

单斜相钒酸铋 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的制备及其 光催化性能的研究进展

李 杰¹ 逢显娟² 吴艳芳¹

(1.河南科技大学医学院,洛阳 471023;2.河南科技大学化工与制药学院,洛阳 471023)

摘 要 近年来,单斜相结构的钒酸铋 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 以优异的物理化学特性和可见光催化性能,引起了人们的广泛关注。研究表明,制备方法的不同会导致其结晶度、形貌、晶面裸露、比表面积等微观结构发生改变,进而影响其可见光催化性能。因此,就 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的制备方法行了归纳总结,并对其今后的研究方向进行了展望,以期为 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 可见光催化剂的研究提供参考。

关键词 单斜相,钒酸铋,制备,光催化,进展

中图分类号 O643

文献标识码 A

文章编号:1006-3536(2020)07-0019-05

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2020.07.005

Research progress on the preparation of monoclinic $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ and its photocatalytic performance

Li Jie¹ Pang Xianjuan² Wu Yanfang¹

(1.Medical College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023;

2.School of Chemical Engineering and Pharmaceutics, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023)

Abstract In recent years, bismuth vanadate $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ with monoclinic structure has attracted wide attention due to its excellent physical and chemical properties, and visible light photocatalytic properties. Base on a large number of studies, the preparation methods of $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ have a significant impact on its microstructure, such as crystallinity, morphology, crystal fact and specific surface area. The $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ microstructures in turn have a strong effect on its visible light photocatalytic properties. So, the preparation methods of $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ in latest years were summarized, and meantime the future research direction of $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ were also prospected, in order to provide a reference for the research of $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ photocatalyst.

Key words monoclinic, bismuth vanadate, preparation, photocatalysis, progress

光催化技术因其在环境治理和新能源开发方面的优势,成为了当前研究的前沿课题之一。光催化技术的核心是光催化剂,然而以 TiO_2 为代表的光催化剂因存在量子效率低、太阳能利用率低等问题成为其广泛应用的瓶颈^[1]。因此,开发和研制高效、稳定的可见光催化剂成为当前光催化领域的发展趋势。 BiVO_4 作为一种新型的可见光催化剂^[2],因具有无毒、化学稳定性好、太阳能利用率高等优点而备受到人们关注。研究发现 BiVO_4 主要有 3 种晶体结构,即四方锆石结构 $\text{BiVO}_4(\text{z-t})$ 、单斜白钨矿结构 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 和单斜四方结构 $\text{BiVO}_4(\text{s-t})$ 。其中, $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 由于其独特的电子结构和优异的可见光催化性能^[3], 成为可见光催化剂研究领域的热

点。诸多研究表明, $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的光催化性能与其粒径、结晶度、形貌、比表面积、晶面裸露度等微观结构密切相关,而通过改变制备方法或优化制备条件可对其微观结构进行调控。因此,笔者就近年来 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的制备方法及其光催化性能研究进行了综述,以期为从事 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的研究者提供参考。

1 水热法

水热法是指在密闭的反应器中,以水为溶剂,使难溶或不溶的物质先溶解,然后再重结晶,来制备材料的一种方法。Lin 等^[4]研究了 pH 对 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 光催化性能的影响。结果表明, pH 为 7 时制备

基金项目:国家自然科学基金(1404504);河南省基础与前沿研究计划项目(162300410054)

作者简介:李杰(1982-),男,硕士,实验师,主要研究方向为光催化半导体材料。

的 BiVO_4 (s-m) 由于粒径小、 VO_4 畸变程度大、 $\{010\}$ 晶面裸露度高及光生电子和空穴复合率低, 显示出了优异的光催化性能。Li 等^[5] 研究发现改变水热温度可调控 BiVO_4 (s-m) 的形貌。水热温度为 140°C 时, BiVO_4 (s-m) 形貌为无规则的棒状结构; 180°C 时, BiVO_4 (s-m) 为 50nm 宽的纳米带; 200°C 时, 为竹叶状形貌。Xu 等^[6] 以油酸钠为模板剂, 制备出了片状结构的 BiVO_4 (s-m), 发现氧空位和 $\{001\}$ 晶面裸露率的增加, 有助于活性位产生, 同时片状结构缩短了光生电子和空穴迁移到表面的距离, 减小了光生电子和空穴的复合几率, 提高了样品的光催化性能。Khan 等^[7] 以十二烷基硫酸钠为模板, 采用超声辅助水热法制备了花状形貌的 BiVO_4 (s-m), 在合成过程中超声波产生的空化效应和气泡, 使表面活性剂形成均匀的胶束, 从而促进有序、高结晶度、花状形貌 BiVO_4 (s-m) 的形成。陈渊等^[8] 采用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)辅助水热法制备出形貌规整、结晶度高、六角形微米棒状的 BiVO_4 (s-m)。结果表明, PVP 对 BiVO_4 (s-m) 微米棒的择优生成起关键的促进作用, 通过调整 PVP 含量可制备出不同长度和径度的微米棒。Wang 等^[9] 研究了氨基酸对 BiVO_4 (s-m) 微观结构的影响。结果显示, 氨基酸的加入有利于 BiVO_4 (s-m) 结晶度和 (040) 晶面裸露度的提高, 从而促进了光生电子-空穴对的分离和迁移, 提高了 BiVO_4 (s-m) 的光催化性能。Liu 等^[10] 采用水热法制备了具有树叶形貌的 BiVO_4 (s-m), 研究了形貌对 BiVO_4 (s-m) 电子结构的影响。与体相材料相比, 树叶形貌的 BiVO_4 (s-m) 的导带位置更负, 有利于自由基的生成和光生电子-空穴对的分离, 进而改善了 BiVO_4 (s-m) 的光催化性能。Wu 等^[11] 通过调控反应物 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 NaVO_3 的摩尔比合成了不同形貌结构的 BiVO_4 (s-m)。他们认为形貌各异的原因是由于过量的 VO_3^{3-} 离子被 BiVO_4 (s-m) 的某些晶面优先吸附, 使晶面的表面能发生了改变, 从而影响了晶面的生长速度, 因此呈现出不同形貌结构的 BiVO_4 (s-m)。光催化性能测试表明, 具有巢形形貌的 BiVO_4 (s-m) 光催化活性最优, 原因在于该样品的比表面积大, 光生电子和空穴分离效率高。姜韵婕等^[12] 研究了司班 60 添加量对 BiVO_4 (s-m) 形貌及光催化性能的影响。结果表明, 随着司班 60 添加量的增加, BiVO_4 (s-m) 的形貌由不规则的颗粒逐渐聚集形成表面光滑、均一的微米球。当司班 60 添加量为 2.5g 时, 得到样品的光催化活性最佳。

2 溶剂热法

溶剂热法是在水热法的基础上发展起来的一种新方法, 在合成过程中通常以有机溶剂或有机溶剂与水的混合物来进行反应。Nguyen 等^[13] 考察了 Bi/V 摩尔比对 BiVO_4 (s-m) 形貌和光催化性能的影响。研究发现, 当 $\text{Bi}/\text{V}=1$ 时, BiVO_4 (s-m) 为直径 $0.53 \pm 0.09\mu\text{m}$ 的椭球; $\text{Bi}/\text{V}=2$ 时, BiVO_4 (s-m) 为直径 $1.52 \pm 0.15\mu\text{m}$ 的针状物; $\text{Bi}/\text{V}=3$ 时, BiVO_4 (s-m) 为球状和棒状结构的混合物。Bi/V = 2 时, 样品的荧光强度最弱, 羟基自由基的生成速度最快, 光催化性能最佳。Zhao 等^[14] 研究了乙二醇含量和 pH 对 BiVO_4 (s-m) 微观结构的影响。发现乙二醇含量为 8mL 、pH 为 2 时所得样品的光催化活性最佳, 原因在于较小的长径比提高了光生电子和空穴的分离效率。Ou 等^[15] 探讨了 pH 对 BiVO_4 (s-m) 晶体结构和形貌的影响。结果表明在酸性或中性条件下, 所得样品为 BiVO_4 (z-t) 和 BiVO_4 (s-m) 的混合物; 在碱性条件下, 样品为不同形貌的 BiVO_4 (s-m)。pH = 8 时, 为纳米片组成的花状形貌; pH = 9 时, 为纳米片组成的双层花半开状形貌; pH = 10 时, 为方形截面的微米管。光催化降解 NO 的结果表明, BiVO_4 (s-m) (pH = 8) 具有最高的光催化活性, 主要原因为该样品结晶度高、 (040) 晶面裸露度高以及特殊的形貌结构。Ahmed 等^[16] 研究了反应温度对 BiVO_4 (s-m) 形貌和光催化性能的影响。结果表明, 提高反应温度有利于纳米带状形貌 BiVO_4 (s-m) 的形成, 反应温度为 160°C 时, 制备的 BiVO_4 (s-m) 纳米带禁带宽度最小, 比表面积最大, 光催化降解亚甲基蓝 (MB) 的能力最强。Zhao 等^[17] 研究了乙二胺四乙酸 (EDTA) 浓度对 BiVO_4 (s-m) 微观结构的影响。结果显示, EDTA 浓度与 BiVO_4 (s-m) 的 $\{010\}$ 晶面的裸露度和形貌有关。EDTA 浓度为 0.4mmol 时, BiVO_4 (s-m) 光催化降解 MB 的活性最高, 主要原因为 $\{010\}$ 晶面的高裸露度以及特殊的手里剑形貌, 提高了光生电子和空穴的分离效率。郭鹏瑶等^[18] 发现随着 EDTA 含量的增加, BiVO_4 (s-m) 形貌由不规则的棒状形貌逐渐转变为 3D 棒花状, 同时比表面积增大, 禁带宽度变窄。EDTA 添加量为 1.2g 时, 对甲基橙 (MO) 的降解率是未添加 EDTA 样品的 2 倍。吕瑞等^[19] 研究了反应介质对 BiVO_4 (s-m) 的影响。结果显示, 当乙二醇为介质时, 得到的 BiVO_4 (s-m) 具有最优的光催化活性, 其活性的提高归功于光致载流子的有

效分离和对 MB 吸附量的增加。

3 微波水热/溶剂热法

微波水热/溶剂热法采用微波进行加热,可以实现分子水平的加热和振动。具有加热均匀、速度快、无滞后等特点,可在短时间内高效地制备出纯度高、形貌独特的纳米材料。Dabodiya 等^[20]通过改变微波水热反应时间,选择性地合成了不同晶体结构和形貌的 BiVO_4 。研究发现球状形貌的 $\text{BiVO}_4(\text{z-t})$ 是反应初期的主要产物,随着反应时间的延长, $\text{BiVO}_4(\text{z-t})$ 以溶解重结晶的方式逐渐向 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 转变,当反应时间为 12min 时, $\text{BiVO}_4(\text{z-t})$ 完全转变为以 (010) 和 (110) 晶面为主导,具有十面体形貌的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 。光催化性能测试表明, $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$: $\text{BiVO}_4(\text{z-t})$ 为 60:40 的混合相光催化降解罗丹明 B(Rh B) 的效果最佳,原因在于 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 和 $\text{BiVO}_4(\text{z-t})$ 形成了异质结结构,提高了光生电子和空穴的迁移速率和分离效率。李杰等^[21]研究了前驱液 pH 对 BiVO_4 晶体结构的影响。发现前驱液 pH 为 3~5 时,样品为 $\text{BiVO}_4(\text{z-t})$ 微米球;前驱液 pH 小于 2 或大于 7 时,所得样品为 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 多面体。光催化实验结果表明, pH 为 9 时制备的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 由于结晶度高、(040) 晶面暴露率高和 VO_4 四面体畸变程度大,光催化活性最佳。Eric 等^[22]研究发现控制 EDTA 浓度可调控 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的形貌。多面体形貌的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 在 5h 内可使 85% 的 Rh B 脱色,显示出了优异的光催化性能。Liu 等^[23]制备了由 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 纳米棒组成的宽度为 8 μm 、厚度为 100nm 的三明治形片状聚集体,研究表明聚乙二醇 10000 是形成该形貌的关键,此样品可使 86.5% 的 MO 降解,其光催化性能增强的原因主要归其大的比表面积。Nguyen 等^[24]采用微波溶剂热法制备出了高结晶度、椭球形貌的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 。与沉淀法和固相法相比,该方法制备的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 样品由于形貌独特、粒径小,表现出了较高的光催化活性。Tan 等^[25]通过调控 pH 选择性地合成了不同晶体结构和形貌的 BiVO_4 。当 pH 为 0.59 时,所得样品为 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$,形貌为八面体和十面体; pH 为 2.55 时,所得样品为球状的 $\text{BiVO}_4(\text{z-t})$; pH 为 4.26~9.76,样品为棒状或树枝状形貌的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 。光催化降解 Rh B 的结果显示, pH 为 7.81 时制备的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 由于比面积大和结晶度高而表现出最佳的光催化性能。Li 等^[26]制备出了由纳米片堆积而成,具有微米球状形

貌的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 。认为 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的 (010) 晶面的原子密度大于 (001)、(100) 和 (010) 晶面,因此沿着 [010] 方向的晶面生长速度较慢,导致制备的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 为沿 (010) 晶面生长的纳米片,在微波水热过程中,纳米片进一步聚合,形成多孔的微米球。该法制备的微米球光催化活性优于固相法制备的微米球,其原因在于纳米片堆积而成的微米球具有较大的比表面积,为光催化反应提供了大量的活性位。同时,形成的纳米片状结构缩短了光生电子和空穴的迁移路径和迁移时间,有效地促进了二者的分离,因此具有较高的光催化活性。

4 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是以有机物或无机金属盐为前驱物,在溶液中经水解、缩聚、陈化等过程,转变为三维网络结构的凝胶,凝胶经干燥、煅烧后得到目标物。Chen 等^[27]以柠檬酸(CA)和尿素为结构导向剂,制备了 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 微米球。研究发现聚合物的链长长度是形成微米球的主要因素。该样品降解 Rh B 的表观反应速率是块体 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的 2.7 倍,其光催化性能增强的原因在于该样品颗粒尺寸小、介孔结构和大的比表面积。Wang 等^[28]研究了煅烧温度和煅烧时间对 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 光催化性能的影响。结果表明,煅烧温度为 500 $^{\circ}\text{C}$,煅烧时间为 1h 时,所得 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 样品的光催化性能最佳,在 3h 内对 Rh B 的降解率高达 91.2%。Deebasree 等^[29]采用超声辅助溶胶-凝胶法制备了 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 。结果显示 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的粒径、结晶度和分散性会随超声功率的增大逐渐增大。超声功率为 80W 时,制备的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 具有粒径小、比表面积大和形貌规整等优点,表现出了优异的光催化性能。Zhang 等^[30]以 CA 和 EDTA 为螯合剂,制备出了网格状结构的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 。结果显示,在合成过程中 EDTA 兼具软模板剂的作用,随着 EDTA 和 CA 比例的增大, $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 经历层状结构、网格状结构、层状结构的转变。同时,前驱液 pH 应控制在 5~9 范围内。光催化降解 MB 测试表明,网格状结构的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 由于粒径小、多孔结构和大比表面积表现出了良好的光催化性能。王敏等^[31]研究发现 pH 为 9 时,制备的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 由于禁带宽度窄、粒径小以及氧空位多,表现出了较高的光催化性能。Yao 等^[32]采用溶胶-凝胶法制备出了 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 超薄纳米片,其中含有大量的氧缺陷,有利于 O_2 分子在 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 表面吸附,有望成为一种高效的

光催化剂。

5 共沉淀法

共沉淀法通常是在溶液状态下将不同化学成分的物质混合,在混合液中加入适当的沉淀剂制备前驱体沉淀物,再将前驱体沉淀物进行干燥、煅烧,从而得到相应的粉体材料。Huo 等^[33]研究了煅烧温度对 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 光催化性能的影响。结果显示 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ (400°C) 具有较高的界面电子转移率和较小电荷复合率,因此光催化性能较高。Zulkifili 等^[34]以 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_5\text{V}$ 为反应物合成了 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 。研究发现,当煅烧温度为 400°C 时,制备的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 为纳米片堆积而成的花状形貌,比表面积最大,显示出了优异的光催化性能。Deebasree 等^[35]采用超声-沉淀法制备 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 。结果表明,超声波会对 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 微晶的生长取向产生影响,同时,伴随超声功率的增加,其形貌也由无边界、无空隙的片状结构转变为具有大量空隙的立方体结构。与沉淀法制备的样品相比, $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ (160W) 使 MB 的降解率和矿化率提高了近 1 倍。其原因可归结为多孔的立方体结构提高了其空隙体积,增大了 MB 和 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的接触面积。

6 其他制备方法

Liu 等^[36]以二异丙醇胺为发泡剂,采用电喷涂法制备了完全中孔结构的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 纳米纤维。结果表明,与固相合成法制备的样品相比,完全中孔结构的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 纳米纤维由于比表面积大、结晶度高,显示了优异的光催化性能。特别是 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 纳米粒子堆积形成的中孔孔道,在抑制 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 纳米粒子团聚的同时也为光催化反应中参与和生成的反应物和产物提供了高效的转移途径。

Ma 等^[37]应用溶胶-凝胶自燃烧法合成了 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$,研究发现通过控制前驱液的 pH 可选择性地合成不同形貌特征的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 。当前驱液 pH 为 7 时, $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 为球形; pH 为 8 时, $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 为棒状; pH 为 9 时, $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 为蠕虫状;其中蠕虫状形貌的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 比表面积最大,光催化活性最佳。

李杰等^[38]以硝酸铋和偏钒酸铵为反应物,采用超声辅助热回流法制备 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 。研究发现,超声波产生的空化效应促进了 $\text{BiVO}_4(\text{z-t})$ 向

$\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的转变,所制 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 为纳米片状结构,片状结构缩短了光生电子和空穴迁移到样品表面的距离,减小了二者的复合几率,因此比固相法制备的样品具有更高的可见光催化性能。

Lv 等^[39]以乙酰丙酮氧钒为钒源,在没有模板剂的情况下,利用静电纺丝技术制备了 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 纳米管。该纳米管主要由粒径为 40nm 的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 纳米颗粒构筑而成,其直径为 200nm 。研究表明有机盐是制备 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 纳米管的关键,同时多孔状纳米管状结构显著地提高了样品的比表面积和光利用能力,因此提升了 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的光催化性能。

7 结语与展望

综上所述,改变制备方法或优化制备条件是一种改善 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 可见光催化性能的有效方法。但目前的研究仍存在一些不足之处,可从以下几个方面进行深入探讨。第一,继续探索或优化 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的制备方法。独特的形貌结构和高活性晶面的裸露是影响 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 可见光催化性能的重要因素之一。因此,通过系统研究不同形貌和晶面形成的机理,对 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的形貌以及晶面裸露进行调控,并通过适宜的制备方法或制备条件得到具有更好界面接触效果的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$,从而提升其可见光催化性能。第二,深入研究 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的构效关系和光催化降解机理。可采用模拟计算和原位表征的方法,在分子水平上揭示光催化降解机理以及催化剂微观结构与其催化性能之间的关系,以此为 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 的设计、合成提供理论依据,推动 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 可见光催化剂的发展。第三,拓展 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 在光催化领域中的应用范围。由上述文献报道可知, $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 在水中污染物光催化降解方面已取得了巨大进展,但在光催化 CO_2 还原和有机合成方面的应用研究还较少。为此,可通过构筑不同微观结构的 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 或将其与其他助催化剂偶联,建立高效的光催化体系,拓宽 $\text{BiVO}_4(\text{s-m})$ 在多相光催化的应用范围,为人工光合成提供一种新思路。

参考文献

- [1] 孙彬,赵敏南,邵长旺,等.一维纳米 TiO_2 形貌调控及光催化应用研究进展[J].化工新材料,2013,41(11):177-180.
- [2] Kudo A, Ueda K, Kato H, et al. Photocatalytic O_2 evolution under visible light irradiation on BiVO_4 in aqueous AgNO_3 solution[J]. Catalysis Letters, 1998, 53(3): 229-230.

- [3] Tokunaga S, Kato H, Kudo A. Selective preparation of monoclinic and tetragonal BiVO_4 with scheelite structure and their photocatalytic properties[J]. *Chemistry of Materials*, 2001, 13: 4624-4628.
- [4] Lin Y, Lu G G, Wei C Y. Microstructure and photocatalytic performance of BiVO_4 prepared by hydrothermal method[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 781: 56-63.
- [5] Li Y, Wu Z, Li L, et al. Efficient synthesis of BiVO_4 nanobelts with enhanced visible-light-driven photocatalytic activity for water purification[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30: 16135-16141.
- [6] Xu J, Bian Z, Xin X, et al. Size dependence of nanosheet BiVO_4 with oxygen vacancies and exposed {001} facets on the photo-degradation of oxytetracycline[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 684-696.
- [7] Khan I, Ali S, Mansha M, et al. Sonochemical assisted hydrothermal synthesis of pseudo flower-shaped bismuth vanadate (BiVO_4) and their solar-driven water splitting application[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 36: 386-392.
- [8] 陈渊, 刘国聪, 杨家添, 等. 可见光响应催化剂 BiVO_4 六角形微米棒的水热合成[J]. *无机化学学报*, 2011, 27(6): 1059-1064.
- [9] Wang Z, Li W J, Kong D F, et al. Amino acid-assisted hydrothermal synthesis of BiVO_4 with highly exposed (040) facets and enhanced visible-light-driven photocatalytic properties[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2017, 17(8): 5391-5399.
- [10] Liu X L, Guo Z, Zhou L B, et al. Hierarchical biomimetic BiVO_4 for the treatment of pharmaceutical wastewater in visible-light photocatalytic ozonation [J]. *Chemosphere*, 2019, 222: 38-45.
- [11] Wu M, Jing Q F, Feng X Y, et al. BiVO_4 microstructures with various morphologies: synthesis and characterization[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 427: 525-532.
- [12] 姜韵婕, 关卫省, 冯蝶静, 等. Span 60 辅助制备 BiVO_4 及其光催化降解水中强力霉素的性能研究[J]. *环境污染与防治*, 2017(2): 61-65.
- [13] Nguyen D T, Hong S S. Synthesis of needle-like BiVO_4 with improved photocatalytic activity under visible light irradiation [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, 19(12): 7696-7701.
- [14] Zhao G S, Zheng X C, Qian J Y, et al. 1D rodlike mBiVO_4 mesocrystals: preparation, formation mechanism and photocatalytic performance[J]. *Chemistry Select*, 2019, 4: 6930-6944.
- [15] Ou M, Nie H, Zhong Q, et al. Controllable synthesis of 3D BiVO_4 superstructures with visible-light-induced photocatalytic oxidation of NO in the gas phase and mechanistic analysis[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2015, 17: 28809-28817.
- [16] Ahmed T, Zhang H L, Gao Y Y, et al. Surfactant-free synthesis of m-BiVO_4 , nanoribbons and enhanced visible-light photocatalytic properties[J]. *Materials Research Bulletin*, 2018, 99: 298-305.
- [17] Zhao G, Liu W, Hao Y, et al. Nanostructured shuriken-like BiVO_4 with preferentially exposed {010} facets: preparation, formation mechanism, and enhanced photocatalytic performance[J]. *Dalton Transactions*, 2018, 47(4): 1325-1336.
- [18] 郭鹏瑶, 王敏, 胡筱敏, 等. 乙二胺四乙酸添加量对三维棒状钒酸铋形貌及光催化活性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(12): 132-139.
- [19] 吕瑞, 胡颖媛, 张小超, 等. 可控形貌 BiVO_4 的合成及其光催化性能研究[J]. *化工新型材料*, 2018, 46(5): 140-143.
- [20] Dabodiya T S, Selvarasu P, Murugan A V, et al. Tetragonal to monoclinic crystalline phases change of BiVO_4 via microwave-hydrothermal reaction; in correlation with visible-light-driven photocatalytic performance[J]. *Inorganic Chemistry*, 2019, 58(8): 5096-5110.
- [21] 李杰, 宋晨飞, 逢显娟. 可见光催化剂钒酸铋的可控合成及性能研究[J]. *无机材料学报*, 2019, 34(2): 48-56.
- [22] Eric D C S, Guiherme L D, Azael M L C, et al. Enhanced photocatalytic activity of BiVO_4 powders synthesized in presence of EDTA for the decolorization of rhodamine B from aqueous solution[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 34123-34130.
- [23] Liu S Q, Tang H L, Zhou H, et al. Photocatalytic performance of sandwich-like BiVO_4 sheets by microwave assisted synthesis[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 391: 542-547.
- [24] Nguyen T D, Hong S S. Synthesis of BiVO_4 nanoparticles using microwave process and their photocatalytic activity under visible light irradiation[J]. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology*, 2017, 17(4): 2690-2694.
- [25] Tan G, Zhang L, Ren H, et al. Effects of pH on the hierarchical structures and photocatalytic performance of BiVO_4 powders prepared via the microwave hydrothermal Method[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(11): 5186-5193.
- [26] Li J Q, Wang D F, Liu H, et al. Nanosheet-based BiVO_4 hierarchical microspheres and their photocatalytic activity under visible light[J]. *Physica Status Solidi A*, 2012, 209(2): 248-253.
- [27] Chen L, Wang J X, Meng D W, et al. Effects of citric acid and urea on the structural and morphological characteristics of BiVO_4 synthesized by the sol-gel combustion method[J]. *Journal of Sol-gel Science and Technology*, 2015, 76(3): 562-571.
- [28] Wang X, Shen Y, Zuo G, et al. Influence of heat treatment on photocatalytic performance of BiVO_4 synthesised by sol-gel method[J]. *Materials Technology*, 2015, 31(3): 176-180.
- [29] Deebasree J P, Maheskumar V, Vidhya B. Investigation of the visible light photocatalytic activity of BiVO_4 , prepared by sol gel method assisted by ultrasonication[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 45: 123-132.
- [30] Zhang L Y, Dai Z X, Zheng G H, et al. Superior visible light photocatalytic performance of reticular of BiVO_4 synthesized via a modified sol-gel method[J]. *RSC Advances*, 2018, 8: 10654-10664.