

Recent Research Progresses on the CO₂ Adsorption Materials

Can Jin, Lukang Zheng, Qi Chen*, Qiang Xiao

Institute of Advanced Fluorine-Containing Materials, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang
Email: *1473245517@qq.com

Received: Jul. 4th, 2017; accepted: Jul. 17th, 2017; published: Jul. 21st, 2017

Abstract

CO₂ as the main greenhouse gas, the reduction of its emission is the key to curb global warming. CO₂ capture and sequestration (CCS) is of significance for the mitigation of greenhouse effect. The key of CCS is seeking for the adsorbents with high adsorption capacity, high selectivity, good thermal stability, and good recyclability. In recent years, some porous materials such as activated carbon, zeolite molecular sieves, and metal organic polymer materials have been widely applied to CO₂ adsorption. This paper firstly gives an overview introduction of the methods of CO₂ capture as well as some porous materials as CO₂ adsorbents. Afterwards, melamine based microporous polymers (MBMPs) are highlighted. Due to the advantages of the high specific surface area, the diversity of the synthetic methods, the easy functionalization, etc., MBMPs show a broad prospect of the application in gas storage and separation.

Keywords

Carbon Dioxide, Capture, Adsorption, Porous Materials

二氧化碳吸附材料研究新进展

金 灿, 郑璐康, 陈 琦*, 肖 强

浙江师范大学含氟新材料研究所, 浙江 金华
Email: *1473245517@qq.com

收稿日期: 2017年7月4日; 录用日期: 2017年7月17日; 发布日期: 2017年7月21日

摘 要

CO₂是导致温室效应的主要气体, 减少其排放是遏制全球气候变暖的关键, CO₂的捕集与封存对于缓解温

*通讯作者。

室效应具有重要意义；而捕集与封存的关键是寻求高吸附量、高选择性、热稳定性好且循环性能良好的吸附剂。近些年来一些多孔材料如活性炭、沸石分子筛、金属有机骨架材料被广泛应用于CO₂吸附。本文介绍了CO₂捕集方法及各种多孔材料的CO₂吸附性能，重点介绍了密胺基微孔有机聚合物(MBMPs)。MBMPs由于其具有较高的比表面积、合成方法多样、容易功能化修饰等优点，在气体的存储与分离方面具有广阔应用前景。

关键词

二氧化碳, 捕集, 吸附, 多孔材料

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着温室效应的日益加剧，控制温室气体的排放已经深入到人类政治经济生活中[1]。CO₂是最大的温室气体，但同时也是一种珍贵的碳资源[2] [3]，因此CO₂的捕集和封存(CCS)无论对于环境保护还是碳资源的综合利用都有重要意义。火力发电厂是最重要的CO₂排放源，占总排放量的30%以上[4]。随着页岩气开发的大幅度增加，天然气在能源结构中的比重将不断增长。天然气中除主要成分CH₄ (80%~95%)外，还含有CO₂、N₂等气体，CH₄中CO₂的捕集和移除对于天然气大规模开发应用也具有重要意义。

2. CO₂捕集方法

液态胺基溶液变温吸收法是目前捕集回收CO₂的主要方法，但该方法存在一些弊端如：胺基溶液易腐蚀吸收设备、吸收剂再生过程中溶剂易挥发、再生过程能耗大等[5] [6]。膜分离是气体分离的常用技术，虽然一些膜在高压下对高浓度CO₂表现出良好的分离性能，但对于混合气中稀浓度CO₂气体的分离则需要很高的压力，而导致高能耗[7]。此外，膜的稳定性、膜通量及膜放大也制约了其应用。

低温分离法是利用混合气体中各个组分的挥发度不同，对含有CO₂的混合气体进行低温冷凝和多次冷却、压缩，使CO₂气体变为液态或者固态，从而达到分离的效果。但低温分离法所需要的实验装置较复杂，能耗较高，且该方法由于各个组分的相变特征不同可能会造成CO₂发生相变，传统的低温分离技术一般只适用于油田开采。Xu等人[8]设计的新型低温分离CO₂技术，克服了传统低温分离技术的许多缺点，能实现低能耗的分离CO₂气体。

吸附分离法采用固体吸附剂通过变压吸附(PSA)或变温吸附(TSA)对CO₂进行捕集和分离可克服设备腐蚀问题，而且能耗大幅度降低，是常用的气体分离方法。常见的物理吸附剂有：活性炭[9] [10] [11] [12]、沸石分子筛[13] [14] [15] [16] [17]、改性的多孔材料[18] [19]等。

3. CO₂吸附材料

3.1. 活性炭

活性炭比表面积大、孔容大，对二氧化碳吸附容量高，是一种有前景的吸附剂。Martin-Martinez等[20]认为在273 K时，当活性炭孔径是一个CO₂分子直径(0.33 nm)时，CO₂的吸附机理是微孔填充；孔径是一个CO₂分子尺寸时，吸附机理是表面覆盖。研究表明，影响CO₂吸附性能的主要因素是活性炭的孔

隙结构和表面化学官能团。Guo 等[21]制备出 PEI/AC、K₂CO₃/AC、PEI-K₂CO₃/AC，结果表明，PEI-K₂CO₃/AC 的 CO₂ 吸附效果最好，高达 3.6 mmol/g，且其选择性增大、耐水性提高。未改性的活性炭对 CO₂ 的吸附是物理吸附，高压下吸附量很高，但温度过高或 CO₂ 分压低都会影响其吸附效果，且其耐水性差，不适用工业化应用。寻找更好的改性活性炭的方法，提高其在低分压下的吸附能力和选择性将成为以后的研究方向。

3.2. 沸石分子筛

沸石分子筛主要成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃，其比表面积大，孔径均一，含有大量微孔结构，孔径与普通分子接近，是优良的吸附剂。沸石分子筛对 CO₂ 的吸附属于物理吸附，吸附量随温度的升高而快速下降。Su 等[22]用四乙烯五胺(TEPA)浸渍 Y 型沸石(Si/Al 摩尔比为 60)，然后用于 CO₂ 吸附，结果发现改性后吸附剂对 CO₂ 的吸附能力随着温度的增加表现出先增加后降低的趋势；经 20 次循环使用后吸附剂对 CO₂ 的吸附能力没有明显降低，且再生性能良好。

3.3. 金属有机骨架材料

金属有机骨架(MOFs)材料是一类由金属离子(簇)和刚性有机分子配位连接形成的多孔结晶骨架网络。MOFs 材料除了具有可设计性和调节性，其比表面也较高，孔容和孔隙率也较大，密度较大，这些物理化学性质上的优势使得 MOFs 材料对于传统的多孔材料在 CO₂ 吸附分离过程中表现出明显优势。由于超高的比表面积(可高达 5000 m²/g)和孔容(可达 2 cm³/g)，MOFs 材料显示了很高的 CO₂ 吸附量，如 MOF-177 的 CO₂ 吸附量可达 33.5 mmol/g (298 K, 32 bar)，MIL-101(Cr)上的 CO₂ 吸附量可达 40 mmol/g (298 K, 50 bar) [23]。基于金属中心空位和配体胺基功能化的 CO₂ 吸附可提高 CO₂ 吸附热，从而一定程度上提高 CO₂ 吸附选择性。但基于金属中心空位的 CO₂ 吸附容易受水分等影响，且吸附容量低，如 MOF-74-Mg 吸附量仅为 0.83 mmol/g (1 bar, 298 K) [24]。而胺基功能化的 MOFs (如 NH₂-MIL-53)，CO₂ 吸附位数受胺基密度限制，其常压下的 CO₂ 吸附量也不高[25] [26]。

3.4. 多孔有机聚合物

共价有机骨架材料是由有机构建单元通过共价键连接在一起，形成具有周期性结构的多孔骨架，骨架之间有很强的共价作用力，同 MOFs 材料对比，其热稳定性更好，在 500℃~600℃ 的空气气氛下可以稳定存在。同时，因为这类材料只有轻质元素组成，所以有较低的重量密度，孔隙结构非常发达，因此其在气体吸附分离与储存领域越来越受到关注。在高压下，多孔聚合物吸附 CO₂ 的性能都较为优异，但 COFs 材料也有选择性不高和低压吸附量低的问题。基于以上问题，研究者们采取各种方法进行了改性。Zhou 等[27]通过在 PPN-6 上嫁接磺酸基和磺酸锂，从而显著提高了 CO₂ 的低压选择性，制备的 PPN-6-SO₃H 和 PPN-6-SO₃Li 在常温常压下的吸附量分别为 3.6、3.7 mmol/g，CO₂/N₂ 的 IAST (理想溶液吸附理论)选择性分别是 155、414；随后制备出胺基修饰的共价有机骨架 PPN-6-CH₂DETA，该材料对空气中的 CO₂ (体积分数约 4 × 10⁻⁴) 的吸附量达到 1.04 mmol/g，吸附选择性高达 3.6 × 10¹⁰ [28]。

一种与 MOFs 类似的多孔聚合物(Porous Organic Polymers, POPs)是由有机结构单元通过单聚或多聚以共价键联组装而成，其单体通常采用刚性有机结构单元以保持多孔结构，其结构单元组成均为轻元素(C、H、N、B 等)，因此 POPs 可称为“有机分子筛”。POPs 的比表面很高，可达 6400 m²/g，且具有丰富的孔结构以及多样的官能团，由于这些可调的物理化学性质，POPs 在气体吸附、光电及催化等方面具有良好的应用前景[29] [30] [31] [32] [33]。

作为 CO₂ 吸附剂 POPs 显示了很高的吸附量。例如吉林大学贲腾及其合作者报道了一种苯环 - 碳四

面体共价键连接的 POPs (PAF-1), PAF 具有很高的比表面积(高达 $5600 \text{ m}^2/\text{g}$), 在 40 bar 和 298 K 下, CO_2 吸附量可达 29.55 mmol/g , 即使在 1 bar 和 273 K 下, 该材料 CO_2 吸附量仍有 3.48 mmol/g [33] [34]。Zhou 课题组[35]报道了结构类似的苯环-硅四面体共价键连接的 PPN-4, 其比表面积达到 $6461 \text{ m}^2/\text{g}$, 是已知 POPs 材料中 CO_2 吸附量(达 38.9 mmol/g , 50 bar 、 298 K)最高的。尽管上述 POPs 表现出很高的 CO_2 吸附量, 但 CO_2 在 POPs 上的吸附热较低($<20 \text{ kJ/mol}$), 低压(常压)下的吸附量不高, CO_2 吸附选择性有所降低。

Cooper 课题组对比研究了一些高比表面积 POPs 上的 CO_2 吸附, 发现仅仅增加材料的比表面积并不能进一步提高 CO_2 吸附量(尤其在低 CO_2 分压下), 更有效的途径是提高 CO_2 在 POPs 上的等量吸附热[36]。Mohanty 等人成功合成了一种富电子的 POPs, 显示出了较高的 CO_2 等量吸附热(34.0 kJ/mol), 并具有较高的 CO_2 吸附量(2.68 mmol/g , 1 bar 、 298 K), 并表现出良好的 CO_2 吸附选择性[37]。Zhou 课题组[38]在 PPN-6 (PAF-1)中引入 $-\text{S}_3\text{H}$ 基团大幅提高了 CO_2 等量吸附热, 并通过 Li 离子改性进一步提高了 CO_2 等量吸附热, 显示了优异的 CO_2 吸附性能, 在 295 K , 0.15 bar 达到 1.23 mmol/g ($5.4 \text{ wt}\%$), 接近于 30% MEA 溶液的 CO_2 吸附量($\sim 5.5 \text{ wt}\%$)。后来, 他们通过嫁接氨基到 PPN-6 上, 实现了直接从空气中捕集 CO_2 [39]。

虽然活性炭和沸石分子筛等此类吸附剂在常温下对 CO_2 具有较高的吸附量, 但是当温度升高时吸附量急剧下降, 且在有水环境中选择性较差, 因此需要研发其它对 CO_2 具有良好吸附性能的吸附剂。密胺基多孔有机聚合物由于其合成方法简便、原料易得、且具有高吸附量和高选择性, 受到了人们的广泛关注。

3.5. 密胺基微孔聚合物

密胺基微孔聚合物(Melamine Based Microporous Polymer, MBMPs)是以三聚氰胺(密胺)和苯甲醛同系物为原料, 通过 Schiff 碱反应制得的具有微孔结构的多孔聚合物材料。由于 MBMPs 高胺基含量和丰富的微孔结构, 显示了良好的 CO_2 吸附性能[40] [41]。Xiao [42]课题组以三聚氰胺和苯二甲醛通过席夫碱缩合反应, 合成了密胺基多孔有机聚合物。以体积法精确测量了不同温度下的 CO_2 和 N_2 吸附等温线, 合成的 MBMPs 显示了良好的 CO_2 吸附性能, 273 K 和 1.2 bar 下, CO_2 吸附量可达 2.8 mmol/g 。以双位 Langmuir 模型(DSL)和单位 Langmuir 模型(SSL)分别较好的拟合了 MBMPs 上的 CO_2 和 N_2 吸附平衡数据, 以理想吸附溶液理论(IAST)预测的双组份气体吸附等温线表明, 对于等摩尔 CO_2 和 N_2 气体, 298 K 和 1 bar 下, CO_2 对 N_2 选择性可达 83.7 。穿透柱技术研究了双组份混合气体 CO_2/N_2 在 MBMPs 上的动态吸附行为, 表明在 MBMPs 上可实现 CO_2 和 N_2 的彻底分离。更重要的是, 吸附饱和的 MBMPs 可以通过气体吹扫实现再生, 而已经报道的胺基功能化材料吸附 CO_2 后常需要升高温度进行再生, 这意味着 MBMPs 可作为一类变压吸附材料用于 CO_2/N_2 分离。随后他们课题组[43]又将 MBMPs 经过炭化后处理得到微孔炭材料, 并从理论和实验两方面研究了 CO_2 的吸附分离性能。制备的微孔炭具有较高的 CO_2 吸附量, 在 298 K 、 1 bar 下吸附量为 2.34 mmol/g ; 采用 DSL 模型很好的描述了 CO_2 在微孔炭上的吸附行为, 等量吸附热在 $32.5 - 24.5 \text{ kJ/mol}$ 之间; 应用 IAST 预测微孔炭上双组分气体的吸附行为, 该材料显示了很好的吸附选择性。

将 MBMPs 加入到聚二甲基硅氧烷(PDMS)中, 制备出一种混合基质膜, 考察了不同的 MBMPs 含量对此膜分离 CO_2 混合气的影响。结果显示, 加入 MBMPs 后提高了 PDMS 膜的分离性能; 增加 MBMPs 含量, 明显提高了混合基质膜的渗透系数, 同时气体分离选择性先增大后又减小。该膜分离 CO_2/N_2 的选择性达到 19.2 , 突破了 Robeson 上限[44]。

由于 MBMPs 采用 DMSO 为溶剂在 180°C 回流 3 d , 合成条件苛刻, 同时合成过程伴随有恶臭产生, 如何在较温和的条件下合成密胺基聚合物具有重要的实际意义。通过进一步探索, Xiao 课题组又以三聚氰胺、间苯三酚和甲醛为原料通过水热缩聚反应制备了一种密胺酚醛纤维(PMF), 并且考察了原料比例、

加水量以及温度对 PMF 的影响, 结果表明 PMF 呈现纤维形貌。采用体积法测试了 PMF 的 CO₂ 吸附性能, 在 298 K、1 bar 时吸附量达到 1.3 mmol/g。穿透柱结果显示 PMF 分离 CO₂/N₂ 混合气体时, CO₂ 的穿透时间更长, 说明可以实现 CO₂/N₂ 混合气的分离[45]。

4. 展望

多孔材料的比表面积、孔结构、表面性质、表面官能团对 CO₂ 的吸附都有重要的影响, 多孔材料的结构和组成的微小变化都能引起 CO₂ 吸附量的改变。这就需要大量的实验去探究最佳的孔径条件、最佳孔径比等。为了取得更好的 CO₂ 吸附捕集效果, 一方面需要调控多孔材料的结构, 提高多孔材料的机械性能, 增大材料比表面积; 另一方面是寻求更优的材料改性方案, 制备出环境友好、机械强度高、能耗低、吸附效果好的 CO₂ 吸附剂。

资助信息

国家自然科学基金(21471131、21303166)。

参考文献 (References)

- [1] 联合国. “联合国气候变化框架公约”京都议定书[M]. 京都: 联合国, 1998.
- [2] Song, C. (2006) Global Challenges and Strategies for Control, Conversion and Utilization of CO₂, for Sustainable Development Involving Energy, Catalysis, Adsorption and Chemical Processing. *Catalysis Today*, **115**, 2-32.
- [3] Ishida, N., Shimamoto, Y. and Murakami, M. (2012) Solar-Driven Incorporation of Carbon Dioxide into α -Amino Ketones. *Angewandte Chemie International Edition*, **51**, 11750-11752. <https://doi.org/10.1002/anie.201206166>
- [4] Yang, H.Q., Xu, Z.H., Fan, M.H., Gupta, R., Slimane, R.B., Bland, A.E. and Wright, I. (2008) Progress in Carbon Dioxide Separation and Capture: A Review. *Journal of Environmental Sciences*, **20**, 14.
- [5] Rochelle, G.T. (2009) Amine Scrubbing for CO₂ Capture. *Science*, **325**, 1652-1654. <https://doi.org/10.1126/science.1176731>
- [6] Figueroa, J.D., Fout, T., Plasynski, S., McIlvried, H. and Srivastava, R.D. (2008) Advances in CO₂ Capture Technology—The U.S. Department of Energy’s Carbon Sequestration Program. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **2**, 9-20.
- [7] Favre, E., *et al.* (2007) Carbon Dioxide Recovery from Post-Combustion Processes: Can Gas Permeation Membranes Compete with Absorption. *Journal of Membrane Science*, **294**, 50-59.
- [8] Xu, G., Li, L., Yang, Y., *et al.* (2012) A Novel CO₂ Cryogenic Liquefaction and Separation System. *Eng*, **42**, 522-529.
- [9] Yakovlev, V.Y., Fomkin, A.A., Tvardovskii, A.V., *et al.* (2005) Carbon Dioxide Adsorption on the Microporous Carbon Adsorbent. *Russian Chemical Bulletin*, **54**, 1373-1377. <https://doi.org/10.1007/s11172-005-0412-3>
- [10] Milewskaduda, J., Duda, J., Nodzinski, A., Lakatos, J., *et al.* (2000) Absorption and Adsorption of Methane and Carbon Dioxide in Hard Coal and Active Carbon. *Langmuir*, **16**, 5458-5466. <https://doi.org/10.1021/la991515a>
- [11] Cagnon, B.T., Guillot, A., *et al.* (1975) The Effect of the Carbonization/Activation Procedure on the Microporous Texture of the Subsequent Chars and Active Carbons. *Clinical Radiology*, **14**, 261-266.
- [12] Yakovlev, V.Y., Fomkin, A.A., Tvardovskii, A.V., *et al.* (2003) Adsorption and Deformation Phenomena at Interaction of N₂ and Microporous Carbon Adsorbent. *Journal of Colloid and Interface Science*, **268**, 33-36.
- [13] Babarao, R. and Jiang, J. (2009) Unprecedentedly High Selective Adsorption of Gas Mixtures in Rho Zeolite-Like Metal-Organic Framework: A Molecular Simulation Study. *Journal of the American Chemical Society*, **131**, 11417-11425. <https://doi.org/10.1021/ja901061j>
- [14] Siriwardane, R.V., Shen, M.-S. and Fisher, E.P. (2003) Adsorption of CO₂, N₂, and O₂ on Natural Zeolites. *Energy & Fuels*, **17**, 571-576. <https://doi.org/10.1021/ef020135l>
- [15] Chatti, R., Bansawal, A.K., Thote, J.A., *et al.* (2009) Amine Loaded Zeolites for Carbon Dioxide Capture: Amine Loading and Adsorption Studies. *Microporous and Mesoporous Materials*, **121**, 84-89.
- [16] Xu, X., Zhao, X., Sun, L., *et al.* (2009) Adsorption Separation of Carbon Dioxide, Methane and Nitrogen on Monoethanol Amine Modified β -Zeolite. *Journal of Natural Gas Chemistry*, **18**, 167-172.
- [17] Xu, X., Zhao, X., Sun, L., *et al.* (2008) Adsorption Separation of Carbon Dioxide, Methane, and Nitrogen on H β and

- Na-Exchanged β -Zeolite. *Journal of Natural Gas Chemistry*, **17**, 391-396.
- [18] Lee, K.B., Beaver, M.G., Caram, H.S., *et al.* (2008) Performance of Na₂O Promoted Alumina as CO₂ Chemisorbent in Sorption-Enhanced Reaction Process for Simultaneous Production of Fuel-Cell Grade H₂ and Compressed CO₂ from Synthesis Gas. *Journal of Power Sources*, **176**, 312-319.
- [19] Caskey, S.R., Wong-Foy, A.G. and Matzger, A.J. (2008) Dramatic Tuning of Carbon Dioxide Uptake via Metal Substitution in a Coordination Polymer with Cylindrical Pores. *Journal of the American Chemical Society*, **130**, 10870-10871. <https://doi.org/10.1021/ja8036096>
- [20] Martín-Martínez, J.M., Torregrosa-Maci, R. and Mittelmeijer-Hazeleger, M.C. (1995) Mechanisms of Adsorption of CO₂ in the Micropores of Activated Anthracite. *Fuel*, **74**, 111-114.
- [21] Guo, Y., Zhao, C., Li, C., *et al.* (2014) Application of PEI-K₂CO₃/AC for Cap-Turing CO₂ from Flue Gas after Combustion. *Applied Energy*, **129**, 17-24.
- [22] Su, F., Lu, C., Kuo, S.C., *et al.* (2010) Adsorption of CO₂ on Amine-Functionalized Y-Type Zeolites. *Energy Fuels*, **24**, 1441-1448. <https://doi.org/10.1021/ef901077k>
- [23] Llewellyn, P.L., Bourrelly, S., Serre, C., Vimont, A., Daturi, M., Hamon, L., De Weireld, G., Chang, J.S., Hong, D.Y., Kyu Hwang, Y., Hwa Jhung, S. and Ferey, G. (2008) High Uptakes of CO₂ and CH₄ in Mesoporous Metal-Organic Frameworks MIL-100 and MIL-101. *Langmuir*, **24**, 7245-7250. <https://doi.org/10.1021/la800227x>
- [24] Zhang, Z., Zhao, Y., Gong, Q., Li, Z. and Li, J. (2013) MOFs for CO₂ Capture and Separation from Flue Gas Mixtures: The Effect of Multifunctional Sites on Their Adsorption Capacity and Selectivity. *Chemical Communications*, **49**, 653-661. <https://doi.org/10.1039/C2CC35561B>
- [25] Boutin, A., Couck, S., Coudert, F.X., Serra-Crespo, P., Gascon, J., Kapteijn, F., Fuchs, A.H. and Denayer, J.F.M. (2011) Thermodynamic Analysis of the Breathing of Amino-Functionalized MIL-53(Al) upon CO₂ Adsorption. *Microporous and Mesoporous Materials*, **140**, 108-113.
- [26] Stavitski, E., Pidko, E.A., Couck, S., Remy, T., Hensen, E.J.M., Weckhuysen, B.M., Denayer, J., Gascon, J. and Kapteijn, F. (2011) Complexity behind CO₂ Capture on NH₂-MIL-53. *Langmuir*, **27**, 3970-3976. <https://doi.org/10.1021/la1045207>
- [27] Zhou, L., Fan, J., Cui, G., *et al.* (2014) Highly Efficient and Reversible CO₂ Adsorption by Amine-Grafted Platelet SBA-15 with Expanded Pore Diameters and Short Mesochannel. *Green Chemistry*, **16**, 4009-4016. <https://doi.org/10.1039/C4GC00832D>
- [28] Lu, W., Yuan, D., Sculley, J., *et al.* (2011) Sulfonate-Grafted Porous Polymer Networks for Preferential CO₂ Adsorption at Low Pressure. *Journal of the American Chemical Society*, **133**, 18126-18129. <https://doi.org/10.1021/ja2087773>
- [29] Wu, D., Xu, F., Sun, B., Fu, R., He, H. and Matyjaszewski, K. (2012) Design and Preparation for Porous Polymers. *Chemical Reviews*, **112**, 3959-4015. <https://doi.org/10.1021/cr200440z>
- [30] Dawson, R., Cooper, A.I. and Adams, D.J. (2012) Nanoporous Organic Polymer Network. *Progress in Polymer Science*, **37**, 530-563.
- [31] Xiang, Z. and Cao, D. (2013) Porous Covalent-Organic Materials: Synthesis, Clean Energy Application and Design. *Journal of Materials Chemistry A*, **1**, 2691-2718. <https://doi.org/10.1039/C2TA00063F>
- [32] Ding, S.Y. and Wang, W. (2013) Covalent Organic Frameworks (COFs): From Design to Applications. *Chemical Society Reviews*, **42**, 548-568. <https://doi.org/10.1039/C2CS35072F>
- [33] Ben, T., Ren, H., Ma, S., Cao, D., Lan, J., Jing, X., Wang, W., Xu, J., Deng, F., Simmons, J.M., Qiu, S. and Zhu, G. (2009) Targeted Synthesis of a Porous Aromatic Framework with High Stability and Exceptionally High Surface Area. *Angewandte Chemie International Edition*, **48**, 9457-9460. <https://doi.org/10.1002/anie.200904637>
- [34] Ben, T., Pei, C., Zhang, D., Xu, J., Deng, F., Jing, X. and Qiu, S. (2011) Gas Storage in Porous Aromatic Frameworks (PAFs). *Energy & Environmental Science*, **4**, 3991-3999. <https://doi.org/10.1039/c1ee01222c>
- [35] Lu, W., Yuan, D., Zhao, D., Schilling, C.I., Plietzsch, O., Muller, T., Brase, S., Guenther, J., Blumel, J., Krishna, R., Li, Z. and Zhou, H. (2010) Porous Polymer Networks: Synthesis, Porosity, and Applications in Gas Storage/Separation. *Chemistry of Materials*, **22**, 5964-5972. <https://doi.org/10.1021/cm1021068>
- [36] Dawson, R., Stoeckel, E., Holst, J.R., Adams, D.J. and Cooper, A.I. (2011) Microporous Organic Polymers for Carbon Dioxide Capture. *Energy & Environmental Science*, **4**, 4239-4245. <https://doi.org/10.1039/c1ee01971f>
- [37] Mohanty, P., Kull, L.D. and Landskron, K. (2011) Porous Covalent Electron-Rich Organonitridic Frameworks as Highly Selective Sorbents for Methane and Carbon Dioxide. *Nature Communications*, **2**, 401. <https://doi.org/10.1038/ncomms1405>
- [38] Lu, W., Yuan, D., Sculley, J., Zhao, D., Krishna, R. and Zhou, H.C. (2011) Sulfonate-Grafted Porous Polymer Networks for Preferential CO₂ Adsorption at Low Pressure. *Journal of the American Chemical Society*, **133**, 18126-18129. <https://doi.org/10.1021/ja2087773>

- [39] Lu, W.G., Sculley, J.P., Yuan, D.Q., Krishna, R. and Zhou, H.C. (2013) Carbon Dioxide Capture from Air Using Amine-Grafted Porous Polymer Networks. *The Journal of Physical Chemistry C*, **117**, 4057-4061. <https://doi.org/10.1021/jp311512q>
- [40] Liu, L., Li, P., Zhu, L., Zou, R. and Zhao, Y. (2013) Microporous Polymelamine Network for Highly Selective CO₂ Adsorption. *Polymer*, **54**, 596-600.
- [41] Xu, C. and Hedin, N. (2013) Synthesis of Microporous Organic Polymers with High CO₂-over-N₂ Selectivity and CO₂ Adsorption. *Journal of Materials Chemistry A*, **1**, 3406-3414. <https://doi.org/10.1039/c3ta01160g>
- [42] Hu, J.X., Shang, H., Wang, J.G., Luo, L., Xiao, Q., Zhong, Y.J. and Zhu, W.D. (2014) Highly Enhanced Selectivity and Easy Regeneration for the Separation of CO₂ over N₂ on Melamine-Based Microporous Organic Polymers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **53**, 11828-11837. <https://doi.org/10.1021/ie501736t>
- [43] 胡敬秀, 张静, 邹建锋, 肖强, 钟依均, 朱伟东. 源自密胺基多孔聚合物的富氮微孔炭及选择性吸附 CO₂[J]. 物理化学学报, 2014, 30(6): 1169-1174.
- [44] 王亚丹, 肖强, 钟依均, 朱伟东. 密胺苯二醛多孔聚合物/聚二甲基硅氧烷混合基质膜的制备及气体分离性能[J]. 物理化学学报, 2012.
- [45] Xiao, Q., Wen, J.J., Guo, Y.N., *et al.* (2016) Synthesis, Carbonization, and CO₂ Adsorption Properties of Phloroglucinol-Melamine-Formaldehyde Polymeric Nanofibers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **55**, 12667-12674. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b03494>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: japc@hanspub.org