以芳香族多羧酸为配体的 Ni(II)配位超分子的研制及 光诱导下的表面电子行为

张 丽 牛淑云* 金 晶 孙丽萍 史忠丰 李 雷

(辽宁师范大学化学化工学院, 辽宁 大连 116029)

摘要: 采用水热方法合成了 2 个 Ni(II)配合物 $[\text{Ni}_3(\text{btc})_2(\text{H}_2\text{O})_{14}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (1) 和 $[\text{Ni}_2(\text{btcc})(\text{bipy})_2(\text{H}_2\text{O})_6] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (2), (H_3btc =1,3,5-benzenetricarboxylic acid, H_4btcc =1,2,4,5-benzenetetracarboxylic acid, bipy =2,2'-bipyridyl). 通过 X 射线单晶衍射(XRD)、红外光谱(IR)、紫外-可见-近红外吸收光谱(UV-Vis-NIR)对化合物进行了表征. 结果表明, 化合物(1)是由 2 个均苯三甲酸根桥连的三核 Ni(II)离子的化合物, 而化合物(2)是由 1 个均苯四甲酸根桥连的双核化合物, 分子中 bipy 分子作为端基配体. 分子中大量的水分子和羧酸根的存在使 2 个化合物分别被连成具有三维(3D)和二维(2D)结构的配位超分子化合物. 着重研究了化合物的表面光电电压光谱(SPS), 并将其与 UV-Vis-NIR 吸收光谱进行了分析和对比, 发现 SPS 中表面光伏响应带与 UV-Vis-NIR 吸收光谱的吸收峰在数量和位置上都是一一对应的. 此外, 对比 2 个化合物的表面光电电压光谱可以看出, 配合物的结构及中心金属的配位微环境对其表面光伏响应带的强度、位置和形状均有一定影响.

关键词: Ni(II)配位超分子; 晶体结构; 氢键; 表面光电电压

中图分类号: O641.4

Preparation and Light-Induced Surface Electron Behavior of Ni(II) Based on Aromatic Polycarboxyl Acids

ZHANG Li NIU Shu-Yun* JIN Jing SUN Li-Ping SHI Zhong-Feng LI Lei

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning Province, P. R. China)

Abstract: Two nickel coordination complexes $[\text{Ni}_3(\text{btc})_2(\text{H}_2\text{O})_{14}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (1), $[\text{Ni}_2(\text{btcc})(\text{bipy})_2(\text{H}_2\text{O})_6] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (2), (H_3btc =1,3,5-benzenetricarboxylic acid, H_4btcc = 1,2,4,5-benzenetetracarboxylic acid, bipy = 2, 2' -bipyridyl) were synthesized hydrothermally and characterized by single crystal X-ray diffraction (XRD), infrared (IR) and Ultraviolet-Visible-Near Infrared (UV-Vis-NIR) spectra. Result indicate that complex (1) is a trinuclear complex bridged by btc groups and complex (2) is a binuclear complex connected by btcc groups. The existence of hydrogen bonds allows complexes (1) and (2) to become coordination supramolecules with three dimensional (3D) and two dimensional (2D) infinite structures, respectively. Surface photovoltage spectrum (SPS) of these complexes exhibits positive surface photovoltage responses from 300–800 nm. However, the intensity, position and shape of these response bands are obviously different. This distinction might be responsible for the structures and coordination environments of nickel ions in these complexes. By contrasting SPS with UV-Vis-NIR spectra we find that these response bands in SPS are consistent with absorption peaks in the UV-Vis-NIR spectra.

Key Words: Ni(II) coordination supramolecule; Crystal structure; Hydrogen bond; Surface photovoltage

含过渡金属的芳香族羧酸配合物是一类稳定的 化合物, 它们在催化、超导、医药、新材料等多方面有

Received: January 7, 2009; Revised: February 14, 2009; Published on Web: April 6, 2009.

*Corresponding author. Email: syniu@sohu.com; Tel: +86411-82159044.

国家自然科学基金(20571037)、辽宁省教育厅创新团队项目(2007T092) 和北京大学稀土材料化学及应用国家重点实验室开放课题基金资助

© Editorial office of Acta Physico-Chimica Sinica

比较广泛的用途^[1-6]. 同时, 有机配体桥联的过渡金属多核配合物广泛存在于生物体的金属蛋白及氧化酶中, 它们对生物体有着微妙的促进生物活性和催化的作用, 对于探讨生化过程和人工仿生模拟均具有一定意义^[7-10]. 此外, 含有羧基和多羧基的有机芳香配体, 如均苯四甲酸、均苯三甲酸、对苯二甲酸以及邻苯二甲酸等刚性多齿芳香羧酸因具有配位的多样性及可作为分子内或分子间氢键的给体或受体作用而备受关注^[11-13]. 因此, 均苯四甲酸、均苯三甲酸等配体成为合成多维配合物和结构新颖的配位超分子化合物的首选. 近期, 我们较集中地研究了以含羧酸基有机物为配体的系列过渡金属配合物和配位超分子的制备和表面电子行为, 通过表面光电测试技术(SPV)探讨了它们的光电转换性能^[14-17]. 表面光电电压光谱(SPS)是一种检测由入射光诱导而引起的固体表面电荷变化的测试方法, 它快速、灵敏度高而且无破坏性. SPS 不仅与由光吸收引起的电子跃迁过程有关, 还直接反映了光生电荷的分离和转移特性. 目前, 它已被成功地应用到光激发表面相互作用的电子转移、染料的敏化过程、光催化研究以及固体材料表面和相间的电荷转移过程等方面^[18-21]. 本文报道了 2 个 Ni(II)配位超分子的合成、结构, 研究了氢键在构筑超分子化合物中的作用并利用 SPS 技术探讨了不同结构对配合物表面光电性能的影响.

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

均苯三甲酸、均苯四甲酸、2,2'-联吡啶和氯化镍均为分析纯产品, 生产厂家为青岛正业试剂仪器有限公司. 实验用水为蒸馏水. 化合物的单晶 X 射线衍射数据在日本理学株式会社的 Rigaku R-AXIS-PAPID X 射线衍射仪上收集, 红外光谱在日本分光株式会社的 FT-IR/480 红外光谱仪上测量, 在日本分光株式会社的 UV-570 紫外-可见-近红外光谱仪上测定了研磨后固体粉末样品的漫反射光谱, 元素分析是在德国埃尔默公司的 PE-240C Analyzer 和 TLASMA-II ICP 元素分析仪上完成的. 表面光电电压谱在自组装的表面光电电压光谱仪上完成.

1.2 配合物的合成

1.2.1 $[\text{Ni}_3(\text{btc})_2(\text{H}_2\text{O})_{14}]\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (1)的合成

将均苯三甲酸(0.23 g, 1.0 mmol) 和 NaOH(0.12 g, 3.0 mmol)混合溶于 10 mL H_2O 中, 将其逐滴滴加到

10 mL $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.24 g, 1 mmol)的水溶液中, 溶液变为浅绿色. 将此混合液转入到水热反应釜中, 加热到 140 $^{\circ}\text{C}$, 恒温 6 d, 自然冷却至室温, 过滤, 得到浅绿色针状晶体, 即为化合物(1). IR (KBr, cm^{-1}): 3395 (ν_{OH}); 1613 ($\nu_{\text{as,COO}}$); 1363 ($\nu_{\text{s,COO}}$); 1541, 1476, 434 ($\nu_{\text{ArC}\cdots\text{C}}$); 1205, 1108($\nu_{\text{C-C,C-O}}$); 754, 721($\delta_{\text{C-H}}$); 563, 456 ($\nu_{\text{Ni-O}}$).

1.2.2 $[\text{Ni}_2(\text{btec})(\text{bipy})_2(\text{H}_2\text{O})_6]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (2)的合成

将均苯四甲酸(0.25 g, 1.0 mmol)和 NaOH(0.16 g, 4.0 mmol)混合溶于 10 mL H_2O 中, 将其逐滴滴加到 10 mL $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.24 g, 1.0 mmol)的水溶液中, 再将 2,2'-联吡啶(0.08 g, 0.50 mmol)加入到上述溶液中, 溶液变为蓝黑色. 将此混合液转入到水热反应釜中, 加热到 100 $^{\circ}\text{C}$, 恒温 6 d, 自然冷却至室温, 过滤, 得到绿色块状晶体, 即为化合物(2). IR(KBr, cm^{-1}): 3407, 3253 (ν_{OH}); 3078 ($\nu_{\text{ArC-H}}$); 1545 ($\nu_{\text{as,COO}}$); 1378 ($\nu_{\text{s,COO}}$); 1597, 1549, 1494($\nu_{\text{ArC}\cdots\text{C}}$); 1164, 1140, 1025 ($\nu_{\text{C-C,C-O}}$); 810, 763, 735($\delta_{\text{C-H}}$); 647($\nu_{\text{Ni-N}}$); 521($\nu_{\text{Ni-O}}$).

配合物(1)和(2)的结构分别与文献[22]和[23]是相同的, 但合成方法是截然不同的. 文献[22]和[23]均采用了溶剂挥发法, 而我们则采用水热反应法直接得到了产物. 尤其是在配合物(2)的合成过程中, 我们的起始物和反应溶剂均与文献[23]报道的不同.

1.3 晶体结构的测定

在 293 K 下, 选取化合物单晶体, 在 Rigaku R-AXIS-PAPID 单晶衍射仪上收集衍射数据. 以 Mo K_{α} 射线($\lambda=0.071073$ nm)为辐射源, IP 面探测器采用 ω 扫描方式. 全部衍射数据都经 LP 因子和经验吸收校正. 晶体结构用直接法解出, 经全矩阵最小二乘程序修正. 全部结构计算和绘图采用 SHELXTL 程序系统. 化合物的主要晶体学数据和结构修正见附件表 1s(www.whxb.pku.edu.cn).

1.4 光物理性能的测定

表面光电电压谱(SPV)在自组装的仪器上进行. SPS 测试系统主要由光源、分光系统、信号检测系统、微机数据处理系统四部分组成(见附件图 3s). 光电电压池采用铜和铍铝合金作为电磁屏蔽材料(见附件图 4s). 将晶体样品研磨成细小均匀的粉末, 将其均匀地平铺在样品槽上, 样品厚度约为 1mm. 样品池中形成 ITO/样品/ITO 的三明治结构 (ITO 为氧化铟和氧化锡复合氧化物光学玻璃). 将装好样品的反应池放到实验装置上, 并且同锁相放大器相连接. 让一束通过单色仪的汇聚光, 经过调制解调器载波后垂直

照射到样品的表面上,并使光斑完全照射到样品上.锁相放大器检测到 300–800 nm 连续波长的氙灯光照射所产生的信号,并将其放大.经光照射所产生的光电压信号,通过锁相放大器收集后经过 SPS 测试程序,将其转换为数据文件.用 Origin 7.0 程序处理可以得到表面光电电压光谱图,并可以根据要求对每个响应带进行分析指认.

2 结果与讨论

2.1 $[\text{Ni}_3(\text{btc})_2(\text{H}_2\text{O})_{14}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}(1)$ 的晶体结构描述

结构分析表明,在化合物(1)的分子中,包含 3 个 Ni(II)离子.其中 Ni(2)离子和 Ni(2A)离子是晶体学等效的.3 个 Ni(II)离子均为六配位,且配位原子均为氧原子. Ni(1)离子处于较规则的八面体场配位环境中,来自于 2 个均苯三甲酸根的羧基氧原子 O(4)和 O(4A)占据轴向位置,平面位置由 4 个配位水分子的氧原子 O(7)、O(7A)、O(8)和 O(8A)组成. Ni(2)离子和 Ni(2A)离子也处于八面体场的配位环境中,配位的六个 O 原子中有 1 个来自于均苯三甲酸的羧基 O 原子,另外五个均为配位水分子.分子中, Ni(1)和 Ni(2)、Ni(1)和 Ni(2A)之间各由一个均苯三甲酸根连接,将化合物连成三核结构(图 1).

在化合物(1)的晶体中存在着大量的配位水分子和羧基基团为氢键的形成提供了大量的给体和受体.化合物的晶体中配位水分子之间,配位水分子与羧基氧原子之间以及游离的水分子与配位水分子和羧基氧原子之间均存在氢键,这些丰富的氢键将化合物网成 3D 结构.在 *a* 方向上,与对称中心 Ni(1)离子配位的水分子 O(8)分别与相邻两个分子中未配位的羧基 O 原子 O(5)和 O(2)形成氢键, O(8)—H $\cdots$ O(5)以及 O(8)—H $\cdots$ O(2)之间的距离分别为 0.2914 和 0.2841 nm.这两条氢键使得化合物的分子被连接成沿 *a* 方向的一维链(附件图 1s). *b* 方向上,配位

图 4 化合物(2)的分子结构图

Fig.4 Molecular structure of complex (2)

X 射线单晶衍射分析表明, 化合物(2)的分子中包含 2 个晶体学等效的 Ni(II)离子 Ni(1)和 Ni(1A). 2 个 Ni(II)离子均为六配位, 其中 1 个 O 原子来自于均苯四甲酸根的羧基 O 原子, 3 个 O 原子来自于 3 个配位水分子, 另外的 2 个 N 原子来自于同一个 bipy 分子, 构成了畸变的八面体的配位环境. O(1)、O(4)、N(1)和 N(2)处于赤道平面位置, O(1)和 O(3)处于轴向位置. Ni(1)—O 的键长在 0.2060(2)和 0.2104(2) nm 之间. Ni(1)—N 的键长分别为 0.2071(3)和 0.2717(14) nm. 分子中, 均苯四甲酸上的 4 个羧基基团已全部去质子化, 但只有对位上的 2 个羧基分别用其中的 1 个 O 原子以单齿的形式连接 2 个 Ni(II)离子, 使化合物被连成了双核结构(图 4).

晶体中存在着大量的氢键将化合物(2)网成 2D 层面结构. *b* 方向上, 配位水分子的 O(2)以二分叉的形式分别与另一个分子中的配位水分子的 O(1)和羧基氧原子 O(7)形成氢键, O(2)—H···O(1)以及 O(2)—

图 5 化合物(2)在 *b* 方向的氢键Fig.5 Hydrogen bonds in complex (2) along *b*-axis
2,2-bipy molecules have been omitted for clarity. 图 6 化合物(2)在 *bc* 平面上 2D 的氢键Fig.6 2D hydrogen bond networks of complex (2) at *bc* plane

H···O(7)之间的距离分别为 0.2821 和 0.3153 nm, 而 O(1)和 O(7)又分别与另一个分子的羧基氧原子 O(5)和配位水分子的 O(3)形成氢键, O(1)—H···O(5)以及 O(3)—H···O(7)之间的距离分别为 0.2670 和 0.2720 nm. 这样顺次下去, 化合物就被连成沿 *b* 方向的 1D 无限链(图 5).

c 方向上, 配位水分子和羧基 O 原子之间又以与 *b* 方向相同的形式将化合物连成 1D 链. 因此, 化合物(2)被氢键连成了 2D 无限结构(图 6). 化合物(1)和(2)的键长、键角见附表 2s.

2.3 化合物的光物理性能

化合物(1)的表面光电压谱(图 7), 在 300–800 nm 范围内存在 2 处明显的光伏响应带. 其中 300–550 nm 处的光伏响应带是 1 个重叠带. 经过 Origin 7.0 处理后, 得到 2 处不同强度的光伏响应带: $\lambda_{\max}=342$ nm 的响应带可以归属为配体与金属之间的电荷转移跃迁, LMCT; $\lambda_{\max}=401$ nm 和 $\lambda_{\max}=698$ nm 的响应带可以归属为 Ni(II)(d^8) 离子的 $d \rightarrow d^*$ 跃迁 ($^3A_{2g} \rightarrow ^3T_{1g}$, $^3A_{2g} \rightarrow ^3T_{1g}$)引起的.

图 7 化合物(1)的表面光电压光谱

Fig.7 SPS of complex (1)

SPS: surface photovoltage spectrum;
Dotted lines are treated by Origin 7.0.

图8 化合物(1)的紫外-可见-近红外吸收光谱

Fig.8 UV-Vis-NIR absorption spectrum of complex (1)

化合物的SPS与其UV-Vis吸收光谱有较好的对应关系. 在化合物(1)的UV-Vis谱(图8)中, 明显观察到5个很强的吸收峰, 其中256 nm的峰可以归属为配体的 $\pi \rightarrow \pi^*$ 吸收峰; 300 nm可以归属为配体与金属之间的LMCT; 402、738和1180 nm的3个吸收峰分别对应Ni(II)离子的 $d \rightarrow d^*$ 跃迁(${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_{1g}(P)$, ${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_{1g}(F)$, ${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_{2g}$). 与化合物(1)的SPS对比可见, UV-Vis光谱中300、402和738 nm的3个吸收峰分别与SPS中 $\lambda_{\max}$ 为342、401和698 nm的3个响应带相对应.

化合物(2)的表面光电压谱(图9), 在300–800 nm范围内也存在2个明显的光伏响应带. 其中, 300–600 nm范围内的响应带经过Origin7.0处理后, 得到2个不同强度的光伏响应带: $\lambda_{\max}=349$ nm和 $\lambda_{\max}=399$ nm, 其中 $\lambda_{\max}=349$ nm的光伏响应带可以归属为配体与金属之间的电荷转移跃迁(LMCT), $\lambda_{\max}=399$ nm的谱带可以归属为Ni(II)(d^8)离子的 $d \rightarrow d^*$ 跃迁 (${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_{1g}$). 此外在600 nm以后的 $\lambda_{\max}=687$

图9 化合物(2)的表面光电压光谱

Fig.9 SPS of complex (2)

Dotted lines are treated by Origin 7.0.

nm的光伏响应带是由Ni(II)(d^8)离子的 $d \rightarrow d^*$ 跃迁(${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_{1g}$)引起的.

从化合物(2)的UV-Vis谱(图10)中明显可以观察到2个很强的吸收峰带, 其中256 nm处的肩峰可以归属为配体的 $\pi \rightarrow \pi^*$ 吸收峰; 306 nm的吸收峰可以归属为配体与金属之间的LMCT; 404、742和1124 nm的3个吸收峰分别对应Ni(II)(d^8)离子的 $d \rightarrow d^*$ 跃迁(${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_{1g}(P)$, ${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_{1g}(F)$, ${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_{2g}$). UV-Vis光谱中306、404和742 nm的3个吸收峰分别与SPS(图9)中 $\lambda_{\max}$ 为349、399和687 nm的3个响应带相对应. 由于所用的SPS光谱仪的测定范围是从300–800 nm开始的, 所以在SPS中观察不到300 nm以下和800 nm以上的信息. 至于两者在峰位置上十几个纳米的移动可能是Origin处理带来的.

对比化合物(1)和(2)的SPS, 主要存在两点差异: (I) 化合物(1)在各处的光伏响应强度明显高于化合物(2); 化合物(1)中光伏响应的最大值达到了3.63 μV , 而化合物(2)中光伏响应的最大值却只有0.40 μV . 2个化合物光伏响应强度的明显差别主要受到配合物结构的影响. 化合物(1)是由均苯三甲酸根离子桥连的三核配合物, 而且大量的配位水分子和羧酸根间的氢键又将化合物连接成具有3D结构的超分子. 化合物(2)是由均苯四甲酸桥连的双核化合物, 存在的氢键将化合物连接成2D超分子. 多维的结构能够为传输电子或空穴提供更多的通道, 增强表面光伏响应的强度. (II) 2个化合物中, 由金属Ni(II)(d^8)离子 $d \rightarrow d^*$ 跃迁引起的光伏响应带的形状和位置明显不同, 这可能是由于Ni(II)在配合物中微环境不同的原因. 在化合物(1)中, Ni(II)离子处于略微畸变的八面体场中, 6个配位原子均来自于O原子,

图10 化合物(2)的紫外-可见-近红外吸收光谱

Fig.10 UV-Vis-NIR-absorption spectrum of complex (2)

所以两个 Ni(II)的 $d \rightarrow d^*$ 跃迁带没有产生劈裂. 而化合物(2)中 Ni(II)离子的 6 个配位原子有 2 个来自于 2,2'-联吡啶分子中的 N 原子, 另外 4 个来自于 O 原子, 可见(2)中 Ni(II)的微环境比(1)的对称性低, 所以 2 个 $d \rightarrow d^*$ 带均表现出明显劈裂. 而且(1)的配位微环境较(2)规则得多, 因此(1)中由 Ni(II)离子 $d \rightarrow d^*$ 跃迁引起的光伏响应带比(2)平滑得多. 同时, 我们也可以观察到(1)中由 Ni(II)离子 $d \rightarrow d^*$ 跃迁引起的光伏响应带的位置较(2)发生了微小的红移. 2 个化合物中, 金属 Ni(II)离子 $d \rightarrow d^*$ 跃迁引起的光伏响应带的形状和位置的不同也能从化合物的紫外光谱图中得到很好的佐证. 化合物(1)的紫外光谱中, Ni(II)离子的 3 个 $d \rightarrow d^*$ 跃迁吸收很强, 且分辨得很清晰. 而在化合物(2)的紫外光谱中, Ni(II)离子在 742 和 1124 nm 处的 2 个 $d \rightarrow d^*$ 跃迁吸收带存在一定劈裂、加宽和重叠现象, 这与相应 SPS 谱是一致的. 光谱中体现出的结构变化与 X 射线单晶衍射和表面光电电压测试的结果也是相吻合的.

3 结 论

采用水热方法合成了 2 个 Ni(II)配合物. X 射线单晶衍射表明, 化合物(1)和(2)分别由氢键连接成具有 3D 和 2D 无限结构的配位超分子. 化合物的表面光电电压谱在 300–800 nm 范围内均呈现出正的表面光伏响应, 但是表面光伏响应带的强度、中心金属离子 $d \rightarrow d^*$ 跃迁引起的光伏响应带位置和形状都存在着很大的差别. 这是由于化合物的分子结构和中心金属 Ni(II)所处的配位微环境不同而引起的.

References

- (a) Chae, H. K.; Siberio-Perez, D. Y.; Kim, J.; Go, Y. B.; Eddaoudi, M.; Matzger, A. J.; O'Keeffe, M.; Yaghi, O. M. *Nature*, **2004**, **427**: 523
(b) Sun, W. Y.; Kusakawa, T.; Fujita, M. *J. Am. Chem. Soc.*, **2002**, **124**: 11570
- (a) Rosi, N. L.; Eckert, J.; Eddaoudi, M.; Vodak, D. T.; Kim, J.; O'Keeffe, M.; Yaghi, O. M. *Science*, **2003**, **300**: 1127
(b) Biradha, K.; Fujita, M. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2002**, **41**: 3392
- Evans, O. R.; Lin, W. B. *Accounts Chem. Res.*, **2002**, **35**: 511
- Zimmerman, S. C.; Wendland, M. S.; Rakow, N. A.; Zharov, I.; Suslick, K. S. *Nature*, **2002**, **418**: 399
- Zhang, J.; Zhang, T. L.; Yang, L.; Zhang, J. G.; Cui, Y. *Acta Phys. - Chim. Sin.*, **2008**, **24**(5): 760 [张 进, 张同来, 杨 利, 张建国, 崔 燕. 物理化学学报, **2008**, **24**(5): 760]
- Chen, H.; Xu, X. Y.; Gao, J.; Yang, X. J.; Lu, L. D.; Wang, X. *Acta Phys. -Chim. Sin.*, **2006**, **22**(7): 856 [陈 虎, 许兴友, 高 健, 杨绪杰, 陆路德, 汪 信. 物理化学学报, **2006**, **22**(7): 856]
- Prior, T. J.; Rosseinsky, M. J. *Chem. Commun.*, **2001**, **4**: 495
- Choi, E. Y.; Kwon, Y. U. *Inorg. Chem.*, **2005**, **44**(3): 538
- Choi, E. Y.; Kwon, Y. U. *Inorg. Chem. Commun.*, **2004**, **7**: 942
- Armstrong, W. H.; Roth, M. E.; Lippard, S. J. *J. Am. Chem. Soc.*, **1987**, **109**: 6318
- Kim, J. C.; Lough, A. J.; Kim, H. *Inorg. Chem. Commun.*, **2002**, **5**: 771
- Cho, J.; Lough, A. J.; Kim, J. C. *Inorg. Chim. Acta*, **2003**, **342**: 305
- Yan, Y.; Wu, C. D.; He, X.; Sun, Y. Q.; Lu, C. Z. *Cryst. Growth Des.*, **2005**, **5**(2): 821
- Niu, S. Y.; Fan, H. T.; Jin, J. *Chin. Sci. Bull.*, **2004**, **49**(15): 1499 [牛淑云, 范洪涛, 金 晶. 科学通报, **2004**, **49**(15): 1499]
- Sun, L. P.; Niu, S. Y.; Jin, J.; Yang, G. D.; Ye, L. *Inorg. Chem. Commun.*, **2006**, **9**: 679
- Sun, L. P.; Niu, S. Y.; Jin, J.; Zhang, L. *Eur. J. Inorg. Chem.*, **2007**: 3845
- Zhang, L.; Niu, S. Y.; Jin, J.; Sun, L. P. *Chin. Sci. Bull.*, **2008**, **53** (3): 339
- Lin, Y. H.; Wang, D. J.; Zhao, Q. D. *J. Phys. Chem. B*, **2004**, **108** (10): 3202
- Kronik, L. Y. *Surf. Sci. Rep.*, **1999**, **37**(1–5): 1
- Qi, M. H.; Liu, G. F. *J. Phys. Chem. B*, **2003**, **107**(31): 7640
- Donchev, V.; Kirilov, K.; Ivanov, T. *Mater. Sci. Eng. B*, **2006**, **129**: 186
- Daiguebonne, C.; Deluzet, A.; Camara, M. *Cryst. Growth Des.*, **2003**, **3**(6): 1015
- Li, X. H.; Xiao, H. P.; Hu, M. L. *Acta Cryst.*, **E2004**, **60**: m242