

咪唑二甲酸镉(II)配位聚合物的合成、结构表征和荧光性质

袁 利¹ 卢文贯^{*2}

(¹ 广州医学院公共卫生学院, 广州 510182)

(² 韶关学院化学系, 韶关 512005)

摘要: 以 5:2 物质的量比的 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 和 H_3IDC (咪唑-4,5-二羧酸)为原料,在 DMF/HAc 混合溶剂热条件下得到了 1 个新的三维层-柱状金属-有机框架结构的配位聚合物 $[\text{Cd}_5(\text{IDC})_2(\text{HIDC})_2(\text{DMF})_2]_n$ (**1**),通过元素分析、红外光谱、热重分析以及单晶 X-射线结构分析对其组成和结构进行了表征。单晶 X-射线结构分析表明,配合物 **1** 的晶体属于正交晶系, $Pbca$ 空间群, $a=1.414\,30(4)$ nm, $b=1.571\,78(4)$ nm, $c=1.608\,89(4)$ nm, $V=3.576\,51(16)$ nm³, $Z=4$, $D_c=2.456$ g·cm⁻³, $F(000)=2\,520$, 对于 2 471 个可观测点($I>2\sigma(I)$), 最终残差因子 $R_1=0.032\,0$, $wR_2=0.074\,5$ 。在 **1** 的晶体结构中,每个镉(II)离子的配位数为 6,处于扭曲的八面体配位环境中,每个 IDC^{3-} 分别桥联 5 个镉(II)离子形成二维层结构,相邻的二维层之间通过 HIDC^{2-} 进一步连接形成三维层-柱状金属-有机框架结构,其通道为配位的 DMF 分子占据。配合物 **1** 的固体室温荧光测试结果表明,在波长为 471 nm 的光激发下于 536 nm 处出现强烈的荧光发射。

关键词: 金属-有机框架; 溶剂热; 镉配合物; 晶体结构; 荧光性质

中图分类号: O614.24*2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4861(2011)07-1324-05

Solvothermal Synthesis, Structure and Luminescent Property of a Cd(II) Coordination Polymer with Imidazole-4,5-dicarboxylate

YUAN Li¹ LU Wen-Guan^{*2}

(¹ School of Public Health, Guangzhou Medical University, Guangzhou 510182, China)

(² Department of Chemistry, Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong 512005, China)

Abstract: Reaction of $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ and imidazole-4,5-dicarboxylic acid (H_3IDC) with 5:2 metal/ligand molar ratio under DMF/HAc solvothermal condition, yielded a new 3D layered-pillared metal-organic framework architecture of $[\text{Cd}_5(\text{IDC})_2(\text{HIDC})_2(\text{DMF})_2]_n$ (**1**), which was structurally characterized by elemental analysis, infrared spectroscopy, and single-crystal X-ray diffraction. X-ray diffraction crystal structural analysis reveals its crystallizes in orthorhombic, space group $Pbca$, with $a=1.414\,30(4)$ nm, $b=1.571\,78(4)$ nm, $c=1.608\,89(4)$ nm, $V=3.576\,51(16)$ nm³, $Z=4$, $D_c=2.456$ g·cm⁻³, $F(000)=2\,520$, the final $R_1=0.032\,0$, $wR_2=0.074\,5$ for 2 471 observed reflections with $I>2\sigma(I)$. In complex **1**, each Cd(II) ion is six-coordinated with a distorted octahedral coordination geometry, and each $\mu_5\text{-IDC}^{3-}$ acts as a bridge to bond five Cd(II) ions, leading to an infinite 2D network of $[\text{Cd}_5(\mu_5\text{-IDC})_2(\text{DMF})_2]_n^{4n+}$, which are further linked through $\mu_4\text{-HIDC}^{2-}$ to generate an infinite 3D layered-pillared framework architecture of $[\text{Cd}_5(\mu_5\text{-IDC})_2(\mu_4\text{-HIDC})_2(\text{DMF})_2]_n$ with 1D open channels along the a axis, which are filled with coordinated DMF molecules. Furthermore, its thermal stability and luminescent property at room temperature in the solid state were also investigated. CCDC: 798235.

Key words: metal-organic framework; Cd(II) complex; solvothermal synthesis; crystal structure; luminescent property

收稿日期: 2010-12-13。收修改稿日期: 2011-03-13。

国家自然科学基金资助项目(No.21071099)。

*通讯联系人。E-mail: lwg@sgu.edu.cn

近年来,金属-有机框架(Metal-Organic Frameworks, MOFs)配位聚合物由于其多变的结构特点以及在气体吸附与分离、催化和荧光传感等多方面的潜在应用而呈现出了快速发展的态势,其合成、结构和性能等研究是材料化学中十分活跃的一个研究领域^[1-10]。在金属-有机框架配位聚合物晶体材料的合成与制备实验中,水热、溶剂热合成法是最为行之有效的方法之一^[11-12]。但反应条件的微小变化,如体系的 pH 值^[13]、温度^[14]、反应物的配比^[15,16]和溶剂^[2,17]等都会影响到最终产物的结构。咪唑-4,5-二羧酸(imidazole-4,5-dicarboxylic acid, H₃IDC)是一种骨架比较稳定的氮杂环羧酸多齿配体,改变反应体系的 pH 值^[18-19],或调节反应物的配比^[16,18,20]等都能对 H₃IDC 的去质子化程度进行调控,可以得到 H₂IDC⁻、HIDC²⁻和 IDC³⁻ 3 种含不同质子数的物种,它们能以 μ_2^- 、 μ_3^- 、 μ_4^- 、 μ_5^- 、 μ_6^- 等多种桥联方式与金属离子配位,可以组装出许多结构新颖和性能特殊的配位聚合物晶体材料^[16,18-30]。最近,Xu 等以 H₃IDC 与 Zn(NO₃)₂ 为原料在 *N,N'*-二甲基甲酰胺(DMF) 溶剂热条件下得到了一个具有层-柱状金属-有机框架结构的三维配位聚合物[Zn₅(IDC)₂(HIDC)₂(DMF)₄]_n,并研究了其荧光和主客体分子交换等性质^[26]。我们则用 H₃IDC 与 Cd(NO₃)₂ 为原料在 DMF/HAc 的混合溶剂热体系中反应,成功地获得了另一个具有层-柱状金属-有机框架结构的三维配位聚合物 [Cd₅(IDC)₂(HIDC)₂(DMF)₂]_n (**1**)。本文将报道它的合成和结构表征,并研究了它的热稳定性和荧光性质。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

由浓 H₂SO₄ 和 K₂Cr₂O₇ 氧化苯并咪唑制得 H₃IDC,其余试剂为市售分析纯,未经处理直接使用。Vario EL CHNS-O 元素分析仪;Nicolet 330 FTIR 红外光谱仪(4 000~370 cm⁻¹,KBr 压片法);Netzsch TG-209 热重分析仪(空气氛,升温速率 10 °C·min⁻¹);Bruker D8 ADVANCE 型 X-射线粉末衍射仪(Cu K α ,

$\lambda=0.154\ 056\ \text{nm}$)。Shimadzu RF-5301PC 荧光光谱仪。

1.2 配位物 1 的合成

将 1.25 mmol Cd(NO₃)₂·4H₂O(0.386 g),0.50 mmol H₃IDC (0.078 g),7.5 mL DMF 和 2.5 mL 冰醋酸混合搅拌 30 min,然后装入 25 mL 内衬聚四氟乙烯不锈钢的反应釜内,于 170 °C 下恒温 3 d,然后以 5 °C·h⁻¹ 的速率降至室温,在釜底析出亮棕色的块状晶体,过滤并用 DMF 充分洗涤,自然干燥,得晶体 0.112 g,产率 68% (以 H₃IDC 计)。基于 C₂₆H₂₀N₁₀O₁₈Cd₅ 的元素分析实验值(% , 计算值):C 23.95 (23.61),H 1.78(1.52),N 10.51(10.59)。主要的红外吸收峰(cm⁻¹):3 418(s),3 157(w),2 397(m),1 662(vs),1 533(vs),1 387(s),1 303(m),1 240(m),1 101(m),843(w),672(m)。配合物 **1** 的合成实验表明,当 DMF/HAc 体积比为 3:1 时,可得到适于解析单晶结构的晶体,产率较高;当体积比为高于或低于 3:1 时,晶体质量下降,而且产率较低;如果不加 HAc,保持其它反应条件相同,则得不到配合物 **1**。因此,尽管 HAc 没有参与配合物 **1** 主体骨架的形成,但它对于配合物 **1** 的合成起了非常重要的作用。

1.3 晶体结构的测定

选取尺寸为 0.24 nm×0.22 nm×0.20 mm 的单晶,使用 Oxford CCD Gemini S Ultra 单晶衍射仪,在 150(2) K 下用经石墨单色器单色化的 Mo K α 射线($\lambda=0.071\ 073\ \text{nm}$)以 φ - ω 扫描方式在 2.59°< θ <27.00° 范围内收集到 17 152 个衍射强度数据,3 869 个独立衍射点($R_{\text{int}}=0.051\ 1$),其中 $I>2\sigma(I)$ 的可观测点为 2 471 个。收集的衍射强度数据使用多重扫描作吸收校正。晶体结构采用直接法解得,对全部非氢原子坐标及各向异性热参数进行了全矩阵最小二乘法修正。HIDC²⁻羧基氧上的氢原子和 DMF 羟基氧上的氢原子,由差值 Fourier 残余峰中确定得到,其它氢原子用理论加氢的方法得到。所有的计算均使用 SHELXTL 程序完成。配合物 **1** 的晶体学数据见表 1,部分键长及主要键角列于表 2。

CCDC:798235。

表 1 配合物 1 的晶体学数据

Table 1 Crystal Structure parameters of complex 1

Empirical formula	C ₂₆ H ₂₀ Cd ₅ N ₁₀ O ₁₈	<i>F</i> (000)	2 520
Formula weight	1 322.52	Absorption coefficient $\mu(\text{Mo K}\alpha) / \text{mm}^{-1}$	3.019
Crystal system	Orthorhombic	Reflections collected / unique (R_{int})	17 152 / 3 869 (0.051 1)
Space group	<i>Pbca</i>	Absorption correction	Semi-empirical from equivalents

续表 1

a / nm	1.414 30(4)	Refinement method	Full-matrix least-squares on F^2
b / nm	1.571 78(4)	Data / restraints / parameters	3 869 / 1 / 272
c / nm	1.608 89(4)	Goodness-of-fit on F^2	0.916
V / nm^3	3.57651(16)	Final R indices [$I > 2\sigma(I)$]	$R_1=0.032\ 0$, $wR_2=0.074\ 5$
Z	4	R indices (all data)	$R_1=0.053\ 6$, $wR_2=0.078\ 1$
$D_c / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.456	Largest diff. peak and hole / ($\text{e}\cdot\text{nm}^{-3}$)	2 042 and $-1\ 063$

表 2 配合物 1 的部分键长及主要键角

Table 2 Selected bond distances (nm) and bond angles ($^\circ$) of complex 1

Cd(1)-N(3)	0.224 2(4)	Cd(2)-O(5)	0.225 4(4)	Cd(3)-O(7)	0.220 6(4)
Cd(1)-N(1)	0.224 4(4)	Cd(2)-N(4A)	0.225 5(4)	Cd(3)-O(7E)	0.220 6(4)
Cd(1)-O(8A)	0.225 0(4)	Cd(2)-N(2C)	0.228 6(4)	Cd(3)-O(6)	0.222 8(4)
Cd(1)-O(4B)	0.229 6(3)	Cd(2)-O(1D)	0.232 3(3)	Cd(3)-O(6E)	0.222 8(4)
Cd(1)-O(5)	0.244 5(4)	Cd(2)-O(8A)	0.233 9(4)	Cd(3)-O(9E)	0.226 0(4)
Cd(1)-O(1)	0.261 2(4)	Cd(2)-O(4C)	0.243 7(4)	Cd(3)-O(9)	0.226 0(4)
N(3)-Cd(1)-N(1)	110.20(16)	O(5)-Cd(2)-N(4A)	138.71(15)	O(7)-Cd(3)-O(7E)	180.000(1)
N(3)-Cd(1)-O(8A)	134.51(15)	O(5)-Cd(2)-N(2C)	95.16(16)	O(7)-Cd(3)-O(6)	83.43(15)
N(1)-Cd(1)-O(8A)	98.87(15)	N(4A)-Cd(2)-N(2C)	101.04(16)	O(7E)-Cd(3)-O(6)	96.57(15)
N(3)-Cd(1)-O(4B)	93.18(15)	O(5)-Cd(2)-O(1D)	97.93(14)	O(7)-Cd(3)-O(6E)	96.57(15)
N(1)-Cd(1)-O(4B)	125.26(14)	N(4A)-Cd(2)-O(1D)	94.04(14)	O(7E)-Cd(3)-O(6E)	83.43(15)
O(8A)-Cd(1)-O(4B)	97.77(13)	N(2C)-Cd(2)-O(1D)	139.28(14)	O(6)-Cd(3)-O(6E)	180.000(1)
N(3)-Cd(1)-O(5)	68.43(15)	O(5)-Cd(2)-O(8A)	68.53(14)	O(7)-Cd(3)-O(9E)	89.54(15)
N(1)-Cd(1)-O(5)	120.99(15)	N(4A)-Cd(2)-O(8A)	70.56(15)	O(7E)-Cd(3)-O(9E)	90.46(15)
O(8A)-Cd(1)-O(5)	66.70(14)	N(2C)-Cd(2)-O(8A)	121.07(14)	O(6)-Cd(3)-O(9E)	87.04(16)
O(4B)-Cd(1)-O(5)	113.53(13)	O(1D)-Cd(2)-O(8A)	99.59(12)	O(6E)-Cd(3)-O(9E)	92.96(16)
N(3)-Cd(1)-O(1)	82.91(14)	O(5)-Cd(2)-O(4C)	101.97(14)	O(7)-Cd(3)-O(9)	90.46(15)
N(1)-Cd(1)-O(1)	68.45(14)	N(4A)-Cd(2)-O(4C)	119.20(15)	O(7E)-Cd(3)-O(9)	89.54(15)
O(8A)-Cd(1)-O(1)	141.53(13)	N(2C)-Cd(2)-O(4C)	70.63(13)	O(6)-Cd(3)-O(9)	92.96(16)
O(4B)-Cd(1)-O(1)	66.31(12)	O(1D)-Cd(2)-O(4C)	68.98(12)	O(6E)-Cd(3)-O(9)	87.04(16)
O(5)-Cd(1)-O(1)	151.34(13)	O(8A)-Cd(2)-O(4C)	164.60(12)	O(9E)-Cd(3)-O(9)	180.000(1)

Symmetry transformations used to generate equivalent atoms: A: $-x+3/2, -y+2, z-1/2$; B: $-x+1, y+1/2, -z+3/2$; C: $-x+3/2, y+1/2, z$;

D: $x+1/2, y, -z+3/2$; E: $-x+2, -y+2, -z+2$.

2 结果与讨论

2.1 晶体结构

单晶结构分析结果表明, 配合物 $[\text{Cd}_5(\text{IDC})_2(\text{HIDC})_2(\text{DMF})_2]_n$ (**1**) 属正交晶系, $Pbca$ 空间群, 它是一个基于 μ_4 -HIDC²⁻ 柱连接 $\text{Cd}(\text{II})$ - μ_5 -IDC³⁻ 二维层的三维金属-有机框架结构。在配合物 **1** 的结构单元中, 包含 2 种对称配位模式的 μ_4 -HIDC²⁻ 和 μ_5 -IDC³⁻ 配体(图 1), 3 个都呈现 6 配位扭曲的八面体构型但具有不同配位环境的 $\text{Cd}(\text{II})$ 离子。如图 2 所示, $\text{Cd}(1)$ 和 $\text{Cd}(2)$ 都分别与来自 2 个不同 μ_5 -IDC³⁻ 配体和 2

个不同 μ_4 -HIDC²⁻ 配体的 4 个羧基氧原子以及 2 个氮原子配位, 形成了 6 配位的扭曲八面体配位环境, $\text{Cd}-\text{O}$ 和 $\text{Cd}-\text{N}$ 键长分别在 0.225 0(4)~0.261 2(4) nm

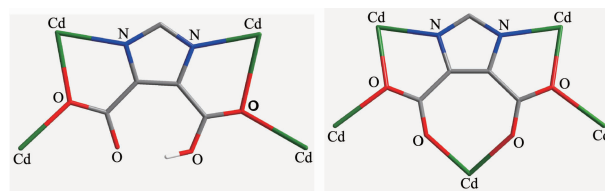
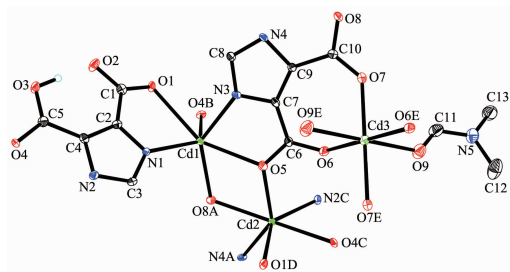


图 1 在配合物 **1** 中 HIDC²⁻ 和 IDC³⁻ 的配位模式图
Fig.1 Coordination modes of HIDC²⁻ and IDC³⁻ in complex **1**



Symmetry codes: A: $-x+3/2, -y+2, z-1/2$; B: $-x+1, y+1/2, -z+3/2$; C: $-x+3/2, y+1/2, z$; D: $x+1/2, y, -z+3/2$; E: $-x+2, -y+2, -z+2$; Thermal ellipsoids were drawn at the 30% level, and the hydrogen atoms were omitted for clarity except for those bonded to oxygen atoms of μ_4 -HIDC²⁻

图 2 在配合物 1 中镉(II)离子的配位环境图

Fig.2 Coordination environment of Cd(II) ions in complex 1

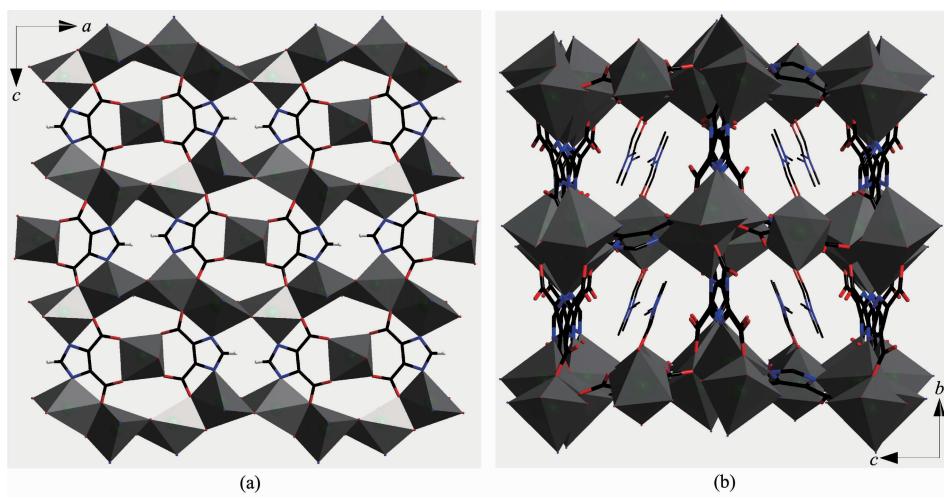
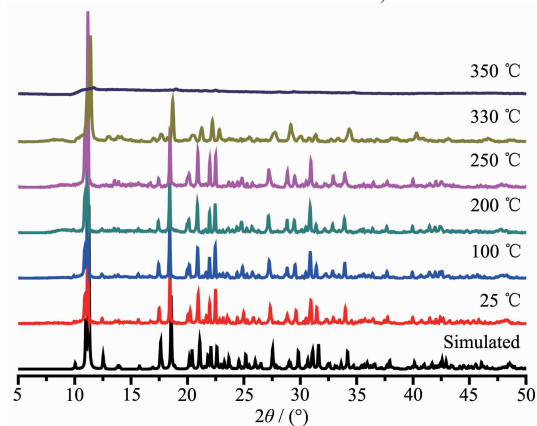


图 3 配合物 1 的二维层(a)和三维层-柱状金属-有机框架结构图(b)

Fig.3 2D network (a) and 3D layered-pillared MOF architecture (b) of complex 1

2.2 粉末 XRD、热稳定性和荧光光谱分析

如图 4 所示,实验测定的谱图和单晶结构分析模拟的粉末 XRD 谱图很好地吻合,证明了配合物 1



Simulated XRD pattern is generated from the single-crystal diffraction data

图 4 配合物 1 的模拟和变温粉末 XRD 图

Fig.4 Simulated and different temperature PXRD patterns of complex 1

和 0.224 2(4)~0.225 5(4) nm 范围内。Cd(3)则与来自 2 个不同 μ_5 -IDC³⁻配体的 4 个羧基氧原子和 2 个 DMF 羟基氧原子配位,形成了 6 配位的扭曲八面体配位环境,Cd-O 键长在 0.220 6(4)~0.226 0(4) nm 范围内。沿 *ac* 平面,这些 Cd(II)离子通过 μ_5 -IDC³⁻配体连接形成了二维波浪层结构 $[\text{Cd}_5(\mu_5\text{-IDC})_2(\text{DMF})_2]_n^{4n+}$ (图 3a)。相邻的二维波浪层 $[\text{Cd}_5(\mu_5\text{-IDC})_2(\text{DMF})_2]_n^{4n+}$ 再通过 μ_4 -HIDC²⁻配体进一步相互连接形成了沿 *a* 轴具有一维孔状通道的层-柱状结构的三维金属-有机框架配位聚合物 $[\text{Cd}_5(\mu_5\text{-IDC})_2(\mu_4\text{-HIDC})_2(\text{DMF})_2]_n$,其通道为配位的 DMF 分子占据(图 3b)。

是均一的纯相。在空气氛下的热重分析结果表明,配合物 1 在 240 °C 时才开始失重,到达 330 °C 之前有略 11.2% 的失重出现,这应该是配位的 DMF 分子逐渐解离所致(理论值 11.0%)。随着 DMF 配体的逐渐解离,在不断升温下,层-柱状的三维金属-有机框架开始塌陷。当温度达到 530 °C 时,配合物中的有机配体彻底分解完毕,最终残余物为 CdO(实验值 49.5%,理论值 48.5%)。变温粉末 XRD 测试实验结果(图 4)也进一步证明了配合物 1 的整体框架在 330 °C 之前可以保持稳定。

在室温下,当在 471 nm 波长的光源下激发时,配合物 1 在 536 nm 处出现强的荧光发射(图 5)。已知在 280~480 nm 波长范围激发时,固态 H₃IDC 显示非常弱的荧光发射^[16,18,26,29]。因而,配合物 1 出现在 536 nm($\lambda_{\text{ex}}=471$ nm)的荧光发射峰,可能是由于 Cd²⁺与 H₃IDC 配体的配位造成的,离域于 H₃IDC 配体内部的电子可能迁移到 Cd²⁺的空轨道上,即是发生了

配体到金属的电荷转移(LMCT)^[16,18,26,29]。

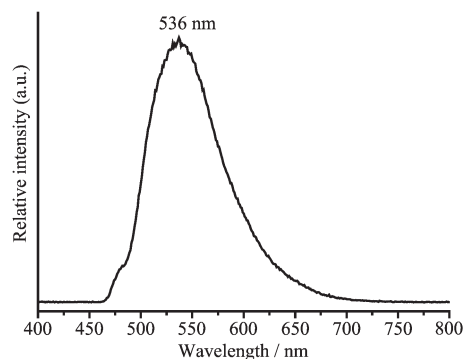


图 5 室温下配合物 **1** 的固体荧光光谱

Fig.5 Solid-state fluorescent emission spectrum of complex **1** at room temperature

参考文献:

- [1] MENG Xiang-Ru(孟祥茹), ZHAO Jin-An(赵金安), HOU Hong-Wei(侯红卫), et al. *Chinese J. Inorg. Chem. (Wuji Huaxue Xuebao)*, **2003**, **19**(1):15-19
- [2] Rowsell J L C, Yaghi O M. *Micropor. Mesopor. Mater.*, **2004**, **73**:3-14
- [3] Pan L, Olson D H, Ciemnomolonski L C, et al. *Angew. Chem., Int. Ed.*, **2006**, **45**:616-618
- [4] Chen B L, Yang Y, Zapata F, et al. *Adv. Mater.*, **2007**, **19**:1693-1696
- [5] ZHANG Zhong-Qiang(张中强), HUANG Ru-Dan(黄如丹), XU Yan-Qing(许颜清), et al. *Chem. J. Chin. Univ. (Gaodeng Xuexiao Huaxue Xuebao)*, **2008**, **29**(8):1528-1531
- [6] YIN Hua(尹华), LIU Shi-Xiong(刘世雄). *Chinese J. Inorg. Chem. (Wuji Huaxue Xuebao)*, **2009**, **25**(5):893-899
- [7] WANG Cui-Juan(王萃娟), ZHOU Xian-Li(周先礼), REN Ping-Di(任平弟), et al. *Chinese J. Inorg. Chem. (Wuji Huaxue Xuebao)*, **2010**, **26**(10):1900-1903
- [8] Bureekaew S, Shimomura S, Kitagawa S. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **2008**, **9**:1-12
- [9] Suh M P, Cheon Y E, Lee E Y. *Coord. Chem. Rev.*, **2008**, **252**:1007-1026
- [10] Lee J Y, Farha O K, Roberts J, et al. *Chem. Soc. Rev.*, **2009**, **38**:1450-1459
- [11] Feng S H, Xu R R. *Acc. Chem. Res.*, **2001**, **34**:239-247
- [12] Cundy C S, Cox P A. *Chem. Rev.*, **2003**, **103**:663-702
- [13] Wang J, Zhang Y H, Tong M L. *Chem. Commun.*, **2006**:3166-318
- [14] Liu C M, Gao S, Zhang D Q, et al. *Cryst. Growth Des.*, **2007**, **7**:1312-1317
- [15] Lin J G, Xu Y Y, Qiu L, et al. *Chem. Commun.*, **2008**:2659-2661
- [16] Lu W G, Jiang L, Feng X L, et al. *Cryst. Growth Des.*, **2008**, **8**:986-994
- [17] Chen C Y, Cheng P Y, Wu H H, et al. *Inorg. Chem.*, **2007**, **46**:5691-5699
- [18] Fang R Q, Zhang X M. *Inorg. Chem.*, **2006**, **45**:4801-4810
- [19] Xu Q, Zou R Q, Zhong R Q, et al. *Cryst. Growth Des.*, **2008**, **8**:2458-2463
- [20] Lu J Y, Ge Z H. *Inorg. Chim. Acta*, **2005**, **358**:828-833
- [21] Fang R Q, Zhang X H, Zhang X M. *Cryst. Growth Des.*, **2006**, **6**:2637-2639
- [22] Sun Y Q, Zhang J, Chen Y M, et al. *Angew. Chem., Int. Ed.*, **2005**, **44**:5814-5817
- [23] Zhang, M B, Chen Y M, Zheng S T, et al. *Eur. J. Inorg. Chem.*, **2006**:1423-1428
- [24] ZHANG Xian-Fa(张现发), GAO Shan(高山), HUO Li-Hua(霍丽华), et al. *Chinese J. Inorg. Chem. (Wuji Huaxue Xuebao)*, **2006**, **22**(1):139-141
- [25] Sun Y Q, Yang G Y. *Dalton Trans.*, **2007**:3771-3781
- [26] Zhong R Q, Zou R Q, Xu Q. *Micropor. Mesopor. Mater.*, **2007**, **102**:122-127
- [27] Alkordi M H, Liu Y L, Larsen R W, et al. *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**, **130**:12639-12641
- [28] Gurunatha K L, Uemura K, Maji T K. *Inorg. Chem.*, **2008**, **47**:6578-6580
- [29] GU Jin-Zhong(顾金忠), GAO Zhu-Qing(高竹青), DOU Wei(窦伟), et al. *Chinese J. Inorg. Chem. (Wuji Huaxue Xuebao)*, **2009**, **25**(5):920-923
- [30] Gu Z G, Cai Y P, Fang H C, et al. *Chem. Commun.*, **2010**, **46**:5373-5375