

溶液 pH 对二维层状氧化物偏锑酸钡光催化降解酸性橙的影响研究

张 涛¹ 沈金凤¹ 王怡涵¹ 叶 芊¹ 李园园^{1,2*} 杨顶峰^{3*}

(1.重庆第二师范学院生物与化学工程学院,重庆 400067;2.河南省农业科学院,郑州 450002;
3.重庆理工大学化学化工学院,重庆 400054)

摘 要 采用高温固相法制备二维层状氧化物偏锑酸钡(BaSb_2O_6),并将其用于在不同 pH(pH=2、4、6)条件下光催化降解酸性橙溶液的研究。通过粉末 X 射线多晶衍射和红外反射光谱对其进行结构表征。光催化降解实验表明,当溶液 pH=2 时, BaSb_2O_6 对酸性橙溶液的降解率达到最大,其降解率在 120min 内达到 88%。活性自由基捕获实验发现超氧自由基负离子($\cdot\text{O}_2^-$)是氧化降解酸性橙的主要活性物种。进一步进行循环实验,发现在酸性条件下 BaSb_2O_6 具有较高的光催化和结构稳定性。

关键词 偏锑酸钡,锑酸盐材料,光催化,紫外光,酸性橙,pH

中图分类号 O61

文献标识码 A

文章编号:1006-3536(2021)05-0205-05

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2021.05.046

Influence of pH on photodegradation of acid orange by 2D layered oxide BaSb_2O_6

Zhang Tao¹ Shen Jinfeng¹ Wang Yihan¹ Ye Qian¹ Li Yuanyuan^{1,2} Yang Dingfeng³

(1.College of Biological and Chemical Engineering,Chongqing University of Education,
Chongqing 400067;2.Henan Academy of Agricultural Sciences,Zhengzhou 450002;
3.College of Chemistry and Chemical Engineering,Chongqing University of Technology,
Chongqing 400054)

Abstract 2D layered oxide barium metaantimonate (BaSb_2O_6) was prepared by conventional solid-state method and applied for photodegradation of acid orange under the effect of pH (pH = 2, 4, 6). The crystal structure was characterized by powder X-ray diffraction and infrared reflectance spectrum. The results of photocatalytic performance demonstrated that the maximum photodegradation rate reached 88% within 120min under UV light irradiation at pH = 2. The trapping experiment indicated that superoxide anion ($\cdot\text{O}_2^-$) was the dominant active specie in the process of photodegradation. Furthermore, the cycling running manifested that BaSb_2O_6 embraced stable photocatalytic activity and structural stability under acidic condition.

Key words barium metaantimonate, antimonate material, photocatalysis, UV light, acid orange, pH

近年来,水污染问题愈发严重,寻求高效水污染治理技术迫在眉睫^[1]。光催化技术被认为是解决水环境污染最有前景的技术之一。在光辐射下,光催

化剂可以吸收光能并将其转化为化学能,用于水污染治理的治理。因此,高效、稳定的光催化材料的开发和应用受到了世界范围内的广泛关注^[2-4]。

收稿日期:2020-02-25;修回日期:2021-02-21

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201901618 和 KJQN202001613);重庆市科委基金项目(基础研究与前沿探索)(cstc2017jcyjAX0258);重庆英才创新创业示范团队(CQYC201903178);教育部学校规划建设发展中心重庆第二师范学院儿童研究院重点项目(CRIKT201909);重庆第二师范学院大学生科研项目(KY20200138 和 KY20200139)

作者简介:张涛(1989-),男,硕士研究生,助理研究员,主要从事含钒资源的清洁提取与综合利用、光催化材料的设计与合成方向的研究,E-mail: zhangtao@cque.edu.cn.

通讯作者:李园园(1985-),女,博士研究生,副教授,主要从事无机材料的设计与合成、光催化方向的研究,E-mail:liyy@cque.edu.cn.

杨顶峰,E-mail:yangxunscience@cqut.edu.cn.

二维氧化物体系作为光催化材料具有如下优势^[5],①二维氧化物结构种类繁多;②丰富的原子组成及离子掺杂有利于通过能级工程调控材料的光催化性质;③二维氧化物材料往往具有较大的比表面积,有利于光生载流子的有效分离,从而增强材料的光催化性能^[6];④二维氧化物体系往往具有较高的结构稳定性,可以循环使用。在氧化物光催化体系中,铋酸盐光催化剂的研究引起了人们的广泛关注。例如:采用水热法制备的具有较大比表面积的 BiSbO_4 纳米板对 4-氯酚(4-CP)的光催化降解表现出了良好的效果^[7]。 $\text{Sr}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$ ^[8]则在紫外光照下表现出了很高的光催化降解苯的性质。另外,二维层状氧化物 MSb_2O_6 ($\text{M}=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Zn}$)^[9-12]也是良好的光催化材料,这可能源自于其层间的自发极化电场和二维结构特征有利于光生载流子的有效分离所致。例如:通过研究煅烧温度对 CaSb_2O_6 晶粒尺寸、比表面积和缺陷结构的影响发现 900°C 煅烧的 CaSb_2O_6 纳米颗粒在紫外光下对甲基橙(MO)具有最佳的光催化活性和良好的光催化稳定性^[13], SrSb_2O_6 普遍对苯系污染物的光催化降解展现出良好的活性和稳定性^[14]。其中, BaSb_2O_6 由于具有最小的结构堆积因子而具有较优的光催化性质^[15]。 BaSb_2O_6 在紫外光的照射下对亚甲基蓝(MB)、苯酚的降解和光催化分解水产氢效果远远高于 CaSb_2O_6 和 SrSb_2O_6 ^[15-16];然而 BaSb_2O_6 用于光催化降解酸性橙(AO7)还未见报道。

因此,本实验使用高温固相法制备 BaSb_2O_6 ,并研究了不同 pH 下光催化降解 AO7 溶液的性质。在 pH=2 的条件下, BaSb_2O_6 对 AO7 溶液的降解效率在 120min 内达到 88%,且降解反应符合一级动力学模型。光催化循环实验表明, BaSb_2O_6 具有较高的光催化稳定性。本研究表明二维结构的 BaSb_2O_6 等铋酸盐材料是潜在的半导体光催化材料。

1 实验方法

1.1 试剂与仪器

二水合氯化钡($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 纯度 99.5%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;三氧化二铋(Sb_2O_3 , 纯度 99.5%),上海麦克林生化科技有限公司;盐酸(HCl , 浓度 36%~38%),科龙化工科技有限公司。

汞灯光源(GGZ500 型),上海季光特种照明电器厂;紫外分光光度计(UV-2550 型)、X 射线衍射

仪(XRD, XRD-7000 型),日本岛津仪器有限公司;红外光谱仪(FT-IR, Nicolet 360 型),上海莱睿科学仪器有限公司;离心机(TG-16 型),四川蜀科仪器有限公司;真空鼓风干燥箱(DHG-9037A 型),无锡玛瑞特科技有限公司;电子天平(FA2004B 型),上海佑科仪器仪表有限公司;高温马弗炉(XL-6A 型),重庆励迈科技科技有限公司。

1.2 样品的制备

采用高温固相法^[17]制备 BaSb_2O_6 。首先称取 0.2442g(1mmol) $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 0.3061g(1mmol) Sb_2O_3 。其次,将上述反应物在玛瑙研钵中混合均匀并研磨 30min。最后,将反应物转移至马弗炉中于 870°C 恒温反应 10h。待反应结束后,自然冷却至室温,所得白色产物为 BaSb_2O_6 。

1.3 样品的表征

通过 XRD 对样品进行物相分析,Cu $\text{K}\alpha$ 靶($\lambda=0.154056\text{nm}$),电流 40mA,电压 40mV,扫描步长 0.01° ,扫描速度 $0.1^\circ/\text{S}$,扫描范围 $10^\circ\sim 60^\circ$;通过 FT-IR 收集样品的红外反射数据,KBr 压片法,分辨率 2cm^{-1} ,扫描范围 $500\sim 4000\text{cm}^{-1}$,将 1mg BaSb_2O_6 加入到 100mg KBr 中混合研磨均匀,以 15MPa 压制 15min,形成直径为 13mm 的圆片。

1.4 样品的光催化性能评价

在 500W 汞灯紫外光照射下,以酸性橙(AO7)为模拟污染物来评价 BaSb_2O_6 的光催化性质。反应液面离光源的距离为 13cm。分别用盐酸调节 AO7 溶液的 pH 为 2、4 和 6。然后称取 50mg 光催化剂 BaSb_2O_6 放入 100mL 10mg/L AO7 溶液中,进行暗吸附 120min,使其达到吸附与脱附平衡。接着,开启光源,每隔 30min 取 5mL 上清液,离心分离后,在 AO7 的最大吸收波长 484nm 处测其吸光度。以溶液的降解率来评价光催化剂的活性,即 $C/C_0=A/A_0$,其中, C 和 C_0 分别为光照后溶液的浓度和初始溶液的浓度(mg/L), A 和 A_0 分别为光照后溶液的吸光度和初始溶液的吸光度。自由基捕获实验是通过加入 10mL 异丙醇(IPA)、0.1mmol 氮氧自由基哌啶醇(TEMPO)和 0.1mmol 乙二胺四乙酸二钠盐(EDTA-2Na)来分别检测 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 h^+ 。

2 结果与讨论

2.1 XRD 与 FT-IR^[18] 分析

图 1(a)为 BaSb_2O_6 的 XRD 谱图。由图可见, BaSb_2O_6 为三方晶系,空间群为 $\text{P-}3_1\text{m}$ ^[17]。实验获

得的谱图与标准 PDF 卡片(JCPDS 46-1494)一致,表明所获得的样品为纯相。 $2\theta = 15.5^\circ$ 、 24.9° 、 31.1° 、 33.8° 、 37.4° 、 42.4° 、 46.6° 、 51.7° 和 55.3° 处指标化对应的晶面分别为 (001)、(101)、(002)、(110)、(111)、(201)、(112)、(103) 和 (211)。

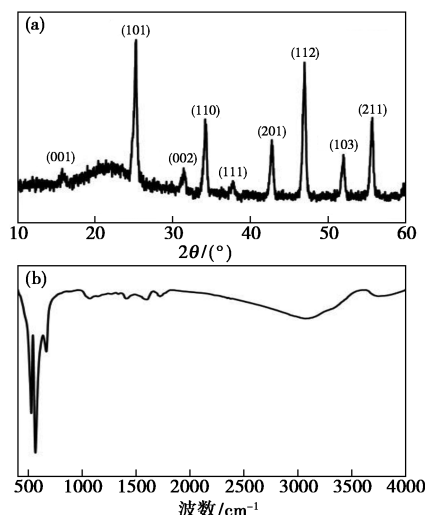


图1 BaSb₂O₆ 的 XRD 谱图(a)和 FT-IR 谱图(b)

图1(b)为 BaSb₂O₆ 的 FT-IR 谱图。由图可见, BaSb₂O₆ 的反射峰范围在 $3000 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$ 之间,属于 O—H 伸缩振型^[19]; $1500 \sim 2000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的峰值归因于 C=C 群的拉伸振动; $500 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的宽峰归因于 Sb—O 键和 Ba—O 键的拉伸振动模式^[20]。

以上分析说明本实验合成的样品为 BaSb₂O₆。

2.2 光催化活性评价

2.2.1 pH 的影响

BaSb₂O₆ 在不同 pH 条件下紫外光光催化降解 AO7 染料的曲线见图 2(a),以 10mg/L 酸性橙为模拟污染物来评价 BaSb₂O₆ 的光催化性质。由图可见,当溶液 pH=6 时,光催化降解率在 120min 内达到 61%,空白降解率为 37%。当 pH=4 时, BaSb₂O₆ 对 AO7 的降解效率略有增加,其催化降解效率为 75%,空白降解率为 42%。进一步增强溶液的酸性,当溶液 pH=2 时, BaSb₂O₆ 在 120min 对 AO7 溶液的降解率可达 88%,空白降解率为 55%。因此,随着溶液酸性的增强,光催化降解效率呈上升趋势。BaSb₂O₆ 在强酸性条件下表现出了更为优异的光催化降解效果。

在不同 pH 条件下,光催化降解动力学可使用一级动力学 Langmuir-Hinshelwood 模型进行描述[式(1)]^[21],结果见图 2(b)。由图可见, BaSb₂O₆ 降解 AO7 溶液的光催化反应均满足一级动力学

行为。

$$\ln C_t = -kt + \ln C_0 \quad (1)$$

式中, C_0 为吸附脱附平衡后 AO7 液的初始浓度, mol/L; C_t 为每隔一定光照时间后 AO7 溶液的浓度, mol/L; t 为光照时间, min; k 为表观反应速率常数, min^{-1} 。

根据式(1),将 $\ln C_0/C_t$ 与反应时间 t 做线性拟合,结果见图 2(c)。由图可见,不同 pH 下其表观反应速率常数 k 分别为 0.0172 min^{-1} 、 0.0095 min^{-1} 和 0.00629 min^{-1} 。

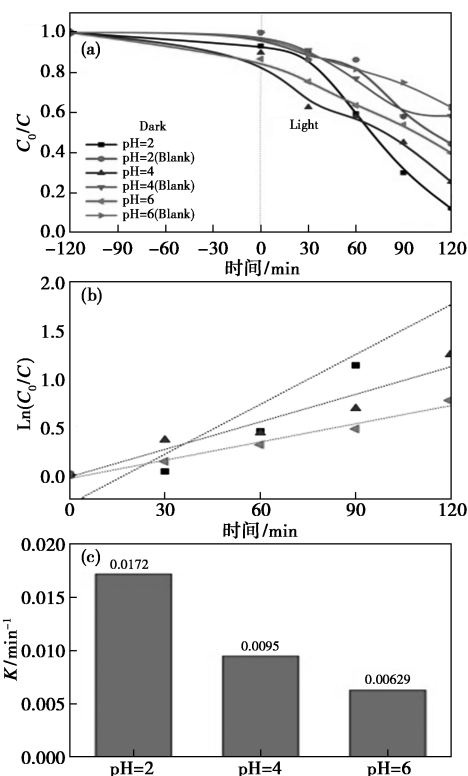


图2 不同 pH 和 UV 下 BaSb₂O₆ 降解 AO7 曲线图(a)、光催化降解 AO7 的一阶动力学曲线拟合图(b)和 AO7 光降解动力学常数的拟合图(c)

2.2.2 稳定性实验分析

在 pH=2, UV 下 BaSb₂O₆ 降解 AO7 溶液的循环实验图见图 3(a)。由图可见,相对于第一次催化实验而言,第二次和第三次光催化实验 120min 中内的降解有明显的上升,甚至可以达到 97% 和 95%。总体而言,光催化降解循环实验具有较高的稳定性。

图 3(b)为光催化前后 BaSb₂O₆ 的 XRD 谱图。由图可见,光催化循环 3 次之后的 XRD 谱图与最初制备样品的 XRD 谱图保持一致。表明催化剂 BaSb₂O₆ 在强酸性条件下具有较高的光催化降解和物相稳定性。

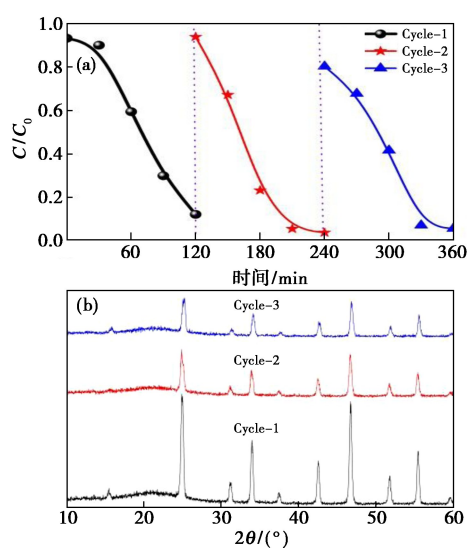


图3 UV下BaSb₂O₆降解AO7溶液的循环实验图(a)和光催化循环反应前后的XRD谱图(b)

2.3 光催化降解机制

为了进一步研究BaSb₂O₆降解AO7溶液的光催化机制。本实验从热力学角度分析了光催化活性物种相对于BaSb₂O₆半导体带边位置产生的可能性。半导体的带边位置价带(E_{vb})和导带(E_{cb})决定了催化剂的氧化还原能力。通常情况下, E_{vb} 和 E_{cb} 可以通过经验公式(2—3)获得^[22-23]。

$$E_{vb} = \chi - E_e + 0.5E_g \quad (2)$$

$$E_{cb} = E_{vb} - E_g \quad (3)$$

式中, χ 为半导体的绝对电负性; E_g 为5.1eV^[18]; E_e 为自由电子的能量, $E_e \approx 4.5\text{eV}$ 。

最终,可以算出BaSb₂O₆的 E_{vb} 和 E_{cb} 分别为4.07eV和-1.03eV。目前在光催化降解污染物氧化机制研究方面普遍认为,半导体光催化氧化过程中主要涉及到的活性物种有 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 h^+ ^[24]。

氧化还原电对 $\text{O}_2/\cdot\text{O}_2^-$ 的电势为-0.33eV,而BaSb₂O₆的 E_{cb} 为-1.03eV,光激发电子电势足以将 O_2 还原为 $\cdot\text{O}_2^-$ 。氧化还原电对 $\text{OH}^-/\cdot\text{OH}$ 的电势为2.68eV,带边 E_{vb} 电势较大,为4.07eV,光生空穴足以将 OH^- 氧化为 $\cdot\text{OH}$ 。因此推测超氧自由基负离子 $\cdot\text{O}_2^-$ 和羟基自由基 $\cdot\text{OH}$ 是降解AO7溶液的主要活性物质。实验中,通过在光催化反应中加入IPA、TEMPO和EDTA-2Na分别作为 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 h^+ 的捕获剂^[25-27]。

BaSb₂O₆降解AO7溶液活性自由基捕获实验结果见图4。由图可见,当加入EDTA-2Na后,AO7溶液的降解率为80%。加入IPA后,AO7的降解率略有下降,为59%。然而引入TEMPO后,

AO7溶液的降解效率显著减弱,这说明BaSb₂O₆降解AO7溶液的光催化反应中, $\cdot\text{O}_2^-$ 占据主导作用, $\cdot\text{OH}$ 占据次要作用,空穴最弱。捕获实验结果与上述热力学分析结果保持一致。

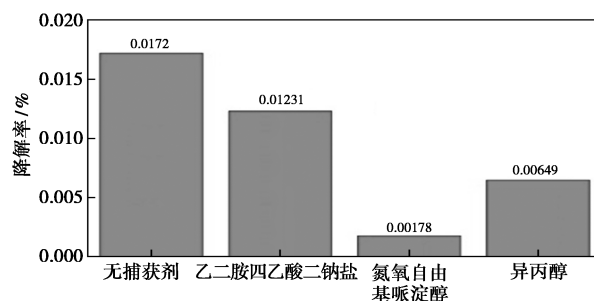


图4 BaSb₂O₆降解AO7溶液活性自由基捕获实验结果图

3 结论

以高温固相法制备了半导体光催化剂BaSb₂O₆,并将其用于紫外光光催化降解AO7溶液的研究。实验结果表明,随着溶液酸性强度的增加,BaSb₂O₆对AO7溶液的降解能力逐渐增强。当AO7溶液pH=2时,BaSb₂O₆对AO7溶液的降解效率在120min时达到88%,且光催化降解行为满足一级动力学机制^[28]。活性自由基捕获实验表明BaSb₂O₆在紫外光光催化降解AO7的过程中主要活性物种为 $\cdot\text{O}_2^-$,次要活性物种为 $\cdot\text{OH}$,空穴 h^+ 最弱。光催化循环实验表明,BaSb₂O₆在pH=2的酸性条件下降解AO7具有较高的催化和结构稳定性。

参考文献

- [1] 方方,张旭.Cu₂O/TiO₂异质结构纳米材料的合成及其光催化降解甲基橙的研究[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2019,35(4):75-78.
- [2] 张瑞阳,李成金,张艾丽,等.整体式光催化材料的制备及应用研究进展[J].材料导报,2020,34(3):7-22.
- [3] Kudo A,Miseki Y.Heterogeneous photo-catalyst materials for water splitting[J].Chemical Society Reviews,2009,38:253-278.
- [4] Chen X B,Shen S H,Guo L J,et al.Semiconductor-based photocatalytic hydrogen generation[J].Chemical Reviews,2010,110:6503-6570.
- [5] Guo F,Shi W L,Wang H B,et al.Fabrication of a CuBi₂O₄/g-C₃N₄ p-n heterojunction with enhanced visible light photocatalytic efficiency toward tetracycline degradation[J].Inorganic Chemistry Frontiers,2017,10:1714-1720.
- [6] 杨静静,何勇平,彭媛等.半导体SiC光催化分解水制氢研究进展[J].广州化工,2015,43(7):34-36.

- [7] You Q, Fu Y, Ding Z, et al. A facile hydrothermal method to BiSbO₄ nanoplates with superior photocatalytic performance for benzene and 4-chlorophenol degradations [J]. Dalton Transactions, 2011, 40: 5774-5780.
- [8] Xue H, Li Z H, Wu L, et al. Nanocrystalline ternary wide band gap p-block metal semiconductor Sr₂Sb₂O₇: hydrothermal syntheses and photocatalytic benzene degradation[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(15): 5850-5855.
- [9] Xue H, Li Z, Dong H, et al. 3D Hierarchical architectures of Sr₂Sb₂O₇: hydrothermal syntheses, formation mechanisms, and application in aqueous-phase photocatalysis [J]. Crystal Growth Design, 2008, 8: 4469-4475.
- [10] Sato J, Saito N, Nishiyama H, et al. Photocatalytic water decomposition by RuO₂-loaded antimonates, M₂Sb₂O₇ (M=Ca, Sr), CaSb₂O₆ and NaSbO₃, with d¹⁰ configuration[J]. Photochemistry Photobiology, 2002, 148: 85-89.
- [11] Mizoguchi H, Woodward P M. Probing the electronic structures of ternary perovskite and pyrochlore oxides containing Sn⁴⁺ or Sb⁵⁺ [J]. Chemistry of Materials, 2004, 16: 5233-5248.
- [12] Lin X P, Huang F Q, Wang W D, et al. Photocatalytic activities of M₂Sb₂O₇ (M=Ca, Sr) for degrading methyl orange [J]. Applied Catalysis A General, 2006, 313: 218-223.
- [13] Zhang M, Chen L M, Yao S Y, et al. Effect of calcination temperature on the photocatalytic activity of CaSb₂O₆ nanoparticles prepared by co-precipitation method[J]. Catalysis Communications, 2014, 48: 29-32.
- [14] 李朝晖, 刘平, 付贤智. 宽带隙 p 区金属氧化物/氢氧化物对苯的光催化降解[J]. 物理化学学报, 2010, 26(4): 877-884.
- [15] Lin X P, Wu J J, Lu X J, et al. Novel antimonate photocatalysts MSb₂O₆ (M=Ca, Sr and Ba): a correlation between packing factor and photocatalytic activity[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2009, 11: 10047-10052.
- [16] Chen J, Li D Z, Wang J B, et al. Morphological effect on photocatalytic degradation of rhodamine B and conversion of active species over BaSb₂O₆ [J]. Applied Catalysis B Environmental, 2015, 163: 323-329.
- [17] 郎大宁, 李怡招, 曹亚丽, 等. 氧化锌/石墨烯复合物的固相制备及气敏、光催化应用[J]. 现代化工, 2019, 39(12): 130-134.
- [18] 齐普荣, 王滔, 王晗旭, 等. 分子识别作用下光催化降解偶氮染料酸性红 GR[J]. 化工环保, 2020, 40(12): 32-35.
- [19] Liu T Y, Ma X L, Yang L F, et al. Highly enhanced photocatalytic activity of CaSn(OH)₆, through tuning CaSn(OH)₆/SnO₂, heterostructural interaction and optimizing Fe³⁺, doping concentration [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 217: 256-264.
- [20] Balasubramaniam M, Karazhanov S, Balakumar S. Sonochemistry-assisted fabrication of 1D-ZnSb₂O₆ @ 2D-MoS₂ nanostructures: a synergistic energy storage material for supercapacitors[J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2019, 58: 1350-1477.
- [21] Kashyap J, Ashraf S M, Riaz U. Highly efficient photocatalytic degradation of amido black 10B dye using poly-carbazole decorated TiO₂ nano-hybrids[J]. ACS Omega, 2017, 2: 8354-8365.
- [22] Zhuang H L, Hennig R G. Theoretical perspective of photocatalytic properties of single layer SnS₂ [J]. Physical Review B, 2013, 88: 115314-115318.
- [23] 崔玉民. 光催化技术在降解有机染料污染物方面的应用[J]. 感光科学与光化学, 2004, 22(6): 35-44.
- [24] Li Y Y, Yang Q M, Wang Z M, et al. Rapid fabrication of SnO₂ nanoparticle photocatalyst: computational understanding and photocatalytic degradation of organic dye[J]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2018, 5: 3005-3014.
- [25] Niu S Y, Zhang R Y, Zhang Z Y, et al. In situ construction of the BiOCl/Bi₂Ti₂O₇ heterojunction with enhanced visible light photocatalytic activity [J]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2019, 6: 791-798.
- [26] Li M Y, Tang Y B, Shi W L, et al. Design of visible light response core shell Fe₂O₃/CuBi₂O₄ heterojunctions with enhanced photocatalytic activity towards the degradation of tetracycline: Z-scheme photocatalytic mechanism insight[J]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2018, 5: 3148-3154.
- [27] 肖青, 孙红娟, 彭同江, 等. 石墨相氮化碳/蒙脱石复合材料的制备及其可见光催化性能[J]. 合成化学, 2020, 28(2): 91-98.
- [28] 李月, 秦朝潮. 光催化氧化反应器的水动力学模型处理染料废水[J]. 山东化工, 2019, 48(22): 247-250.

(上接第 204 页)

- [12] Zhuang Shuting, Cheng Rong, Kang Mi. Kinetic and equilibrium of U(VI) adsorption onto magnetic amidoxime-functionalized chitosan beads[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188(4): 655-661.
- [13] Mahdavinassab M, Hamzehloueiian M, Sarrafi Y. Preparation and application of magnetic chitosan/graphene oxide composite supported copper as a recyclable heterogeneous nanocatalyst in the synthesis of triazoles[J]. Journal of Biological Macromolecules, 2019, 138(7): 764-772.
- [14] Ahamad T, Naushad M, Al-Shahrani T, et al. Preparation of chitosan based magnetic nanocomposite for tetracycline adsorption: kinetic and thermodynamic studies[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 147(1): 258-267.
- [15] 施周, 袁明洋, 杨秀贞. 磁性壳聚糖改性硅藻土吸附去除水中的铅离子[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 787-792.
- [16] 常仕博, 徐星星, 苏振国. 基于硅藻土多孔微珠的多孔陶瓷制备及过滤性能研究[J]. 功能材料, 2019, 50(10): 10195-10201.
- [17] Chen Bo, Long Fengxia, Chen Sijiang. Magnetic chitosan biopolymer as a versatile adsorbent for simultaneous and synergistic removal of different sorts of dyestuffs from simulated wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 385(11): 1-12.
- [18] 李阵群, 许多, 魏春艳. 棉秆皮纤维素/氧化石墨烯纤维的制备及其力学性能和吸附性能[J]. 纺织学报, 2020, 41(1): 15-20.