

# 多纳米孔道配位聚合物的研究进展

周秋香 王延吉\* 赵新强 岳琳

(河北工业大学化工学院 天津 300130)

**摘 要** 介绍了新型多功能材料——多纳米孔道配位聚合物在合成、表征及应用方面的研究现状和发展趋势。目前利用自组装方法设计合成的多纳米孔道的配位聚合物有三种空间结构,即一维、二维、三维多纳米孔道配位聚合物。该聚合物在选择性催化、类分子筛、主客体分子(离子)交换等方面有很好的应用前景。

**关键词** 多纳米孔道 配位聚合物 研究进展

## Developments of Porous Coordination Polymer with Nanometer-Sized Channel

Zhou Qiuxiang, Wang Yanji\*, Zhao Xinqiang, Yue Lin

(School of Chem. Tech., Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

**Abstract** This paper presents the status and progress of the new functional material-porous coordination polymer with nanometer-sized channel in the syntheses and characterization and application. porous coordination polymer with nanometer-sized have three geometric structure by design and syntheses of self-assembly reaction. There are many one-,two- and three-dimensional porous coordination polymer with nanometer-sized channel. It has been found a wide range of technological applications in catalysts, acting as molecular sieves, molecular (ion) exchangers.

**Key words** Nanometer-sized channel, Porous coordination polymer, Development

对多纳米孔道配位聚合物的研究已成为无机化学与材料科学最为活跃的研究领域之一。多纳米孔道配位聚合物是由无机化合物与有机化合物进行配位聚合所形成的一种多功能材料,即利用过渡金属离子与有机配体采用自组装的方法合成的具有多条纳米孔道的配位聚合物。它具有结构可塑、稳定、坚固等特点,在选择性催化、类分子筛、主客体分子交换、电磁学等方面有很好的应用前景<sup>[1~5]</sup>。

近年来,随着配位聚合物晶体工程的发展以及合成、表征技术的提高,人们设计了一些有机配体使之与过渡金属离子配位自组装,获得了一些一维、二维、三维多孔道配位聚合物。本文中,笔者从多纳米孔道配位聚合物空间结构方面介绍其合成、表征及应用的研究进展。

### 1 一维多纳米孔道配位聚合物的合成、表征及应用

一维多孔配位聚合物的结构单元有直线长链型和锯齿链型。如图 1 所示:

周秋香 女, 39 岁, 博士生, 副教授, 现从事多功能材料的研究。\*联系人

国家自然科学基金资助项目(20176008)

2003-01-07 收稿

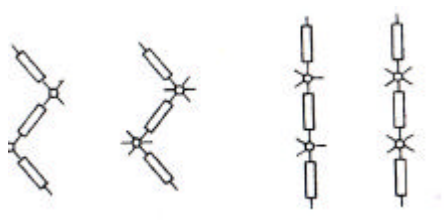
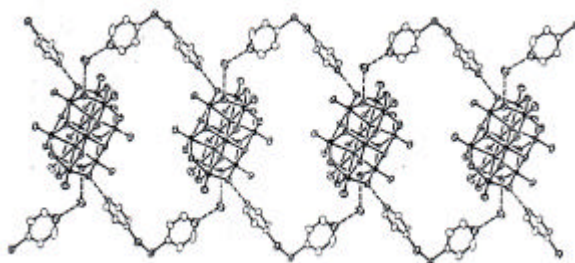
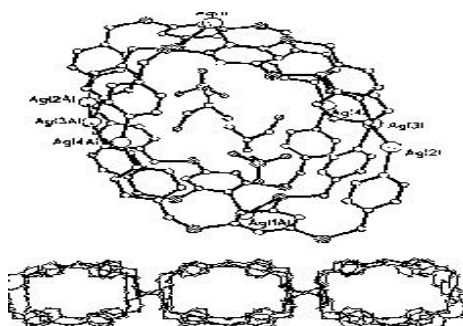


图 1 一维多孔配位聚合物的结构

Fig.1 Structure of one dimensional porous coordination polymer

目前合成的直线链结构和锯齿链型的多纳米孔道配位聚合物主要以刚性小分子如 4,4'-联吡啶(4,4'-bpy)与过渡金属离子自组装为主,在这些刚性配体配位的过程中,由于配体配位齿间的间距与夹角没有明显的改变,使得配位聚合物形成过程中具有最少的不确定因素。过渡金属离子以  $\text{Cu}(\text{II})$  为主,如:  $[\text{Cu}(4,4'\text{-bpy})(\text{C}_5\text{H}_4\text{F}_3\text{O}_2)]^{[9]}$ 、 $[(\text{CH}_3)_3\text{Sn}(4,4'\text{-bpy})]^{[10]}$ 、 $[\text{Cd}(4,4'\text{-bpy})_3(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 2\text{ClO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}^{[11]}$ 、 $[\text{Cu}(4,4'\text{-bpy})(\text{tta})_2] \cdot \text{DMF}^{[12]}$ 、 $[\text{Cu}(4,4'\text{-bpy})(\text{H}_2\text{O})_2(\text{ClO}_4)_2] \cdot 4,4'\text{-bpy}^{[13]}$ 、 $[\text{Cu}(2,2'\text{-bpy})(4,4'\text{-bpy})(\text{ClO}_4)_2]^{[14]}$ 、 $[\text{Cu}(\text{tta})(4,4'\text{-bpy})]^{[15]}$ 、 $[\text{Cu}(4,4'\text{-bpy})(\text{CH}_3\text{CN})_2]\text{BF}_4^{[16]}$ 、 $[\text{Cu}_2(\text{NO}_3)_2((\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{P})_2(4,4'\text{-bpy})]^{[17]}$ 、 $[\text{Zn}((\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_2\text{S}_2\text{P})_2(4,4'\text{-bpy})]^{[18]}$ 、 $[(\text{Cu}_2\text{Cl}_2)(\text{pPh}_3)_2(4,4'\text{-bpy})]^{[19]}$  及  $[\text{Cu}(4,4'\text{-bpy})_4]\text{Mo}_8\text{O}_{26}^{[20]}$ 、这些聚合物具有多条纳米孔道。

近几年,人们还利用一些其它配体合成了一些一维多孔纳米配位聚合物。如在乙醇中利用  $\text{AgBF}_4$  和吡嗪(pyrazine)(1:1)反应,可得多孔道配位聚合物  $[\text{Ag}_2(\text{pyz})](\text{BF}_4)^{[21]}$ 。通过在水/乙醇溶液中混合含有  $\text{VO}_2\text{SO}_4$  的溶液和 2-(4-吡啶基)二硫化物( $\text{H}_2\text{dpds}$ )反应得到了一维多纳米孔道配位聚合物  $(\text{H}_2\text{dpds})_2[\text{V}_{10}\text{O}_{26}(\text{OH})_2] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , 该聚合物网络通道大约为  $2 \times 4 \text{ \AA}$ 。其结构如图 2 所示<sup>[22]</sup>。

图 2  $(\text{H}_2\text{dpds})_2[\text{V}_{10}\text{O}_{26}(\text{OH})_2] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  的结构Fig.2 Structure of  $(\text{H}_2\text{dpds})_2[\text{V}_{10}\text{O}_{26}(\text{OH})_2] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 图 3  $[\text{Ag}_7(\text{tpst})_4(\text{ClO}_4)_2(\text{NO}_3)_3]_n$  的结构Fig.3 Structure of  $[\text{Ag}_7(\text{tpst})_4(\text{ClO}_4)_2(\text{NO}_3)_3]_n$

洪茂椿等合成了 $[\text{Ag}_7(\text{tpst})_4(\text{ClO}_4)_2(\text{NO}_3)_5]_n$ (未报道结果), 结构如图 3 所示, 该聚合物可以容纳 2 个  $\text{ClO}_4^-$  离子 2 个 DMF 分子<sup>[23]</sup>。

一维多纳米孔道配位聚合物结构测定主要是通过 X 射线衍射试验获得的。对其应用研究得不是很多, 目前在分子吸附、类分子筛等功能方面很少报道。

## 2 二维多孔配位聚合物

二维多纳米孔道配位聚合物具有平面层状结构, 层和层之间可以形成通道。其结构单元如图 4 所示。

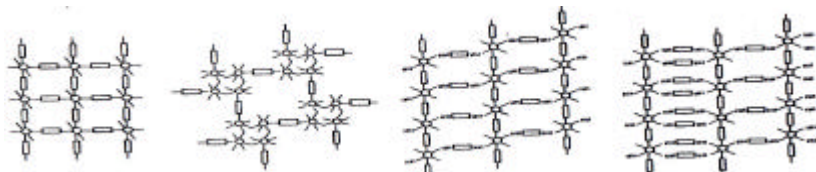


图 4 二维多孔配位聚合物的结构

Fig.4 Structure of two dimensional porous coordination polymer

对二维多纳米孔道配位聚合物的研究是从近几年开始的, 所用的配体以吡嗪及其衍生物为多。Fujita 通过  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  和 4,4'-联吡啶在  $\text{H}_2\text{O}$ -EtOH 混合溶剂中反应得到了聚合物 $[\text{Cd}(4,4'\text{-bpy})_2(\text{NO}_3)_2] \cdot \text{C}_6\text{H}_4\text{Br}_2$ , 形成二维的平面结构, 他发现聚合物 $[\text{Cd}(\text{bpy})_2] \cdot (\text{NO}_3)_2$  具有很好的催化活性, 它能加速氰基甲基硅烷基化反应<sup>[24]</sup>。

Carlucci 等用  $\text{AgBF}_4$  和吡嗪(pyz)在乙醇中反应, 当  $\text{AgBF}_4$  和吡嗪的摩尔比为 1:2 时, 可得到具有二维网状结构的多孔配位聚合物 $[\text{Ag}_2(\text{pyz})_3](\text{BF}_4)_2$ <sup>[21]</sup>。

Kondo 等设计了一个二维的骨架结构 $[\text{Cu}(\text{pzdc})_2(\text{L})]_n$ , 使之与一个柱状配体连接, 合成了二维多孔配位聚合物 $[\text{Cu}(\text{pzdc})_2(\text{L})] \cdot \text{XH}_2\text{O}$ (pzdc 为 2,3-二羧基吡嗪, L 为吡嗪), 其结构如图 5 所示, 该聚合物的孔道可用于甲烷气体的吸附<sup>[25]</sup>。

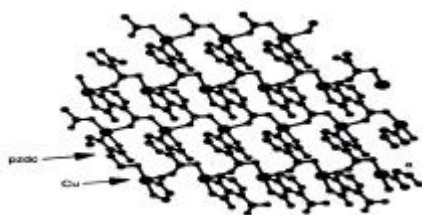


图 5  $[\text{Cu}(\text{pzdc})_2(\text{L})] \cdot \text{XH}_2\text{O}$  的结构

Fig.5 Structure of  $[\text{Cu}(\text{pzdc})_2(\text{L})] \cdot \text{XH}_2\text{O}$

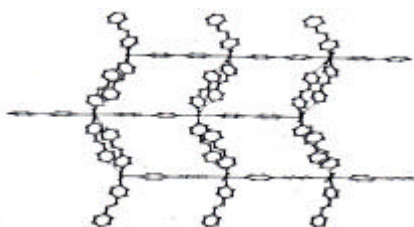


图 6  $[(\text{H}_2\text{O})_2\text{Zn}(\text{bpy})(\text{bpen})_2] \cdot 1.75(\text{bpen}) \cdot 0.25(\text{bpy}) \cdot \text{NO}_3 \cdot 4.45\text{H}_2\text{O}$  的结构

Fig.6 Structure of  $[(\text{H}_2\text{O})_2\text{Zn}(\text{bpy})(\text{bpen})_2] \cdot 1.75(\text{bpen}) \cdot 0.25(\text{bpy}) \cdot \text{NO}_3 \cdot 4.45\text{H}_2\text{O}$

2001 年 Lu 等用  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  与 bpy、bpen 为反(1,2-双(4-吡啶)乙烷)在  $120^\circ\text{C}$  热水中反应得到一个二维网状结构聚合物 $[(\text{H}_2\text{O})_2\text{Zn}(\text{bpy})(\text{bpen})_2] \cdot 1.75(\text{bpen}) \cdot 0.25(\text{bpy}) \cdot \text{NO}_3 \cdot 4.45\text{H}_2\text{O}$ 。所形成的孔道可以容纳客体分子<sup>[26]</sup>, 结构如图 6 所示。

除此之外, 还合成了一些二维多纳米孔道配位聚合物, 如:  $[\text{Co}(4,4'\text{-bpy})_2(\text{NCS})_2] \cdot 2(\text{CH}_3\text{CH}_2)_2\text{O}$ <sup>[27]</sup>、 $[\text{Cu}(4,4'\text{-pby})_2(\text{C}_3\text{H}_2\text{O}_4)(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot \text{H}_2\text{O}$ <sup>[28]</sup>、 $[\text{Mn}(4,4'\text{-pby})(\text{H}_2\text{O})_2(\text{NCS})_2](4,4'\text{-bpy})$ <sup>[29]</sup>、 $[\text{Zn}(4,4'\text{-bpy})(\text{H}_2\text{O})_4] \cdot 2\text{NO}_3 \cdot 2(4,4'\text{-bpy}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ <sup>[30]</sup>等。对其结构测定以 X 射线衍射试验、热分析测定、孔结构测定为主。

### 3 三维多孔配位聚合物

三维多纳米孔道配位聚合物占有重要的地位, 而且数量较多, 主要是利用其空间结构, 进行选择催化、分子识别、主客体分子交换等, 对它的研究主要集中在合成合适的有机配体以及合成孔道大小适宜的配位聚合物。三维多纳米孔道配位聚合物的空间结构如图 7 所示。目前已经报道了一些三维多纳米孔道配位聚合物的合成与应用。

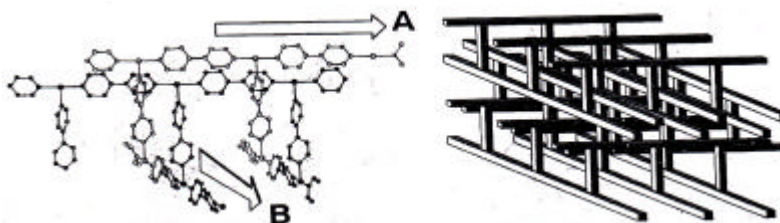


图 7 三维多孔配位聚合物的结构

Fig.7 Structure of three dimensional porous coordination polymer

Robson 等利用 2,4,6-三(4-吡啶)-1,3,5-三嗪(tpt)与  $\text{Zn}^{2+}$  链接, 在四氯乙烷、四乙胺氰化物/甲醇中, 合成了三维的配位聚合物 $[\text{Zn}(\text{CN})(\text{NO}_3)(\text{tpt})_{2/3} \cdot 3/4\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_4 \cdot 3/4\text{CH}_3\text{OH}]_n$ , 在该晶体中形成了一条条通道, 客体离子或小分子可以在通道中移动<sup>[31]</sup>。

Yaghi 等利用银盐与 4,4'-bpy 配位聚合形成了一个 T 型结构聚合物 $[\text{Ag}(4,4'\text{-bpy})] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 每个 Ag 与 4,4'-bpy 两个配位, 并通过 4,4'-bpy 形成一条长链, 各长链之间通过 Ag-Ag 金属键形成三维网状结构, 可以容纳溶剂小分子<sup>[32]</sup>。

Goodgame 等报道了一种新型的类分子筛 $[\text{Zn}(\text{dimio})_2]_n \cdot n\text{DMF}$ , 该聚合物具有纳米孔洞, 是由  $\text{ZnBr}_2$  与 2,4,6-三(1-咪唑基)-1,3,5-三嗪(timt)在 DMF 溶液中反应制得的, 可以吸附和释放溶剂分子<sup>[33]</sup>。

$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  与  $\text{H}_3(\text{tma})$  在水/乙醇溶液中可合成一种新型类分子筛 $[\text{Cu}(\text{tma})_2(\text{H}_2\text{O})_3]_n$  (tma=1,3,5-苯三酸)在  $240^\circ\text{C}$  下呈稳定结构(如图 8)<sup>[34]</sup>。

用  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  和 4,4'-bpy 在  $50^\circ\text{C}$  回流状态下加入  $\text{NaClO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  得到聚合物 $[\text{Cu}(4,4'\text{-bpy})(\text{H}_2\text{O})_2(\text{ClO}_4)_2]_n$ , 该聚合物分子通过  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ClO}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和游离的 4,4'-bpy 以氢键连接形成三维网状结构, 该聚合物经测定具有较好的磁性<sup>[35]</sup>。利用金属离子  $\text{M}(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn})$  的硝酸盐与 4,4'-联吡啶在丙酮/乙醇溶液中反应合成了三维结构的多纳米孔道配位聚合物 $\{[\text{M}_2(4,4'\text{-bpy})_3(\text{NO}_3)_4](\text{H}_2\text{O})\}_n$ , 该聚合物可以吸附小的气体分子  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$ , 并进行了吸附试验。结果表明, 在相同温度、压力下吸附甲烷的量最多<sup>[36]</sup>。

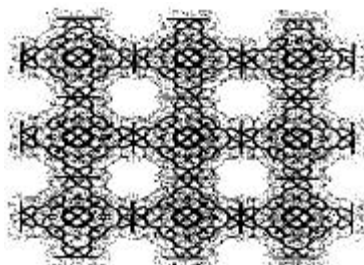


图 8  $[\text{Cu}(\text{tma})_2(\text{H}_2\text{O})_3]$  的结构  
Fig.8 Structure of  $[\text{Cu}(\text{tma})_2(\text{H}_2\text{O})_3]$

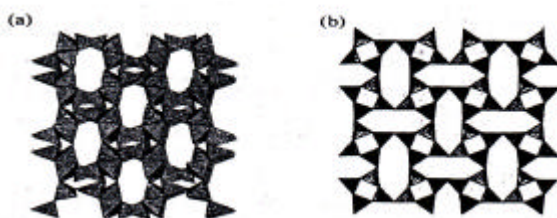


图 9  $[\text{Cu}(\text{pyrimidine})_2]\text{BF}_4$  的结构  
Fig.9 Structure of  $[\text{Cu}(\text{pyrimidine})_2]\text{BF}_4$

$[\text{Cu}(\text{pyrimidine})_2]\text{BF}_4$  具有类沸石的功能<sup>[37]</sup>, 其结构如图 9 所示。采用芳香环平面多齿吡啶配体 2,4,6-三吡咯-1,3,5-三嗪(tpt)与 $[\text{Pd}(\text{en})(\text{NO}_3)_2]$ (en 为乙二醇)在乙醇/水溶液中反应, 可以得到具有纳米腔的聚合物  $\text{Pd}(\text{tpt})_4(\text{en})_6(\text{NO}_3)_{12}$ , 腔的尺寸大约  $14 \times 5 \text{ \AA}$ , 腔内可容纳多个客体分子, 并可在腔内进行取代和催化反应<sup>[38]</sup>。采用三齿有机桥联配体 2,4,6-叠氨基苯基-1,3,5-三酚(tapp)与二价的铜离子反应, 可以得到大约  $800 \text{ \AA}^3$  容量的纳米笼状聚合物, 笼内可以容纳 6 个 DMF 分子。具有三个二齿配位的桥联配体 1,4,5,8,9,12-六氮杂苯并菲(hat), 可以和  $\text{AgClO}_4$  在硝基甲烷中反应, 得到聚合物 $[\text{Ag}(\text{hat})\text{ClO}_4] \cdot 2\text{CH}_3\text{NO}_2$ , 使之容纳溶剂分子<sup>[39]</sup>。

Fujita 等<sup>[40]</sup>采用平面六齿的有机桥联配体 3,5-嘧啶基-1,3,5-三苯(tpb), 与二价的金属钯配合物 $[\text{Pd}(\text{NO}_3)_2(\text{en})]$ 合成了聚合物 $[\text{Pd}_{18}(\text{en})_{18}(\text{tpb})_6](\text{NO}_3)_{36}$ , 它具有  $900 \text{ \AA}^3$  容量, 可容纳数个  $\text{NO}_3^-$  离子和 DMF 分子, 如图 10 所示。

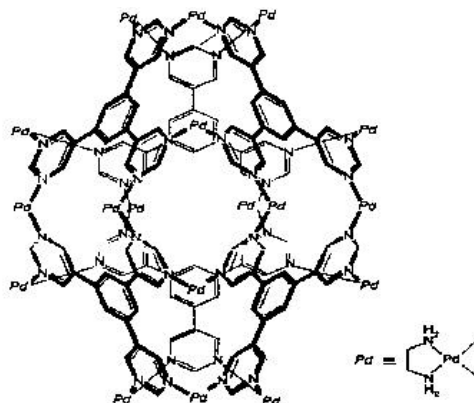


图 10  $[\text{Pd}_{18}(\text{en})_{18}(\text{tpb})_6](\text{NO}_3)_{36}$  的结构  
Fig.10 Structure of  $[\text{Pd}_{18}(\text{en})_{18}(\text{tpb})_6](\text{NO}_3)_{36}$



在水/乙烯基乙二醇(1:3)中,混合  $\text{Cu}(\text{BF}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$  和 4,4'-联吡啶,得到具有三维结构的 $[\text{CuSiF}_6(4,4'\text{-bpy})_2]_n$ ,利用它可以吸附甲烷气体,并和沸石比较了吸附量,在相同条件下该聚合物比甲烷的吸附量大<sup>[41]</sup>,如图 11 所示。

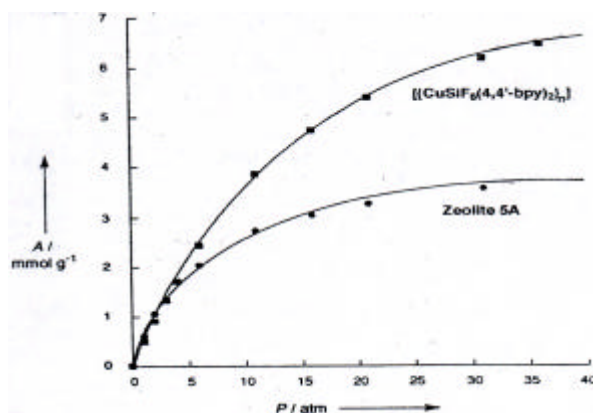


图 11  $[\text{CuSiF}_6(4,4'\text{-bpy})_2]_n$  的吸附曲线

Fig.11 Adsorption curve of  $[\text{CuSiF}_6(4,4'\text{-bpy})_2]_n$

利用含有  $N,N'$ -给予体配体(吡嗪; 4,4'-三甲基联吡啶; 联 4 吡啶硫化物)与铑和铱的氢化物 $[\text{Rh}(\text{H}_2)(\text{PPh}_3)_2(\text{solvent})(\text{EtOH})]\text{ClO}_4$ 、 $[\text{Ir}(\text{H}_2)(\text{PPh}_3)_2(\text{Me}_2\text{CO})_2]\text{BF}_4$  在丙酮或乙醇中反应,得到纳米孔道三维聚合物<sup>[42]</sup>。

此外,还有一些三维纳米孔道聚合物被合成与表征,如:  $[\text{Cu}(2,4\text{-pydc})_2(\text{H}_2\text{O})] \cdot 2\text{Et}_3\text{NH}^{[42]}$ 、 $[\text{ZnCu}(2,4\text{-pydc})_2(\text{H}_2\text{O})_3(\text{DMF})] \cdot \text{DMF}^{[43]}$ 和 $[\text{Zn}_4(\text{OH})_2(\text{bdc})_3(\text{DMSO})_4] \cdot \text{H}_2\text{O}$ (bdc 为 1,4-二羧基苯)等<sup>[44]</sup>。

我国化学家对多纳米孔道配位聚合物的研究属于刚刚起步阶段,报道的成果很少,目前研究的部门主要是中国科学院福建物质结构研究所、南京大学等。

综上所述,多纳米孔道配位聚合具有其独特的物理和化学性能,对它的研究已经成为目前无机化学和材料学科最为活跃的研究领域之一。目前,尽管已经合成了不少的多纳米孔道配位聚合物,但目前这个领域的研究还存在着一些问题,如:多纳米孔道还不够大;其微晶较难处理且柔软性较差;作为桥联的有机配体在催化和分离的操作中还不够稳定;孔道吸附和释放溶剂分子方面有待改进等。21 世纪对多孔配位聚合物的研究将是一个蓬勃发展的阶段,我们开展这方面的研究将具有重要的科学意义和巨大的应用前景。

### 参考文献

- [1] S Kitagawa, M Munakata. *Trend Inorg. Chem.*,1993,(1): 3.
- [2] M Munakata, L P Wu, T Kuroda-Sowa. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*,1997, 70: 1727.
- [3] B F Hoskins, R Robson. *J. Am. Chem. Soc.*, 1990, 112: 1546.
- [4] J C MacDonaldo, G M Whitesides. *Chem. Rev.*,1990, 94: 2383.
- [5] G R Desiraju. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*,1995, 34: 2311.
- [6] C Janiak. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*,1997, 36: 1431.
- [7] Y Aoyama, K Endo, T Anzai et al. *J. Am. Chem. Soc.*,1996, 118: 5562.
- [8] O M Yaghi, G Li, H Li. *Nature*, 1995, 378: 703.
- [9] K B Yu. *Acta Crystallogr., Sect. C*, 1991, C47: 2653.
- [10] I Lange, E Wieland, P G Jones et al. *J. Organomet. Chem.*, 1993, 458: 57.

- [11] S D Huang, R G Xiong. *Polyhedron.*, 1997, 16: 3929.
- [12] S H Gou, X Z You, Z Xu et al. *Acta Crystallogr., Sect. C*, 1991 C47: 1303.
- [13] X M Chen, M L Tong, Z N Chen. *Aust. J. Chem.*, 1996, 49: 835.
- [14] C Chem, D Xu, Y Xu et al. *Acta Crystallogr., Sect. C*, 1992, C48: 1231.
- [15] M Li, Z Xu, X You et al. *Polyhedron.*, 1993, 12: 921.
- [16] A S Batsanov, M J Begley, P Hubberstey et al. *J. Chem. Soc., Dalton Trans.*, 1999: 1947.
- [17] P J Prest, J S Moore. *Acta Crystallogr., Sect. C*, C52, 2176, (1996).
- [18] D L Zhu, Y P Yu, G C Gou et al. *Acta Crystallogr. Sect. C*, 1996, C52: 1963.
- [19] J Lu, G Crisci, T Niu et al. *Inorg. Chem.*, 1997, 36: 5140.
- [20] D Hargman, C Zubietta, D J Rose et al. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 1997, 36: 873.
- [21] Li Carlucci, G Coani, D M Proserpio et al. *J. Am. Chem. Soc.*, 1995, 117: 4562.
- [22] M Kondo, K Fujimoto et al. *Chem. Soc. Jpn.*, 1999: 291.
- [23] 洪茂椿. *无机化学学报*, 2000, 16(3): 369~373.
- [24] M Fujita, Y J Kwon. *J. Am. Chem. Soc.*, 1994, 116: 1151.
- [25] M Kondo, T Okubo, A Asami et al. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 1999, 38: 140.
- [26] J Y Lu, Runnels K A, C Norman, *Inorg. Chem.*, 2001, 40: 4516.
- [27] J Lu, T Paliwala, S C Lim et al. *Inorg. Chem.*, 1997, 36: 923.
- [28] J Li, H Zeng, J Chen et al. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, 1997, 1213.
- [29] M X Li, G Y Xie, Y D Gu et al. *Polyhedron.*, 1995, 14: 1235.
- [30] L Cralucci, G Ciani, D M Proserpio et al. *J. Chem. Soc., Dalton Trans.*, 1997, 1801.
- [31] S R Batten, B F Hoskins, R J Robson, *J. Am. Chem. Soc.*, 1995, 117: 5385.
- [32] O M Yaghi, H Li. *J. Am. Chem. Soc.*, 1996, 118: 295.
- [33] D D L Goodgame, D A Grachvogel, D J Williams. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 1999, 38: 153.
- [34] S S Y Gui, S M F Lo, J P H Charment et al. *Science*, 1999, 283: 1148.
- [35] X M Chen, M L Tong, Y J Lou et al. *Aust. J. Chem.*, 1996, 49: 835.
- [36] M Kondo, S Kitagawa et al. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 1997, 36: 1725.
- [37] S W Keller. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 1997, 36: 247.
- [38] M Fujita, S Y Yu, T Kusukawa et al. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 1998, 37: 2082.
- [39] B F Abrahams, P A Jackson, R Robson. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 1998, 37: 2656.
- [40] N Takeda, K Yamaguchi, M Fujita. *Nature*, 1999, 398: 794.
- [41] S Noro, S Kitagawa et al. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2000, 39: 2082.
- [42] X Y Yu, M Maekawa, T Morita et al. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 2002, 75: 267.
- [43] S Noro, S Kitagawa et al. *Chem. Commun.*, 2002, 222~223.