SnS_2 光催化材料研究进展

陈小卫[1] 陈 虎[1] 张铭烨[1] 许 琦[2] 奚新国[2*]

(1.盐城工学院材料科学与工程学院,盐城 224051;2.盐城工学院化学化工学院,盐城 224051)

摘 要 作为典型的金属硫化物半导体结构材料,SnS_2 因其凭借丰富的边缘结构、巨大的比表面积、良好的化学稳定性和可调控禁带宽度(~2.5eV)等特点,近年来在光催化领域备受关注。结合近年来国内外 SnS_2 材料在光催化领域的研究进展,综述了 SnS_2 的结构、制备方法及光催化研究,特别关注了近年来 SnS_2 材料与其他材料在二元或三元复合光催化领域的研究现状,并对今后光催化 SnS_2 领域的进一步研究前景提出了展望。

关键词 SnS_2,层状材料,光催化,研究进展

Research progress of SnS_2 photocatalytic material

Chen Xiaowei[1] Chen Hu[1] Zhang Mingye[1] Xu Qi[2] Xi Xinguo[2]

(1.School of Materials Science and Engineering,Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051;2.School of Chemistry and Chemical Engineering,Yancheng Institute of Technology,Yancheng 224051)

Abstract Tin disulfide (SnS_2) is a typical semi-conductor material of metal sulfide. With its virtue characteristics of layered structure and suitable band gap width (~2.5eV),SnS_2 has attracted much attention in the fields of photocatalysis.With research progress of SnS_2 materials in the field of photocatalysis,the structure,preparation methods and photocatalysis of SnS_2 were summarized.Finally,a prospect for the further development of photocatalytic SnS_2 was provided.

Key words SnS_2,layered material,photocatalysis,research progress

因其可将部分太阳光能量转化为化学能的特性,光催化技术被视为解决当今新能源开发和环境污染问题的研究热点[1]。目前,光催化技术研究包括光催化制氢[2]、光催化降解污染物[3-4]及光催化有机化合物合成[5]等。光催化领域的研究重点之一是如何制备出具有生态环境友好型、光催化性能高的光催化材料。

根据文献报道,从光催化研究的结构角度,目前呈现不同的纳米材料结构有量子点[6-7]、纳米线[8-9]、纳米片[10-12]和多形貌[13-17]等。这些结构具有纳米量子尺度效应和良好的比表面积等特点,成为众多研究者关注的焦点。与其他维度的纳米材料相比,二维纳米材料如石墨烯[18]、$g\text{-}C_3N_4$ 纳米材料[1]、层状金属硫化物纳米材料[19-22]、ZnO 纳米材料[23]、黑磷(BP)[24]等,由于具有特殊的物理化学结构及特殊的催化反应活性等优势,受到越来越多学者的关注。

在金属二硫化物中,SnS_2 过渡金属化合物材料具有特殊的二维结构和光电特性[25-28]。SnS_2 晶体是六方 CdI2 型体系,内部原子间经共价键方式构成“汉堡包”结构,层间通过弱的分子间作用力结合。正因为如此,其结构具有介于二维和三维之间的特性,具有一定的各向异性和光电特性,属于 n 型半导体,其禁带宽度为~2.5eV[29-30]。因为 SnS_2 材料在可见光响应区域对应的禁带宽度能较好地利用太阳光,有相关文献报道其在光催化领域具有一定的研究开发价值,并在近年来取得了一定的研究进展[31-32]。

作为光催化材料,SnS_2 光催化材料有如下几大

基金项目:国家自然科学基金(51772258);国家重点研发计划项目(2016YFC0209202);江苏省高校自然科学研究重大项目(15KJA430007);住建部科研项目(2018-K1-004)

作者简介:陈小卫(1987-),男,硕士,助教,主要从事纳米功能材料研究。
联 系 人:奚新国(1970-),男,博士,教授、硕士研究生导师,主要从事光催化大气污染治理、固废资源化利用和水泥基生态环境材料等方面的研究。

优点：(1)SnS_2 是一种禁带宽度可调控的半导体材料，能吸收可见光频率的光子，提高可见光的利用效率；(2)其导带(CB)和价带(VB)的边缘电位[31](−0.27eV，+2.21eV)比多数光敏半导体高，在作为助催化剂材料时，半导体材料与 CB SnS_2 边缘之间的电位差促使电子从半导体转移至 SnS_2，这将使更多的导带电子迁移，从而促进电子-空穴对的分离[25]；(3)SnS_2 材料具有一定可调的比表面积，能吸附更多的反应物分子；(4)SnS_2 材料边缘结构复杂，有很多的不饱和键。一般而言，为提高光催化效率，主要是从材料界面有效反应比表面积、光谱响应的范围、光生载流子分离传输效率等方面研究。根据文献报道[29-30,32-38]，SnS_2 光催化材料的研究大都集中在控制形貌结构、元素掺杂或复合异质结协同光催化方面，探讨如何提高光催化性能。

1 SnS_2 材料的制备

近年来，多形貌结构 SnS_2 材料在多个领域受到广泛的研究与应用。其制备方法趋于多样化，其中固相反应法、溶剂(水)热法、化学气相沉积法(CVD)和喷雾热解法等方法是常用的材料制备方法。

1.1 固相反应法

固相反应法就是反应物均呈固态形式，反应后直接生成所需产品的方法。其主要特点是无需溶剂、设备简单、反应易控、应用简单。如 Kiruthigaa 等[39]通过固相法在 300℃下成功合成了尺度在 426～725nm 的纳米 SnS_2，形貌呈微球状，其禁带宽度为 3.41eV，并在紫外光下能很好地降解 Reactive Red 120 染料。Hou 等[40]以硫脲和 $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ 为原料，通过固相法在 170℃下反应 2h，成功制备了多孔花瓣状 SnS_2 材料，并在可见光下 25min 几乎完全将 Cr^{6+} 还原。

1.2 溶剂(水)热法

溶剂(水)热法是一种进行材料合成与形貌控制的热点方法。据文献报道，该法在制备 SnS_2 材料方面进行了大量的工作，并成功获得了多种不同形貌结构、不同尺度的 SnS_2 纳米材料。如 Zhang 等[41]将四氯化锡、硫代乙酰胺与柠檬酸混合，通过水热反应在不同温度(130～170℃)和不同反应时间(6～24h)条件下调控获得了一系列尺度可控的 SnS_2 纳米材料，且禁带宽度在 2.20～2.30eV，研究发现在 150℃下反应 12h 制备的 SnS_2 纳米材料在可见光下降解 Cr^{6+} 的效果最好；Xia 等[42]以 $SnCl_2 \cdot 2H_2O$、硫粉和 $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ 为原料，通过十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)微乳法一步水热获得了形貌为空心微球的 SnS_2 材料，并从实验结果出发，提出了一种基于气泡模板、自组装和后续壳层演化的机理过程；Liu 等[43]以乙二醇为溶剂，硫脲和 $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ 为原料，通过微波辅助溶剂热法在 180℃下反应 12h，成功获得了类康乃馨花状结构三维纳米材料，并通过可见光催化性能测试测得对罗丹明 B(RhB)降解拟一阶速率常数为 $0.7836h^{-1}$，4h 降解基本完全，对苯酚降解拟一阶速率常数为 $0.2475h^{-1}$，4h 降解达 60%。

1.3 CVD

作为半导体领域最为广泛的制备技术，CVD 是利用含有薄膜元素的一种或几种气相化合物或单质，在衬底表面上进行化学反应生成薄膜的方法。如 Su 等[44]在此制备方法上，通过籽晶诱导生长的思路，成功获得了高品质的 SnS_2 薄层晶体，表征分析厚度在 20nm 左右，光电流响应时间～5μs；Huang 等[45]通过两步 CVD 法在碳布上成功生长出了 SnS_2 纳米片，通过测试发现该材料在真空条件下受 473nm 激光照射敏感的响应时间为 22ms，可作为良好的光电探测材料，可被应用在光电晶体管上。Li 等[46]采用 CVD 法，以 S 和 Sn 粉为反应物，SiO_2/Si 为衬底，在 410～525℃下能够成功生长出二维 SnS_2 纳米薄片和花状 SnS_2，其带隙约为 2.20eV，并对其纳米薄片和花状形貌生长进行了机理讨论。Chen 等[47]报道了将 $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ 和 S 粉作为原料，通过简易 CVD 的方法，在 FTO 导电胶上 450℃下生长出了形貌均一的 SnS_2 六角纳米薄片，其薄片大小在 2～5μm，厚度约在 20nm，且在电压 5eV 下表现出良好的电流密度 $3.68mA/cm^2$。

1.4 喷雾热解法

喷雾热解过程是将各反应物按化学计量比形成前驱液，通过雾化后，由载气引入高温反应炉，在炉中瞬间蒸发溶剂、沉淀溶质，通过干燥、热分解、烧结与烧成等物理化学过程，最终获得超细目标粉体。据相关文献报道，在制备 SnS_2 材料方面已有应用。如 Vijayakumar 等[48]采用此方法，通过 SnS_2 与 *N*，*N*-二甲基硫脲为原料，在 348～423K 下成功制备出六角 SnS_2 薄片状颗粒，研究发现光吸收波长在 400～800nm 范围内，其禁带宽度为～2.75eV，其电阻率在 1.48×10^3～$0.55\times10^3 \Omega \cdot cm$ 范围；Kumar

等[49]以四氯化锡、硫脲和酒精（水和酒精体积比为1∶3）混合形成溶液，通过此技术在300℃下成功制得了 SnS_2 材料，研究发现其形貌平均尺寸为60nm，禁带宽度为2.72eV，形成薄膜的透光率达98％。Anitha 等[50]以氯化锡和硫脲为原料，在175～275℃下成功合成了花瓣状 SnS_2 薄膜材料，通过分析表明其优先定向沿（001）面，禁带宽度在3.26～2.7eV，250℃下合成的 SnS_2 薄膜材料所获得的电阻率最小（21.9Ω·cm）。Arulanantham 等[51]研究了在325℃下不同硫浓度对喷雾热解 SnS_2 薄膜物理化学性能的影响，随着硫浓度（0.8mol/L、0.9mol/L、1.0mol/L）增大，获得的 SnS_2 薄膜颗粒粒径变大（分别为23nm、27nm、40nm），电阻率从 1.4×10^2Ω·cm 增大到 3.01×10^2Ω·cm。

此外，据文献报道，SnS_2 材料的制备方法还有很多，如化学沉淀法[52]、原子层沉积法[53]和真空热蒸发法[54]等。随着材料制备方法的不断开发与研究，众多新型制备方法正被逐步用于制备不同形貌的 SnS_2 材料中。

2　SnS_2 及其复合物在光催化中的应用

如何增大 SnS_2 材料比表面积、扩展光谱响应的范围、提高光生载流子分离传输效率等问题，是该材料关注的重点。添加微量的助催剂抑制载流子对复合是常见的光催化性能的提高研究手段[33-34]。根据文献报道，一是对 SnS_2 单元改性，主要是通过控制形貌结构和元素掺杂改性，来提高光催化性能；二是通过有机或无机化合物与 SnS_2 形成二元或多元复合异质结，通过光催化协同效应来提高光催化性能。

2.1　SnS_2 单元改性方面

根据文献报道，当前 SnS_2 单元改性主要是从材料自身的形貌控制、尺度控制、元素掺杂、晶格空位等方面提高光催化性能。如 Zhang 等[55]以二硫化硒与单质硫粉作反应源，采用水热法得到花瓣形的 SnS_2，测试表明与 P25 型 TiO_2 相比，花瓣形状的 SnS_2 在太阳光下60min甲基橙降解完全，而 P25 型 TiO_2 只有1.4％。分析认为花瓣型的 SnS_2 比表面积较大，并提供了良好的吸附场所，而且提高了 SnS_2 材料光生电子-空穴对的分离效率。Zhao 等[56]以四氯化锡、三氯化铬和硫脲为原料，通过水热法成功合成了不同量 Cr 掺杂的 SnS_2 纳米化状光催化材料，表征分析发现，Cr 成功进入到 SnS_2 晶格中，且结晶度良好，测试表明掺杂摩尔比5％含量的 Cr 光催化性能是 SnS_2 的2.9倍。Liu 等[57]通过控制合成温度和反应时间，制备出不同尺度、不同形貌的 SnS_2 样品，通过光催化测试比较发现，当材料制备的制度为120℃×3h，反应后制得的 SnS_2 效果最好。Sun 等[58]采用甲酰胺液体对体相六边形 SnS_2 材料进行插层剥离，成功获得了单层 SnS_2，表征发现，剥离得到的单层 SnS_2 的厚度相当于约3个原子厚度，与 TiO_2 对太阳光吸收率为7％相比，其光催化性能测试发现其对太阳光的吸收率达到38.7％。

2.2　SnS_2 二元复合异质结

据已有文献报道，提高光催化性能的一个手段就是通过物理化学制备方法，进行 SnS_2 复合异质结。而进行复合异质结的形式也有很多种，如量子点修饰、二维层状复合、核壳结构复合、三维结构复合、聚合物复合等。如 Liu 等[59]采用简单的原位水热离子交换法制备了一种新型的可见光驱动 Ag_2S/SnS_2 复合光催化剂。在去除甲基橙（MO）和铬（Ⅵ）方面，Ag_2S/SnS_2 复合材料较纯 SnS_2 具有更好的光催化活性，在可见光照射下，1％ Ag_2S/SnS_2 异质结材料光催化降解最好。Song 等[60]通过水热法合成的六方 SnS_2 与超薄纳米片 2Dg-C_3N_4 复合，形成了2D/2D z 型光催化复合异质结。研究表明5％ 2D SnS_2/g-C_3N_4 表现最佳，照射60min后去除 RhB 94.8％，较单纯 2D g-C_3N_4 提高了42.1％。Fan 等[61]制备了 SnO_2@SnS_2 包裹核壳纳米棒，壳层厚度约为3.5nm。在可见光下，与纯 SnS_2 纳米材料相比，核壳纳米棒具有更好的光催化活性。Luo 等[37]采用简单水热法成功合成了直接 Z 型 $LaFeO_3/SnS_2$ 复合异质结光催化材料，通过可见光降解四环素（TC）测试研究发现，$LaFeO_3$（10.0％）/SnS_2 的降解效果最好，降解速率分别为 SnS_2 和 $LaFeO_3$ 的3.5倍和2.2倍。Xu 等[62]首次采用原位聚合法合成了聚吡咯（PPy）改性的 SnS_2 纳米六方片材料，测试结果表明，15-PPy/SnS_2 复合材料不仅在可见光区（＞420nm）具有良好的光催化性能，而且在近红外区（＞760nm）也有较大的光催化性能改善。

2.3　SnS_2 的三元复合异质结

近年来，三元化合物作为光催化剂的研究受到部分研究者的关注。三元复合光催化材料可以进一步增强光生载流子的分离与迁移能力，提高光催化

活性[63]。如 Deng 等[34]通过水热法成功制备了花瓣形 $Ag-Ag_2O-SnS_2$ 三元结构纳米复合异质结光催化材料，与二元复合物 $Ag-SnS_2$ 和 Ag_2O-SnS_2 相比、$Ag-Ag_2O-SnS_2$ 在紫外-可见光区域具有更高的光吸收效率，同时在光催化降解 RhB 的降解速率和降解稳定性上，$Ag-Ag_2O-SnS_2$ 都具备优异的特性。机理研究发现，单质 Ag 介于 Ag_2O 和 SnS_2 之间，如导体连接，当 Ag_2O 受光照产生电子迁移时，电子会迅速经过 Ag 流向 SnS_2 光致空穴，形成相互泯灭，而 Ag_2O 光致空穴与 SnS_2 光生电子因能级差甚远，难以复合。因此实现光生电子-空穴对的分离与迁移，从而具有良好的光催化性能。

3 结语与展望

SnS_2 材料由于具有可见光响应的禁带宽度和优良的电子传输性能，通过自身材料改性或复合异质结可形成良好的光催化性能，被广泛应用于光催化领域。尽管在光催化领域，SnS_2 材料已取得了部分研究进展，但还有很多值得研究者深入的地方，主要表现在以下几个方面：一是 SnS_2 材料结构的可控制备和层数调控方面还有很多研究发展的空间。二是 SnS_2 材料与其他材料的复合方法也有待优化。目前最多的是原位生长法、水热法和条件混合法。条件混合法过程简单，表界面效应、形貌、电子-空穴对分离与降解机理探究仍是重点方向。三是如何将 SnS_2 材料光催化响应区向近红外区迁移仍是研究的方向。尽管利用 SnS_2/半导体复合异质结能在可见光区取得一定的进展研究，而向近红外区的利用率不佳，研究者可通过改性该材料，使其向近红外光光催化迁移，以获得全波段太阳光良好的催化效率。

通过综述近年来 SnS_2 作为光催化材料的研究发展与现状，从材料组成结构、制备及光催化研究 3 个角度，总结了 SnS_2 材料制备及光催化研究方面的内容，并讨论了提高 SnS_2 基光催化性能的几种形式。总之，新型 SnS_2 光催化材料因其自身优势，将成为当下光催化研究的热点。

参考文献

[1] Ong W J，Tan L L，Ng Y H，et al.Graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$)-based photocatalysts for artificial photosynthesis and environmental remediation：are we a step closer to achieving sustainability? [J].Chemical Reviews，2016，116(12)：7159-7329.

[2] Agbea H，Nyanksonb E，Razaac N，et al.Recent advances in photoinduced catalysis for water splitting and environmental applications[J].Journal of Industrial and Engineering Chemistry，2019，4(72)：31-49.

[3] Bora L V，Mewada R K.Visible/solar light active photocatalysts for organic effluent treatment：fundamentals，mechanisms and parametric review[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews，2017，76：1393-1421.

[4] Liu C，Zhu H，Zhu Y，et al.Ordered layered N-doped $KTiNbO_5/g-C_3N_4$，heterojunction with enhanced visible light photocatalytic activity[J].Applied Catalysis B：Environmental，2018，228：54-63.

[5] Friedmann D，Hakki A，Kim H，et al.Heterogeneous photocatalytic organic synthesis：state-of-the-art and future perspectives[J].Green Chemistry，2016，18(20)：5391-5411.

[6] Bajorowicz B，Kobylański M P，Gołąbiewska A，et al.Quantum dot-decorated semiconductor micro-and nanoparticles：a review of their synthesis，characterization and application in photocatalysis[J].Advances in Colloid and Interface Science，2018，256：352-372.

[7] Han M，Zhu S，Lu S，et al.Recent progress on the photocatalysis of carbon dots：classification，mechanism and applications [J].Nano Today，2018，19：201-218.

[8] Lv X，Zhang H，Chang H.Improved photocatalytic activity of highly ordered TiO_2 nanowire arrays for methylene blue degradation[J].Materials Chemistry and Physics，2012，136(2-3)：789-795.

[9] Ganesh R S，Durgadevi E，Navaneethan M，et al.Visible light induced photocatalytic degradation of methylene blue and rhodamine B from the catalyst of CdS nanowire[J].Chemical Physics Letters，2017，684：126-134.

[10] Thaweesak S，Lyu M，Peerakiatkhajohn P，et al.Two-dimensional $g-C_3N_4/Ca_2Nb_2TaO_{10}$ nanosheet composites for efficient visible light photocatalytic hydrogen evolution[J].Applied Catalysis B：Environmental，2017，202：184-190.

[11] Yang L，Huang J，Shi L，et al.Sb doped SnO_2-decorated porous $g-C_3N_4$ nanosheet heterostructures with enhanced photocatalytic activities under visible light irradiation[J].Applied Catalysis B：Environmental，2018，221：670-680.

[12] Peng F，Ni Y，Zhou Q，et al.Construction of ZnO nanosheet arrays within $BiVO_4$ particles on a conductive magnetically driven cilia film with enhanced visible photocatalytic activity [J].Journal of Alloys and Compounds，2017，690：953-960.

[13] Martín-Sómer M，Pablos C，de Diego A，et al.Novel macroporous 3D photocatalytic foams for simultaneous wastewater disinfection and removal of contaminants of emerging concern [J].Chemical Engineering Journal，2019，366：449-459.

[14] Jing L，Xu Y，Zhang M，et al.Novel Ag_2S quantum dot modified 3D flower-like SnS_2 composites for photocatalytic and photoelectrochemical applications [J].Inorganic Chemistry Frontiers，2018，5(1)：63-72.

[15] Li Z Q, Chen X T, Xue Z L. Microwave-assisted synthesis and photocatalytic properties of flower-like Bi_2WO_6 and Bi_2O_3-Bi_2WO_6 composite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 394: 69-77.

[16] Wang L, Xie Y, Liu W, et al. Synthesis of mesoporous core-shell TiO_2 microstructures with coexposed {001}/{101} facets: enhanced intrinsic photocatalytic performance[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(31): 31250-31261.

[17] Yan X, Qin J, Ning G, et al. A novel poly (triazine imide) hollow tube/ZnO heterojunction for tetracycline hydrochloride degradation under visible light irradiation[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(2): 359-365.

[18] Kumar V, Kim K H, Park J W, et al. Graphene and its nanocomposites as a platform for environmental applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 315: 210-232.

[19] Parzinger E, Miller B, Blaschke B, et al. Photocatalytic stability of single- and few-layer MoS_2[J]. ACS Nano, 2015, 9(11): 11302-11309.

[20] Li X, Xia J, Zhu W, et al. Facile synthesis of few-layered MoS_2 modified BiOI with enhanced visible-light photocatalytic activity[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 511: 1-7.

[21] Zhong H, Yang G, Song H, et al. Vertically aligned graphene-like SnS_2 ultrathin nanosheet arrays: excellent energy storage, catalysis, photoconduction, and field-emitting performances[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2012, 116(16): 9319-9326.

[22] Wu Y, Liu Z, Li Y, et al. Construction of 2D-2D TiO_2 nanosheet/layered WS_2 heterojunctions with enhanced visible-light-responsive photocatalytic activity[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2019, 40(1): 60-69.

[23] Wang X, Zhou C, Wang W, et al. CdSe nanoparticle-sensitized ZnO sheets for enhanced photocatalytic hydrogen evolution rates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 826-833.

[24] Yi Y, Yu X F, Zhou W, et al. Two-dimensional black phosphorus: synthesis, modification, properties, and applications [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2017, 120: 1-33.

[25] Hou C, Zhang Y, Li J, et al. In-situ hydrothermal synthesis of CeO_2/SnS_2 heterojunction for use as a new efficient visible-light-driven photocatalyst[J]. Materials Letters, 2018, 213: 154-157.

[26] Tang H, Qi X, Han W, et al. SnS_2 nanoplates embedded in 3D interconnected graphene network as anode material with superior lithium storage performance[J]. Applied Surface Science, 2015, 355: 7-13.

[27] Kale S B, Kalubarme R S, Mahadadalkar M A, et al. Hierarchical 3D $ZnIn_2S_4$/graphene nano-heterostructures: their in situ fabrication with dual functionality in solar hydrogen production and as anodes for lithium ion batteries[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2015, 17(47): 31850-31861.

[28] Zheng J, Xiong X, Wang G, et al. SnS_2 nanoparticles anchored on three-dimensional reduced graphene oxide as a durable anode for sodium ion batteries[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 339: 78-84.

[29] Liu Y, Qiu G, Kong D, et al. Strain effect on SnS_2 nanoribbons: robust direct bandgap of zigzag-edge and sensitive indirect semiconductor with armchair-edge states[J]. Superlattices and Microstructures, 2017, 111: 480-486.

[30] Liu X, Zhao H, Kulka A, et al. Characterization of the physicochemical properties of novel SnS_2 with cubic structure and diamond-like Sn sublattice[J]. Acta Materialia, 2015, 82: 212-223.

[31] Zhang J, Zhang L, Shi Y, et al. Anatase TiO_2 nanosheets with coexposed {101} and {001} facets coupled with ultrathin SnS_2 nanosheets as a face-to-face npn dual heterojunction photocatalyst for enhancing photocatalytic activity[J]. Applied Surface Science, 2017, 420: 839-848.

[32] Li Y Y, Wang J G, Sun H H, et al. Heterostructured SnS_2/SnO_2 nanotubes with enhanced charge separation and excellent photocatalytic hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(31): 14121-14129.

[33] Yan C, Xue X, Zhang W, et al. Well-designed Te/SnS_2/Ag artificial nanoleaves for enabling and enhancing visible-light driven overall splitting of pure water[J]. Nano Energy, 2017, 39: 539-545.

[34] Deng L, Zhu Z, Liu L, et al. Synthesis of Ag_2O and Ag co-modified flower-like SnS_2 composites with enhanced photocatalytic activity under solar light irradiation[J]. Solid State Sciences, 2017, 63: 76-83.

[35] Meng H, Wang T, Chen H, et al. BiOCl/SnS_2 core-shell photocatalyst for the degradation of organic pollutants[J]. Nano, 2016, 11(8): 1650087.

[36] Li J, Du X, Yao L, et al. Synthesis of SnS_2/WO_3 nanocomposite with enhanced photocatalytic activity[J]. Materials Letters, 2014, 121: 44-46.

[37] Luo J, Li R, Chen Y, et al. Rational design of Z-scheme $LaFeO_3$/SnS_2 hybrid with boosted visible light photocatalytic activity towards tetracycline degradation[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 210: 417-430.

[38] Dai K, Lv J, Zhang J, et al. Band structure engineering design of g-C_3N_4/ZnS/SnS_2 ternary heterojunction visible-light photocatalyst with ZnS as electron transport buffer material[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 778: 215-223.

[39] Kiruthigaa G, Manoharan C, Raju C, et al. Solid state synthesis and spectral investigations of nanostructure SnS_2[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2014, 129: 415-420.

[40] Wei H, Hou C, Zhang Y, et al. Scalable low temperature in air solid phase synthesis of porous flower-like hierarchical nanostructure SnS_2 with superior performance in the adsorption and photocatalytic reduction of aqueous Cr(Ⅵ)[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 189: 153-161.

[41] Zhang Y C, Li J, Zhang M, et al. Size-tunable hydrothermal synthesis of SnS_2 nanocrystals with high performance in visible light-driven photocatalytic reduction of aqueous Cr(Ⅵ)[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(21): 9324-9331.

[42] Xia J, Li G, Mao Y, et al. Hydrothermal growth of SnS_2 hollow spheres and their electrochemical properties[J]. CrystEngComm, 2012, 14(13): 4279-4283.

[43] Liu H, Su Y, Chen P, et al. Microwave-assisted solvothermal synthesis of 3D carnation-like SnS_2 nanostructures with high visible light photocatalytic activity[J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2013, 378: 285-292.

[44] Su G, Hadjiev V G, Loya P E, et al. Chemical vapor deposition of thin crystals of layered semiconductor SnS_2 for fast photodetection application[J]. Nano Letters, 2014, 15(1): 506-513.

[45] Huang Y, Deng H X, Xu K, et al. Highly sensitive and fast phototransistor based on large size CVD-grown SnS_2 nanosheets[J]. Nanoscale, 2015, 7(33): 14093-14099.

[46] Li Q, Wei A, Guo Z, et al. Chemical vapor deposition of two-dimensional SnS_2 nanoflakes and flower-shaped SnS_2[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(18): 16057-16063.

[47] Chen L, Liu E, Teng F, et al. Two-dimensional SnS_2 nanosheets arrays as photoelectrode by low temperature CVD method for efficient photoelectrochemical water splitting[J]. Applied Surface Science, 2019, 467: 698-707.

[48] Vijayakumar K, Sanjeeviraja C, Jayachandran M, et al. Characterization of Tin disulphide thin films prepared at different substrate temperature using spray pyrolysis technique[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2011, 22(8): 929-935.

[49] Kumar K D A, Valanarasu S, Tamilnayagam V, et al. Structural, morphological and optical properties of SnS_2 thin films by nebulized spray pyrolysis technique[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28(19): 14209-14216.

[50] Anitha N, Anitha M, Mohamed J R, et al. Influence of substrate temperature on the physical properties of SnS_2 thin films prepared using nebulized spray pyrolysis technique[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(13): 11529-11539.

[51] Arulanantham A M S, Valanarasu S, Jeyadheepan K, et al. Effect of sulfur concentration on the properties of tin disulfide thin films by nebulizer spray pyrolysis technique[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28(24): 18675-18685.

[52] Liu X, Zhao H, Kulka A, et al. Characterization of the physicochemical properties of novel SnS_2 with cubic structure and diamond-like Sn sublattice[J]. Acta Materialia, 2015, 82: 212-223.

[53] Chaki S H, Deshpande M P, Trivedi D P, et al. Wet chemical synthesis and characterization of SnS_2, nanoparticles[J]. Applied Nanoscience, 2013, 3(3): 189-195.

[54] Shi C, Chen Z, Shi G, et al. Influence of annealing on characteristics of tin disulfide thin films by vacuum thermal evaporation[J]. Thin Solid Films, 2012, 520(15): 4898-4901.

[55] Zhang Y C, Du Z N, Li K W, et al. Size-controlled hydrothermal synthesis of SnS_2 nanoparticles with high performance in visible light-driven photocatalytic degradation of aqueous methyl orange[J]. Separation & Purification Technology, 2011, 81(1): 101-107.

[56] Zhao Wenhua, Wei Zhiqiang, Zhang Li, et al. Cr doped SnS_2 nanoflowers: preparation, characterization and photocatalytic decolorization[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018, 88: 173-180.

[57] Liu J H, Huang G F, Huang W Q, et al. Morphology-controlled SnS_2 nanostructures synthesized by refluxing method with high photocatalytic activity[J]. Materials Letters, 2015, 161: 480-483.

[58] Sun Y, Cheng H, Gao S, et al. Freestanding tin disulfide single-layers realizing efficient visible-light water splitting[J]. Angewandte Chemie, 2012, 124(35): 8857-8861.

[59] Liu J, Jing L, Gao G, et al. Ag_2S quantum dots in situ coupled to hexagonal SnS_2 with enhanced photocatalytic activity for MO and Cr(Ⅵ) removal[J]. RSC Advances, 2017, 7(74): 46823-46831.

[60] Song Y, Gu J, Xia K, et al. Construction of 2D SnS_2/g-C_3N_4 Z-scheme composite with superior visible-light photocatalytic performance[J]. Applied Surface Science, 2019, 467: 56-64.

[61] Fan Y, Luo Q, Liu G, et al. Synthesis of SnO_2@SnS_2 core-shell nanorods by double crucible method and their photocatalysis[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2014, 25(9): 3801-3806.

[62] Xu Y, Wang D, Xie M, et al. Novel broad spectrum light responsive PPy/hexagonal-SnS_2 photocatalyst for efficient photoreduction of Cr(Ⅵ)[J]. Materials Research Bulletin, 2019, 112: 226-235.

[63] Shi Y, Chen Y, Tian G, et al. Hierarchical Ag/Ag_2S/CuS ternary heterostructure composite as an efficient visible-light photocatalyst[J]. ChemCatChem, 2015, 7(11): 1684-1690.

收稿日期:2019-05-21