

Au/rGO/BiVO₄ 光催化降解有机污染物

Umair Muhammad, 左 轶, 李克艳, 郭新闻*

(大连理工大学化工学院, 精细化工国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:通过在 BiVO₄ 上连续负载还原氧化石墨烯(rGO)和 Au, 成功合成了 Au/rGO/BiVO₄ 三元复合材料。采用多种表征手段对材料的理化性质展开系统研究。结果表明, BiVO₄ 为十边形单斜晶系, rGO 负载在 BiVO₄ 外部, Au 颗粒镶嵌在 rGO 上形成异质结。研究了 Au/rGO/BiVO₄ 对亚甲基蓝和四环素的光降解作用。rGO 的存在促进了电子转移, 而 Au 则促进了可见光的吸收, 提高了光催化活性。因此, Au/rGO/BiVO₄ 在可见光照射下表现出比 rGO/BiVO₄ 和 BiVO₄ 更强的光降解性能。

关键词: BiVO₄; 光催化; 亚甲基蓝; 四环素; 降解

中图分类号: TQ426

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)S-0120-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.S.024

Gold/reduced graphene oxide/bismuth vanadate for photocatalytic degradation of organic contaminants

UMAIR Muhammad, ZUO Yi, LI Ke-yan, GUO Xin-wen*

(State Key Laboratory of Fine Chemicals, School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Au/rGO/BiVO₄, a ternary composite, is successfully synthesized by supporting the reduced graphene oxide (rGO) and gold on BiVO₄ in succession. The composite is characterized by various techniques to study its structure. Results show that BiVO₄ shows a decagonal-shaped monoclinic system, rGO is loaded on the outer of BiVO₄. Gold particles decorate onto rGO to form a heterojunction. The photodegradation of as-synthesized Au/rGO/BiVO₄ to methylene blue and tetracycline is studied. The existence of rGO promotes electron transfer, while gold facilitates the absorption of visible light to improve the photocatalytic activity. Therefore, Au/rGO/BiVO₄ shows a greater photodegradation performance than both rGO/BiVO₄ and BiVO₄ under the irradiation of visible light.

Key words: bismuth vanadate; photocatalysis; methylene blue; tetracycline; degradation

近几十年来,人类生产生活对水环境的影响越来越受到关注。水污染是最重要的环境问题之一,主要是由工业过程向河流和海洋排放有害物质所引起的^[1-2]。亚甲基蓝(MB)是一种用于纤维、羊毛和丝绸染色的阳离子杂芳香染料,其蒸汽可造成眼睛损伤、局部灼烧、不适、呕吐等^[3-5]。四环素(TC)是一种常用的抗生素,因其在兽医和水产养殖领域的大量应用而备受关注^[6-8]。通常,进入自然环境的抗生素主要通过自然降解和吸附而逐渐被消耗,但由于微生物对其吸附能力较差,在各地的水体中均检测到残留抗生素^[9]。总之,在自然条件下,有机污染物不能很好地被阳光或微生物转化。因此,有必要在废水排入江河和海洋之前采取高效、经济的方法对其进行处理,避免有机污染物对环境造成危害。

光催化因其广泛的应用而吸引了研究人员的注意。1972年,无毒、化学稳定性高和氧化性强的

TiO₂ 被开发出来,但由于其带隙较窄(3.2 eV),导致应用受到限制^[10-12]。此后,研究人员探索了 Cu₂O^[13]、CdS^[14]、g-C₃N₄^[15]、SnWO₄^[16] 等半导体光催化剂在废水处理过程中的性能。其中, BiVO₄ 是一种能够在可见光照射下表现出较高催化性能的光催化剂^[9,17-18],常用于固态电解质、半导体气体检测、固体氧化物燃料电池正极材料以及水的裂解等^[19]。BiVO₄ 具有 3 种晶体结构,分别为四方白钨矿、四方锆石和单斜白钨矿,它们的禁带宽度分别为 2.6、2.9 和 2.4 eV^[20-22]。BiVO₄ 的晶体结构在光催化降解中起着至关重要的作用^[23-24]。由于四方白钨矿和四方锆石结构的 BiVO₄ 具有比较宽的禁带和无畸变的晶体结构,使其可见光催化活性较差。然而,单斜白钨矿型 BiVO₄ 中的 6s² 孤对电子使十二面体配位的 Bi³⁺ 发生畸变,并在四面体配位的 V 中形成两个 V—O 键,导致晶体极化,进而提高了电

收稿日期:2021-04-09;修回日期:2021-06-06

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0301704);国家自然科学基金(21506021);中央高校基本科研业务费项目(DUT19LK61)

作者简介:Umair Muhammad(1998-),男,硕士生,研究方向为 BiVO₄ 基材料的合成及光催化降解, muhammadumair@mail.dlut.edu.cn;郭新闻(1967-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为环境友好催化,通讯联系人, guoxw@dlut.edu.cn。

荷分离效率^[25-26]。BiVO₄能够吸收可见光的关键在于Bi 6s轨道形成的价带以及Bi 6s和O 2p形成的混合轨道,与V 3d轨道形成的导带之间的能量差约为2.4 eV^[27]。

然而,由于BiVO₄在光催化过程中能够对光生电子-空穴进行快速的电荷重组,从而限制了其实际应用^[28]。为了提高其光催化性能,研究人员尝试合成不同的BiVO₄基复合材料,并构建异质结。迄今为止,已有BiVO₄负载Fe、Co、Ni、Zn、Ag、Pd、Au、SiO₂、TiO₂和氧化石墨烯(GO)等多种复合材料陆续被报道^[16,29]。

石墨烯因其超大的比表面积(2 600 m²/g)、高导电性和热稳定性而备受关注^[17,30]。由于半导体与污染物之间存在 π - π 和 π -阳离子键,有机污染物能够吸附在石墨烯表面^[28,31]。GO与BiVO₄结合可增强其光催化活性,因为GO可转化为还原氧化石墨烯(rGO),rGO可改善BiVO₄与污染物之间载流子的分离^[21]。

此后,人们又制备了BiVO₄/GO/PVDF、BiVO₄/GO/PTFE和Ag/rGO/BiVO₄等三元复合材料^[2,17,32],以进一步提高BiVO₄基材料的光催化性能。高效的光催化剂应该在氧化物内部具有较高的电荷分离能力,在异质结处具有较快的电荷转移速率^[33]。由于表面等离子体共振效应的影响,贵金属纳米粒子在可见光下具有很强的吸收能力。因此,在rGO/BiVO₄表面沉积贵金属会减慢光生载流子的复合速率,从而提高光催化活性^[34]。

本文制备了Au/rGO/BiVO₄三元复合光催化剂,并对其在可见光下降解MB和TC的性能进行了评价。该催化剂的活性明显高于BiVO₄和rGO/BiVO₄。此外,还对BiVO₄的合成条件进行了研究。

1 实验部分

1.1 Au/rGO/BiVO₄的合成

将Bi(NO₃)₃·5H₂O(4.85 g)、NH₄VO₃(1.17 g)和聚乙烯醇(0.20 g)溶解在去离子水和乙二醇(体积比6:1,70 mL)的混合溶液中,室温下搅拌1 h,再超声处理2 h。然后,将得到的混合物放入100 mL带有聚四氟乙烯内衬的不锈钢晶化釜中,在90~190℃下晶化6~24 h。固体产物用去离子水离心洗涤5次后放入60℃的烘箱中干燥,得到淡黄色粉末。不同晶化温度和晶化时间得到的BiVO₄分别记为BiVO₄-x℃和BiVO₄-yh,其中x和y分别表示

所采用的温度(℃)和时间(h)。

采用改进的Hummer法合成GO^[35],再将其负载在BiVO₄上。将GO(0.01 g)分散在去离子水(90 mL)中,超声处理4 h。同时,将BiVO₄(1.0 g)分散在另一部分去离子水(10 mL)中,超声处理30 min。然后将BiVO₄悬浊液滴加到GO悬浊液中,并搅拌24 h。得到的rGO/BiVO₄采用与BiVO₄相同的方式收集和焙烧。

采用改进的尿素法制备Au/rGO/BiVO₄^[36]。将上述制备的rGO/BiVO₄(1.0 g)倒入尿素溶液(0.42 mol/L)中。随后,将HAuCl₄(0.01 g)加入rGO/BiVO₄/尿素溶液中。超声处理20 min后,在90℃下搅拌4 h。固体经过离心分离、去离子水洗涤、60℃干燥以及300℃焙烧2 h后,得到Au/rGO/BiVO₄。

1.2 表征方法及仪器

在日本理学SmartLab 9型X射线衍射(XRD)光谱仪上,采用Cu K α 辐射,检测样品的XRD谱图。利用配有能谱仪(EDS)的NOVA Nano SEM 450型扫描电子显微镜(SEM)获得样品的SEM图。采用Tecnai G²20 S-Twin型透射电子显微镜(TEM)获得样品的TEM图。在Jasco UV-550型光谱仪上测定紫外/可见漫反射(UV/Vis)光谱。X射线光电子能谱(XPS)由Thermo ESCALAB250型仪器在260 W的Al K α 辐射下获得。拉曼(Raman)光谱在Bruker激光拉曼光谱仪上获得,激发光波长为532 nm。

1.3 光催化性能评价

采用500 W氙灯,在可见光照射下,检测BiVO₄、rGO/BiVO₄和Au/rGO/BiVO₄3种催化剂在水相中降解MB和TC的活性。将制备的催化剂(0.05 g)转移到MB水溶液(100 mL,5 mg/L)中。为了使MB和TC在催化剂上达到吸附-脱附平衡,将混合物在黑暗中搅拌30 min。然后,将混合物转移到距离光源5 cm的250 mL烧杯中。每5 min取3 mL液体,离心分离出催化剂后,通过UV/Vis光谱中波长为664 nm处的吸光度来检测液体中MB的浓度。对于TC浓度的检测,所采用的波长为357 nm。催化剂的降解性能(D_e)由式(1)计算:

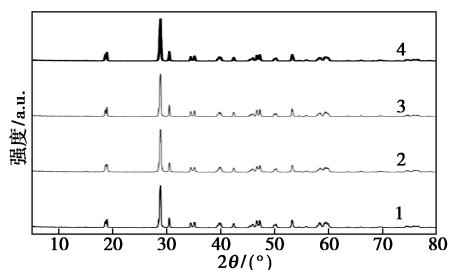
$$D_e = [(C_i - C_t) / C_0] \times 100\% \quad (1)$$

其中: C_i 为吸附-脱附平衡后MB或TC的浓度,mg/L; C_t 为不同反应时间测得的MB或TC的浓度,mg/L; C_0 为MB或TC的初始浓度,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 BiVO₄ 合成条件优化

图 1 为 160℃ 下不同晶化时间得到的 BiVO₄ 的 XRD 谱图。所有样品均在 2θ 为 18.7°、19.0°、28.9°、30.5°、34.5°、35.2°、39.8°、42.3°、46.0°、46.8°、47.3°、50.3°、53.4°、58.5° 及 59.3° 出现衍射峰,它们分别归属为 BiVO₄ 的(110)、(011)、(121)、(040)、(200)、(002)、(211)、(150)、(132)、(240)、(042)、(202)、(310)、(321) 和 (123) 晶面(JCPDS 14-0688),这些衍射峰的出现,证明 BiVO₄ 为单斜晶系,该晶型的 BiVO₄ 是可见光照射下活性最强的催化剂^[37]。此外,4 种样品的特征衍射峰强度相近,说明它们均结晶良好,且结晶度相似。



1—BiVO₄-6 h; 2—BiVO₄-12 h; 3—BiVO₄-18 h; 4—BiVO₄-24 h

图 1 不同晶化时间合成 BiVO₄ 的 XRD 谱图

图 2 为 160℃ 下晶化不同时间得到的 BiVO₄ 的 SEM 图。虽然样品的结晶度相似,但它们的形貌却有很大的差别。晶化时间小于 12 h 的样品为不规则颗粒的团聚体,而超过 18 h 的样品为单分散的光滑颗粒。因此,在后面的研究中,采用 18 h 作为晶化时间。

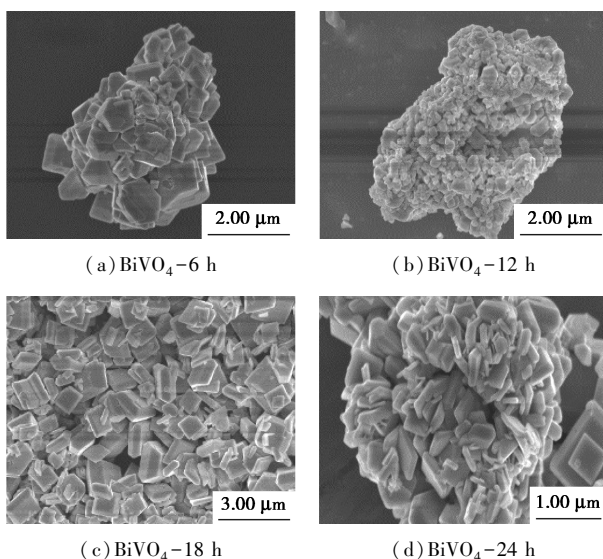
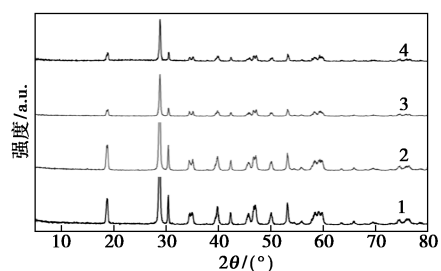


图 2 不同晶化时间合成 BiVO₄ 的 SEM 图

不同温度下晶化 18 h 样品的 XRD 谱图和 SEM 图如图 3 和图 4 所示。很明显,这两个图分别表现出与图 1 和图 2 相似的结果,即所有样品的结晶度都很相近,但形貌明显不同。较高的温度会形成较小但却并不均匀的颗粒。此外,高温会消耗更多的能源。因此,最佳晶化温度选择 90℃。



1—BiVO₄-90C; 2—BiVO₄-130C; 3—BiVO₄-160C;

4—BiVO₄-190C

图 3 不同晶化温度合成 BiVO₄ 的 XRD 谱图

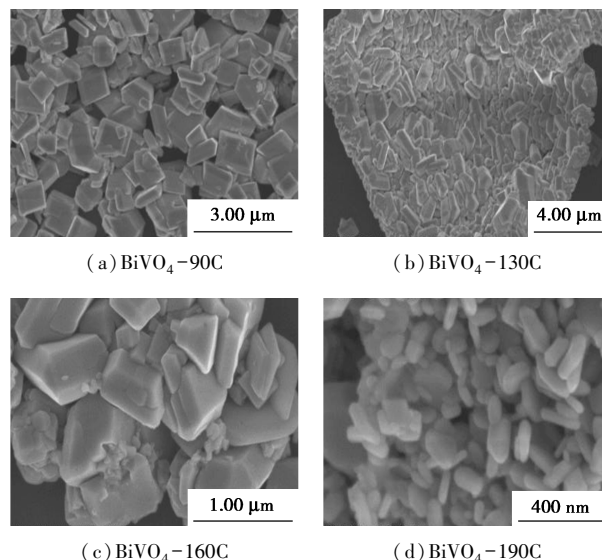
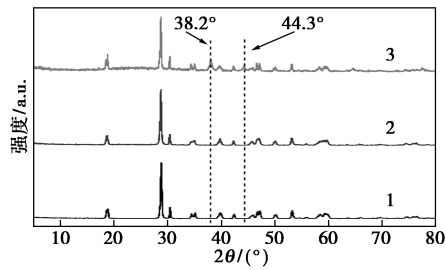


图 4 不同晶化温度合成 BiVO₄ 的 SEM 图

2.2 BiVO₄ 基材料的物化性质

BiVO₄、rGO/BiVO₄ 和 Au/rGO/BiVO₄ 的 XRD 谱图如图 5 所示。BiVO₄ 和 rGO/BiVO₄ 的结构很相近,表明 rGO 的负载对 BiVO₄ 结构没有造成不利影响。此外,rGO/BiVO₄ 的谱图中并没有出现 rGO 的衍射峰,这可能有两个原因:一是 rGO 的含量很低(质量分数 1%);二是在水热处理过程中,堆叠的 rGO 层发生了剥离^[38-39]。与 BiVO₄ 的谱图相比,Au/rGO/BiVO₄ 的谱图中出现了两个新的衍射峰,分别位于 38.2° 和 44.3°,这两个峰分别归属为 Au 的(111) 和 (200) 晶面(JCPDS 04-0784)。这一结果表明,三元复合材料中存在 Au 颗粒^[34]。

1—BiVO₄; 2—rGO/BiVO₄; 3—Au/rGO/BiVO₄图5 3种BiVO₄基材料的XRD谱图

3个BiVO₄基样品的Raman光谱如图6所示。BiVO₄的谱图中出现5个Raman共振谱峰,分别位于210、324、367、710及827 cm⁻¹,对应VO₄³⁻的特征晶格振动、反对称和对称伸缩振动以及V—O键的反对称和对称伸缩振动^[40]。rGO/BiVO₄的谱图中,在1346和1602 cm⁻¹出现了两个新的谱峰,分别归属为rGO的D峰和G峰^[39]。这一结果证实了rGO/BiVO₄中存在rGO。与BiVO₄的谱图相比,Au/rGO/BiVO₄的谱图中VO₄³⁻基团和V—O键的反对称和对称伸缩振动发生了轻微的位移,这是由负载Au颗粒后的光子限制效应造成的^[41]。

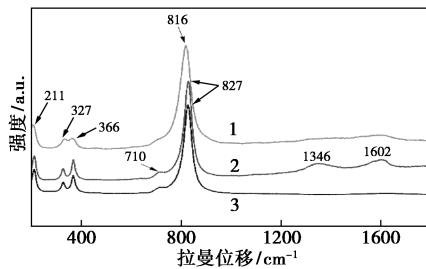
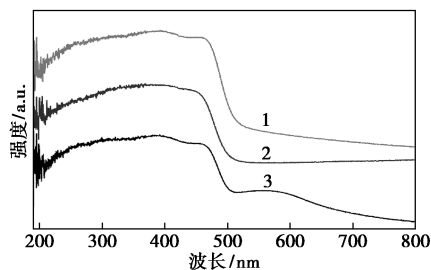
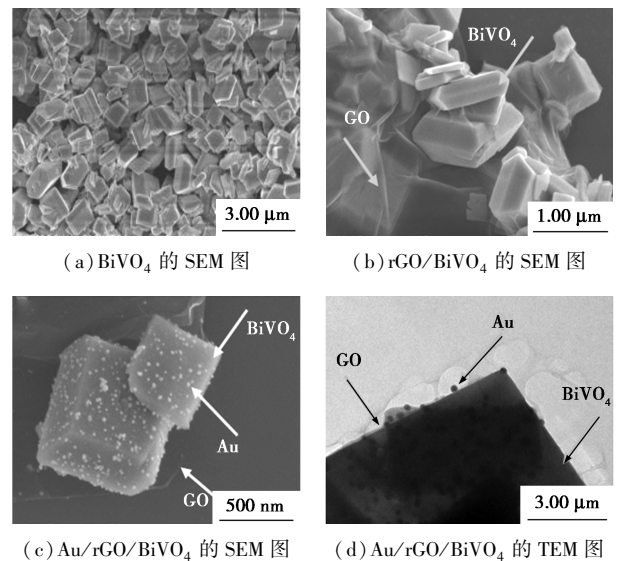
1—Au/rGO/BiVO₄; 2—rGO/BiVO₄; 3—BiVO₄图6 3种BiVO₄基材料的Raman谱图

图7为3种BiVO₄基材料的UV/Vis谱图。与BiVO₄的谱图相比,rGO/BiVO₄和Au/rGO/BiVO₄的谱图在400~800 nm范围内表现出更强的可见光吸收,这可以归因于rGO的加入促进了电子的转移^[37]。在rGO/BiVO₄中加入Au后,整个可见区域

1—Au/rGO/BiVO₄; 2—rGO/BiVO₄; 3—BiVO₄图7 3种BiVO₄基材料的UV/Vis谱图

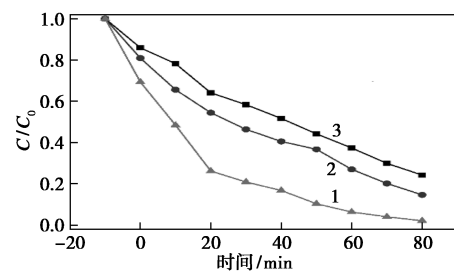
的吸光度明显增强,紫外吸收范围也明显扩大。这是受Au纳米复合材料表面等离子体共振的影响^[21]。可见光吸光度的提高有利于改善材料的光催化活性。

通过SEM和TEM观察3种材料的形貌,如图8所示。BiVO₄的颗粒尺寸为0.5~1 μm。rGO/BiVO₄的SEM图显示,BiVO₄颗粒被rGO覆盖。Au/rGO/BiVO₄的SEM及TEM图清晰地显示出rGO/BiVO₄颗粒外表面均匀分散着纳米Au颗粒。

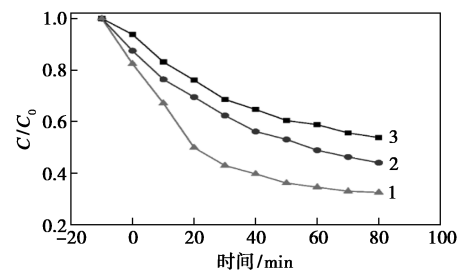
(a) BiVO₄的SEM图(b) rGO/BiVO₄的SEM图(c) Au/rGO/BiVO₄的SEM图(d) Au/rGO/BiVO₄的TEM图图8 3种BiVO₄基材料的SEM及TEM图

2.3 光催化性能评价

3种BiVO₄基材料的光催化降解性能如图9所示



(a) 对MB的降解性能



(b) 对TC的降解性能

1—Au/rGO/BiVO₄; 2—rGO/BiVO₄; 3—BiVO₄图9 3种BiVO₄基材料的光催化性能

示。在可见光照射 80 min 后, rGO/BiVO₄ 上 MB 的降解率为 85.3%, 高于 BiVO₄ (75.8%)。rGO/BiVO₄ 能够表现出更强的光催化活性, 可能是因为 rGO 抑制了 BiVO₄ 中光生电子-空穴的复合。Au/rGO/BiVO₄ 纳米复合材料的表面等离子体共振效应促进了可见光的吸收, 形成异质结, 加速了电子转移速率, 使 MB 的降解效率达到 98.0%。此外, Au 也具有抑制光生电子-空穴复合的作用。3 种催化剂对 TC 的降解性能与 MB 相同, 均为 Au/rGO/BiVO₄ > rGO/BiVO₄ > BiVO₄。

3 结论

采用水热法合成出单斜晶型的 BiVO₄, 并将 rGO 和 Au 分别负载在 BiVO₄ 上制备出 rGO/BiVO₄ 和 Au/rGO/BiVO₄。rGO 和 Au 颗粒均匀负载在 BiVO₄ 表面。在可见光照射下, Au/rGO/BiVO₄ 对 MB 和 TC 的降解均表现出较高的光催化活性。而且, 该催化剂无毒, 具有不造成二次污染的优点, 有利于其在环境保护方面的应用。

参考文献

- [1] Rajasulochana P, Vijay P. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water—A comprehensive review [J]. *Resour Technol*, 2016, 2(4): 175–184.
- [2] Biswas M D, Cho J Y, Jang W K, *et al.* Synthesis of BiVO₄-GO-PTFE nanocomposite photocatalysts for high efficient visible-light-induced photocatalytic performance for dyes [J]. *J Mater Sci Mater Electron*, 2017, 28: 15106–15117.
- [3] Dariani R S, Esmaili A, Mortezaali A, *et al.* Photocatalytic reaction and degradation of methylene blue on TiO₂ nano-sized particles [J]. *Optik (Stuttg)*, 2016, 127: 7143–7154.
- [4] Rafatullah M, Sulaiman O, Hashim R, *et al.* Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review [J]. *J Hazard Mater*, 2010, 177(1–3): 70–80.
- [5] Ponnusami V, Madhuran R, Krithika V, *et al.* Effects of process variables on kinetics of methylene blue sorption onto untreated guava (*Psidium guajava*) leaf powder; Statistical analysis [J]. *Chem Eng J*, 2008, 140(1–3): 609–613.
- [6] Wang D, Li J, Xu Z, *et al.* Preparation of novel flower-like BiVO₄/Bi₂Ti₂O₇/Fe₃O₄ for simultaneous removal of tetracycline and Cu²⁺; Adsorption and photocatalytic mechanisms [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2019, 533: 344–357.
- [7] Wang D, Jia F, Wang H, *et al.* Simultaneously efficient adsorption and photocatalytic degradation of tetracycline by Fe-based MOFs [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2018, 519: 273–284.
- [8] Wang W, Han Q, Zhu Z, *et al.* Enhanced photocatalytic degradation performance of organic contaminants by heterojunction photocatalyst BiVO₄/TiO₂/RGO and its compatibility on four different tetracycline antibiotics [J]. *Adv Powder Technol*, 2019, 30(9): 1882–1896.
- [9] Soltani T, Tayyebi A, Lee B K. Photolysis and photocatalysis of tetracycline by sonochemically heterojunctioned BiVO₄/reduced graphene oxide under visible-light irradiation [J]. *J Environ Manage*, 2019, 232: 713–721.
- [10] Tan G, Zhang L, Ren H, *et al.* Effects of pH on the hierarchical structures and photocatalytic performance of BiVO₄ powders prepared via the microwave hydrothermal method [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2013, 5(11): 5186–5193.
- [11] Liu B, Lin L, Yu D, *et al.* Construction of fiber-based BiVO₄/SiO₂/reduced graphene oxide (RGO) with efficient visible light photocatalytic activity [J]. *Cellulose*, 2017, 25: 1089–1101.
- [12] Qiu P, Park B, Choi J, *et al.* BiVO₄/Bi₂O₃ heterojunction deposited on graphene for an enhanced visible-light photocatalytic activity [J]. *J Alloys Compd*, 2017, 706: 7–15.
- [13] Huang W C, Lv L M, Yang Y C, *et al.* Synthesis of Cu₂O nanocrystals from cubic to rhombic dodecahedral structures and their comparative photocatalytic activity [J]. *J Am Chem Soc*, 2012, 134(2): 1261–1267.
- [14] Yang H, Jin Z, Liu D, *et al.* Visible light harvesting and spatial charge separation over the creative Ni/CdS/Co₃O₄ photocatalyst [J]. *J Phys Chem C*, 2018, 122(19): 10430–10441.
- [15] Qiu P, Xu C, Chen H, *et al.* One step synthesis of oxygen doped porous graphitic carbon nitride with remarkable improvement of photo-oxidation activity; Role of oxygen on visible light photocatalytic activity [J]. *Appl Catal B Environ*, 2017, 206: 319–327.
- [16] Liu X, Liang B, Zhang M, *et al.* Enhanced photocatalytic properties of α-SnWO₄ nanosheets modified by Ag nanoparticles [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2017, 490: 46–52.
- [17] Li M, Xu G, Guan Z, *et al.* Synthesis of Ag/BiVO₄/rGO composite with enhanced photocatalytic degradation of triclosan [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 664: 230–239.
- [18] Li Q, Guo B, Yu J, *et al.* Highly efficient visible-light-driven photocatalytic hydrogen production of CdS-cluster-decorated graphene nanosheets [J]. *J Am Chem Soc*, 2011, 133(28): 10878–10884.
- [19] Pingmuang K, Wetchakun N, Kangwansupamonkon W, *et al.* Photocatalytic mineralization of organic acids over visible-light-driven Au/BiVO₄ photocatalyst [J]. *Int J Photoenergy*, 2013, 2013(3/4): 1–7.
- [20] Tahir M B, Iqbal T, Kiran H, *et al.* Insightful role of reduced graphene oxide in BiVO₄ nanoparticles for improved photocatalytic hydrogen evolution and dyes degradation [J]. *Int J Energy Res*, 2019, 43(6): 2410–2417.
- [21] Meng X, Li Z, Zhang Z. Palladium nanoparticles and rGO co-modified BiVO₄ with greatly improved visible light-induced photocatalytic activity [J]. *Chemosphere*, 2018, 198: 1–12.
- [22] Guo Y, Yang X, Ma F, *et al.* Additive-free controllable fabrication of bismuth vanadates and their photocatalytic activity toward dye degradation [J]. *Appl Surf Sci*, 2010, 256(7): 2215–2222.
- [23] Li J, Chen Y, Chen C, *et al.* Solid-phase synthesis of visible-light-driven BiVO₄ photocatalyst and photocatalytic reduction of aqueous

- Cr(VI) [J]. *Bull Chem React Eng Catal*, 2019, 14(2): 336–344.
- [24] Zhang A, Zhang J, Cui N, *et al.* Effects of pH on hydrothermal synthesis and characterization of visible-light-driven BiVO₄ photocatalyst [J]. *J Mol Catal A Chem*, 2009, 304(1/2): 28–32.
- [25] Tan H L, Amal R, Ng Y H. Alternative strategies in improving the photocatalytic and photoelectrochemical activities of visible light-driven BiVO₄: A review [J]. *J Mater Chem A*, 2017, 5(32): 16498–16521.
- [26] Jiang H Q, Endo H, Natori H, *et al.* Fabrication and photoactivities of spherical-shaped BiVO₄ photocatalysts through solution combustion synthesis method [J]. *J Eur Ceram Soc*, 2008, 28(15): 2955–2962.
- [27] Usai S, Obregón S, Becerro A I, *et al.* Monoclinic-tetragonal heterostructured BiVO₄ by yttrium doping with improved photocatalytic activity [J]. *J Phys Chem C*, 2013, 117(46): 24479–24484.
- [28] Ahmad J, Majid K. In-situ synthesis of visible-light responsive Ag₂O/graphene oxide nanocomposites and effect of graphene oxide content on its photocatalytic activity [J]. *Adv Compos Hybrid Mater*, 2018, 1: 374–388.
- [29] Chen F, Yang Q, Zhong Y, *et al.* Photo-reduction of bromate in drinking water by metallic Ag and reduced graphene oxide (rGO) jointly modified BiVO₄ under visible light irradiation [J]. *Water Res*, 2016, 101: 555–563.
- [30] Fu Y, Sun X, Wang X. BiVO₄-graphene catalyst and its high photocatalytic performance under visible light irradiation [J]. *Mater Chem Phys*, 2011, 131(1/2): 325–330.
- [31] Appavu B, Thiripuranthagan S, Ranganathan S, *et al.* BiVO₄/N-rGO nano composites as highly efficient visible active photocatalyst for the degradation of dyes and antibiotics in eco system [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2018, 151: 118–126.
- [32] Biswas R U D, Oh W C. Synthesis of BiVO₄-GO-PVDF nanocomposite: An excellent, newly designed material for high photocatalytic activity towards organic dye degradation by tuning band gap energies [J]. *Solid State Sci*, 2018, 80: 22–30.
- [33] Van C N, Chang W S, Chen J W, *et al.* Heteroepitaxial approach to explore charge dynamics across Au/BiVO₄ interface for photoactivity enhancement [J]. *Nano Energy*, 2015, 15: 625–633.
- [34] Bao S, Wu Q, Chang S, *et al.* Z-scheme CdS-Au-BiVO₄ with enhanced photocatalytic activity for organic contaminant decomposition [J]. *Catal Sci Technol*, 2016, 7(1): 124–132.
- [35] Pookmanee P, Longchin P, Phanmalee J, *et al.* Performance photocatalytic degradation of methomyl onto composite graphene oxide/bismuth vanadate (GO/BiVO₄) nanoparticle [J]. *Key Eng Mater*, 2017, 751: 701–706.
- [36] Long M, Jiang J, Li Y, *et al.* Effect of gold nanoparticles on the photocatalytic and photoelectrochemical performance of Au modified BiVO₄ [J]. *Nanomicro Lett*, 2011, 3: 171–177.
- [37] Du M, Xiong S, Wu T, *et al.* Preparation of a microspherical silver-reduced graphene oxide-bismuth vanadate composite and evaluation of its photocatalytic activity [J]. *Materials (Basel)*, 2016, 9(3): 1–14.
- [38] Yu C, Dong S, Zhao J, *et al.* Preparation and characterization of sphere-shaped BiVO₄/reduced graphene oxide photocatalyst for an augmented natural sunlight photocatalytic activity [J]. *J Alloys Compd*, 2016, 677: 219–227.
- [39] Yu Q, Tang Z R, Xu Y J. Synthesis of BiVO₄ nanosheets-graphene composites toward improved visible light photoactivity [J]. *J Energy Chem*, 2014, 23(5): 564–574.
- [40] Subramanyam P, Vinodkumar T, Nepak D, *et al.* Mo-doped BiVO₄@reduced graphene oxide composite as an efficient photoanode for photoelectrochemical water splitting [J]. *Catalysts*, 2018, 325: 73–80.
- [41] Wang Z, Wei Y, Wang X, *et al.* Plasmonic Au nanoparticles modified nanopyramid-arrays BiVO₄ with enhanced photoelectrochemical activity [J]. *J Electrochem Soc*, 2019, 166(5): 3138–3145. ■

IHS Markit 预测: 全球精炼石油产品需求将在 2036 年达到峰值

埃信华迈 (IHS Markit) 发布最新预测, 随着全球能源转型加速, 全球精炼石油产品需求预计在 2036 年达到峰值。预计从今年到 2026 年, 精炼石油产品总需求将增长近 900 万桶/日; 到 2050 年, 总需求将达到 8 550 万桶/日。精炼石油产品为炼油厂所有产品, 包括汽油、喷气燃料、柴油、燃料油和生物燃料等, 但不包括天然气液体 (NGL)。

IHS Markit 表示, 为满足日益增长的石化原料需求将继续扩大石化项目投资, 如进行专门的原油制化学品项目投资, 以及对现有一体化基地进行炼油-石化一体化项目建设。排除生物燃料不计, 预计 2032 年全球原油加工的精

炼产品需求将达到峰值, 主要原因是政府和企业温室气体排放目标提高导致燃料经济性和替代投资增加。预计到 2050 年, 添加到精炼产品中的生物燃料将增长 200 万桶/日。

IHS Markit 石油市场和炼油业务副总裁 Sandeep Sayal 预计, 炼油厂将越来越多地关注生物质和氢气等技术, 同时也将探索整个价值链的脱碳方法, 包括低碳原油等级和炼油厂碳捕获基地。预计未来将减少大规模原油加工项目投资, 除了疫情期间已经永久关闭的 230 万桶/日蒸馏能力外, 预计到 2050 年还将减少炼油能力 300 多万桶/日。

(中化新网)