity is 0.9–2.25mPa s

是因为填料表面的润湿程度会随着液体流量的增加而提升。但不同溶液粘度条件下的填料传质比没有显著差别,这在较高的操作气速工况下表现得尤为明显。

将不锈钢填料所有工况条件下的实验结果与关联式(5)的预测结果对比,结果如图 10 所示,大部分数据点相对偏差在 $\pm 5\%$ 以内,少部分点也在 $\pm 9\%$ 以内,验证了不同液体表面张力、粘度和空塔气速条件下经验公式的精度。作为比较, Tasi 的预测模型偏离值最高达到 13%^[17], Wang 的预测模型的最大偏离值达到 20%^[18]。因此,将气速引入关联式可以有效地提升预测精度。

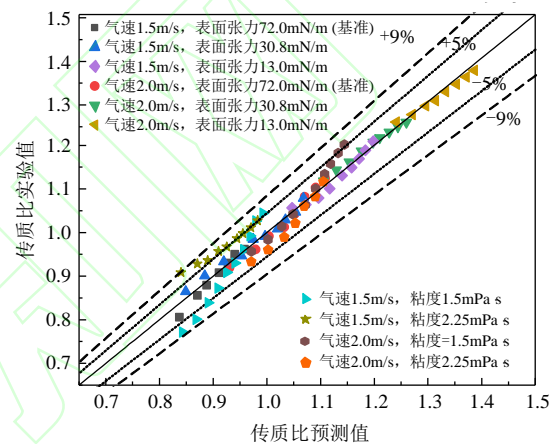


图 10 综合工况条件下不锈钢填料模型预测与实验结果对比

Fig. 10 Comparison between model prediction and experimental results of stainless steel packing under various conditions

实验结果在所测试的填料上验证了相关结论:不锈钢填料的有效传质面积会随着液体负荷上升而增大,降低溶液表面张力可以有效的提升传质比,且溶液粘度的变化对传质性能不会产生明显影响,同时证明了采用的关联式对 ST 250Y 不锈钢规整填料的适用性,也验证了空塔气速对填料传质性能的影响比文献中^[17]认为的更重要,可以通过引入泛率的方式对关联式修正,得到的预测结果更精确。

3.3.2 ST 250Y 亲水改性塑料填料

不同粘度条件下(0.9~2.25mPa s) ST 250Y 改性塑料填料的传质比如图 11 所示。改性塑料填料的厚度较不锈钢而言较高,使其在吸收塔内的单位压降高于不锈钢填料^[28],也因此在高溶液粘度工况下压降受气泡影响更明显,因此粘度 μ_L 为 2.25mPa s 的工况中,液相负荷控制在 $30\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{h})$ 以下防止压

降对结果产生影响。

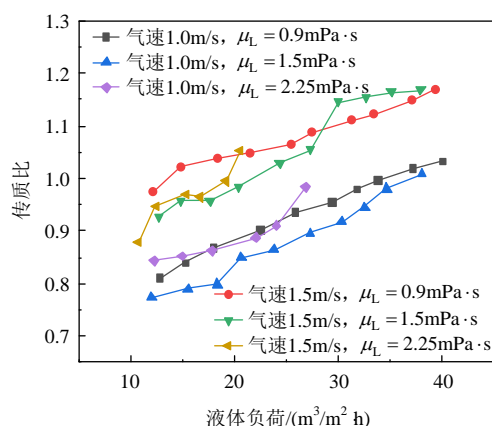


图 11 粘度 0.9–2.25Pa s 条件下不同气速改性塑料填料传质比

Fig. 11 Mass transfer ratio of modified plastic packing with different gas velocity when solution viscosity is 0.9–2.25Pa s

由于厚度导致的压降原因，亲水改性塑料填料在不同粘度条件下的传质性能变化相较于不锈钢稍表现出了一些明显波动，但幅度很小，可以认为粘度对改性塑料填料同样没有显著影响。但塑料填料也表现出了与不锈钢相似的特性：高粘度工况中有效传质面积随液相负荷提升的速度相较于低粘度工况中更快。在液相负荷超过 $22\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ 后，不同溶液粘度下的填料传质性能差别不大。

实验结果验证了亲水改性塑料填料具有和不锈钢填料相似的特性，根据基础模型和实验结果拟合 ST 250Y 改性塑料填料有效传质面积预测关联式是合理的。将亲水改性塑料填料所有工况条件下的实验结果与预测结果对比，结果如图 12 所示，绝大部分的数据相对偏差在 $\pm 6\%$ 以内，少部分也在 $\pm 11\%$ 以内，证明了关联式(8)在不同液体表面张力、粘度以及空塔气速下的可靠性。同样的，关联式对于改性塑料填料有效传质面积的预测相较于 Tsai 等人的模型有更高的精度，最大相对偏差更小。

3.3.3 不同气速和粘度条件下填料传质性能对比

在不同溶液粘度条件以及气速下改性塑料填料与不锈钢填料传质性能对比如图 13 所示：

当泛率相近时，2 种填料的传质性能随粘度变化并没有表现出明显的变化规律，特别是在高粘度条件下(2.25Pa s)，受到压降等因素影响记录的数据点比其他工况少，差异也很小。这也符合上文所述粘度条件对这 2 种填料的传质性能影响有限的结论。在中等粘度条件(1.5Pa s)的低气速工况条件下，改性塑料的有效传质面积测试结果比不锈钢填

料的略低一些。

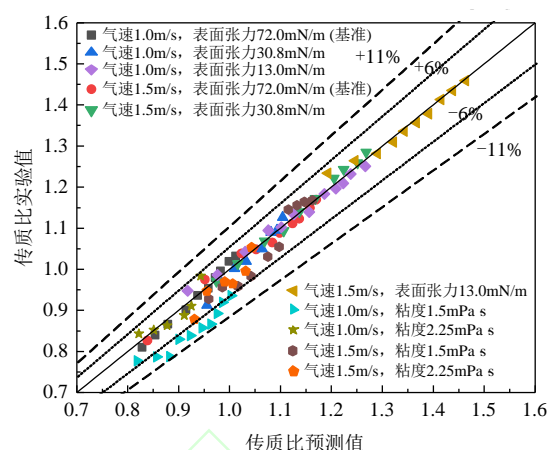


图 12 综合工况条件下改性塑料填料模型预测与实验结果对比

Fig. 12 Comparison between model prediction and experimental results of modified plastic packing under various conditions

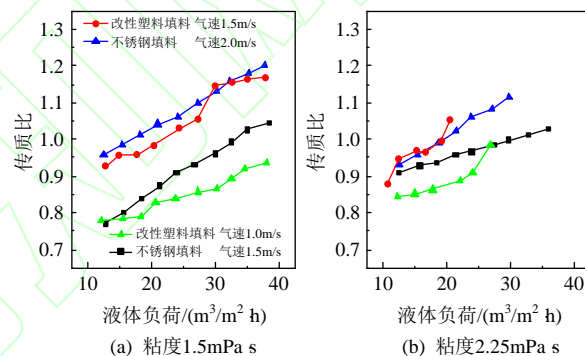


图 13 不同液体粘度条件下填料传质性能对比

Fig. 13 Comparison of mass transfer performance of packing under different liquid viscosity

4 结论

本文通过对新型 ST 250Y 亲水改性塑料和不锈钢填料的流体力学和传质性能测试，结合基础关联式，得到以下结论：

1) 实验条件下 ST 250Y 亲水改性塑料填料表现出与不锈钢填料相似的特性：2 者的传质性能相近，有效传质面积都会随液体负荷和空塔气速的上升以及溶液表面张力的下降而增大，且溶液粘度的变化对传质面积没有明显影响。

2) 相较于不锈钢填料，亲水改性塑料填料液膜扩展性能好的优势会随表面张力降低而扩大，在低表面张力的吸收剂环境下能体现更大优势。

3) 在预测模型中通过泛率引入气速的影响，提出了针对 ST 250Y 不锈钢和亲水改性塑料填料的有效传质面积预测经验公式，

不锈钢填料：

$$\frac{a_e}{a_p} = a_f = (1.65 \frac{u_g}{u_f} + 0.75)[(We_L)(Fr_L)^{-1/3}]^{0.111}$$

亲水改性塑料填料:

$$\frac{a_e}{a_p} = a_f = (1.30 \frac{u_g}{u_f} + 0.75)[(We_L)(Fr_L)^{-1/3}]^{0.132}$$

提高了经验公式的准确性, 在不同工况条件下实验值与预测值均吻合良好, 为工业设计提供了参考。

参考文献

- [1] 刘珍珍, 方梦祥, 夏芝香, 等. 基于高浓度 MEA 的 CO₂ 化学吸收工艺优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3666-3675.
LIU Zhenzhen, FANG Mengxiang, XIA Zhixiang, et al. Optimization of CO₂ chemical absorption process based on high concentration MEA[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3666-3675(in Chinese).
- [2] Committee on Climate Change. Reducing UK emissions-2018 progress report to parliament[R]. London: Committee on Climate Change, 2018.
- [3] 徐燕洁, 张威, 葛春亮, 等. 烷醇胺类两相吸收剂降解性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1347-1355.
XU Yanjie, ZHANG Wei, GE Chunliang, et al. Degradation performance of alkanolamine based biphasic solvent[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1347-1355(in Chinese).
- [4] 刘飞. 胺基两相吸收剂捕集二氧化碳机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
LIU Fei. Study on mechanism of amine based biphasic solvents for CO₂ capture[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).
- [5] 刘牧心, 梁希, 林千果, 等. 碳中和驱动下 CCUS 项目衔接碳交易市场的关键问题和对策分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4731-4739.
LIU Muxin, LIANG Xi, LIN Qianguo, et al. Key issues and countermeasures of CCUS projects linking carbon emission trading market under the target of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4731-4739(in Chinese).
- [6] 刘宁馨, 洪伟荣, 郭雅琼. 规整填料上传质现象的 CFD 模拟研究综述[J]. 化工机械, 2020, 47(5): 584-590.
LIU Ningxin, HONG Weirong, GUO Yaqiong. Review of CFD simulation of the mass transfer within structured packing elements[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2020, 47(5): 584-590(in Chinese).
- [7] FLAGIELLO D, DI NATALE F, LANCIA A, et al. Characterization of mass transfer coefficients and pressure drops for packed towers with Mellapak 250.X[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 161: 340-356.
- [8] OLUJIC Ž, JÖDECKE M, SHILKIN A, et al. Equipment improvement trends in distillation[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009, 48(6): 1089-1104.
- [9] WANG Chao, SEIBERT A F, ROCHELLE G T. Packing characterization: absorber economic analysis[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 42: 124-131.
- [10] MACFARLAN L H, SEIBERT A F, PHAN M T, et al. CFD-based study on structured packing geometry[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 243: 116767.
- [11] 童国锋. 用于烟气 CO₂ 化学吸收塔的高效聚丙烯规整填料研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
TONG Guofeng. Research on a high-efficiency polypropylene structured packing in carbon dioxide chemical absorption tower[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).
- [12] GOLOVANCHIKOV A B, SHAGAROVA A A, VASIL'EV P S, et al. Porous plastic packing for heat and mass transfer processes[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2018, 53(11-12): 759-764.
- [13] 刘佳特, 胡剑光, 戴干策. 表面改性塑料填料流体力学及传质性能研究[J]. 化学工程, 2014, 42(12): 25-29.
LIU Jiatao, HU Jianguang, DAI Gance. Hydrodynamic and mass transfer performance of modified plastic structured packing[J]. Chemical Engineering (China), 2014, 42(12): 25-29(in Chinese).
- [14] TSAI R E, SEIBERT A F, ELDRIDGE R B, et al. Influence of viscosity and surface tension on the effective mass transfer area of structured packing[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1197-1204.
- [15] WANG Chao, PERRY M, ROCHELLE G T, et al. Packing characterization: mass transfer properties[J]. Energy Procedia, 2012, 23: 23-32.
- [16] YI Ningtong, FANG Mengxiang, DI Wentao, et al. Aerosol emissions of amine-based CO₂ absorption system: effects of condensation nuclei and operating conditions[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(8): 5152-5160.
- [17] TSAI R E, SEIBERT A F, ELDRIDGE R B, et al. A dimensionless model for predicting the mass-transfer area of structured packing[J]. AIChE Journal, 2011, 57(5): 1173-1184.
- [18] WANG Chao, SONG Di, SEIBERT F A, et al. Dimensionless models for predicting the effective area, liquid-film, and gas-film mass-transfer coefficients of packing[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,

- 2016, 55(18): 5373-5384.
- [19] 童川, 于笑丹, 陈健, 等. 液体黏度对 CO₂ 吸收塔规整填料传质性能的影响[J]. 化学工程, 2015, 43(9): 6-9, 57.
- TONG Chuan, YU Xiaodan, CHEN Jian, et al. Influence of liquid viscosity on mass transfer of structured packing in CO₂ absorber[J]. Chemical Engineering (China), 2015, 43(9): 6-9, 57(in Chinese).
- [20] 王涛, 刘飞, 方梦祥, 等. 两相吸收剂捕集二氧化碳技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1186-1196.
- WANG Tao, LIU Fei, FANG Mengxiang, et al. Research progress in biphasic solvent for CO₂ capture technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1186-1196(in Chinese).
- [21] DE BRITO M H, VON STOCKAR U, BANGERTER A M, et al. Effective mass-transfer area in a pilot plant column equipped with structured packings and with ceramic rings[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1994, 33(3): 647-656.
- [22] HOFFMANN A, MAĆKOWIAK J F, GÓRAK A, et al. Standardization of mass transfer measurements: a basis for the description of absorption processes[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85(1): 40-49.
- [23] REJL J F, LINEK V, MOUCHA T, et al. Methods standardization in the measurement of mass-transfer characteristics in packed absorption columns[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(5): 695-704.
- [24] ROCHA J A, BRAVO J L, FAIR J R. Distillation columns containing structured packings: a comprehensive model for their performance. 2. mass-transfer model[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1996, 35(5): 1660-1667.
- [25] POHORECKI R, MONIUK W. Kinetics of reaction between carbon dioxide and hydroxyl ions in aqueous electrolyte solutions[J]. Chemical Engineering Science, 1988, 43(7): 1677-1684.
- [26] 任海伦, 安登超, 朱桃月, 等. 精馏技术研究进展与工业应用[J]. 化工进展, 2016, 35(6): 1606-1626.
- REN Hailun, AN Dengchao, ZHU Taoyue, et al. Distillation technology research progress and industrial application[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(6): 1606-1626(in Chinese).
- [27] CHATRE L, SOCCI J, ADAMS S J, et al. Design of 3D-printed structures for improved mass transfer and pressure drop in packed-bed reactors[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 420: 129762.
- [28] SUN Biao, BHATELIA T, UTIKAR R P, et al. Study on hydrodynamic performance of structured packings for gas-liquid flow: effects of geometry parameters[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 167: 318-326.



吴宇涛

收稿日期: 2021-12-13。

作者简介:

吴宇涛(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为燃烧后烟气捕集技术, 吸收塔改性填料开发和性能测试, wuyutaoboy@163.com;

*通信作者: 方梦祥(1965), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向煤和生物质流化床热解、气化和燃烧, CO₂ 化学吸收技术, mxfang@zju.edu.cn。

(编辑 邵泽亮)