

液相法制备BiVO₄微纳米材料研究进展

顾 淼¹, 徐红娟², 尤 梦², 林晓岚², 沈幸月², 卞 豪², 孙同明^{2*}

¹通州高级中学, 江苏 南通

²南通大学化学与化工学院, 江苏 南通

收稿日期: 2022年7月21日; 录用日期: 2022年8月17日; 发布日期: 2022年8月25日

摘 要

BiVO₄作为一种优良的半导体材料, 在光催化领域内引起了人们广泛的关注。与其他半导体材料相比, 单相晶相BiVO₄有着更低的带隙能(约2.4 eV), 因此在可见光区的响应特性, 赋予了其优越的光催化性能。本论文综述了BiVO₄微纳米材料的常见液相合成法, 包括水热法、共沉淀法、溶胶-凝胶法、微乳液法等。针对单一BiVO₄光生电子和空穴易复合、迁移速率较慢等缺点, 本文归纳了几种改性方法: 形貌调控, 调节其形状及比表面积大小, 实现BiVO₄的光催化能力的提高; 构建异质结, 与半导体材料、贵金属等复合, 改变其表面组成, 从而提高BiVO₄的光催化性能。最后分析了目前的制备方法中的不足之处并提出展望。

关键词

BiVO₄, 纳米材料, 液相法, 可控合成, 光催化

Recent Advances in the Preparation of BiVO₄ Micro/Nanomaterials by Liquid Phase Method

Miao Gu¹, Hongjuan Xu², Meng You², Xiaolan Lin², Xingyue Shen², Hao Bian², Tongming Sun^{2*}

¹Tongzhou Senior High School, Nantong Jiangsu

²College of Chemistry and Chemical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu

Received: Jul. 21st, 2022; accepted: Aug. 17th, 2022; published: Aug. 25th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 顾淼, 徐红娟, 尤梦, 林晓岚, 沈幸月, 卞豪, 孙同明. 液相法制备 BiVO₄ 微纳米材料研究进展[J]. 纳米技术, 2022, 12(3): 137-144. DOI: 10.12677/nanotechnology.2022.123016

Abstract

As an excellent semiconductor material, BiVO_4 has attracted widespread attention in the field of photocatalysis. In comparison with other common semiconductor materials, the monoclinic has a lower band gap energy (about 2.4 eV) and thereby exhibiting visible light responsive and excellent photocatalytic properties. In this work, we will overview the common liquid-phase synthetic methods of BiVO_4 micro/nanomaterials, including the hydrothermal method, co-precipitation method, sol-gel method, and microemulsion method. In addition, in view of the shortcomings of easy recombination of photogenerated electrons and holes, and slow migration rate, several modification methods for prime BiVO_4 are introduced. Morphology control: adjust its shape and specific surface area to achieve the enhancement of photocatalytic/adsorption capacity of BiVO_4 . Construction of heterojunction: compound with semiconductor materials, and noble metals to change its surface composition to improve the photocatalytic performance of BiVO_4 . Finally, the drawbacks of the current preparation methods are analyzed and prospects are proposed.

Keywords

BiVO_4 , Nanomaterials, Liquid Phase Method, Controllable Synthesis, Photocatalysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铋元素是一种稳定性高, 半衰期极长且放射性十分微弱的重金属元素, 铋系材料的禁带宽度较窄, 带隙能相对较低, 因此, 铋系材料作为具备可见光吸收效应的优良半导体材料, 目前, 已经发现并用于光催化的铋系材料有 BiVO_4 [1] [2] [3] [4] [5], Bi_2WO_6 [6], BiOX ($X = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}$) [7], BiPO_4 [8]等。其中, 由于 BiVO_4 本身低毒、稳定性高、制备成本低等优点, 且带隙能比较小(约 2.4 eV), 只吸收可见光便可产生光生电子对和空穴, 在可见光区域的光催化响应优异。因此, BiVO_4 微纳米材料打破了传统光催化剂在紫外光下方能激发应用的瓶颈, 成为一种可见光下有响应的半导体材料, 目前广泛被应用于光催化领域的研究[9]。

众所周知, 纳米材料的尺寸、形貌等微观结构会影响其理化性质, 因此, 对纳米材料的控制合成和性质的研究已成为纳米科学研究的重要内容。本文系统总结了文献中采用不同液相法合成 BiVO_4 微纳米材料的研究现状, 对比不同液相法的制备特点, 以及产物在降解染料方面的性质研究。针对单一 BiVO_4 光生电子和空穴易复合、迁移速率较慢等缺点, 本文归纳了几种改性方法以及增强其光催化性能的各种策略, 最后分析了目前的制备方法中的不足之处并提出展望。

2. 液相法制备 BiVO_4 微纳米材料

2.1. 水热/溶剂热法

所谓水热/溶剂热法, 是以水、乙二醇有机溶剂等为溶剂, 将整个化学合成体系处于高温蒸汽密闭环境中制备材料的一种方法。水热法是制备 BiVO_4 微纳米材料的重要方法之一[10]。在这种高温高压的环境下, 水等溶剂不仅可以作为传递介质的媒介, 也能更好地溶解反应物, 从而在一定程度上加快反应速

率。一般来说，反应釜中的温度要高于 100°C ，内部的气压也要高于 101.325 kpa 。水热法的优点，主要在于反应条件相对温和、操作过程较为简单、制备得到的产品纯度较高，且在合成过程中调控反应参数较为方便(图 1)。

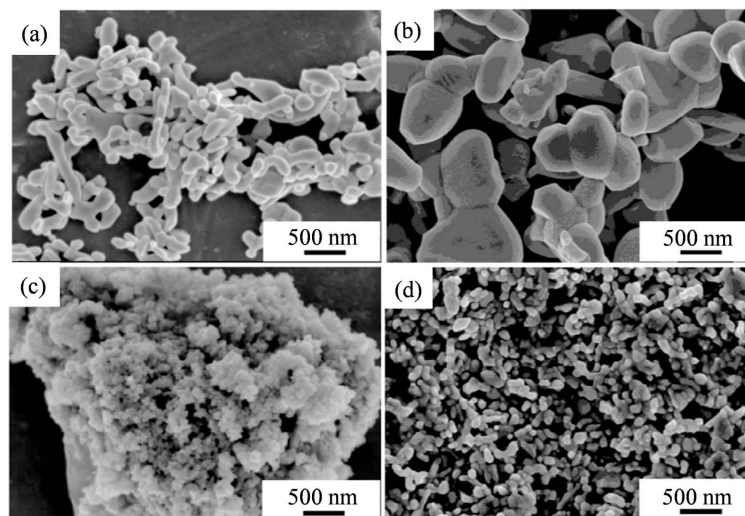


Figure 1. SEM images of BiVO_4 : (a) without adding sucrose (before heat treatment); (b) without adding sucrose (after heat treatment); (c) adding sucrose (before heat treatment); (d) adding sucrose (after heat treatment)

图 1. BiVO_4 的 SEM 图: (a) 无蔗糖(未退火); (b) 无蔗糖(已退火); (c) 加蔗糖(未退火); (d) 加蔗糖(已退火)

2.2. 溶胶 - 凝胶法

溶胶 - 凝胶法是用合适的沉淀剂使液相中的原料析出沉淀，经过解凝形成小颗粒，逐步形成溶胶；溶胶经长时间陈化后缓慢聚合、凝胶化，形成一种骨架结构并逐渐失去流动性；之后将成型的凝胶进行干燥，再通过焙烧除去一些有机杂质，从而制备出分子甚至纳米级材料。该方法的优点主要有：产品纯度高、颗粒精细、化学均匀性良好等。

袁龙课题组[11]采用溶胶 - 凝胶法，先把 NH_4VO_3 和乙二醇混合并加热搅拌数小时，之后加入少量 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ，制备出橙黄色凝胶，再将其放置在烘箱中干燥和马弗炉中煅烧后，制备出纯 BiVO_4 粉末，其 SEM 图如图 2 所示。研究发现样品表现出大量团聚的不规则的球状颗粒，晶体的边缘十分清晰。进一步研究发现晶相会随着温度的升高而改变，会从单斜晶相变为四方晶相，对光辐射的吸收也随之变化，使 BiVO_4 纳米材料随温度的变化从柠檬黄色变成砖红色，这证明了 BiVO_4 微纳米材料可用作制备温控变色材料。

2.3. 微乳液法

微乳液法是在表面活性剂和助表面活性剂的作用下，两种互不相溶的液体形成稳定、透明的乳液体系[12]。在这样的微乳液体系中，表面活性剂的双亲分子将乳液中两种互不相溶的连续介质重新切割，并包裹成细小的独立空间，从而形成微型反应器，可以增容一些溶质并能够让该溶质在反应器中进行反应，生成固体粒子，且能把它的大小控制在纳米级别的范围内，之后再经过一系列的聚集、成核、热处理等步骤后，逐渐形成了纳米微粒的体系。该制备方法的优点主要有：1) 纳米粒子的表面有表面活性剂的覆盖，稳定性好，不容易团聚；2) 过程操作方便，同时可以通过控制反应器的大小来限制生成的纳米粒子

的粒径, 得到尺寸合适的纳米粒子; 3) 可以通过控制表面活性剂的不同, 生成不同疏水或者亲水等表面性质的纳米微粒; 4) 反应的温度较低, 实验装置的要求不高, 节能环保。

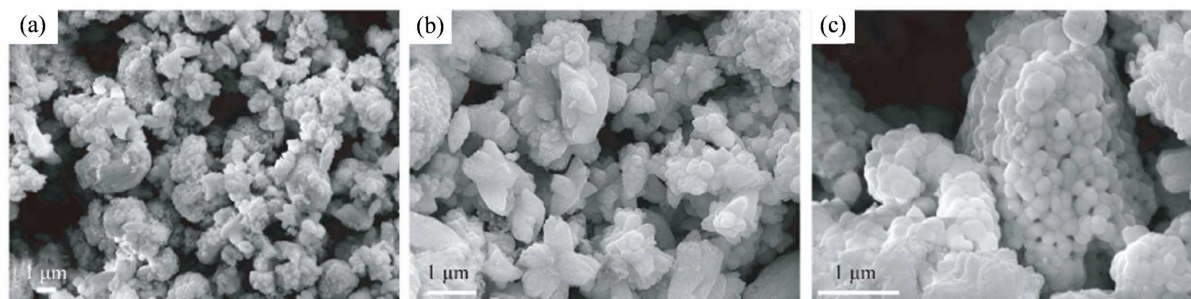


Figure 2. SEM patterns of BiVO_4 powder at different magnifications: (a) $\times 6000$; (b) $\times 15000$; (c) $\times 25000$

图 2. 不同倍率下, BiVO_4 的 SEM 图: (a) $\times 6000$; (b) $\times 15000$; (c) $\times 25000$

彭秧等[13]采用微乳液法, 将聚乙二醇、环己烷、水等物质搅拌均匀, 形成混合乳液体系后, 加入 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 NH_4VO_3 , 并搅拌均匀, 反应后经过超声波、陈化等一系列操作后, 制得了砖型 BiVO_4 微米棒, 如图 3 所示。之后进行光催化降解亚甲基蓝的实验后发现, 该样品对亚甲基蓝具有优异的降解效果, 在阳光辐照下仅 10 分钟, 降解率便达到 68%。

戈磊等[14]通过微乳液法, 以 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 NH_4VO_3 、氨水、 HNO_3 、正庚烷等为原料, 以 Tween-80 为表面活性剂, 以正丁醇为助表面活性剂, 成功制备得了 BiVO_4 。研究发现随着温度的升高, BiVO_4 颗粒的粒径也随之增大, 晶相结构也发生了从四方晶相往单斜晶相的转变。在光催化降解甲基橙实验中, 在 250 W 汞灯模拟的可见光下, 合成温度为 110°C 制得的 BiVO_4 产品对甲基橙光催化性能最优, 3 小时后甲基橙降解程度达到 99.9%, 经研究发现此时产品为单斜相和四方相的混合物, 由于混晶效应, 可见光吸收效应要优于纯单斜相的样品。

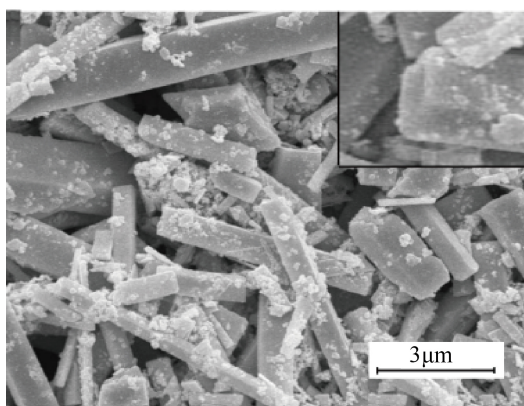


Figure 3. SEM images of BiVO_4 microrods with brick shape

图 3. 砖型 BiVO_4 微米棒的 SEM 扫描图

2.4. 共沉淀法

共沉淀法是指在含有两种及以上金属离子的电解质溶液中加入一定的沉淀剂, 使金属阳离子沉淀得到混合前驱体溶液, 之后进行过滤、洗涤、煅烧等步骤, 便可以成功制得目标产物的纳米微粒。该方法的优点主要有步骤简短、操作简单、煅烧温度较低、节约能源、产物粉体精细、均匀。

许杰等[15]通过低温共沉淀法,完成了 BiVO_4 微粒的可控制备。将浓硝酸、 NH_4VO_3 先混合搅拌均匀,另外将 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、去离子水混合制得澄清溶液;将上述两份溶液混合搅拌,于 40°C 加热后,再加入氨水析出黄色絮状沉淀物,制得了四方相 BiVO_4 微粒,在不同温度下进行退火处理后,合成了单斜相 BiVO_4 ,产物的 SEM 扫描结果如图 4 所示。研究发现:四方相 BiVO_4 微粒在 400°C 时退火,形成的单斜相 BiVO_4 微粒表面变得粗糙不平,有很多凹坑;而在 500°C 时退火,产物表面多了许多空隙。退火温度对 BiVO_4 微粒的粒径和大小却无太大影响。该结果为可控合成不同形貌的 BiVO_4 微米材料提供了新的可能。

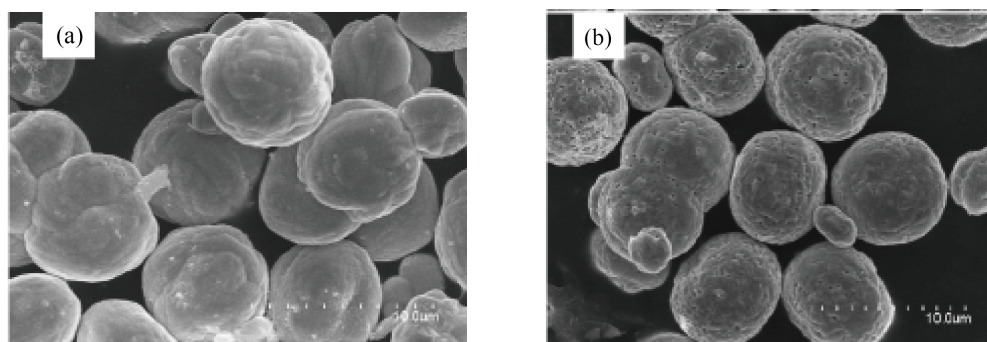


Figure 4. SEM images of BiVO_4 treated by annealing at different temperatures. (a) 400°C ; (b) 500°C
图 4. 不同温度下退火处理的 BiVO_4 的 SEM 图: (a) 400°C ; (b) 500°C

3. 增强 BiVO_4 光催化性能的方法

尽管 BiVO_4 微纳米材料本身光催化性能已较为优越,但在实际应用中仍然面临着许多问题,部分材料降解有机物的效果仍不理想。 BiVO_4 在可见光照射下能发挥其催化作用,但光生电子与空穴的复合使其光催化性能仍不理想。所以,对 BiVO_4 材料而言,很难同时保持敏感的光响应性、良好的载流子迁移效率和较强的氧化还原能力。为解决以上问题,常用的方法有形貌调控、构造异质结等。

3.1. BiVO_4 的形貌调控

一般来说,催化剂的形貌、比表面积等因素对其光催化性能有很大影响。一些表面比较粗糙,或者比表面积比较大的半导体光催化剂,它们的光生电子迁移速率相对较快,同时用来接触并吸收光能的面积也更大,发生化学反应的接触面积也更大,光敏性也更高;有些中空型的结构可以进一步抑制光生电子和空穴的复合,从而提高光催化效率。电子和空穴必须在粒子的同一表面才能发生反应,然而这些电子和空穴倾向于在表面凹陷处复合,对于小粒子来说,光催化性能会大大降低[16]。因此,通过调节 BiVO_4 形貌提高光催化性质是最近的热门研究。

贾锦超等[17]以微波水热法合成出了单斜 BiVO_4 晶体,通过实验发现:不同温度、pH、溶液混合速度等多种因素均对单斜 BiVO_4 晶体形貌有一定影响:当温度为 130°C 、pH 为 0.5 时,合成出的 BiVO_4 微粒以完整的片状为主。随着温度的升高, BiVO_4 晶粒的形状逐渐不规则化。当提高 pH 时,样品先不规则碎片化;pH 逐渐变大到 7 时,样品的形状向棒状转变;pH 变为 9 时,样品以不规则的块状的形式存在。经过光催化降解亚甲基蓝的实验,发现完整片状的产品光催化性能最优。

3.2. 构建异质结

异质结是不同的半导体之间建立起新的联系,从而促进不同半导体之间的电子与空穴的分离与迁移。异质结的构建一方面可以减少光生电子及其空穴的复合率,进一步提高光催化效率;另一方面也能够减

缓半导体光催化剂的光腐蚀效应, 提高该催化剂的可重复使用率; 另外, 异质结也可以在一定程度上加快电子的迁移速率, 并提高其可见光的吸收宽度[18] [19] [20]。常见半导体可分为电子型半导体(半导体表面中光生电子数目远大于空穴数目, 即 n 型半导体), 以及空穴型半导体(半导体表面中光生空穴数目远大于电子数目, 即 p 型半导体)。由此可以根据半导体种类将常见异质结的种类分为以下几种: p-p 型异质结、n-n 型异质结以及 p-n 型异质结。除此之外, 还可以根据半导体的禁带宽度以及能级位置的不同将其划分成 I 型异质结、II 型异质结、III 型异质结以及 Z 型异质结[21] [22]。

庞欣等[23]通过水热法制备了十面体状的 BiVO_4 微粒, 并通过水热法制备出空心球状的 Bi_2MoO_6 。将两份制备好的样品依据 Bi_2MoO_6 的用量不同, 通过搅拌、超声、干燥等一系列步骤混合, 制备出 Z 型异质结 $\text{Bi}_2\text{MoO}_6/\text{BiVO}_4$ 复合物。分别对产物进行光催化降解水实验, 实验结果表明: 当 Bi_2MoO_6 的质量分数约为 7% 时, 其复合物的光生电子和空穴的复合率最低, 电子的迁移速率较快, 光催化性能最优; 在 300 W 氙灯辐照 6 小时下对水的降解率最高, 其产生 O_2 的量相较单一 BiVO_4 提高了 35%。

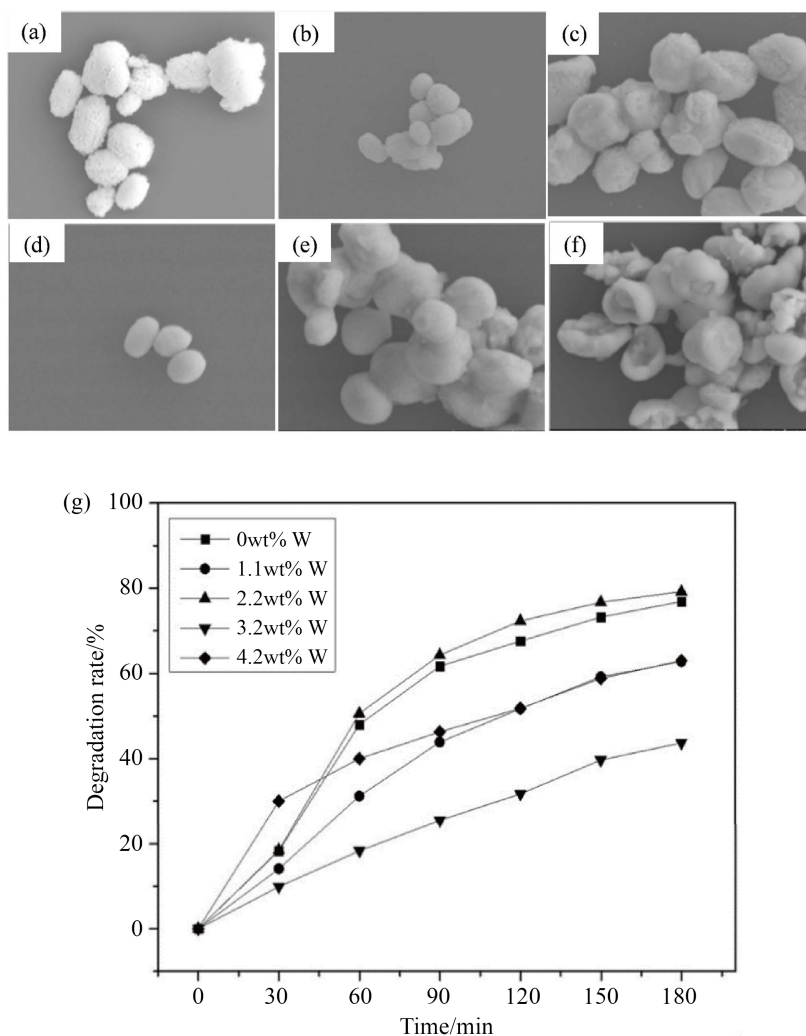


Figure 5. The SEM images of BiVO_4 after adding various wt% of W: (a) 0; (b) 1.1%; (c) 2.2%; (d) 3.2%; (e) 4.2%; (f) 5.2%; (g) photocatalytic degradation of methylene blue
图 5. BiVO_4 掺入不同量的 W 的 SEM 图。(a) 0; (b) 1.1%; (c) 2.2%; (d) 3.2%; (e) 4.2%; (f) 5.2%; (g) 光催化降解 MB 图

将 Au、Ag、Pb、Pt、Ru、W 等贵金属负载在半导体表面, 可得到一种特殊的异质结, 该异质结能够提高半导体的可见光吸收能力以及光催化性能。具体原理如下: 一方面, 用于沉积的贵金属可以在半导体表面形成金属的聚集体, 该聚集体可以有效地吸附光生电子, 阻止其与光生空穴复合, 延长其寿命, 进一步提高光催化活性[24] [25]。另一方面, 用于沉积的贵金属的费米能级一般低于半导体的费米能级, 因此两者有平衡双方的费米能级的倾向。所以当贵金属与半导体相接触时, 光生电子倾向于从费米能级高的表面迁移至低的表面, 即从半导体材料移动至贵金属中, 直到它们的费米能级相等。此时贵金属表面呈负电性, 而半导体材料表面呈正电性, 它们之间形成了电荷层, 促进了半导体能级的弯曲, 形成了 Schottky 势垒, 进一步阻止了光生电子及其空穴的复合[26]。另外, 贵金属的负载量也与光催化的性能相关, 适当的贵金属负载可以增强光催化能力, 而过量的贵金属负载反而会促进光生电子及其空穴的复合, 从而降低光催化性能。

费乾峰等[27]采用溶胶-凝胶法, 将少量 NH_4VO_3 、 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、EG 混合加热并搅拌, 当完全溶解后加入不同量的钨酸钠, 通过调节 W 的负载量对 BiVO_4 的光催化性质进行改性, 结果如图 5 所示。由图可知, 当 W 的负载量约为 2.2% 时, 光催化性能最优。在 700 W 氙灯模拟可见光降解亚甲基蓝的实验中, 该样品在 180 分钟内对 MB 降解率达 80%。

4. 结论与展望

本文主要综述了液相法合成 BiVO_4 微纳米材料的研究进展, 并概括了一些影响样品形貌和光催化活性的因素。作为重要光催化剂之一, BiVO_4 的合成方法远不止局限于本文所述的四类, 人们对它的开发和利用还远远未达其上限。因此, 今后的研究可以聚焦于采用更多方法合成 BiVO_4 微纳米材料, 未来研究的重点应该在提高材料的光催化效率上, 同时在降低合成成本、实现大规模生产和使用仍有很大的研究空间。

基金项目

感谢江苏省大学生创新训练项目和南通大学大型仪器测试基金(KFJN2206, KFJN2211)的支持。

参考文献

- [1] 梁芳, 史发年. 铋基双金属光催化剂合成及降解有机污染物研究进展[J]. 无机盐工业, 2022, 54(4): 61-68.
- [2] Jiang, L.W., Qin, Q., Wang, Y., *et al.* (2022) High-Performance BiVO_4 Photoanodes Cocatalyzed with Bilayer Metal-Organic Frameworks for Photoelectrochemical Application. *Journal of Colloid and Interface Science*, **619**, 2186-2190. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.03.143>
- [3] 刘艺炜. 可见光响应的 BiVO_4 光催化剂的可控制备和性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2020.
- [4] Chao, M.X. and Sheng, Z.Z. (2016) Bismuth-Based Photocatalytic Semiconductors: Introduction, Challenges and Possible Approaches. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, **423**, 533-549. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2016.07.030>
- [5] Kudo, A., Omori, K. and Kato, H. (1999) A Novel Aqueous Process for Preparation of Crystalform Controlled and Highly Crystalline BiVO_4 Powder from Layered Vanadates at Room Temperature and Its Photocatalytic and Photo-physical Properties. *Journal of the American Chemical Society*, **121**, 11459-11467. <https://doi.org/10.1021/ja992541y>
- [6] Kumar, O.P., Ashiq, M.N. and Ahmad, M. (2020) Silver and Yttrium-Doped Bismuth Vanadate for Photoluminescent Activity and Boosted Visible Light-Induced Photodegradation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **819**, 218-219.
- [7] Feng, H.Q. (2020) Advances in Preparation Methods of Bismuth-Based Photocatalysts. *Chemical Engineering Journal*, **414**, 177-179. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127877>
- [8] Guo, W.W., Jie, L. and Zeng, J.W. (2022) Hydrothermal Synthesis of Ni-Doped Hydrangea-Like Bi_2WO_6 and the Enhanced Gas Sensing Property to N-Butanol. *Sensors and Actuators B Chemical*, **357**, 1396-1420. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131396>

- [9] Wang, X., Yan, J. and Luo, Y.M. (2021) Enhanced Degradation of Carbamazepine by BiOX (Cl, Br, I) Composite Photocatalysts under Simulated Solar Light Irradiation. *Chemical Physics Letters*, **787**, 1468-1496. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.139222>
- [10] 刘欣, 李家科, 罗文静, 等. 蔗糖辅助水热合成 BiVO₄ 及其光催化性能研究[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(8): 1457-1461.
- [11] 袁龙, 胡志燕, 袁梦, 等. 溶胶-凝胶法制备 BiVO₄ 及其热致变色特性[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 16-21.
- [12] 陈仕祥. 微乳液法制备 Fe₂O₃/TiO₂ 和 SiO₂/TiO₂ 复合光催化剂及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.
- [13] 彭秧, 侯林瑞, 原长洲. 砖形 BiVO₄ 微米棒光催化剂的制备及其光催化性能[J]. 应用化学, 2008, 25(4): 485-488.
- [14] 戈磊, 张宪华. 微乳液法合成新型可见光催化剂 BiVO₄ 及光催化性能研究[J]. 无机材料学报, 2009, 24(3): 453-456.
- [15] 许杰, 郝辰春, 王文忠. 晶相、形貌和尺寸可控的 BiVO₄ 微球控制合成[J]. 化工新型材料, 2016, 44(4): 137-139.
- [16] Can, L., Fan, F., Jie, J., *et al.* (2021) Boosting Carrier Dynamics of BiVO₄ Photoanode via Heterostructuring with Ultrathin BiOI Nanosheets for Enhanced Solar Water Splitting. *Journal of Materials Science & Technology*, **79**, 1798-1800. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.037>
- [17] 贾锦超. 可见光催化剂 BiVO₄ 的形貌调控及光催化性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [18] Benjamin, O., Omotayo, O.A. and Arotiba, O. (2020) Bismuth Vanadate in Photoelectrocatalytic Water Treatment Systems for the Degradation of Organics: A Review on Recent Trends. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **878**, 188-189. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114724>
- [19] 史苏琦, 张守臣, 张迪嘉, 等. BiVO₄ 晶面调控制备及其降解四环素类抗生素性能研究[J]. 无机盐工业, 2021, 53(11): 114-121.
- [20] Zhang, X.F., Zhang, Y.B., Quan, X., *et al.* (2009) Preparation of Ag Doped BiVO₄ Film and Its Enhanced Photoelectrocatalytic (PEC) Ability of Phenol Degradation under Visible Light. *Journal of Hazard Materials*, **167**, 911-914. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.074>
- [21] Washington, R.S., Lucas, R.G., Gustavo, T.Z.L., *et al.* (2022) Ternary Oxide CuWO₄/BiVO₄/FeCoOx Films for Photoelectrochemical Water Oxidation: Insights into the Electronic Structure and Interfacial Band Alignment. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **187**, 938-944.
- [22] Siavash, B., Saeed, S., Eric, A., *et al.* (2022) One-step Preparation of Ag-Incorporated BiVO₄ Thin Films: Plasmon-Heterostructure Effect in Photocatalytic Activity Enhancement. *Applied Surface Science*, **580**, 1498-1523. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152253>
- [23] 庞欣. 基于 BiVO₄ 的复合结构催化剂的构筑及其光催化活性调控[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2020.
- [24] 魏琰. BiVO₄ 材料压电催化去除水中污染物及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [25] 高宇晨. BiVO₄-氮化碳复合材料的制备及其光催化降解对硝基苯酚机理的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- [26] 许超奇. BiOCl 基光催化复合材料的构建与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [27] 费乾峰, 王臣, 杨本宏. 溶胶-凝胶法合成分级结构 BiVO₄:W 及光催化活性[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2018, 37(5): 355-361.