中国科学: 化学 2019 年 第 49 卷 第 1 期: 207 ~ 214
SCIENTIA SINICA Chimica chemcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 环境放射化学专刊

富氮共价有机框架材料的合成及其碘吸附性能研究

谭望†, 郭兴华†, 张顺, 李阳, 张美成, 李星, 李小锋, 马利建*, 李首建*

四川大学化学学院, 成都 610064
†同等贡献
*通讯作者, E-mail: ma.lj@hotmail.com; sjli000616@scu.edu.cn

收稿日期: 2018-06-29; 接受日期: 2018-09-11; 网络版发表日期: 2018-12-24
国防基础科研科学挑战专题(编号: TZ2016004)和国家自然科学基金(编号: 21771128, 21671140)资助项目

摘要 放射性碘因其易挥发性、生物相容性以及高迁移率等性质成为气体放射性核废物中极为重要的污染物, 一旦泄露到环境中将会产生巨大的危害. 因此, 高效的碘吸附材料的研究与开发意义重大. 共价有机框架(covalent organic framework, COF)材料是一类新兴的结晶多孔聚合物材料, 具有高度灵活的分子可设计性和孔道结构可调控性. 富氮结构和富电子π-π共轭体系的COF材料能够为碘的吸附提供有效结合位点, 是良好的吸附剂备选材料. 本文选用高含氮化合物2,4,6-三对甲酰苯氧基-1,3,5-三嗪(TPT-CHO)为单体, 通过醛胺缩合反应合成了富氮的新型COF材料——TPT-DMB COF. 吸附实验表明, 制备产物对气态碘具有大容量、高效和可逆的吸附特性, 最大吸附容量可达5150 mg g^{-1}, 高于绝大多数已报道的吸附剂材料. 这些特性使该材料在放射性碘的富集与分离领域具有极大的应用前景.

关键词 共价有机框架, 富氮, 碘, 大容量, 吸附性能

1 引言

核能是人类未来最有前途的清洁能源之一[1]. 但随着核工业的不断发展, 核废物的产生也日益增加. 此外, 乏燃料中含有大量的原料铀和裂变产生的大量的固态和气态的放射性元素, 如果不加以回收和处理, 将对生态环境和人体健康产生严重的危害[2,3]. 相对于固体放射性废物来说, 气态放射性废物因具有很大的流动性, 易随气流迁移, 故其污染面积更大, 危害也更强[4]. 放射性碘是气体放射性核废物中最重要的放射性污染物. 其主要存在形态有^{125}I、^{129}I和^{131}I, 在这些碘的同位素中, ^{125}I和^{131}I是毒性相对较大的放射性污染物. 对切尔诺贝利和福岛等核事故研究也表明, 放射性碘类污染物是众多放射性物质中危害最大的[5]. 因此, 核电站废气中气态碘的富集和储存已经成为全世界放射性废气处理中最为重要的问题.

目前, 人们主要使用干法除尘、液体吸收和固相吸附等方法去除气体中的放射性碘[6]. 干法除尘对放射性气体的处理效率低, 主要用于放射性气溶胶的处置. 液体吸收法虽然有较高的吸收效率, 但其流动性

引用格式: Tan W, Guo X, Zhang S, Li Y, Zhang M, Li X, Li X, Ma L, Li S. Synthesis of nitrogen-rich covalent organic framework and its adsorption property for volatile iodine. *Sci Sin Chim*, 2019, 49: 207–214, doi: 10.1360/N032018-00156

© 2018 《中国科学》杂志社

大、不易存储、易产生二次污染, 更为重要的是其稳定性差、易解吸, 在实际应用中很少使用. 固相吸附法是最为常用的放射性气体碘的富集和储存方法, 被广泛研究和应用. 已经研究和报道的碘固相吸附材料主要分为改性碳材料、无机多孔材料、金属有机框架材料、氢键有机框架材料和多孔有机聚合物材料等. 后面三种多孔材料因其对气态碘的吸附容量高, 是目前研究的热点领域. 共价有机框架(covalent organic framework, COF)是一类新兴的结晶性多孔聚合物, 它是属于多孔有机聚合物中比较特殊的一种材料. 自2005年Yaghi等[7]制备出共价有机框架材料以来, COF材料已在气体储存与分离、超疏水界面、催化、能量转换、储能和光电等方面表现出极为突出的应用潜力.

COF材料不仅结构规整、孔道有序、比表面积大, 而且具有高度灵活的分子可设计性和孔道结构可调控性[8,9], 在气态碘吸附材料的设计与制备领域具有巨大的研究价值和应用前景. Yin等[10]将共价有机框架材料用于气态碘的摄取, 但是该研究使用的单体合成困难, 目标COF材料制备需要严苛的惰性氛围及较高的反应温度, 且其对碘的吸附动力学缓慢, 不利于大规模制备和实际的应用.

据研究报道, 富氮结构和富电子的π-π共轭体系能够为碘的吸附提供有效的结合位点, 特别是大量氮原子的存在, 极大可能能够提高材料对碘的吸附能力[11,12]. 因此, 设计和筛选合成方法简单、氮含量高、吸附容量大的COF材料以用于碘的富集与储存仍是具有重要现实意义的研究方向.

本文使用高含氮化合物2,4,6-三对甲酰苯氧基-1,3,5-三嗪(TPT-CHO)为单体, 通过醛胺缩合反应合成出了具有富氮结构的COF材料TPT-DMB COF, 研究其对碘的吸附性能, 希望制备出具有高效、大吸附容量等优异性能的气态碘吸附材料.

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

实验试剂包括: 三聚氯氰(分析纯, 阿拉丁试剂(中国)有限公司)、对羟基苯甲醛(分析纯, 阿拉丁试剂(中国)有限公司)、邻联甲苯胺(分析纯, 阿拉丁试剂(中国)有限公司)、二甲基甲酰胺(分析纯, 天津市致远化学试剂有限公司)、碘单质(分析纯, 阿拉丁试剂(中国)有限公司)、均三甲苯(分析纯, 阿拉丁试剂(中国)有限公司)、二氧六环(分析纯, 阿拉丁试剂(中国)有限公司).

实验所用仪器及设备有: JD200-3 电子天平(沈阳龙腾电子有限公司, 中国)、核磁共振(Bruker Avance III HD, 德国)、扫描电子显微镜(FEI Company, Oregon, 美国)、元素分析仪(Carlo-Erba 1106, 意大利)、热重分析仪(TGA meter, SDTQ600, 美国)、拉曼光谱(LabRAM HR, 美国)、X射线衍射仪(Shimadzu XRD6100, 日本)、101-1型电热鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司, 中国)、DZF-6050 真空干燥箱(上海齐欣科学仪器有限公司, 中国)、玻璃仪器气流烘干器(郑州汇成科工贸有限公司, 中国).

2.2 共价有机框架材料的合成

2.2.1 单体TPT-CHO的合成

称取7.45 g (61.0 mmol)对羟基苯甲醛溶解于100 mL丙酮和H_2O (1/1, *v*/*v*)的混合溶液中, 在冰浴条件下加入2.48 g 氢氧化钠, 磁力搅拌30 min. 缓慢滴加50 mL丙酮溶解的三聚氯氰(3.7 g, 20.0 mmol)溶液, 继续搅拌1 h, 后使其在80℃下搅拌回流2 h, 自然冷却. 将反应后的溶液倒入300 mL蒸馏水中, 形成大量白色固体. 过滤, 固体粉末用10%的碳酸钠溶液洗涤2~3次, 真空干燥. 将获得的白色固体粉末用乙酸乙酯重结晶, 获得白色晶状产物TPT-CHO 7.82 g (产率为88.9%). ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$) δ:9.99 (s, 3H), 7.92 (d, J=8.7 Hz, 6H), 7.32 (d, J=8.5 Hz, 6H) (图1).

2.2.2 共价有机框架材料TPT-DMB COF的合成

称取63.7 mg (0.3 mmol)邻联甲苯胺(DMB)装入10 mL玻璃耐压瓶中, 然后加入1 mL均三甲苯/二氧六环(1:1, *v*/*v*)混合溶剂, 于超声仪中超声5 min, 形成均匀分散液. 再称取单体TPT-CHO (88.4 mg, 0.2 mmol)置于另一10 mL玻璃瓶中, 同时加入1 mL均三甲苯/二氧六环(1:1, *v*/*v*)混合溶剂, 超声5 min, 形成均匀分散液. 将形成的TPT-CHO分散液转移至上述邻联甲苯胺分散液所在的耐压瓶中, 并超声10~20 s使之混合均匀, 然后反复充注保护气(氩气)以排尽空气, 接着缓慢加入乙酸(6 M, 0.2 mL), 密封, 于80℃下静置反应4 d, 有粉末状固体产物沉淀生成. 产物用丙酮、DMF、四氢

呋喃交替洗涤，直到洗涤液变为无色，将固体产物于50℃真空干燥24 h，得到82.6 mg淡黄色固体粉末，产率约为58.5% (图2).

3　结果与讨论

3.1　材料表征

3.1.1　红外谱图分析

图3为TPT-DMB　COF与单体邻联甲苯胺和TPT-CHO的红外光谱对比图. 由红外光谱图可见，TPT-DMB　COF的氨基峰(即位于3300 cm^{-1}附近的系列锐锋)明显消失，且醛基的C=O键的伸缩振动峰(1702 cm^{-1})基本消失，说明了反应单体中的氨基和醛基的消耗. 同时, 在1627 cm^{-1}处有新的峰出现, 这是亚胺键(C=N键)的伸缩振动峰. 通过红外谱图的对比分析证实了在材料的制备过程中反应物发生了醛胺缩聚反应.

3.1.2　元素分析

材料的C、H、O、N的元素分析结果如表1所示. 本研究制备产物TPT-DMB　COF中的C、H、O、N元素的含量与理论值非常接近，说明制备产物的实际结构与理论设计结构是一致的. 由于结构中大量三嗪环和亚胺键的存在，材料的氮含量达到13.76%，是一个富氮的COF材料.

3.1.3　粉末X射线衍射分析

本研究使用粉末X射线衍射(PXRD)测定材料

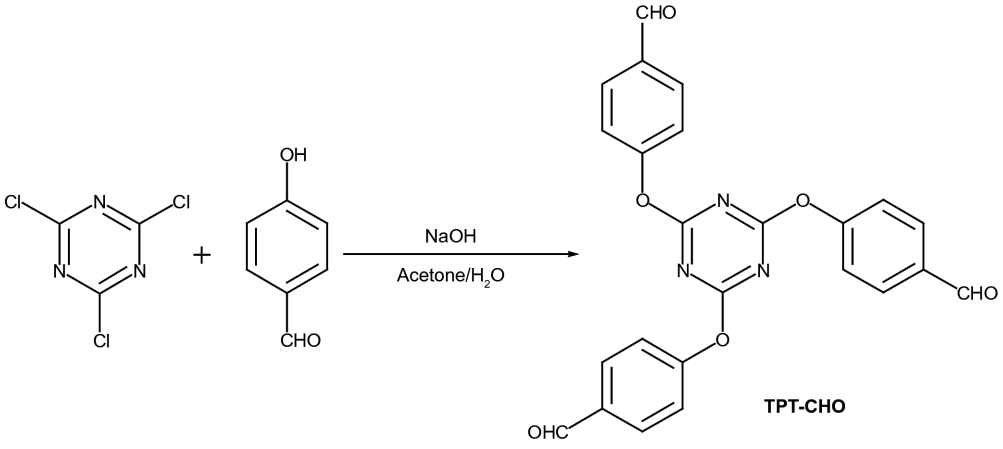


图 1　单体TPT-CHO的合成示意图
Figure 1　Synthesis of the monomer TPT-CHO.

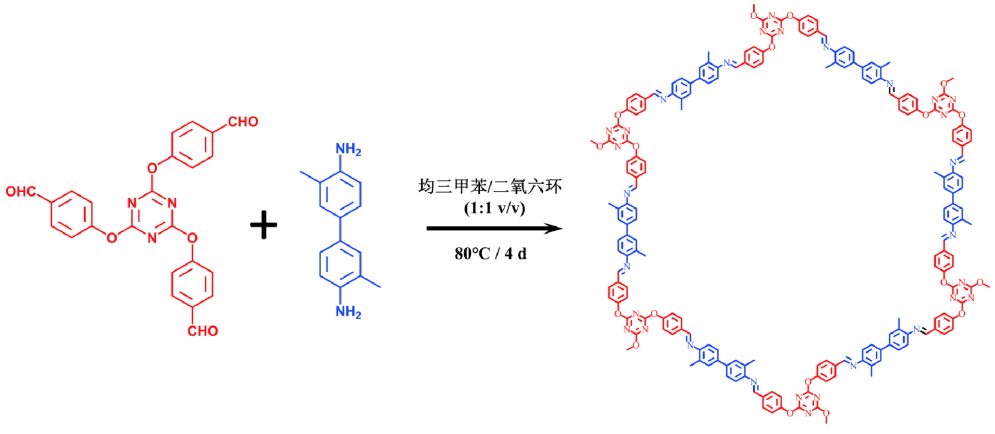


图 2　共价有机框架材料TPT-DMB COF合成示意图(网络版彩图)
Figure 2　The synthesis diagram of TPT-DMB COF (color online).

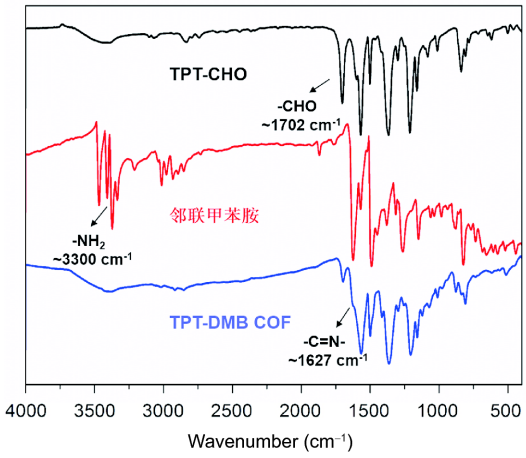


图 3 单体DMB、TPT-CHO和产物TPT-DMB COF的红外谱图(网络版彩图)

Figure 3 FTIR spectra of DMB, TPT-CHO and TPT-DMB COF (color online).

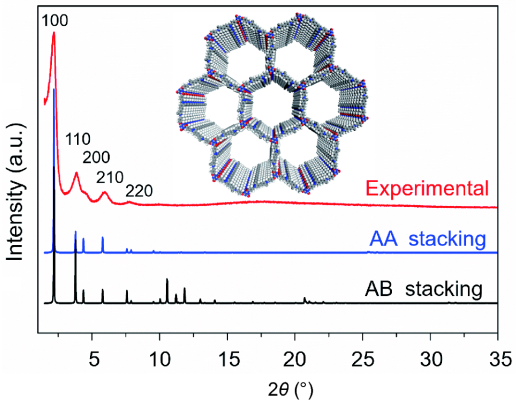


图 4 TPT-DMB COF的PXRD谱图(实验值与AA、AB两种理论堆叠方式比较) (网络版彩图)

Figure 4 PXRD patterns of the TPT-DMB COF (The experimental value (red) is compared with the theoretical stacking modes of AA (blue) and AB (black)) (color online).

表 1 TPT-DMB COF的C/H/O/N元素分析

Table 1 The elemental analysis of TPT-DMB COF

元素	C	N	O	H
实验值	74.29	13.76	6.70	5.25
理论值	75.61	11.60	7.95	4.84

TPT-DMB COF是否具有有序的晶体结构, 并通过实测值和理论模拟值的对比研究以确定材料的真实空间结构. PXRD显示, TPT-DMB COF具有多个明显的衍射峰(图4), 其主要的衍射峰由(100)晶面引起, 位于2.20°. 其他清晰可见的峰位于2θ为3.86°、4.52°、5.96°、7.76°处, 分别归属于(110)、(200)、(210)、(220)晶面. 目前, 大多数已报道的COF材料衍射峰均较少, 一般仅有两个. 本实验制备的TPT-DMB COF明显尖锐的衍射峰的存在说明材料具有良好的晶形, 是一种高结晶度的聚合物材料.

为了进一步研究产物TPT-DMB COF的空间结构及其排布规律, 确认其实测结构和预想结构相符合, 本研究使用Materials Studio软件对TPT-DMB COF的晶体结构进行了模拟, 如图5所示. 通过模拟可知, 材料以*P6/M*空间群构成规则的结构, 并主要以重叠堆积(AA堆叠)和交错堆垛(AB堆叠)方式进行排布. 对比AA堆叠与AB堆叠对应的PXRD谱图与实测结果的区别(图4)发现, 实验测得的衍射峰的位置和相对强度与AA堆叠方式的理论模拟值极为吻合, 说明TPT-DMB

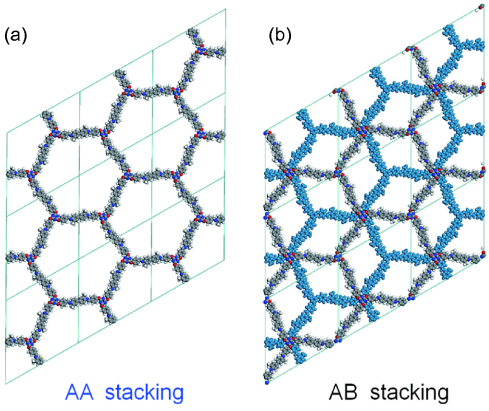


图 5 TPT-DMB COF的空间堆叠方式模拟图(Materials Studio). (a) AA堆叠; (b) AB堆叠 (网络版彩图)

Figure 5 Space-filling models of TPT-DMB COF with AA (a) and AB (b) stacking (color online).

COF主要以AA堆叠方式进行排列和生长.

3.1.4 热重分析

TPT-DMB COF材料的热重分析曲线如图6所示. 材料在加热到100℃过程中的少量质量损失主要归因于材料表面和孔道中的湿存水的蒸发. 当加热到350℃时, TPT-DMB COF的总失重率仅为5%, 而当温度继续升高至500℃时, 材料的失重率仍不超过20%. 热重分析结果表明制备材料具有良好的热稳定性, 该性质为其在高热环境下的应用创造了条件.

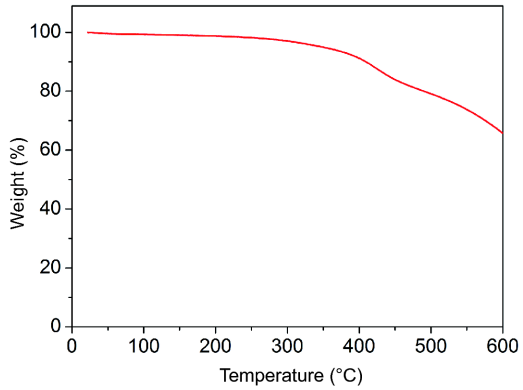


图 6　TPT-DMB COF的热重分析曲线(网络版彩图)
Figure 6　Thermogravimetric analysis curve of TPT-DMB COF (color online).

3.1.5　扫描电子显微镜分析

扫描电子显微镜分析被用于研究TPT-DMB COF的微观形貌. 如图7所示, 扫描电子显微镜图中TPT-DMB COF呈现为直径200~300 nm的蠕虫状结构, 且分布比较均匀. 放大后还可看到材料表面有不规则的类似小片层的结构存在.

3.2　TPT-DMB COF对碘吸附性能研究

3.2.1　碘吸附实验

本研究进行的碘吸附实验主要采用重量法进行测定, 实验步骤如下: 称取10 mg TPT-DMB COF固体粉末置于2 mL的敞口玻璃器皿中, 然后将其放入含有500 mg碘的广口瓶中, 密封, 放入烘箱中, 在75℃环境下进行碘吸附实验. 在设定的时段内(0~48 h)特定时间点取出材料, 冷却并称重, 根据每次称得的重量绘制材料的碘吸附曲线, 如图8所示. 从图中可以看到, 在0~500 min这段时间中TPT-DMB COF对碘的吸附速率是极为快速的, 而在500 min之后吸附速率渐渐趋于平缓, 并逐渐达到吸附饱和. 这个过程中TPT-DMB COF对碘的最高吸附量可达5150 mg g^{-1}. 吸附完成后, 材料由黄色变为黑色.

为了对比评价本研究制备产物的碘吸附性能优劣, 我们将收集到的与气态碘吸附有关的材料及相关文献列表于表2中. 由表可见, 在相同或近似的实验条件下, TPT-DMB COF对碘的吸附容量高于传统的吸附剂材料活性炭和沸石[13,14], 以及新型微孔聚合物[15~21]、MOFs[22,23]等新兴的多孔材料, 也高于已报道的COF材料[10,24]. 因此, TPT-DMB COF在碘吸附领域具有很大的应用潜力.

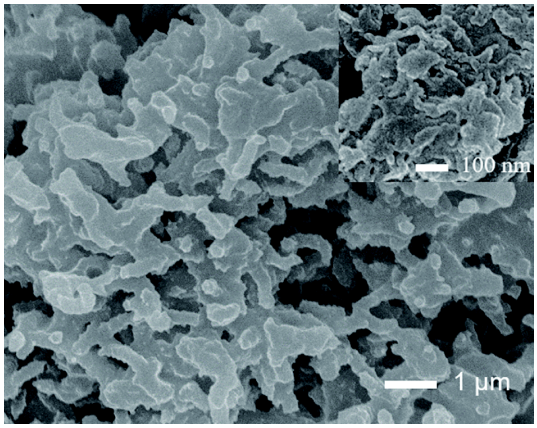


图 7　TPT-DMB COF的扫描电子显微镜图
Figure 7　SEM images of TPT-DMB COF.

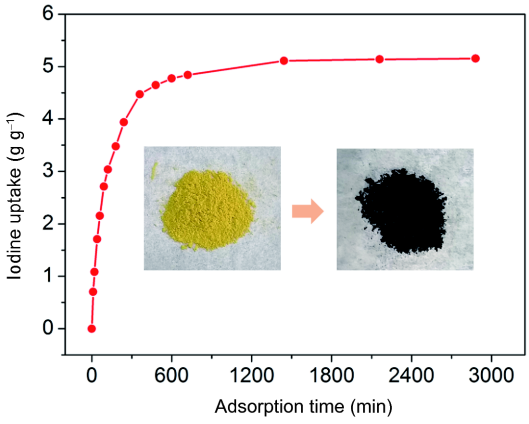


图 8　TPT-DMB COF的碘吸附量随时间变化曲线(内部: 吸附前后直观图) (网络版彩图)
Figure 8　Gravimetric iodine uptake of TPT-DMB COF as a function of time (Inset: photographs before and after iodine uptake) (color online).

3.2.2　碘解吸实验

由于TPT-DMB COF具有较好的热稳定性, 本文使用加热解吸法进行解吸附实验. 将吸附了碘的TPT-DMB COF置于125℃环境下加热解吸, 在设定时段内(0~360 min)的特定时间点取出材料, 冷却并称重, 并根据每次称得的重量来绘制碘的释放百分数随时间变化曲线(图9). 从图中可以看出, 在0~50 min时间段内碘的释放速率极为迅速, 达到80%以上, 随后碘释放速率逐渐趋于平缓, 最终可使材料的碘释放率达到90%以上.

表 2 各种吸附剂材料的碘吸附量对比

Table 2 Comparison of iodine uptake properties of various adsorbing materials

吸附剂	温度(℃)/压力(bar)[a)]	碘吸附量(mg/g)	参考文献
活性炭	75/1	300	[13]
Ag@沸石	95/1	275	[14]
Ag@Mon-POF	70/1	250	[15]
TTPB	75/1	4430	[16]
HCMP-2,-3	85/1	3160, 3360	[17]
BDP-CPP-1,-2	75/1	2830, 2230	[18]
CMPN-2,-3	70/1	1100, 2080	[19]
Azo-Trip	77/1	2330	[20]
NiP-CMP	77/1	2020	[21]
ZIF-8	77/1	1250	[22]
Cu-BTC	75/1	1750	[23]
COF-DL229	75/1	4682	[24]
SIOC-COF-7	75/1	4810	[10]
TPT-DMB COF	75/1	5150	本文

a) 1 bar=10^5 Pa

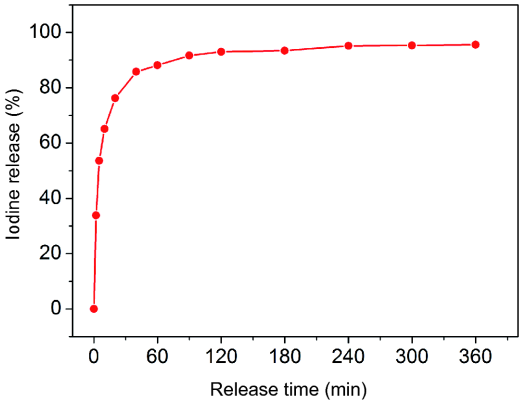


图 9 TPT-DMB COF释放碘的百分数随时间变化曲线(网络版彩图)

Figure 9 The iodine release percentage of TPT-DMB COF as a function of time (color online).

3.2.3 材料复用性实验

由前文可知, TPT-DMB COF在第一次使用时对碘具有较高的吸附和解吸效率. 考虑到实际应用时需面临的成本问题, 我们对材料的重复利用能力进行了考察. 如图10所示, TPT-DMB COF在碘吸附解吸循环三次后, 其碘吸附容量仍可保持较高的水平(大于4600 mg g^{-1}), 且吸附碘的循环百分率仍然超过90%. 由此可见, TPT-DMB COF具有良好的循环使用性能, 可以重复利用, 这一特性使其在放射性碘的吸附解吸领域具有重要的应用价值.

3.2.4 吸附机理探索

为了研究吸附碘以后的材料TPT-DMB COF@I_2中碘的存在形态, 我们采用拉曼光谱法对材料进行了检测和分析, 如图11所示. 吸附碘前, TPT-DMB COF在拉曼光谱中没有明显的特征峰. 而吸附碘后, TPT-DMB COF@I_2在167 cm^{-1}附近均出现了一个最强峰, 这是I_5^- (I_5^-的V型或直线构型)的特征峰[25,26]. 拉曼光

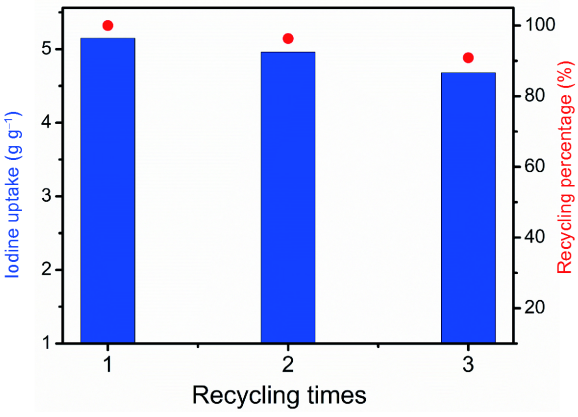


图 10 TPT-DMB COF吸附碘的循环复用性研究(网络版彩图)

Figure 10 Reusability of TPT-DMB COF for iodine uptake (color online).

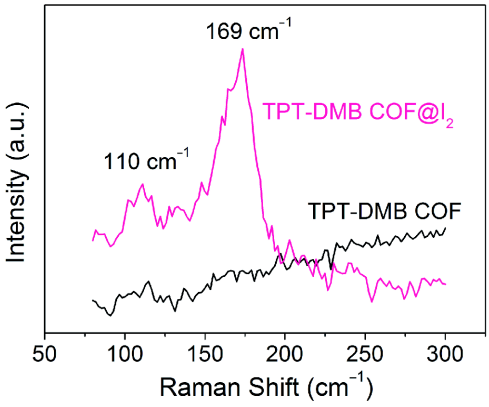


图 11 TPT-DMB COF吸附碘前后的拉曼光谱图(网络版彩图)

Figure 11 Raman spectra of TPT-DMB COF before and after iodine uptake (color online).

谱的分析结果表明, 在材料吸附碘的过程中, 碘客体分子与富电子的主体COF材料之间发生了电荷相互作用, 存在电荷转移, 从而形成了I_5^-电荷转移复合物. 或许正是由于碘以I_5^-复合物的形式吸附于材料活性位点上, 从而使得材料表现出可观的碘吸附容量.

4　结论

本文采用溶剂热法, 通过醛胺缩合反应合成了富氮的新型COF材料TPT-DMB COF. 材料具有结构规整有序、骨架密度低、结晶性好、热稳定性高等突出的优势. 通过对碘的吸附、解吸实验和材料循环利用实验研究发现, TPT-DMB COF对气态碘具有大容量、高效和可逆的吸附特性, 其最大吸附容量可达5150 mg g^{-1}, 高于绝大多数已报道的吸附剂材料. 这一特性使其在放射性核废物后处理过程中放射性碘的富集与分离领域具有极大的应用前景. 本研究对碘的超富集材料的设计与制备具有重要的指导意义.

参考文献

1 Mounfield PR. *World Nuclear Power*. London: Routledge, 2017
2 Ewing RC. *Nat Mater*, 2015, 14: 252–257
3 Pang H, Wang X, Yao W, Yu S, Wang X. *Sci Sin Chim*, 2018, 48: 58–73
4 Verde G. *J Fundam Appl Sci*, 2017, 9: 1211–1224
5 Steinhauser G, Brandl A, Johnson TE. *Sci Total Environ*, 2014, 470-471: 800–817
6 Haefner DR. Tranter TJ. *Methods of Gas Phase Capture of Iodine from Fuel Reprocessing Off-Gas: A Literature Survey*. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2007
7 Côté AP, Benin AI, Ockwig NW, O'Keeffe M, Matzger AJ, Yaghi OM. *Science*, 2005, 310: 1166–1170
8 Chen X, Huang N, Gao J, Xu H, Xu F, Jiang D. *Chem Commun*, 2014, 50: 6161–6163
9 Sun B, Mo Y, Wang L, Yue J, Wang D. *Sci Sin Chim*, 2016, 46: 994–1006 (in Chinese) [孙兵, 莫依萍, 汪利梅, 岳婕妤, 王栋. 中国科学: 化学, 2016, 46: 994–1006]
10 Yin ZJ, Xu SQ, Zhan TG, Qi QY, Wu ZQ, Zhao X. *Chem Commun*, 2017, 53: 7266–7269
11 Qian X, Zhu ZQ, Sun HX, Ren F, Mu P, Liang W, Chen L, Li A. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8: 21063–21069
12 Yan Z, Yuan Y, Tian Y, Zhang D, Zhu G. *Angew Chem Int Ed*, 2015, 54: 12733–12737
13 Ma H, Chen JJ, Tan L, Bu JH, Zhu Y, Tan B, Zhang C. *ACS Macro Lett*, 2016, 5: 1039–1043
14 Chapman KW, Chupas PJ, Nenoff TM. *J Am Chem Soc*, 2010, 132: 8897–8899
15 Katsoulidis AP, He J, Kanatzidis MG. *Chem Mater*, 2012, 24: 1937–1943
16 Geng T, Zhu Z, Zhang W, Wang Y. *J Mater Chem A*, 2017, 5: 7612–7617
17 Liao Y, Weber J, Mills BM, Ren Z, Faul CFJ. *Macromolecules*, 2016, 49: 6322–6333
18 Zhu Y, Ji YJ, Wang DG, Zhang Y, Tang H, Jia XR, Song M, Yu G, Kuang GC. *J Mater Chem A*, 2017, 5: 6622–6629
19 Chen Y, Sun H, Yang R, Wang T, Pei C, Xiang Z, Zhu Z, Liang W, Li A, Deng W. *J Mater Chem A*, 2015, 3: 87–91
20 Dang QQ, Wang XM, Zhan YF, Zhang XM. *Polym Chem*, 2016, 7: 643–647
21 A S, Zhang Y, Li Z, Xia H, Xue M, Liu X, Mu Y. *Chem Commun*, 2014, 50: 8495–8498
22 Sava DF, Rodriguez MA, Chapman KW, Chupas PJ, Greathouse JA, Crozier PS, Nenoff TM. *J Am Chem Soc*, 2011, 133: 12398–12401
23 Sava DF, Chapman KW, Rodriguez MA, Greathouse JA, Crozier PS, Zhao H, Chupas PJ, Nenoff TM. *Chem Mater*, 2013, 25: 2591–2596
24 Wang C, Wang Y, Ge R, Song X, Xing X, Jiang Q, Lu H, Hao C, Guo X, Gao Y, Jiang D. *Chem Eur J*, 2018, 24: 585–589
25 Pei C, Ben T, Xu S, Qiu S. *J Mater Chem A*, 2014, 2: 7179–7187
26 Svensson PH, Kloo L. *Chem Rev*, 2003, 103: 1649–1684

Synthesis of nitrogen-rich covalent organic framework and its adsorption property for volatile iodine

Wang Tan[†], Xinghua Guo[†], Shun Zhang, Yang Li, Meicheng Zhang, Xing Li, Xiaofeng Li, Lijian Ma[*], Shoujian Li[*]

College of Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China
†These authors contributed equally to this work.
**Corresponding authors (email: ma.lj@hotmail.com; sjli000616@scu.edu.cn)*

Abstract: Radioactive iodine is a very important pollutant among the radioactive nuclear waste gases because of its easy volatile, high biocompatibility and mobility. Once leaking into the environment, it will bring huge harm to ecology environment. Therefore, the development of high efficient adsorption materials for iodine is of great significance. Covalent organic framework (COF) is a kind of novel porous crystal polymer with highly flexible molecular designability and regulable channel structure. COF containing nitrogen-rich structure and electron-rich π-π conjugated system can provide effective binding sites for iodine adsorption, and is a potential adsorption material. In this paper, a nitrogen-rich monomer, 2,4,6-tris(4-formylphenoxy)-1,3,5-triazine (TPT-CHO) was chosen to construct a new nitrogen-rich COF (TPT-DMB COF) through the condensation of aldehyde and amine. It was found by adsorption experiments that TPT-DMB COF showed large capacity, high efficiency and reversible adsorption properties for volatile iodine. The maximum adsorption capacity can reach 5150 mg g^{-1}, higher than that of most reported adsorption materials. The advantages endow the material with great application prospects in the field of enrichment and separation of radioactive iodine.

Keywords: covalent organic framework, nitrogen-rich, iodine, large capacity, adsorption property

doi: 10.1360/N032018-00156