

[Article]

doi: 10.3866/PKU.WHXB201112232

www.whxb.pku.edu.cn

## 磷酸铋纳米棒的可控合成及其光催化性能

刘艳芳<sup>2</sup> 马新国<sup>1</sup> 易欣<sup>3</sup> 朱永法<sup>1\*</sup><sup>1</sup>清华大学化学系, 北京 100084; <sup>2</sup>北京化工大学理学院, 北京 100029; <sup>3</sup>上海师范大学化学系, 上海 200234

**摘要:** 采用水热法合成了形貌可控的磷酸铋纳米棒光催化剂, 并以亚甲基蓝(MB)为探针研究了其光催化活性. 利用粉末X射线衍射(XRD), 透射电镜(TEM)和紫外-可见漫反射光谱(UV-Vis DRS)对产物进行了表征. 研究发现甘油含量、水热时间、水热温度及前驱体浓度会影响磷酸铋纳米棒的形貌及结构. 甘油含量和前驱体浓度主要影响产物形貌. 随着甘油含量的增加, 产物的长径比先增大后减小. 前驱体浓度越低, 所得BiPO<sub>4</sub>纳米棒的尺寸越小, 长径比越大. 水热时间短时, 产物结晶度差, 且为六方相, 时间延长后转化为单斜相. 水热温度过低或过高均不利于完美晶体的形成, 160 °C时产物的结晶度最高. 实验结果表明: BiPO<sub>4</sub>纳米棒在紫外光下具有良好的光催化性能, 其光催化活性受长径比和尺寸大小影响的总体趋势是长径比越大, 尺寸越小, 其光催化活性越强. 结晶度对BiPO<sub>4</sub>的光催化性能影响较大, 结晶度越高, 其光催化活性越好. 单斜相BiPO<sub>4</sub>的光催化活性较六方相的强.

**关键词:** 磷酸铋; 纳米棒; 水热法; 可控合成; 光催化; 亚甲基蓝**中图分类号:** O643

## Controllable Synthesis and Photocatalytic Performance of Bismuth Phosphate Nanorods

LIU Yan-Fang<sup>2</sup> MA Xin-Guo<sup>1</sup> YI Xin<sup>3</sup> ZHU Yong-Fa<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Department of Chemistry, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China; <sup>2</sup>College of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, P. R. China; <sup>3</sup>Department of Chemistry, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, P. R. China

**Abstract:** BiPO<sub>4</sub> nanorods with controlled morphologies were fabricated using a hydrothermal method. The photocatalytic activity of the BiPO<sub>4</sub> nanorods was investigated by their ability to degrade methylene blue (MB). The products were characterized by X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), and UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy (DRS). It was found that glycerol content, reaction time and temperature, and concentration of precursor influenced the morphology and structure of the product. The glycerol content and concentration of precursor mainly influence the morphology of the product. As the glycerol content increases, the aspect ratio first increases, and then decreases. The aspect ratio of the product increases and the size decreases as the concentration of precursor is lowered. When the reaction time is short, the crystallinity of the product is poor, and it forms a hexagonal phase. Hexagonal BiPO<sub>4</sub> transforms into the monoclinic product when the reaction time is longer. The optimal temperature for crystal formation was found to be 160 °C. The results show that BiPO<sub>4</sub> nanorods possess excellent photocatalytic activity under ultraviolet light. The photocatalytic activity of BiPO<sub>4</sub> increased with an increase of aspect ratio and decrease of particle size. The crystallinity of the product has a significant influence on its photocatalytic activity. BiPO<sub>4</sub> with higher crystallinity has higher photocatalytic activity, and monoclinic BiPO<sub>4</sub> has higher photocatalytic activity than hexagonal BiPO<sub>4</sub>.

Received: September 15, 2011; Revised: December 12, 2011; Published on Web: December 23, 2011.

\*Corresponding author. Email: zhuyf@tsinghua.edu.cn; Tel/Fax: +86-10-62787601.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (20925725, 50972070, 51102150) and National Key Basic Research Program of China (973) (2007CB613303).

国家自然科学基金(20925725, 50972070, 51102150)及国家重点基础研究发展规划项目(973) (2007CB613303)资助

© Editorial office of *Acta Physico-Chimica Sinica*

**Key Words:** Bismuth phosphate; Nanorod; Hydrothermal method; Controllable synthesis; Photocatalysis; Methylene blue

## 1 引言

半导体光催化因其在环境治理和新能源开发方面的优势,近年来成为被广泛关注的前沿课题之一。目前研究最广泛的光催化材料是 $\text{TiO}_2$ ,但是其存在太阳光利用率低,光生电子-空穴对复合率高等不易克服的缺点。针对 $\text{TiO}_2$ 光催化材料进行改性,如离子掺杂、半导体复合和贵金属沉积、表面敏化等,<sup>1</sup>虽然可以部分地改善 $\text{TiO}_2$ 光催化材料的性能,但仍然存在很多关键性的科学问题没有解决。因此,开展新型非传统高活性、高效光催化材料的研究,已成为光催化领域的一个重要方向,其中,多元金属氧化物材料在该领域的发展最为引人注目。<sup>2</sup>

非金属含氧根如硫酸盐、磷酸盐等酸根离子具有结构稳定性好,不易产生氧空位缺陷等优势,研究发现 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 作为表面修饰剂来修饰 $\text{TiO}_2$ 可使其光催化活性提高。<sup>3</sup>赵进才等<sup>4</sup>系统地研究了 $\text{PO}_4^{3-}$ 修饰 $\text{TiO}_2$ 对不同污染物的降解机理,发现 $\text{PO}_4^{3-}$ 不但能改变光催化反应速率,而且能改变催化途径,其能加快羟基自由基对有机物的进攻,而阻止空穴直接氧化有机物。最近研究发现新型铋盐光催化剂不仅具有很高的紫外和可见光催化降解有机物的能力,并且具有很好的光电转换效率和光化学稳定性,如 $\text{BiVO}_4$ ,<sup>5</sup> $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ,<sup>6</sup> $\text{BiOCl}$ <sup>7</sup>等。本课题组采用水热法合成的纳米化的 $\text{BiWO}_4$ ,<sup>8</sup>和 $\text{BiMoO}_6$ ,<sup>9</sup>具有显著的光催化有机物的活性,并首次报道了 $\text{BiPO}_4$ 具有比P25更高的光催化性能,<sup>10</sup>磷酸铋的颗粒大小是影响其光催化活性的因素之一,小尺寸磷酸铋纳米颗粒的光催化活性较强。<sup>11</sup>

对光催化纳米材料形貌的控制已经成为该领域研究的热点。Wang等<sup>12</sup>对 $\text{BiVO}_4$ 纳米结构进行调控,制备出由纳米棒构成的分等级纳米微球结构,使其光催化活性提高了近20倍。近几年来,本课题组研究了具有层状结构的 $\text{Bi}_2\text{WO}_6$ ,<sup>13</sup> $\text{ZnWO}_4$ ,<sup>14</sup>等钨酸盐系列氧化物,发现其光催化性能与结晶度、形貌等有很大关系。晶化的 $\text{Bi}_2\text{WO}_6$ 比无定形态具有更好的催化能力。 $\text{ZnWO}_4$ 纳米棒比纳米颗粒具有更多垂直于[100]方向的晶面,而垂直于该方向的晶面含有W和O原子,具有更高的活性。最近,Pan等<sup>15</sup>发现单斜相磷酸铋的光催化活性远比六方相的强。Li等<sup>16</sup>报道增大 $\text{ZnWO}_4$ 纳米棒的长径比有利于减小光

生电子与空穴的复合几率,从而增强其光催化活性。因此合成小尺寸,长径比大的纳米棒可能会得到光催化活性更强的光催化剂。Xue等<sup>17</sup>报道一定比例的甘油与水作为溶剂可以得到长径比为4-20的 $\text{BiPO}_4$ 纳米棒,但其并没有研究 $\text{BiPO}_4$ 形貌与其光催化活性的关系。

本文采用水热法制备了形貌可控的磷酸铋纳米棒,并以光催化降解典型的水溶性染料亚甲基蓝为模型,探讨了形貌及结构对磷酸铋纳米棒光催化性能的影响,以期揭示磷酸铋纳米棒光催化性能与其形貌和结构的联系。

## 2 实验方法

### 2.1 试剂及分析方法

$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (分析纯,北京化工厂),  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (分析纯,北京化工厂), 丙三醇(分析纯,天津市福晨化学试剂厂), 亚甲基蓝(指示剂,天津化学试剂有限公司), 去离子水(自制)。采用JEM 2100透射电镜观察产物颗粒形貌及尺寸,样品分析时采用的电子束加速电压为100 kV;采用德国Bruker D8 Advance型X射线衍射仪(Cu靶 $K_\alpha$ 射线, $\lambda=0.154$  nm,管电压40 kV,管电流20 mA)测试产物的晶型。催化剂的吸收光谱在装有积分球附件的Hitachi U-3010紫外-可见漫反射分光光度计(UV-Vis DRS)上进行,参比为 $\text{BaSO}_4$ 片,扫描范围200-800 nm。

### 2.2 $\text{BiPO}_4$ 纳米棒的合成过程

考察甘油含量对产物的影响。在磁力搅拌下,将3 mmol  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 加入到120 mL一定甘油/水比例的混合溶液中,然后加入3 mmol  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,继续搅1 h。将混合物转移到带聚四氟乙烯内衬的反应釜中,封口后,在160 °C下反应24 h。产物离心,并依次用去离子水和无水乙醇各洗两次,在120 °C下干燥1 h备用。考察水热时间对产物的影响时,溶剂为40 mL甘油/水的混合溶液(甘油含量为5%),改变水热时间,其他条件不变。考察水热温度对产物的影响时,溶剂为40 mL甘油/水的混合溶液(甘油含量为5%(体积分数)),水热时间为17 h,改变水热温度,其他条件不变。考察前驱体浓度对产物的影响时,水热时间为17 h,水热温度为200 °C,改变甘油/水混合溶液的体积(甘油含量为5%),其他条

件不变.

### 2.3 紫外光催化活性评价过程

采用亚甲基蓝(MB)为目标降解物. 光催化评价过程: 取  $1.0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 MB 溶液 100 mL, 加入 50 mg 催化剂. 超声分散 10 min, 再搅拌 10 min. 放于评价装置中进行活性评价, 其中紫外光稳定时的光强为  $1.03 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ . 每隔 5 min 关灯取样一次(取样 6 mL), 离心一次(离心机转速  $12000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ), 取上层清液, 使用 Hitachi U-3010 紫外-可见分光光度计检测亚甲基蓝的剩余浓度.

### 3 结果与讨论

图 1 是不同甘油含量及不同前驱体浓度下合成的磷酸铋的 TEM 照片. 从图中可以看出, 溶剂完全为甘油时, 产物为球形颗粒, 水的存在有利于纳米棒的形成. 当甘油含量高时, 产物形貌较均一. 表 1

给出了甘油含量与产物形貌的关系. 当甘油含量低于 50% 时,  $\text{BiPO}_4$  纳米棒的直径无明显变化; 随着甘油含量的增大, 纳米棒长度及长径比的变化趋势是先增大后减小, 这与黄可龙等<sup>18</sup>在制备四氧化三钴时的现象相似. 据文献<sup>19</sup>报道,  $\text{BiPO}_4$  的形成分为两个过程: 首先是反应物在溶液中迁移到达晶核表面, 然后与晶核反应生成特定形貌的产物. 第一个过程受溶液粘度的影响很大: 当溶液粘度大时, 反应物的迁移受到抑制, 使晶核表面的反应物浓度很小, 晶核生长速率也很小, 这有助于晶核各向同性生长. 因此, 当溶剂完全为甘油时, 产物为 25 nm 左右的颗粒; 当水的比例上升时, 溶液粘度减小, 有助于产物的各向异性生长, 在某些晶面存在优势生长而形成纳米棒. 产物长径比的变化趋势并不与甘油含量的变化呈简单的正比或反比关系, 而是先增大后减小, 这可能与产物自身的性质有关. 水热时间

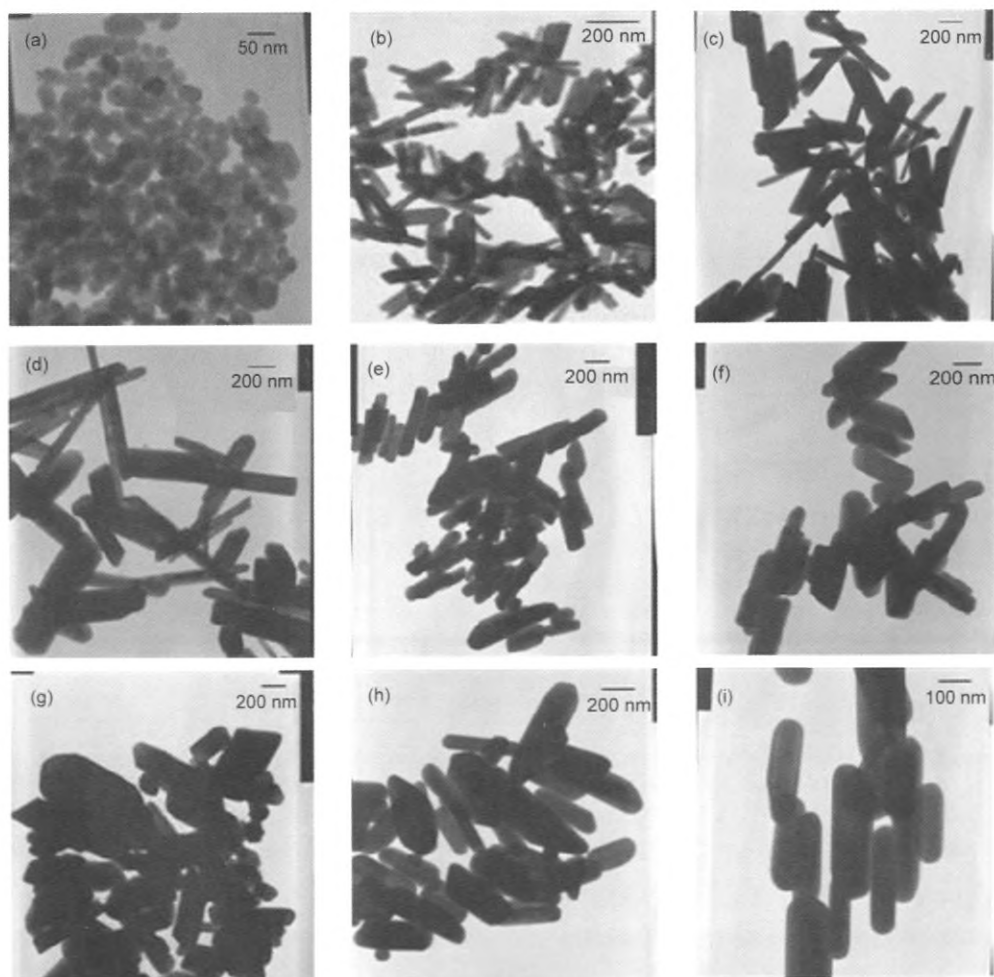


图 1 不同甘油含量(a-f)及不同前驱体浓度(g-i)制备的  $\text{BiPO}_4$  的 TEM 照片  
Fig.1 TEM images of  $\text{BiPO}_4$  synthesized with different glycerol contents (a-f) and different precursor concentrations (g-i)

glycerol content (volume fraction): (a) 100%, (b) 80%, (c) 50%, (d) 25%, (e) 5%, (f) 0%; c(precursor)/(mmol·L<sup>-1</sup>): (g) 75, (h) 25, (i) 12.5

表1 甘油含量对BiPO<sub>4</sub>的形貌及BiPO<sub>4</sub>纳米棒直径、长度和长径比的影响Table 1 Effect of glycerol contents on the microshape of BiPO<sub>4</sub> and diameter, length, and aspect ratio of BiPO<sub>4</sub> nanorods

$W_{\text{glycerol}}/\%$	BiPO <sub>4</sub> microshape	Mean diameter/nm	Mean length/nm	Aspect ratio
0	nanorod	100	350	3.5
5	nanorod	100	500	5
25	nanorod	100	800	8
50	nanorod	100	700	7
80	nanorod	40	180	4.5
100	nanoparticle	25	-	-

表2 前驱体浓度对BiPO<sub>4</sub>的形貌及BiPO<sub>4</sub>纳米棒直径、长度和长径比的影响Table 2 Effect of precursor concentration on the microshape of BiPO<sub>4</sub> and diameter, length, and aspect ratio of BiPO<sub>4</sub> nanorods

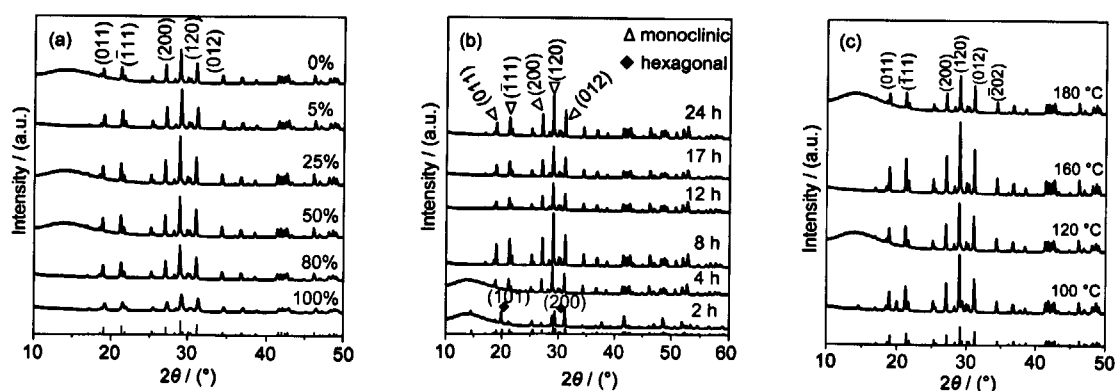
$V_{\text{solvent}}/\text{mL}$	$C_{\text{precursor}}/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$	BiPO <sub>4</sub> microshape	Mean diameter/nm	Mean length/nm	Aspect ratio
40	75	nanorod	150	300	2
120	25	nanorod	100	500	5
240	12.5	nanorod	50	300	6

及水热温度对BiPO<sub>4</sub>纳米棒的长径比影响不大. 由表2可以看出在一定范围内, 前驱体浓度越低, 产物的尺寸越小, 长径比越大, 这与向群<sup>20</sup>及陈亚芍<sup>21</sup>等的研究结果一致. 当反应物浓度降低到一定程度时, 晶核长大过程中团聚的机会减小, 有利于降低产物的尺寸.

图2是不同甘油含量, 不同水热时间及不同水热温度下所得BiPO<sub>4</sub>的XRD谱图. 由图2可知, 甘油含量对产物的晶相没有影响. 各产物的衍射峰位完全相同,  $2\theta$ 为19.0°、21.4°、27.1°、29.1°、31.2°的衍射峰分别对应于单斜相BiPO<sub>4</sub> (JCPDS No. 15-0767)的(011)、( $\bar{1}$ 11)、(200)、(120)、(012)晶面. 当甘油含量少时, 产物在 $2\theta$ 为15°处出现了宽的衍射峰, 这是非晶的衍射峰. 但甘油含量为5%时, 此衍射峰没有出现, 且其特征衍射峰十分尖锐, 说明此时产物的结晶度较高. 溶剂完全为甘油时, 产物的特征峰较宽,

这可能是产物粒径较小, 缺陷较多, 结晶度差造成的. 由以上分析可得以下结论: 改变甘油含量不会改变产物的晶相, 但会影响产物的结晶度. 水热时间会影响产物的晶相. 2 h的产物不但有单斜相的特征衍射峰, 而且在 $2\theta$ 为14.6°、20.1°、29.5°处出现了衍射峰, 这与六方相(JCPDS No. 45-1370)的衍射峰相对应, 且此时六方相衍射峰比单斜相的强度大, 说明短时间内易形成六方相BiPO<sub>4</sub>, 水热时间延长后, 产物主要为单斜相. 可以推测, 六方相的BiPO<sub>4</sub>经过一定时间后会逐渐转化为单斜相. 这说明单斜相的BiPO<sub>4</sub>较其他相更稳定.<sup>22</sup> 在本实验所做温度范围内, 晶相没有随温度变化而变化, 产物都是单斜相, 且在160 °C时产物结晶度最高.

图3是不同甘油含量及不同水热时间下所得产物的UV-Vis DRS图. 由图3可知, 不同实验条件下形成的产物吸收边界相同. 根据禁带宽度( $E_g/\text{eV}$ )的

图2 不同甘油含量(a), 不同水热时间(b)及不同水热温度(c)制备的BiPO<sub>4</sub>纳米棒的XRD图谱Fig.2 XRD patterns of BiPO<sub>4</sub> nanorods obtained with different glycerol contents (a), different hydrothermal time (b), and different hydrothermal temperatures (c)

JCPDS No. 15-0767 (monoclinic BiPO<sub>4</sub>) and JCPDS No. 45-1370 (hexagonal BiPO<sub>4</sub>) as references

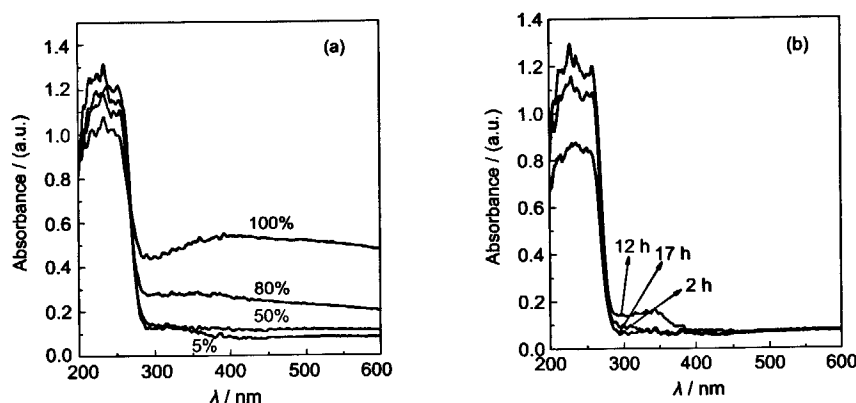


图3 不同甘油含量(a)及不同水热时间(b)合成  $\text{BiPO}_4$  纳米棒的 UV-Vis DRS

Fig.3 UV-Vis DRS of  $\text{BiPO}_4$  nanorods obtained with different glycerol contents (a) and under different hydrothermal time (b)

公式:  $E_g = 1240/\lambda$ , 可以判断产物的禁带宽度相同. 甘油含量为 100% 和 80% 时产物在 400 nm 左右吸收很强, 可能是氧缺陷、羟基缺陷或其他缺陷较多造成的, 也可能是小尺寸效应造成的. 2 h 合成的产物在紫外区的吸收能力差, 而 12 h 制备的产物在 350 nm

处有吸收峰, 可能此时存在的缺陷较多, 17 h 合成的产物的紫外吸收能力强, 且在 350 nm 处无吸收, 说明其缺陷较少, 即随着水热时间的延长, 纳米晶结晶趋于完美. 与宋旭春等<sup>23</sup>的结论一致.

图 4 是表观速率常数 ( $k$ ) 与甘油含量、水热时

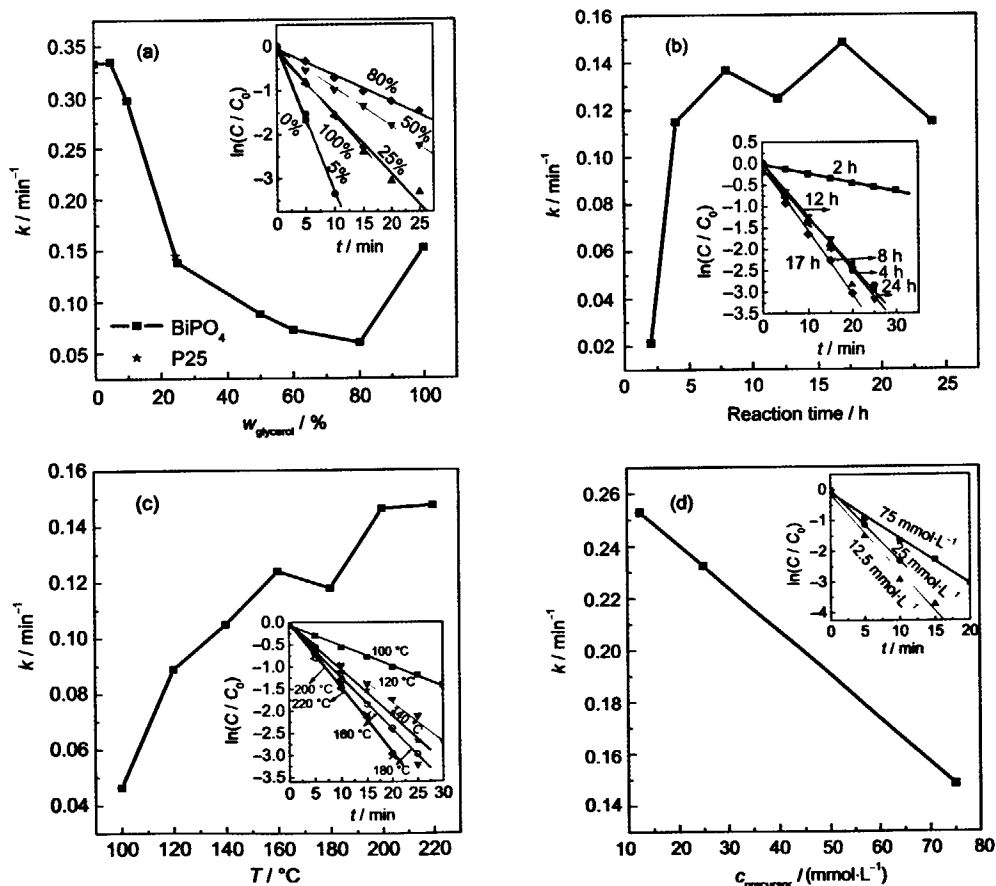


图 4 表观速率常数 ( $k$ ) 与甘油含量(a), 水热时间(b), 水热温度(c)及前驱体浓度(d)的关系曲线

Fig.4 Relation curves of apparent rate constant ( $k$ ) vs glycerol content (a),  $k$  vs hydrothermal time (b),  $k$  vs hydrothermal temperature (c), and  $k$  vs precursor concentration (d)

The inserted figures are fitted curves of  $\ln(C/C_0)$  vs irradiation time ( $t$ ).

间、水热温度及前驱体浓度的关系曲线, 插图为拟合曲线(大量实验表明, 光催化过程可以用 Langmuir-Hinshelwood 动力学方程来表征,<sup>24</sup> 低浓度时, 满足  $\ln(C/C_0) = -kt$ ,<sup>9,25,26</sup> 其中,  $C_0$  为反应物的初始浓度)。由图 4 可知, 在一定范围内, 前驱体浓度越低, 产物的光催化活性越强, 而前驱体浓度较低时形成的产物尺寸较小, 长径比较大, 因此光催化活性增强可能是这两种原因造成的。据文献<sup>27</sup>报道,  $\text{BiFeO}_3$  的光催化活性随着颗粒尺寸的减小而增加, 因为随着颗粒尺寸的减小, 产生的光生电子-空穴对在体内复合的几率减小, 电子-空穴对更能有效迁移到催化剂表面; 而且颗粒尺寸越小, 比表面积越大, 从而为光催化反应提供更多可利用的表面活性位置。甘油含量为 5% 时产物的光催化活性最强, 80% 时最差, 而这两种情况下产物的长径比相近, 不符合长径比越大光催化活性越强的关系, 也不符合尺寸越小光催化活性越强的规律, 因此可能有其他原因是主导因素。催化剂的光催化活性主要取决于其晶体结构、晶化度, 晶粒尺寸和比表面积等因素。<sup>28</sup> 从图 4 可看出, 甘油含量为 5%, 水热时间为 8、12、17、24 h, 水热温度为 160 °C 的条件下, 产物的光催化活性都较强, 而这些条件下合成产物的衍射峰都很尖锐, 且在小角度时没有出现非晶的衍射峰, 即产物结晶较好, 因此可以得出以下结论:  $\text{BiPO}_4$  纳米棒的结晶度越高, 其光催化活性越强。对于晶型的影响, 4 h 合成的  $\text{BiPO}_4$  光催化活性比 2 h 的明显增强, 而这两者的区别在于晶相的不同: 4 h 合成的  $\text{BiPO}_4$  主要为单斜相, 而 2 h 的产物为六方相, 因此可推测单斜相  $\text{BiPO}_4$  的光催化活性比六方相的强。这与我们前期的研究结果<sup>15</sup>一致。另外, 与 P25 相比, 甘油含量为 5%、水热温度为 160 °C、水热时间 24 h 的条件下得到的  $\text{BiPO}_4$  的光催化活性是同等条件下 P25 光催化活性的 2.3 倍, 可见  $\text{BiPO}_4$  具有良好的光催化活性。

#### 4 结论

采用水热法控制合成不同形貌及结构的  $\text{BiPO}_4$  纳米棒光催化剂。发现溶剂(甘油含量)及前驱体浓度对产物的形貌影响最大。溶剂为纯甘油时, 产物为球形颗粒, 只要有水存在, 产物即为棒状, 且其长径比随甘油含量的增加先增大后减小。前驱体浓度越低, 所得  $\text{BiPO}_4$  纳米棒尺寸越小, 长径比越大。水热时间及水热温度对产物的长径比影响不大, 但对其结晶度及晶相影响较大。水热时间短时, 产物结

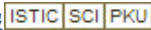
晶度差, 且为六方相, 时间延长后产物结晶完善, 且在 8 h 后完全为单斜相; 水热温度过低或过高, 均不利于完美晶体的形成, 160 °C 时产物的结晶度最高。  $\text{BiPO}_4$  的光催化活性受多种因素影响。研究发现, 长径比对  $\text{BiPO}_4$  的光催化活性影响不是特别明显, 总体趋势是长径比越大, 尺寸越小, 产物的光催化活性越强。结晶度对产物的光催化活性影响较大, 结晶度越高, 产物的光催化活性越强。单斜相  $\text{BiPO}_4$  的光催化活性较六方相的强。本实验中磷酸铋只有在紫外光下才具有光催化活性, 其在可见光下的光催化活性有待进一步研究。

#### References

- (1) Chen, X. B.; Shen, S. H.; Guo, L. J.; Mao, S. S. *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 6503.
- (2) Kudo, A.; Mesiki, Y. *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 253.
- (3) Qin, X.; Jing, L. Q.; Xue, L. P.; Luan, Y. B.; Fu, H. G. *Chin. J. Inorg. Chem.* **2008**, *24*, 1108. [秦旭, 井立强, 薛连鹏, 栾云博, 付宏刚. 无机化学学报, **2008**, *24*, 1108.]
- (4) Zhao, D.; Chen, C. C.; Wang, Y. F.; Ji, H. W.; Ma, W. H.; Zhao, J. C. *J. Phys. Chem. C* **2008**, *112*, 5993.
- (5) Tokunaga, S.; Kato, H.; Kudo, A. *Chem. Mater.* **2001**, *13*, 4624.
- (6) Yao, W. F.; Xu, X. H.; Wang, H.; Zhou, J. T.; Yang, X. N.; Zhang, Y.; Shang, S. X.; Huang, B. B. *Appl. Catal. B* **2004**, *52*, 109.
- (7) Zhang, K. L.; Liu, C. M.; Huang, F. Q.; Zheng, C.; Wang, W. D. *Appl. Catal. B* **2006**, *68*, 125.
- (8) Fu, H. B.; Pan, C. S.; Zhang, L. W.; Zhu, Y. F. *Mater. Res. Bull.* **2007**, *42*, 696.
- (9) Zhang, L. W.; Xu, T. G.; Zhao, X.; Zhu, Y. F. *Appl. Catal. B* **2010**, *98*, 138.
- (10) Pan, C. S.; Zhu, Y. F. *Environ. Sci. Technol.* **2010**, *44*, 5570.
- (11) Pan, C. S.; Zhu, Y. F. *J. Mater. Chem.* **2011**, *21*, 4235.
- (12) Shang, M.; Wang, W. Z.; Ren, J.; Sun, S. M.; Zhang, L. *CrystEngComm* **2010**, *12*, 1754.
- (13) Fu, H. B.; Zhang, S. C.; Xu, T. G.; Zhu, Y. F.; Chen, J. M. *Environ. Sci. Technol.* **2008**, *42*, 2085.
- (14) Shi, R.; Wang, Y. J.; Li, D.; Xu, J.; Zhu, Y. F. *Appl. Catal. B* **2010**, *100*, 173.
- (15) Pan, C. S.; Li, D.; Ma, X. G.; Chen, Y.; Zhu, Y. F. *Catal. Sci. Technol.* **2011**, *1*, 1399.
- (16) Li, D.; Shi, R.; Pan, C. S.; Zhu, Y. F.; Zhao, H. J. *CrystEngComm* **2011**, *13*, 4695.
- (17) Xue, F.; Li, H. B.; Zhu, Y. C.; Xiong, S. L.; Zhang, X. W.; Wang, T. T.; Liang, X.; Qian, Y. T. *J. Solid State Chem.* **2009**, *182*, 1396.
- (18) Huang, K. L.; Liu, R. S.; Yang, Y. P.; Liu, S. Q.; Wang, L. P. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2007**, *23*, 655. [黄珂龙, 刘人生, 杨幼平, 刘素琴, 王丽平. 物理化学学报, **2007**, *23*, 655.]

- (19) Li, G. F.; Ding, Y.; Zhang, Y. F.; Lu, Z.; Sun, H. Z.; Chen, R. *J. Colloid Interface Sci.* **2011**, *363*, 497.
- (20) Xiang, Q.; Liu, R. L.; Shi, L. Y.; Pan, Q. Y. *Journal of Shanghai University (Natural Science)* **2006**, *12*, 12. [向群, 刘荣利, 施利毅, 潘庆谊. 上海大学学报(自然科学版), **2006**, *12*, 12.]
- (21) Zhu, W. Q.; Xu, L.; Ma, J.; Ren, J. M.; Chen, Y. S. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2010**, *26*, 1284. [朱文庆, 许磊, 马瑾, 任建梅, 陈亚苟. 物理化学学报, **2010**, *26*, 1284.]
- (22) Rose, C. L.; Mooney-Slater. *Z. Kristallogr.* **1962**, *117*, 371.
- (23) Song, X. C.; Yang, E.; Zheng, Y. F.; Wang, Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2007**, *23*, 1123. [宋旭春, 杨娥, 郑遗凡, 王芸. 物理化学学报, **2007**, *23*, 1123.]
- (24) Terzian, R.; Serpone, N.; Minero, C.; Pelizzetti, E. *J. Catal.* **1991**, *128*, 352.
- (25) Xu, P. C.; Liu, Y.; Wei, J. H.; Xiong, R.; Pan, C. X.; Shi, J. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2010**, *26*, 2261. [许平昌, 柳阳, 魏建红, 熊锐, 潘春旭, 石兢. 物理化学学报, **2010**, *26*, 2261.]
- (26) Fu, H. B.; Yao, W. Q.; Zhang, L. W.; Zhu, Y. F. *Mater. Res. Bull.* **2008**, *43*, 2617.
- (27) Xian, T.; Yang, H.; Dai, J. F.; Wei, Z. Q.; Ma, J. Y.; Feng, W. J. *Chin. J. Catal.* **2011**, *32*, 618. [县涛, 杨华, 戴剑锋, 魏智强, 马金元, 冯旺军. 催化学报, **2011**, *32*, 618.]
- (28) Xiao, Y.; Dang, L. Q.; An, L. Z.; Bai, S. Y.; Lei, Z. B. *Chin. J. Catal.* **2008**, *29*, 31. [肖义, 党利琴, 安丽珍, 白士英, 雷志斌. 催化学报, **2008**, *29*, 31.]

## 磷酸铋纳米棒的可控合成及其光催化性能

作者: 刘艳芳, 马新国, 易欣, 朱永法, LIU Yan-Fang, MA Xin-Guo, YI Xin, ZHU Yong-Fa  
作者单位: 刘艳芳, LIU Yan-Fang(北京化工大学理学院, 北京, 100029), 马新国, 朱永法, MA Xin-Guo, ZHU Yong-Fa(清华大学化学系, 北京, 100084), 易欣, YI Xin(上海师范大学化学系, 上海, 200234)  
刊名: 物理化学学报   
英文刊名: Acta Physico-Chimica Sinica  
年, 卷(期): 2012, 28(3)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wlhxb201203024.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wlhxb201203024.aspx)