

# 二氧化碳捕集塔内熔融共混亲水改性聚丙烯 规整填料性能研究

胡昔鸣<sup>1</sup>, 董文峰<sup>2</sup>, 王争荣<sup>3</sup>, 孙路长<sup>3</sup>, 王凯亮<sup>3</sup>, 李超<sup>2</sup>, 方梦祥<sup>2\*</sup>, 李治甫<sup>4</sup>

(1. 浙江大学青山湖能源研究基地, 浙江省 杭州市 311300; 2. 能源高效清洁利用全国重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027; 3. 中国华电科工集团有限公司, 北京市 丰台区 100160; 4. 中国电力企业联合会, 北京市 西城区 100032)

## Study on Properties of Hydrophilic Modified Polypropylene Regular Filler by Melt Blending in Carbon Dioxide Capture Tower

HU Ximing<sup>1</sup>, DONG Wenfeng<sup>2</sup>, WANG Zhengrong<sup>3</sup>, SUN Luchang<sup>3</sup>, WANG Kailiang<sup>3</sup>, LI Chao<sup>2</sup>,  
FANG Mengxiang<sup>2\*</sup>, LI Zhifu<sup>4</sup>

(1. Qingshanhu Energy Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 311300, Zhejiang Province, China; 2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China; 3. China Huadian Engineering Co., Ltd., Fengtai District, Beijing 100160, China; 4. China Electricity Council, Xicheng District, Beijing 100032, China)

**摘要:**【目的】目前胺法捕集烟气CO<sub>2</sub>工艺系统中大多采用不锈钢填料塔,为了大幅度降低填料塔成本,提出采用聚丙烯材质规整填料替代高成本的不锈钢结构填料,从而降低燃烧后CO<sub>2</sub>捕集系统中吸收塔的投资成本。【方法】采用塑料填料来代替不锈钢填料,将选用的聚丙烯材料和质量分数为30%的聚丙烯接枝马来酸酐(polypropylene grafted maleic anhydride, PP-g-MAH)颗粒料进行混合后,采用熔融共混方法将其制成规整填料。在搭建的填料流体力学性能和传质性能测试平台上,对不同填料性能进行测试。【结果】聚丙烯和PP-g-MAH熔融共混改性的规整填料410Y和350Y干塔压降与不锈钢填料500Y干塔压降接近。在相同公称比表面积规格条件下,改性聚丙烯填料350Y的有效比表面积接近不锈钢填料350Y。在CO<sub>2</sub>-胺反应的吸收塔内的液相负荷条件下,聚丙烯填料350Y的有效比表面积约为不锈钢填料350Y的90%左右。【结论】改性聚丙烯填料与不锈钢填料性能接近,实际应用中可替代不锈钢填料,并大幅降低CO<sub>2</sub>捕集系统中吸收塔的投资成本。

**关键词:** 碳捕集; 化学吸收; 聚丙烯填料; 聚丙烯接枝马来酸酐(PP-g-MAH); 填料性能; 不锈钢填料; 有效比表面积

**ABSTRACT:** [Objectives] At present, most amine based CO<sub>2</sub> capture systems for flue gas use stainless steel filled towers. In order to significantly reduce the cost of filled towers, this paper proposes the use of polypropylene structured filler instead of high cost stainless steel structured filler, thereby reducing the investment cost of absorption towers in CO<sub>2</sub> capture systems after combustion. [Methods] Using plastic fillers instead of stainless steel fillers, the selected polypropylene material and 30% mass fraction of polypropylene grafted maleic anhydride (PP-g-MAH) particles are mixed, and then they are melt blended to form regular fillers. On the constructed testing platform for fluid dynamics and mass transfer performance of fillers, different filler properties are tested. [Results] The dry tower pressure drop of regular fillers of 410Y and 350Y modified by melt blending of polypropylene and polypropylene grafted maleic anhydride is similar to that of stainless steel 500Y. The effective specific surface area of modified polypropylene filler 350Y is close to that of stainless steel filler 350Y with the same nominal specific surface area. Under liquid-phase loading conditions in the CO<sub>2</sub> amine reaction absorption tower, the effective specific surface area of polypropylene filler of 350Y is about 90% of that of stainless steel filler of 350Y. [Conclusions] The modified polypropylene filler has

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFE0199300); 中国华电集团公司“揭榜挂帅”项目(CHDKJ21-01-109); 中央高校基本科研业务费专项资金(2022ZFJH004)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2023YFE0199300); Enlisting and Leading Project of China Huadian Cooperation Ltd. (CHDKJ21-01-109); Special Funds for Basic Scientific Research Operations of Central Universities (2022ZFJH004).

similar performance to stainless steel filler and can replace stainless steel filler in practical applications, significantly reducing the investment cost of absorption towers in CO<sub>2</sub> capture systems.

**KEY WORDS:** carbon capture; chemical absorption; polypropylene filler; polypropylene grafted maleic anhydride (PP-g-MAH); filler performance; stainless steel filler; effective specific surface area

## 0 引言

目前, 胺法捕集烟气 CO<sub>2</sub><sup>[1-3]</sup> 工艺系统中的填料大多采用不锈钢填料, 不锈钢规整填料具有机械加工性好、强度高、易润湿等优点, 但成本太高。以聚丙烯(polypropylene, PP)为代表的塑料填料具有质轻、耐腐蚀和易加工成型等特点<sup>[4]</sup>, 且聚丙烯材质的规整填料密度小, 对填料塔内支撑结构要求低。但聚丙烯等塑料材料耐温性低, 在高温下容易软化变形, 同时, 吸收液在聚丙烯规整填料表面容易形成“沟流”, 严重影响吸收过程中气液传质有效比表面积<sup>[5]</sup>, 导致 CO<sub>2</sub> 捕集<sup>[6-9]</sup> 效率下降。因此, 亟需降低吸收液在聚丙烯材料表面静态接触角, 改善吸收液在波纹填料表面液膜扩展性能, 提高吸收塔内聚丙烯填料有效比表面积。

目前, 国内外一般采用添加亲水材料的熔融共混改性<sup>[10-11]</sup>、熔融接枝亲水材料改性<sup>[12]</sup>、溶液接枝亲水材料改性<sup>[13]</sup>等亲水改性方法; 就液固界面改性而言, 有效提高聚丙烯亲水性的方法主要有界面表面粗糙法、等离子处理法<sup>[14]</sup>、火焰处理法<sup>[15]</sup>、物理法<sup>[16]</sup>、表面接枝聚合<sup>[17-18]</sup>等改性方法。聚丙烯填料的改性关键在于选择合适的改性剂与改性剂添加量。Farrukh 等<sup>[19]</sup>采用质量分数为 16% 的热塑性聚酯与聚丙烯进行共混, 制得的聚丙烯膜与水的接触角从 85.5° 降低到 55.0°; 方勇<sup>[20]</sup>采用聚丙烯接枝马来酸酐(polypropylene grafted maleic anhydride, PP-g-MAH)作为改性剂, 添加质量分数为 40% 的马来酸酐, 得到的单板液体成膜率从 10% 有效提高到 90%; Saffar 等<sup>[21]</sup>采用共混改性法将聚丙烯与质量分数为 2% 的丙烯酸接枝聚丙烯进行共混制膜, 并将其浸渍于纳米 TiO<sub>2</sub> 悬浮液中, 改性后的聚丙烯膜与水的接触角从 90° 有效降低到 40°。总的来说, 共混改性工艺简单、效果明显,

但缺少其与二氧化碳捕集相结合的应用研究与验证。

本文对聚丙烯填料在二氧化碳捕集领域的应用进行了进一步探索。首先选用聚丙烯材料和质量分数为 30% 的 PP-g-MAH 颗粒料, 采用熔融共混方法将其制成 410Y 和 350Y 规整填料, 然后在搭建的规整填料流体力学和传质性能测试平台上对二氧化碳捕集应用场景的聚丙烯填料流体力学及传质性能进行测试, 并与不锈钢填料进行对比。

## 1 熔融共混聚丙烯填料制备

聚丙烯材料和质量分数为 30% 的 PP-g-MAH 颗粒料混合后, 采用熔融共混方法制成宽度为 200 mm 的平板, 降温后通过波纹规整填料模具压制波纹结构, 最后按照填料块尺寸切割组装。聚丙烯填料生产装置如图 1 所示。



图1 聚丙烯填料生产装置

Fig. 1 Polypropylene filler production plant

聚丙烯材料孔板波纹填料实验的几何参数见表 1, 聚丙烯规整填料 410Y 和 350Y 的比表面积分别为 410、350 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>。对于相同公称比表面积的规整填料, 聚丙烯填料的几何结构参数不完全与不锈钢填料一致。

表1 聚丙烯规整填料 410Y 和 350Y 参数

Tab. 1 Parameters of polypropylene regular fillers of 410Y and 350Y

填料型号	比表面积/ (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	波纹 波距/mm	波纹 波峰/mm	波纹边长/ mm	板片 厚度/mm
410Y PP	410	8.00	6.25	10.1	0.8
350Y PP	350	7.66	8.59	11.5	1.0

## 2 流体力学及传质性能测试平台

搭建填料流体力学性能和传质性能测试平台,

对未亲水改性聚丙烯填料410Y和熔融共混亲水改性聚丙烯填料350Y性能进行测试。测试平台由离心风机(用于输送空气,流量为120~1 000 m<sup>3</sup>/h,对应空塔气速为0.5~4 m/s)、亚克力塔体、聚丙烯规整填料、循环泵(用于输送溶液,流量为0~6 m<sup>3</sup>/h)、流量计(涡街流量计连接在风机后,用于测量塔内气体流量,设备型号为川仪VFD10133213A002VH1211110-OUY,量程为120~1 000 m<sup>3</sup>/h,精度为0.01 m<sup>3</sup>/h;电磁流量计连接在溶液循环泵后、塔顶前,用于测量送入塔内的液体流量,设备型号为川仪MFH40018110A005EH1401111,量程为0~5 m<sup>3</sup>/h,精度为0.1 m<sup>3</sup>/h)、传感器(压力传感器测量塔顶、塔底取样口的压力差,型号为川仪PDS,量程为0~3 kPa,精度为0.075%;温度传感器测量塔顶、塔底取样口的气体温度,量程为0~100 ℃,测量精度为1%)、溶液储罐和控制阀门组成,如图2所示。测试塔体直径为300 mm,填料填充高度为2 000 mm。在空气/水体系中,对聚丙烯规整填料410Y和350Y的流体力学性能进行测试,测试内容包括干压降、湿压降和填料持液量。填料段压降与气体速度有关,用 $F$ 因子表示,对于不锈钢填料,一般取值为0.8~3.1 Pa<sup>0.5</sup>,循环液体流量为

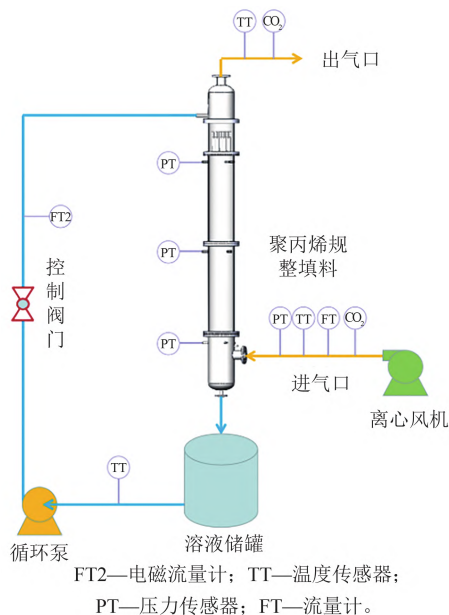


图2 填料流体力学及传质性能测试平台

Fig. 2 Filler fluid mechanics and mass transfer performance testing platform

0~70 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)。

有效比表面积的计算采用化学方法(0.1 mol/L NaOH吸收空气中的CO<sub>2</sub>),因为该方法可以很好地反映传质填料的有效比表面积。在测试中吸收塔的空塔气速保持在1.0 m/s左右,在液相负荷为14.0 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)和28.0 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)条件下分别测试规整填料的有效比表面积,并采用LI-840A红外气体分析仪(量程为0~20 000 mg/L,精度为±1.5%)测量进口和出口的CO<sub>2</sub>浓度。因气相传质阻力较小,可以忽略不计,则有效比表面积计算式<sup>[22]</sup>如下:

$$a_e = \frac{u_G \times \ln\left(\frac{y_{\text{CO}_2, \text{in}}}{y_{\text{CO}_2, \text{out}}}\right)}{ZRT} \times \frac{100 \times H_{\text{CO}_2}}{\sqrt{k_{\text{OH}} C_{\text{OH}} D_{\text{CO}_2, \text{l}}}} \quad (1)$$

式中: $a_e$ 为填料有效比表面积, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>;  $u_G$ 为表面气速, m/s;  $y_{\text{CO}_2, \text{out}}$ 、 $y_{\text{CO}_2, \text{in}}$ 分别为出、入口处CO<sub>2</sub>摩尔分数, mol/mol;  $Z$ 为填料段高度, m;  $R$ 为理想气体常数, m<sup>3</sup>·Pa/(kmol·K);  $T$ 为液体和气体平均温度, K;  $H_{\text{CO}_2}$ 为CO<sub>2</sub>亨利系数, m<sup>3</sup>·kPa/kmol;  $k_{\text{OH}}$ 为二级反应速率常数, m<sup>3</sup>/(kmol·s);  $D_{\text{CO}_2, \text{l}}$ 为溶液中CO<sub>2</sub>扩散系数, m<sup>2</sup>/s;  $C_{\text{OH}}$ 为OH<sup>-</sup>离子浓度, kmol/m<sup>3</sup>。 $D_{\text{CO}_2, \text{l}}$ 、 $k_{\text{OH}}$ 和 $H_{\text{CO}_2}$ 的计算方法详见文献[23]。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 聚丙烯填料流体力学性能

CO<sub>2</sub>吸收塔内总压降决定了烟气鼓风机的功率,总压降由气体分布器、填料段、液体分布器和除雾器的压降组成,其中填料段压降的推荐值不应超过200 Pa/m<sup>[24]</sup>。 $F$ 因子的表达式如下:

$$F = \sqrt{\rho_G} \times u_{\text{SG}} \quad (2)$$

式中: $\rho_G$ 为空气密度;  $u_{\text{SG}} = \sqrt{4V/\pi \cdot D^2}$ ,为表观气速,其中 $V$ 是空气流量,  $D$ 是吸收塔直径。对于聚丙烯规整填料,其 $F$ 因子为0~3.5 Pa<sup>0.5</sup>。

图3为聚丙烯和不锈钢规整填料干塔压降的对比,其中不锈钢规整填料的干塔压降结果源自文献[25]。聚丙烯规整填料350Y、410Y的波纹板片厚度分别为1.2、0.8 mm,远高于不锈钢波纹填料。由图3可知,聚丙烯填料410Y和350Y干塔

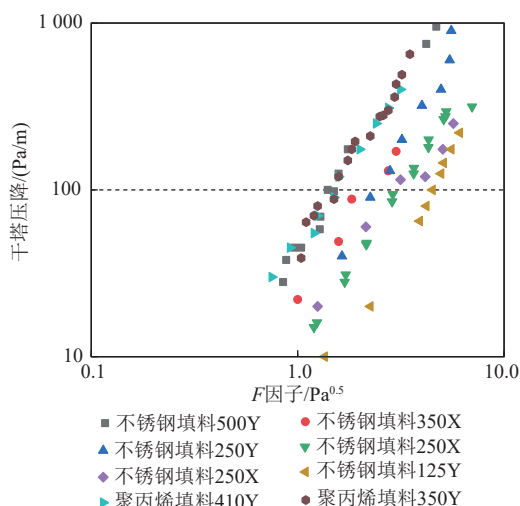


图 3 聚丙烯填料与不锈钢填料的干塔压降对比

Fig. 3 Comparison of dry tower pressure drop between polypropylene fillers and stainless steel fillers

压降与不锈钢 500Y 干塔压降接近。因此，在相同公称比表面积的情况下，聚丙烯填料的干塔压降要高于不锈钢填料。当  $F$  因子为  $1.5 \text{ Pa}^{0.5}$  时，聚丙烯填料的干塔压降约为  $100 \text{ Pa/m}$ 。

图 4 显示了不同溶液负荷条件下的湿塔压降。吸收塔液相负荷  $Q_L$  为  $10 \sim 30 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，本文选取  $14、28 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  进行试验。在试验过程中，聚丙烯规整填料没有明显的液泛现象，当液相负荷为  $14、28 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时，亲水改性聚丙烯填料 350Y 液泛气速分别为  $2.5、2.9 \text{ m/s}$ 。由于聚丙烯填料的湿塔压降高于相同比面积的不锈钢规整填料，因此，350Y 塑料填料的湿压降设定为  $200 \text{ Pa/m}$ 。在不同液相负荷条件下，在测试平台测得亲水改性聚丙烯填料 350Y 空塔气速分别为  $1.49 \text{ m/s}$  和  $1.33 \text{ m/s}$ ，对应于液泛气速的  $50\% \sim 55\%$ 。对于不锈钢规整填料，最佳空塔气速约为液泛气速的  $50\% \sim 80\%$ 。

当吸收塔未达到液泛点时，亲水改性聚丙烯填料 350Y 持液率略有变化，如图 5 所示。填料塔含液量是在特定的操作条件下，在填料表面和波纹板片中空隙区域的单位体积内所持液体的体积。试验过程中壁流严重，因此，在相同液相负荷条件下，聚丙烯填料 410Y 的持液率低于聚丙烯填料 350Y，也正因为这个原因，聚丙烯填料 410Y 的持液率随气速变化不大。

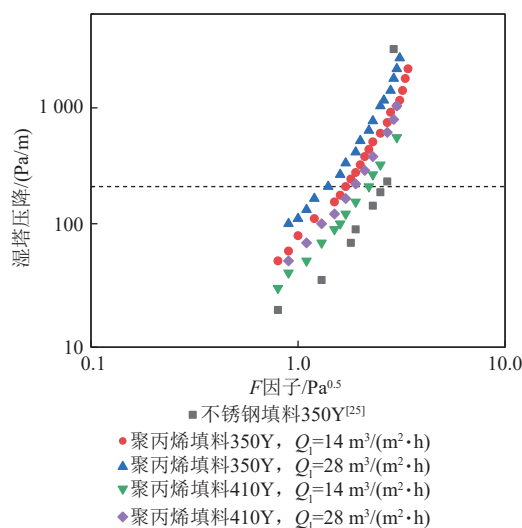


图 4 聚丙烯填料与不锈钢填料的湿塔压降对比

Fig. 4 Comparison of wet tower pressure drop between polypropylene fillers and stainless steel fillers

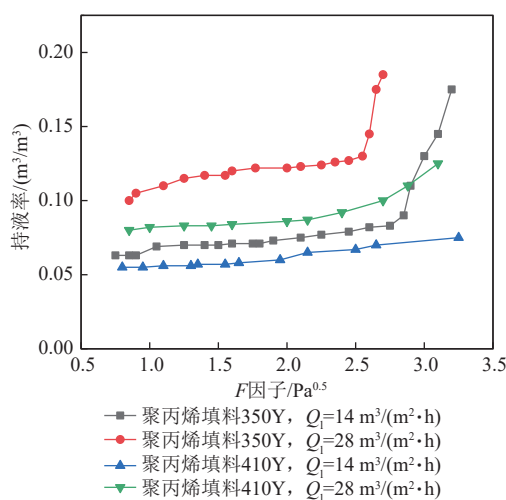


图 5 试验用聚丙烯填料的持液率

Fig. 5 Liquid holding capacity of experimental polypropylene fillers

### 3.2 聚丙烯填料传质性能

文献[26-27]采用无因次传质模型预测不锈钢填料在不同表面张力和液相负荷条件下的比表面积利用率，如式(3)所示。由于亲水改性聚丙烯材料静态水接触角仍高于不锈钢材料，因此采用式(4)计算聚丙烯规整填料的比表面积利用率。

$$\frac{a_{e\_stainless}}{a_{p\_stainless}} = 1.34 \left[ \left( \frac{\rho_1}{\sigma} \right) g^{1/3} \left( \frac{Q}{L_p} \right)^{4/3} \right]^{0.116} \quad (3)$$

$$\frac{a_{e\_plastic}}{a_{p\_plastic}} = f \left( \frac{Q}{L_p} \right) \left[ \left( \frac{\rho_1}{\sigma} \right) g^{1/3} \left( \frac{Q}{L_p} \right)^{4/3} \right]^{0.116} \quad (4)$$

式中： $a_{e\_stainless}$ 、 $a_{e\_plastic}$  分别为不锈钢填料、聚丙烯

填料有效比表面积； $a_{p\_stainless}$ 、 $a_{p\_plastic}$  分别为不锈钢填料、聚丙烯填料比表面积， $m^2/m^3$ ； $Q$ 为体积液体流量， $m^3/s$ ； $L_p$ 为润湿周边， $m$ ； $\rho_l$ 为液体密度， $kg/m^3$ ； $\sigma$ 为液体表面张力， $mN/m$ ； $g$ 为重力加速度， $m/s^2$ ； $f(Q/L_p)$ 为聚丙烯规整填料修正系数， $f(Q/L_p)=a_{e-plastic}/a_{e-stainless}$ 。

图6为不同液相负荷下未亲水改性聚丙烯填料410Y、亲水改性聚丙烯填料350Y和不锈钢规整填料(350X、500Y、A3-500、B1-500)<sup>[25]</sup>比表面积利用率的对比。聚丙烯规整填料比表面积利用率随液相负荷增大而升高。对于未亲水改性聚丙烯规整填料410Y，其比表面积利用率远低于不锈钢规整填料500Y。当液相负荷为 $14 m^3/(m^2 \cdot h)$ 时，聚丙烯填料410Y比表面积利用率为不锈钢规整填料500Y的50%左右。但是综合来看，聚丙烯填料与不锈钢填料有效比表面积的差值随着液相负荷的增大而减小。对于亲水改性聚丙烯填料350Y，当液相负荷小于 $30 m^3/(m^2 \cdot h)$ 时，其比表面积利用率接近不锈钢填料500Y。当液体负荷达到 $40 m^3/(m^2 \cdot h)$ 时，聚丙烯填料350Y出现轻微液泛，导致其比表面积利用率远大于不锈钢填料500Y。

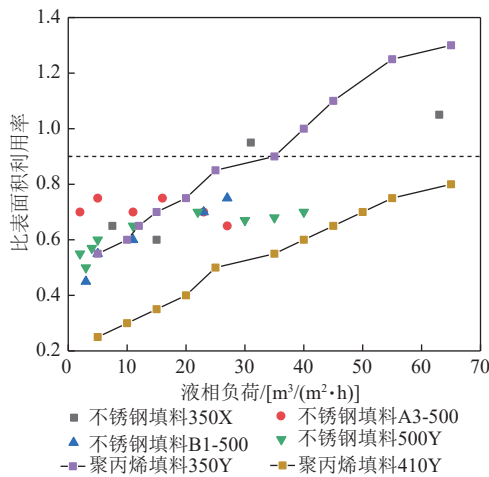


图6 聚丙烯填料与不锈钢填料比表面积利用率对比

Fig. 6 Comparison of specific surface area utilization between polypropylene fillers and stainless steel fillers

聚丙烯规整填料的有效比表面积修正系数拟合曲线如图7所示。在 $CO_2$ -胺反应的吸收塔内的液相负荷条件下(即 $Q/L_p=2.5 \times 10^{-6} m^2/s$ )，由于未改性聚丙烯填料润湿性能较差，在相同公称比表面积规格条件下，聚丙烯填料410Y的有效比表面积

远低于不锈钢填料410Y(约为不锈钢填料410Y的50%)，亲水改性聚丙烯填料350Y的有效比表面积接近不锈钢填料350Y(约为不锈钢填料350Y的90%)。从 $CO_2$ 与有机胺反应的总传质系数来看，亲水改性聚丙烯填料350Y可以替代不锈钢规整填料350Y。

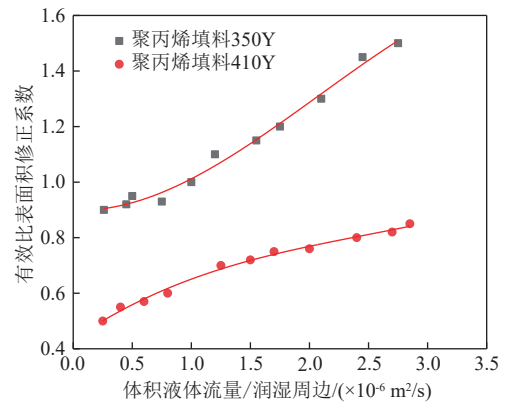


图7 聚丙烯规整填料的有效比表面积修正系数

Fig. 7 Effective specific surface area correction factor of polypropylene regular fillers

式(4)中聚丙烯填料410Y、350Y修正系数的计算式如下：

$$f\left(\frac{Q}{L_p}\right) = \left[ a + b\left(\frac{Q}{L_p}\right) + c\left(\frac{Q}{L_p}\right)^2 + d\left(\frac{Q}{L_p}\right)^3 \right] \left[ \frac{\rho_l}{\sigma} g^{1/3} \left(\frac{Q}{L_p}\right)^{4/3} \right]^{0.116} \quad (5)$$

式中 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 均为拟合后的系数。当填料为聚丙烯410Y时， $a=0.592$ ， $b=38139.2$ ， $c=-1.763 \times 10^9$ ， $d=4.072 \times 10^3$ ；当填料为聚丙烯350Y时， $a=1.254$ ， $b=-2000167$ ， $c=3.583 \times 10^9$ ， $d=-6.277 \times 10^{13}$ 。

### 3.3 耐溶剂性能测试

为测试聚丙烯材料的耐溶剂性能，取若干样品分别放入质量分数为30%的乙醇胺(MEA)、质量分数为30%的MEA+2-氨基-2-甲基-1-丙醇(AMP)吸收剂的溶液中，常温处置，每隔1个月取出进行质量测定，作为材料腐蚀情况的考察，结果如图8所示。可以看出，样品质量基本无明显变化，经过6个月的浸泡后，材料质量略微有所上升，上升幅度不超过3%，且材料表面基本无肉眼可见的变化。由此可以基本推断，聚丙烯材料耐腐蚀性能较佳，6个月的浸泡仅有轻微的溶胀发生，无明显腐蚀。

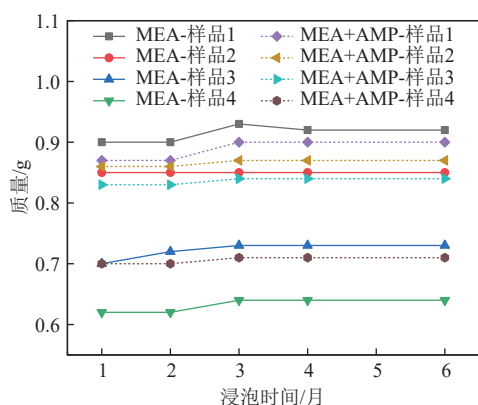


图8 吸收剂浸泡下聚丙烯平板质量变化

Fig. 8 Mass change of polypropylene flat plate soaked in absorbent

## 4 结论

提出添加聚丙烯接枝马来酸酐以提高聚丙烯材料亲水性能并以此制备规整填料,该填料在流体力学和传质性能方面与传统不锈钢填料接近,实际应用中可以替代不锈钢填料,达到降低成本的效果。主要结论如下:

1) 该聚丙烯填料410Y和350Y的干塔压降与不锈钢填料接近,湿塔压降高于相同公称比表面积的不锈钢规整填料。

2) 在CO<sub>2</sub>-胺反应的吸收塔内的液相负荷条件下,该聚丙烯填料350Y有效比表面积约为不锈钢填料的90%左右。

3) 在吸收剂6个月的浸泡下,该聚丙烯材料质量无明显变化,具有较好的耐腐蚀性能。

4) 经过流体力学和传质性能测试可以看出,该聚丙烯填料与不锈钢填料性能接近,可在实际应用中替代不锈钢规整填料。

## 参考文献

[1] 胡道成,王睿,赵瑞,等.二氧化碳捕集技术及适用场景分析[J].发电技术,2023,44(4):502-513.  
HU D C, WANG R, ZHAO R, et al. Research on carbon dioxide capture technology and suitable scenarios[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 502-513.

[2] 张欢,汪丽,叶叙,等.乙二烯三胺与三乙醇胺混合胺溶液CO<sub>2</sub>吸收剂研究[J].发电技术,2022,43(4):609-617.  
ZHANG H, WANG L, YE Y, et al. Study on CO<sub>2</sub> absorbent of DETA and TEA mixed amine

solution[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 609-617.

- [3] 李小端,赵兴雷,叶叙,等.基于电渗析技术的CO<sub>2</sub>吸收剂再生过程研究[J].发电技术,2022,43(4):593-599.  
LI X D, ZHAO X L, YE Y, et al. Study on reclamation process of CO<sub>2</sub> absorbent based on electro dialysis technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 593-599.
- [4] OOI Z L, TAN P Y, TAN L S, et al. Amine-based solvent for CO<sub>2</sub> absorption and its impact on carbon steel corrosion: a perspective review[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(5): 1357-1367.
- [5] HAROUN Y, RAYNAL L, ALIX P. Prediction of effective area and liquid hold-up in structured packings by CFD[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(11): 2247-2254.
- [6] 王旭,杨昊,王满仓,等.燃气电厂化学吸收二氧化碳捕获系统运行参数与能耗分析[J].分布式能源,2023,8(5):69-76.  
WANG X, YANG H, WANG M C, et al. Analysis of operating parameters and energy consumption of chemical absorption carbon dioxide capture system in natural gas power plants[J]. Distributed Energy, 2023, 8(5): 69-76.
- [7] 姜明军,黎启明,赵苍禄,等.融合极限场景辨别算法的含碳捕集综合能源系统鲁棒调度模型研究[J].智慧电力,2023,51(3):17-24.  
JIANG M J, LI Q M, ZHAO C L, et al. Robust scheduling model of integrated energy system with carbon capture integrating extreme scenario discrimination algorithm[J]. Smart Power, 2023, 51(3): 17-24.
- [8] 鲁肖龙,潘淼,鞠立伟,等.考虑碳捕集和电转气的热电联合虚拟电厂调度优化模型[J].电力建设,2023,44(8):107-117.  
LU X L, PAN M, JU L W, et al. Dispatching optimization model of combined heat and power virtual power plant considering carbon capture and power-to-gas[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(8): 107-117.
- [9] 张杰,陈洁,孙晗喆,等.基于碳捕集与液态CO<sub>2</sub>储能综合能源系统优化调度[J].智慧电力,2023,51(3):1-8.  
ZHANG J, CHEN J, SUN H Z, et al. Optimal scheduling of integrated energy systems based on carbon capture and liquid CO<sub>2</sub> energy storage[J]. Smart Power, 2023, 51(3): 1-8.
- [10] ARYANTI P T P, SUBAGJO S, ARIONO D, et al.

- Fouling and rejection characteristic of humic substances in polysulfone ultrafiltration membrane[J]. *Journal of Membrane Science and Research*, 2014, 1(1): 41-45.
- [11] SAFFAR A, CARREAU P J, AJJI A, et al. Development of polypropylene microporous hydrophilic membranes by blending with PP-g-MA and PP-g-AA[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 462: 50-61.
- [12] ZHANG C, BAI Y, SUN Y, et al. Preparation of hydrophilic HDPE porous membranes via thermally induced phase separation by blending of amphiphilic PE-b-PEG copolymer[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 365(1/2): 216-224.
- [13] JAMSHIDI GOHARI R, HALAKOO E, NAZRI N A M, et al. Improving performance and antifouling capability of PES UF membranes via blending with highly hydrophilic hydrous manganese dioxide nanoparticles[J]. *Desalination*, 2014, 335(1): 87-95.
- [14] ARYANTI P T P, KHOIRUDDIN, WENTEN I G. Influence of additives on polysulfone-based ultrafiltration membrane performance during peat water filtration[J]. *Journal of Water Sustainability*, 2013, 3(2): 85-96.
- [15] MEI L, ZHANG D, WANG Q. Morphology structure study of polypropylene hollow fiber membrane made by the blend-spinning and cold-stretching method[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, 84(7): 1390-1394.
- [16] ROY S, BHALANI D V, JEWRAJKA S K. Surface segregation of segmented amphiphilic copolymer of poly (dimethylsiloxane) and poly (ethylene glycol) on poly (vinylidene fluoride) blend membrane for oil-water emulsion separation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 232: 115940.
- [17] XU X, ZHANG H, YU M, et al. Conductive thin film nanocomposite forward osmosis membrane (TFN-FO) blended with carbon nanoparticles for membrane fouling control[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134050.
- [18] ZHANG P Y, XU Z L, YANG H, et al. Preparation and characterization of PVDF-P(PEGMA-r-MMA) ultrafiltration blend membranes via simplified blend method[J]. *Desalination*, 2013, 319: 47-59.
- [19] FARRUKH S, HUSSAIN A, IQBAL N. Fabrication and characterization of microfiltration blended membranes[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 52(10/11/12): 1833-1840.
- [20] 方勇. 聚丙烯基复合材料填料的开发[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- FANG Y. Development of polypropylene-based composite filler[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
- [21] SAFFAR A, CARREAU P J, KAMAL M R, et al. Hydrophilic modification of polypropylene microporous membranes by grafting TiO<sub>2</sub> nanoparticles with acrylic acid groups on the surface[J]. *Polymer*, 2014, 55(23): 6069-6075.
- [22] TSAI R E, SCHULTHEISS P, KETTNER A, et al. Influence of surface tension on effective packing area[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(4): 1253-1260.
- [23] 童国锋. 用于烟气CO<sub>2</sub>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 G F. Study on efficient polypropylene structured packing for flue gas CO<sub>2</sub> chemical absorption tower[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [24] KARPE P, AICHELE C P. Amine modeling for CO<sub>2</sub> capture: internals selection[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(8): 3926-3932.
- [25] LASSAUCE A, ALIX P, RAYNAL L, et al. Pressure drop, capacity and mass transfer area requirements for post-combustion carbon capture by solvents[J]. *Oil & Gas Science and Technology-Revue D'IFP Energies Nouvelles*, 2014, 69(6): 1021-1034.
- [26] WANG C, SONG D, 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.
- [27] 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.

收稿日期: 2024-02-13。

修回日期: 2024-05-02。

作者简介:



胡昔鸣

胡昔鸣(1993), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为CO<sub>2</sub>化学吸收技术, ximinghu@zju.edu.cn;



王争荣

王争荣(1984),男,硕士,副高级工程师,主要从事燃煤电厂节能减排、碳捕集与利用技术等方面研究, wangzr@chec.com.cn;



孙路长

孙路长(1976),女,硕士,正高级工程师,研究方向为二氧化碳捕集利用及封存技术, sunlc@chec.com;



王凯亮

王凯亮(1975),男,硕士,正高级工程师,主要从事大气污染物控制、燃煤电厂脱硫脱硝除尘技术研究和工程设计与管理方面的工作, wangkl@chec.com.cn;



方梦祥

方梦祥(1965),男,博士,教授,主要从事煤和生物质流化床热解、气化和燃烧, CO<sub>2</sub>化学吸收技术等方面研究, 本文通信作者, mxfang@zju.edu.cn。

(责任编辑 苗雪连)