

SnO₂ 光催化材料的研究进展

李 俊 贾庆明* 姚凯利 苏 岚

(昆明理工大学化学工程学院, 昆明 650093)

摘 要 SnO₂ 在常温下禁带宽度为 3.6 eV, 是一种 N 型半导体, 其结构可控、可调, 在光催化领域具有良好的应用前景, 逐渐成为国内外研究的热点。分析了 SnO₂ 晶体结构及其掺杂、复合等改性方法, 概述了 SnO₂ 及其改性材料在光催化制氢和光催化降解有机污染物领域的研究进展, 阐明了诸多改性方法对促进 SnO₂ 光催化性能的主要原因, 是提高光生电子和空穴的分离效率, 并指出 SnO₂ 基光催化材料目前存在的问题, 对未来的研究方向做出了展望。

关键词 SnO₂, 改性, 光催化

Recent progress on SnO₂ photocatalyst

Li Jun Jia Qingming Yao Kaili Su Lan

(Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650093)

Abstract SnO₂ forbidden band width is 3.6 eV at room temperature, a kind of *n*-type semiconductor with ultraviolet response. As the special structure, SnO₂ has good application prospect in the field of photocatalysis, and gradually become a research focus at home and abroad. Research on the crystal structure of SnO₂, the material modification by doping and composite were introduced. The research progress of SnO₂ in the photocatalytic degradation of organic pollutants and catalytic hydrogen production were studied in detail. Then, we clarified that the role of many modification methods of SnO₂ material was mainly to improving the efficiency of light gave birth to the separation of electron and hole. The present problem of SnO₂ based photocatalytic material was pointed out. The idea on further research based on problem of SnO₂ as the photocatalyst was presented.

Key words SnO₂, modification, photocatalysis

光催化材料在新能源开发、环境污染物治理等领域都具有重要的研究价值。目前开发和利用的光催化材料主要包括金属氧化物^[1] (ZnO^[2]、TiO₂^[3-4])、硫化物 (ZnS^[5])、贵金属半导体 (AgI^[6]、Bi₂O₃^[7]、Bi₂WO₆^[8]) 和非金属半导体 (g-C₃N₄^[9]) 等。TiO₂ 和 ZnO 能带较宽, 只能利用太阳能中 4% 紫外光^[10-11]。此外 Bi 系材料中能带合适, 但稳定性较差^[12]。贵金属半导体能带适中, 由于含有贵金属造价高, 不利于工业化和商品化^[13]。SnO₂ 是一种常见的 N 型半导体, 在常温下带隙宽度约 3.6 eV, 合成工艺简单、稳定性好, 结构和性能易于调控, 通过简单改性就有良好的光催化性能, 因此具有较强的研究潜力^[14]。笔者综述了近几年来 SnO₂ 半导体光催化材料的研究进展, 重点对 SnO₂ 的物理改性、

化学掺杂改性和微观结构调整等^[15] 方面进行了分析和总结, 并对 SnO₂ 光催化材料的发展方向进行了展望。

1 SnO₂ 结构特点及其改性方法

1.1 SnO₂ 结构特点

SnO₂ 是典型的宽带隙 ($E_g = 3.6 \text{ eV}$, 300K) N 型半导体材料^[16], 四方晶系金红石结构, 属于 $P4_2/mnm$ 空间群, 晶胞参数分别为 $a = 4.737$, $c = 3.186$, $c/a = 0.673$, 每个晶胞内含有两个分子 SnO₂。该晶胞结构具有较好的对称性, 完美的 SnO₂ 晶体是一种绝缘材料。然而, 晶态 SnO₂ 存在氧空穴和间隙电子, 呈现出 N 型半导体的性质。SnO₂ 由于具有透明导电的特性, 以及良好的热力

基金项目: 国家自然科学基金(21566014 和 21366014)

作者简介: 李俊(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 SnO₂ 基功能材料。

联系人: 贾庆明(1977-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为功能材料。

学、化学和机械稳定性,无生物毒性,可应用于光催化、导电玻璃、气敏传感等方面^[17-20]。

1.2 SnO₂ 改性

根据半导体光催化理论,光催化反应的基本能量要求是光子的能量要大于等于材料的带隙宽度^[21]。电子从价带激发跃迁到导带,形成电子-空穴对并将电荷转移到吸附在半导体材料表面的物质上。半导体材料保持原样而电荷持续转移到被吸附的物质上,进而发生光催化反应。为了提高 SnO₂ 的光催化活性,国内外研究学者对其进行了一系列研究,减低材料所需入射光子能量,抑制光生电子和空穴的复合,提高光生电子和空穴的迁移效率,从而促进光催化反应的进行。目前对 SnO₂ 的改性研究主要集中在掺杂、复合以及形貌等方面^[22-27]。

1.2.1 SnO₂ 掺杂

SnO₂ 的禁带宽度可以通过掺杂不同的元素改变晶体结构来拓宽或变窄,通过调控不同元素的种类和比例,可以得到具有不同禁带宽度的 SnO₂ 材料,用于满足不同光催化环境的需要。

理论研究发现,Ag、Zn、Au 和 V 等金属的掺杂可使得禁带宽度变窄^[28];金属掺杂不仅引入新的反应位点,而且还扮演分离光生电子空穴对的角色。掺杂后,体系在可见光的吸收区域有所扩大,增强了材料的光催化性能。Anandan 等^[29] 针对 SnO₂ 掺杂不同浓度的 Mn,所得纳米复合材料的直径均在 4~7nm 之间。研究发现,掺杂浓度对光催化体系有着明显的影响,其中掺杂 Mn 为 3% (wt,质量分数,下同)时光催化效果最佳。该研究表明:Mn 元素可能制造了特殊的磁场为光生电子空穴对的分离起到了作用。

与金属掺杂相比,非金属掺杂在很大程度上增加 SnO₂ 对光的吸收。SnO₂ 存在晶体缺陷,非金属掺杂可使带隙宽度变小,吸收光发生红移^[30]。Al-Hamdi 课题组^[31] 采用溶胶-凝胶法用 I 对 SnO₂ 进行掺杂。引入 I 原子减少了 SnO₂ 晶格中的氧空位,使得表面费米能级发生改变,价带向导带偏移而减小了能隙宽度。同时,当 I 掺杂量过高时,催化剂对苯酚的降解并未提高。过多的 I 掺杂使得空穴位过饱和,整体的光催化活性并未提高。该研究发现当 I 的掺杂量为 1% 时,改性后的 SnO₂ 光催化活性最优——在太阳光下,苯酚的量在 2h 内降解 60%。这种简单引入 I 元素的方法和技术,能更有效地利用太阳能辐射来处理污水等环境问题。Nouri 等^[32] 对 SnO₂ 进行了非金属掺杂,其掺杂元素为 N、S 和

C。研究发现,掺杂后的体系对光的吸收变强,同时吸收光区域出现红移,经过掺杂后,材料的能隙宽度明显变窄。

1.2.2 SnO₂ 复合

复合也是能有效提高材料光催化活性的方法,通过半导体的复合可以改善体系中电子-空穴的转移,增强光催化活性。Lamba 等^[33] 合成了 SnO₂ 与 ZnO 的复合半导体体系,研究发现经过激发的光生电子和空穴对更容易分离。SnO₂ 价带的空穴转移到 ZnO 的价带上,而 ZnO 导带的电子转移到 SnO₂ 的导带上,从而促进了二者的有效分离。正是因为存在这样的优势,诸多研究都围绕 SnO₂ 的复合材料展开。

Tang 等^[34] 在离子液体中制备出石墨烯与 SnO₂ 复合材料。该制备方法在 10min 之内就能合成该纳米复合材料。Chen 等^[35] 则采用 g-C₃N₄ 与 SnO₂ 进行复合。研究发现,在可见光区域有较大的光吸收,整体在可见光区域的吸收积分已超过 80%。Li 等^[36] 用锌锡酸盐与 SnO₂ 耦合,并且对该体系的形貌进行进一步的研究,发现形貌对复合有一定的影响,比表面积较大的材料,活性位点会增加很多。He 课题组^[37] 采用 Sn²⁺ 掺杂 SnO₂ 并复合 g-C₃N₄ 材料,该材料具有高效的光降解能力和光催化还原 CO₂ 的能力。Zhao 等^[38] 用 SnS₂ 与 SnO₂ 耦合材料,在可见光下对六价铬离子进行电还原。也有研究人员将多种材料耦合在一起。例如 Zhao 等^[39] 使用 Pt-SnO₂/金红石型 TiO₂/锐钛矿型 TiO₂ 进行了多系耦合的研究,由于对光生电子空穴对的分离效果更为有效,所以多系耦合的效果要比双系耦合的光催化效果更为有利。

2 基于 SnO₂ 的光催化剂在光分解水制氢方面的研究

SnO₂ 的光催化制氢研究比较少,其主要研究方向在材料异质结耦合和贵金属沉积两方面^[40-42]。SnO₂ 光催化制氢时,激发电子至导带并与 H⁺ 结合,留下的空穴被体系中的甲酸、甲醛和甲醇等物质反应移除。Zheng 等^[43] 的研究表明 SnO₂ 可与 CuO 形成 P-N 异质结来增加电子空穴的分离效率,并能有效提高产氢的效率。他们以乙酸为牺牲剂,在 SnO₂ 与空穴发生氧化反应生成甲酸和甲醇等物质。而光生电子由 SnO₂ 的导带转移到 CuO 上,并与体系中的 H⁺ 发生还原生成氢气。Lee 等^[44] 合成的 TiO₂/SnO₂ 静电纺丝,直径约 100nm,纺丝中含

有锐钛矿型 TiO_2 、金红石型 TiO_2 和 SnO_2 ，三者复合。在 400W 的汞灯(含 250~600nm 的光波)照射下,当催化剂用量在 0.5g/L 时,以甲醇为牺牲剂产氢率高达 $188\mu\text{mol/h}$ 。Wu 等^[45]将 Pd 掺杂到 SnO_2 并制成 $\text{Pd-SnO}_2/\text{TiO}_2$ 电极材料,材料呈多孔蜂窝状利于物质的吸附和扩散。该材料吸收光的波长边缘达 800nm,在可见光的产氢率达 $234.7\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{cm}^2)$,远高于 PbS/TiO_2 电极材料的 $118.3\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{cm}^2)$ 。

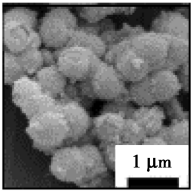
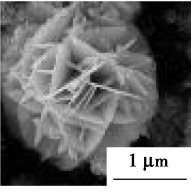
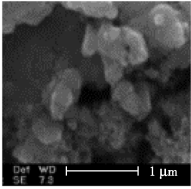
Zang 等^[46]合成了 $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{SnO}_2$,增强了催化剂在可见光区域的光催化活性,改性后的 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 拥有更大的比表面积,对分离光生电子和空穴有着促进作用,提高了材料的产氢效率。他们认为 $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{SnO}_2$ -47.5%的催化活性最佳,在可见光下能得到 $900\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 的氢气产率。

总之,通过改性处理可以提高 SnO_2 的光解制氢能力,但从工业角度出发距离实际应用还很远,还需要科研工作者们进一步的分析和研究。

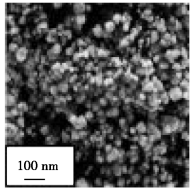
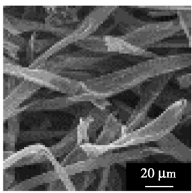
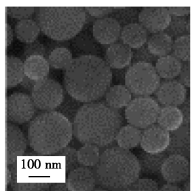
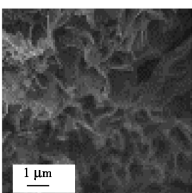
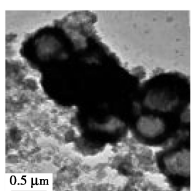
3 基于 SnO_2 的光催化剂应用于降解有机污染物

目前, SnO_2 光催化活性的研究方向主要集中在有机染料分子^[47-51]、小分子化合物和某些制药原料上。大量研究表明, SnO_2 微粒大小和形貌对降解有机污染物有较大影响。表 1 列出了不同材料与 SnO_2 复合后的光催化性能。该表列举了 SnO_2 与金属氧化物、金属元素和非金属元素等材料的复合,并通过光催化降解有机染料来衡量材料的光催化性能。

表 1 不同材料与 SnO_2 复合后的光催化降解有机物性能

催化剂	扫描电镜图	光催化性能表征	降解 80% 时间/min	引用
$\text{TiO}_2@\text{SnO}_2$		罗丹明 B 10mg	10(500W, UV)	[52]
$\text{Zn}@\text{SnO}_2$		罗丹明 B 5mg	25(500W, UV)	[53]
$\text{C/N/S}@\text{SnO}_2$		甲基橙 25mg	50(125W, UV)	[54]

续表

催化剂	扫描电镜图	光催化性能表征	降解 80% 时间/min	引用
$\text{Zn}@\text{SnO}_2$		罗丹明 B 10mg	100(125W, UV)	[55]
活性炭纤维@ SnO_2		甲基紫 200mg	4(648W, 微波辐射)	[56]
$\text{Au}@\text{SnO}_2$		罗丹明 B 20mg	20(300W, UV)	[57]
$\text{ZnO}@\text{SnO}_2$		直接蓝 1550mg	40(300W, UV)	[33]
$\text{S}@\text{SnO}_2$		百草枯 50mg	120(125W, Vis)	[58]

由表可知,在光催化降解有机污染物方面, SnO_2 的改性集中在形貌、掺杂和复合等方面并取得了较好的实验结果。在实际工业应用中,还应考虑到原材料的价格、光腐蚀以及污水处理工艺等限制因素^[59]。

4 结语与展望

SnO_2 禁带宽度较大,在光催化领域有着较大的潜力。而太阳光谱的能量主要集中在可见光区域,所以 SnO_2 的改性方向应为降低其禁带宽度和增加其在可见光区域的吸收。

对 SnO_2 的合成与改性中应着重从以下几点出发:

(1)形貌控制。形貌是影响光生电子转移的一个重要因素。同时,在催化系统中,形貌也对底物的

吸附、反应、脱附有着重要影响。

(2)贵金属掺杂。贵金属对光生电子有很好的转移能力,极大提升了光生电子的有效利用率,降低了空穴的复合。金属的选择和合理的掺杂量以及掺杂方式值得研究人员加以关注。

(3)多光催化剂的复合。不少P-N型材料耦合虽然极大地提高了光电子的利用率,但体系本身易光致分解,需寻找其他耦合途径,对该方法进行研究。

(4)场效应的叠加。目前这方面的研究不多,但光催化体系反应不仅涉及到纯化学领域的研究。电磁场也会对该体系造成一定的影响,特别是在电子转移和存储领域。

在保证体系稳定的前提下,吸收可见光并提高光生电子的利用率,减少空穴复合是光催化剂的目标。这个目标同时叠加在同一材料显然是颇为勉强,但复合材料的深入研究将改变这一思路。不同功能的材料有机结合在一起,能达到取长补短的效果。SnO₂的光催化研究距离实际应用还有一段距离,在后期的研究和发展中复合后的SnO₂将在光催化领域做出巨大贡献。

参考文献

- [1] Li G, Liu X, An T, et al. Photocatalytic and photoelectrocatalytic degradation of small biological compounds at TiO₂ photoanode: a case study of nucleotide bases[J]. *Catalysis Today*, 2015, 242(2): 363-371.
- [2] Kim H W, Na H G, Kwon Y J, et al. Decoration of Co nanoparticles on ZnO-branched SnO₂ nanowires to enhance gas sensing[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2015, 219(3): 22-29.
- [3] Kim H, Yang B. Effect of seed layers on TiO₂ nanorod growth on FTO for solar hydrogen generation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, May 11, 2015, 40(17): 5807-5814.
- [4] 严继康, 曹加龙, 黄思仁, 等. TiO₂/硅藻土复合材料的制备与光催化性能研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 37(6): 28-32, 42.
- [5] Park S, Kim S, Ko H, et al. Light-enhanced gas sensing of ZnS-core/ZnO-shell nanowires at room temperature[J]. *J Electroceram*, 2014, 33(1-2): 75-81.
- [6] Liu J X, Luan Y L, An C H, et al. Silver iodide nanospheres wrapped in reduced graphene oxide for enhanced photocatalysis[J]. *Chemcatchem*, 2015, 7(18): 2918-2923.
- [7] Mohamed M M, Ahmed S A. Pd-doped β -Bi₂O₃/Bi₂Sn₂O₇ hybrid nanocomposites for photocatalytic fluorene oxidation: a green approach for the synthesis of fluorenone/fluoreneol mixture[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2015, 204: 62-72.
- [8] Zhang Z J, Wang W Z, Gao E P, et al. Enhanced photocatalytic activity of Bi₂WO₆ with oxygen vacancies by zirconium doping[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 196(5): 255-262.
- [9] Li W, Feng C, Dai S, et al. Fabrication of sulfur-doped g-C₃N₄/Au/CdS Z-scheme photocatalyst to improve the photocatalytic performance under visible light[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 168-169(2): 465-471.
- [10] 段志刚, 赵宗彦, 李清玉, 等. Ce-TiO₂ 复合粉体晶相控制与光催化性能研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 38(3): 17-22.
- [11] Lana-Villarreal T, Bisquert J, Mora-Sero I, et al. Experimental evidence of a UV light-induced long-range electric field in nanostructured TiO₂ thin films in contact with aqueous electrolytes[J]. *J Phys Chem B*, 2005, 109(20): 10355-10361.
- [12] 赵媛媛. Bi₂WO₆ 和 Bi₂WO₆/TiO₂ 异质结的制备及其光催化性能的研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
- [13] 刘同宣. 贵金属/半导体复合光催化剂的制备及性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [14] 葛良胜, 陈源, 刘碧桃, 等. 静电纺丝法制备 SnO₂ 多孔纳米管及其光催化性能研究[J]. *重庆文理学院学报(社会科学版)*, 2015, 34(2): 18-21.
- [15] 翟永清, 赵倩, 殷艳杰, 等. 纳米 SnO₂ 的水热法合成及光催化性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2015, 44(8): 2150-2157.
- [16] Wang H, Rogach A L. Hierarchical SnO₂ nanostructures: recent advances in design, synthesis, and applications[J]. *Chemistry of Materials*, 2013, 26(1): 123-133.
- [17] 李杰. SnO₂ 纳米材料的合成及其在光催化中的应用[J]. *淮海工学院学报(自然科学版)*, 2015, 30(3): 54-56.
- [18] Chen D, Xu J, Xie Z, et al. Nanowires assembled SnO₂ nanopolyhedrons with enhanced gas sensing properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2011, 3(6): 2112-2117.
- [19] Liu X, Chen N, Han B Q, et al. Nanoparticle cluster gas sensor: Pt activated SnO₂ nanoparticles for NH₃ detection with ultrahigh sensitivity[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(36): 14872-14880.
- [20] Park J Y, Zhao X G, Gu H B. Synthesis and characterization of SnO₂ nanostructure using Bombyxmori(L.) silkworm cocoon as biomass template for photocatalytic reaction[J]. *Materials Letters*, 2015, 141(4): 187-190.
- [21] Gaya U. Heterogeneous photocatalysis using inorganic semiconductor solids[M]. London: Springer Science & Business Media, 2013, 91-98.
- [22] 刘同宣. 贵金属/半导体复合光催化剂的制备及性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [23] 肖信, 张伟德. 碳纳米管/半导体复合材料光催化研究进展[J]. *化学进展*, 2011, 23(4): 657-668.
- [24] Tong H, Ouyang S, Bi Y, et al. Nano-photocatalytic materials: possibilities and challenges[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(2): 229-251.
- [25] Serpone N, Emeline A V. Semiconductor photocatalysis past, present, and future outlook[J]. *The Journal of Physical Chem-*

- istry Letters, 2012, 3(5): 673-677.
- [26] Shi J. On the synergetic catalytic effect in heterogeneous nanocomposite catalysts[J]. Chemical Reviews, 2012, 113(3): 2139-2181.
- [27] Di Paola A, García-López E, Marci G, et al. A survey of photocatalytic materials for environmental remediation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 211(2): 3-29.
- [28] Marschall R. Semiconductor composites: strategies for enhancing charge carrier separation to improve photocatalytic activity[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(17): 2421-2440.
- [29] Anandan K, Rajendran V. Influence of dopant concentrations (Mn=1, 2 and 3 mol%) on the structural, magnetic and optical properties and photocatalytic activities of SnO₂ nanoparticles synthesized via the simple precipitation process[J]. Superlattices and Microstructures, 2015, 85(2): 185-197.
- [30] Sun S, Wang W. Advanced chemical compositions and nanoarchitectures of bismuth based complex oxides for solar photocatalytic application[J]. RSC Advances, 2014, 4(88): 47136-47152.
- [31] Al-Hamdi A M, Sillanpää M, Dutta J. Photocatalytic degradation of phenol by iodine doped tin oxide nanoparticles under UV and sunlight irradiation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 618(3): 366-371.
- [32] Nouri A, Fakhri A. Synthesis, characterization and photocatalytic applications of N-, S-, and C-doped SnO₂ nanoparticles under ultraviolet (UV) light illumination[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2015, 138(2): 563-568.
- [33] Lamba R, Umar A, Mehta S K, et al. Well-crystalline porous ZnO-SnO₂ nanosheets: an effective visible-light driven photocatalyst and highly sensitive smart sensor material[J]. Talanta, 2015, 131(4): 490-498.
- [34] Tang L, Lee Y R, Kim J, et al. Photocatalytic activity of reduced graphene oxide/SnO₂ nanocomposites prepared in ionic liquid[J]. Synthetic Metals, 2015, 201(2): 54-60.
- [35] Chen L Y, Zhang W D. A simple strategy for the preparation of g-C₃N₄/SnO₂ nanocomposite photocatalysts[J]. Science of Advanced Materials, 2014, 6(6): 1091-1098.
- [36] Li Z, Zhou Y, Mao W, et al. Nanowire-based hierarchical tin oxide/zinc stannate hollow microspheres: enhanced solar energy utilization efficiency for dye-sensitized solar cells and photocatalytic degradation of dyes [J]. Journal of Power Sources, 2015, 274(5): 575-581.
- [37] He Y, Zhang L, Fan M, et al. Z-scheme SnO_{2-x}/g-C₃N₄ composite as an efficient photocatalyst for dye degradation and photocatalytic CO₂ reduction[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 137(6): 175-184.
- [38] Zhao Y, Zhang Y, Yao L, et al. Novel synthesis and characterization of SnS₂/SnO₂ nanocomposite photocatalyst[J]. Materials Letters, 2014, 130(3): 104-106.
- [39] Zhao W, Zhang M, Ai Z, Yang Y, et al. Synthesis, characterization, and photocatalytic properties of SnO₂/rutile TiO₂/anatase TiO₂ heterojunctions modified by Pt[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2014, 118(40): 23117-23125.
- [40] Zhao B, Zhao W, Shao G, et al. Corrosive synthesis and enhanced electromagnetic absorption properties of hollow porous Ni/SnO₂ hybrids[J]. Dalton Transactions, 2015, 44(36): 15984-15993.
- [41] Wu W, Liao L, Zhang S, et al. Non-centrosymmetric Au-SnO₂ hybrid nanostructures with strong localization of plasmonic for enhanced photocatalysis application[J]. Nanoscale, 2013, 5(12): 5628-5636.
- [42] Zhang H, Hu C, Zhang C, et al. Construction of 3D Pt catalysts supported on Co-doped SnO₂ nanourchins for methanol and ethanol electrooxidation[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(1): F92-F97.
- [43] Zheng X J, Wei Y J, Wei L F, et al. Photocatalytic H₂ production from acetic acid solution over CuO/SnO₂ nanocomposites under UV irradiation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(21): 11709-11718.
- [44] Lee H C, Hwang W S. Enhancing the sensitivity of oxygen sensors through the photocatalytic effect of SnO₂/TiO₂ film [J]. Materials Transactions, 2005, 46(8): 1942-1949.
- [45] Wu J, Tang C, Xu H, et al. Enhanced photoelectrochemical performance of PbS sensitized Sb-SnO₂/TiO₂ nanotube arrays electrode under visible light illumination[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 633(7): 83-91.
- [46] Zang Y, Li L, Li X, et al. Synergistic collaboration of g-C₃N₄/SnO₂ composites for enhanced visible-light photocatalytic activity[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 246(5): 277-286.
- [47] Sangami G, Dharmaraj N. UV-visible spectroscopic estimation of photodegradation of rhodamine-B dye using tin(IV) oxide nanoparticles[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2012, 97(4): 847-852.
- [48] Qi J, Li X, Zheng H, et al. Simultaneous removal of methylene blue and copper(II) ions by photoelectron catalytic oxidation using stannic oxide modified iron(III) oxide composite electrodes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 293(2): 105-111.
- [49] Li L, Liu J, Su Y, et al. Surface doping for photocatalytic purposes: relations between particle size, surface modifications, and photoactivity of SnO₂: Zn²⁺ nanocrystals[J]. Nanotechnology, 2009, 20(15): 155706.
- [50] Cui Y, Wang F, Iqbal M Z, et al. Synthesis of novel 3D SnO flower-like hierarchical architectures self-assembled by nanoleaves and its photocatalysis[J]. Materials Research Bulletin, 2015, 70(5): 784-788.
- [51] Sun Z, Zhang H, Wei X, et al. Fabrication and electrochemical properties of a SnO₂-Sb anode doped with Ni-Nd for phenol oxidation[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(9): H590-H596.