DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2018.03.015

燃煤烟气污染物脱除技术研究进展

吴 江, MUZVIDZIWA Humphroy, 关 昱, 张文博, 徐 凯

(上海电力学院 能源与机械工程学院, 上海 200090)

摘 要: 烟气除尘技术由静电除尘、袋式除尘,发展到电袋复合除尘。烟气脱硫有干法、半干法、湿法等多种技术,但目前应用最广的仍是石灰石-石膏湿法。电厂烟气脱硝主要采用选择性催化还原技术,其关键在于低负荷、全负荷烟气脱硝催化剂的开发以及催化剂的再生。活性炭喷射是烟气脱汞较为成熟的技术,但其成本高昂,并影响飞灰的综合利用,近年来,催化烟气脱汞技术得到了发展,并取得了一系列成果。多种污染物联合脱除技术可减少单种污染物各自脱除的运行成本,已成为发展趋势。

关键词: 燃煤电厂; 烟气净化; 除尘; 脱硫; 脱硝; 脱汞; 催化; 光催化

中图分类号: X701 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4729(2018)03-0277-06

Research Progress on Removal of Pollutants from Coal-fired Flue Gas

WU Jiang, MUZVIDZIWA Humphroy, GUAN Yu, ZHANG Wenbo, XU Kai

(*School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai* 200090, *China*)

Abstract: In the flue gas pollutants emission reduction technology, the flue gas dust removal technology is developed from electrostatic precipitation and bag dust collection, to the electrostatics fabric filter, wet dust removal, low-low temperature electrostatic precipitator and agglomeration technology. Flue gas desulfurization methods include dry, semi-dry, wet and other technologies, but the most widely used is still limestone-gypsum wet method. Flue gas denitrification technology mainly includes selective non-catalytic reduction (SNCR) and selective catalytic reduction (SCR), etc. SCR flue gas denitrification technologies more widely used in the power plant, the key technologies lie in the developing low load, full load denitration catalyst and catalyst regeneration. Activated carbon injection is a more technology mature of flue gas mercury removal, but its cost is high, and it also affects the comprehensive utilization of fly ash. In recent years, catalysis and other flue gas mercury removal technology has been developed, with a series of results obtained. The combined removal of multiple pollutants can reduce the operating cost of single pollutant removal and it becomes a trend of development.

Key words: coal-fired power plants; flue gas purification; particle removal; desulfurization; denitrification; mercury removal; catalytic; photocatalysis

---

收稿日期: 2018-03-16

通讯作者简介: 吴江(1974—),男,博士,教授。主要研究方向为能源环保及污染物的控制。E-mail: wjcfd2002@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金(51606115);上海市自然科学基金(16ZR1413500)。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中国是世界上最大的煤炭生产国，也是最大的煤炭消费国，目前煤在我国的能源结构中约占70%。预测到2050年，我国火电的发电量仍占全国发电总量的50%以上[1]。因此，煤炭在我国能源框架中的主体地位，在相当长的一段时间内是难以改变的。燃煤过程伴随着大量污染物的生成，为了严控燃煤电厂烟气污染物的排放，我国规定了电厂烟气的排放标准，烟尘，SO_2，NO_x 的排放浓度（标准容积）分别不高于 10 mg/m^3，35 mg/m^3，50 mg/m^3。由于汞的剧毒性，2011 年发布的 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》，增加了汞的排放标准[2]，要求燃煤锅炉汞及其化合物的排放限值为 0.03 mg/m^3，而且这一标准将更为严格。

电厂烟气净化技术是指燃煤电厂中根据烟气中污染物的物理、化学性质，通过吸附剂、催化剂以及其他净化设备等，对烟气中的有害气体、烟尘以及重金属污染物等进行脱除净化的技术。目前，应用较为成熟的有燃煤烟气除尘、脱硫、脱硝和脱汞等技术，主要用于脱除烟气中的粉尘，SO_x，NO_x，Hg 等。

1 除尘技术

电厂烟气除尘技术是指根据烟气中粉尘、飞灰等颗粒性质、烟气密度及电性质进行粉尘脱除减排的技术。电厂应用较多的除尘技术包括静电除尘、袋式除尘和电袋复合除尘等技术。

1.1 静电除尘技术

电除尘技术设备一般是指静电除尘器。它是一种干式高效除尘器，通过利用外加强电场使粉尘荷电分离，在电场力的作用下使粉尘沉积在集尘极的平板或圆管上，从而脱除烟气中的粉尘。静电除尘器是电厂广泛应用的传统型除尘器，但粉尘颗粒度、电阻率等粉尘特性对除尘效率影响较大，且静电除尘器对超细粉尘和重金属的捕集效果较差，已不能达到越来越严格的粉尘排放限值要求，因此对细颗粒物脱除效果明显的布袋除尘器或电袋复合除尘器得到了更多的关注。

1.2 袋式除尘器

袋式除尘器也是一种干式高效除尘器，即利用袋式过滤元件对烟气中的粉尘进行捕集的技术。该除尘器主要有过滤装置和清灰装置两部分。当烟气中的粉尘通过滤料时，经由纤维的筛滤、粉尘的碰撞以及静电的吸引效应，在滤料表面形成一层稳定的初层，多孔的初层具有很好的过滤作用，极大地提高了除尘效率。

1.3 电袋复合式除尘器

为达到超低排放的要求，电除尘器的改造及运行优化研究越来越受到关注。电袋复合式除尘器结合了电除尘器和袋式除尘器的优点，用静电增强袋式除尘器。目前相关研究应用已较为成熟，并显示了其优越的性能：一是对微细粒子（特别是 0.01 ~0.1 μm 的粒子）有很好的捕集性；二是与电除尘器相比，有较宽的粉尘比电阻适用范围；三是与袋式除尘器相比，其滤袋表面沉积的粉尘层较为松散，降低了阻力，从而减少了运行费用。

2 脱硫技术

燃煤电厂排放的 SO_x，是大气污染主要的排放源之一。煤在燃烧过程中，约有 95% 的硫与氧反应生成 SO_x，其中以 SO_2 为主，还有少量的 SO_3。电厂烟气脱硫技术可分为燃烧前、燃煤中和燃烧后 3 个脱硫阶段，烟气脱硫属于燃烧后脱硫。

2.1 燃烧前脱硫

燃烧前脱硫即煤中脱硫，一方面，可通过洗选、型煤加工和水煤浆方法去除煤中的硫分和灰分等；另一方面，可通过煤气化技术得到粗煤气，再对其进行脱硫净化。整体煤气化联合循环发电技术就是典型的低排放清洁发电技术。在燃烧前，将高温粗煤气中的硫脱除，主要有 H_2S 和少量的 COS 等。

2.2 燃烧中脱硫

燃烧中脱硫，是在燃烧过程中加入石灰石粉作脱硫剂，$CaCO_3$ 受热分解成 CaO，CaO 与 SO_2 在 O_2 气氛中生成 $CaSO_4$，从而将 SO_2 脱除。

2.3 燃烧后脱硫

燃烧后脱硫即烟气脱硫（Flue Gas Desulfu-

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

rization,FGD),利用 SO_2 易溶于水或易被吸附的性质,对其进行净化处理。烟气脱硫通常按照脱除过程是否有水以及反应产物的干湿状态,可分为湿法、半干法和干法脱硫 3 类工艺。

湿法烟气脱硫可分为石灰石/石膏法[3-4]、双碱法[5]、海水法[6]等。石灰石/石膏法烟气脱硫技术是目前应用最成熟、最广泛的技术。

干法烟气脱硫的脱硫过程和脱硫产物皆是干燥的,因此不会发生腐蚀、结露等问题,无废液等二次污染,但其脱硫效率较低,适用于含硫量较低的环境。主要有活性炭吸附法[7]、炉内喷钙法[8]以及炉内喷钙尾部烟气增湿活化法[9]等。半干法烟气脱硫是利用石灰浆液吸收 SO_2,最终产物为干粉。其工艺较简单、成本低,但脱硫效率较低。主要有喷雾干燥法、循环流化床烟气脱硫技术[10]以及增湿灰技术[11]等。段守保[12]在对300 MW 循环流化床锅炉机组超低排放设计改造中,经过技术可行性和经济性等分析,推荐选用循环流化床半干法脱硫,效率可达 96.59%。

烟气脱硫技术有很多,不少已实现了商业化应用。在实现电厂烟气 SO_2 超低排放的进程中,对新建机组或现役机组进行 SO_2 吸收塔的优化设计及改造,建议采用较为成熟的石灰石/石膏法烟气脱硫技术,选择采用单塔双循环或双塔双循环等高效脱硫设施,优化喷淋层结构,增加吸收塔浆液循环量,以提高烟气的脱硫效率。

3　脱硝技术

燃煤电厂烟气中排放的氮氧化物主要是 NO 和 NO_2,其中绝大多数是 NO。脱硝技术就是脱除烟气中 NO_x 的过程。由于 NO 不易被水吸收,目前烟气脱硝技术多为干法和半干法脱硝技术,通过在烟气中喷入氨和尿素等,将 NO_x 还原成 N_2 和水,主要有选择性催化还原法(Selective Catalytic Reduction,SCR)、选择性非催化还原法(Selective Non-Catalytic Reduction,SNCR)等。

3.1　SCR 脱硝技术

SCR 脱硝技术是在 200 ~ 400 ℃的较低温度范围内,向烟气中喷入氨或尿素等含氮化合物,在催化剂作用下脱除 NO_x。目前,应用较为广泛的钒基催化剂的温度窗口为 300 ~ 400 ℃,脱硝效率可达 80% ~ 90%。

SCR 脱硝技术是目前应用最广泛的烟气脱硝技术。其脱硝效率高、设备简单,且净化温度较低,无副产物[13]。但催化剂的烧结、磨损、腐蚀等,易使催化剂中毒,活性降低;而且 SCR 脱硝设备长时间运行的寿命,以及锅炉启动、低负荷运行时烟气尚未达到 SCR 催化剂工作温度窗口,容易造成 NO 瞬时超标。目前,为了实现严格控制氮氧化物的排放,往往需要结合低氮燃烧技术,以降低燃烧过程中 NO 的生成。

3.2　SNCR 脱硝技术

SNCR 脱硝技术是指在 870 ~ 1 100 ℃高温区,在不利用催化剂的情况下,喷入氨等还原剂与烟气中的 NO_x 发生化学反应的脱硝技术。其脱硝效率一般为 30% ~ 60%。SNCR 脱硝技术对反应空间和时间均有较高的要求,且大多与其他脱硝技术协同工作。SNCR 脱硝技术的主要影响因素有反应温度、空间速度、混合程度、氨逃逸等。SNCR 脱硝技术投资少、运行费用低,若与低 NO_x 燃烧技术[14]、SCR 技术、再燃烧技术等联合使用,可进一步提高脱硝效率,将 NO_x 的排放浓度控制在限值以下。段守保[12]在对 300 MW 循环流化床锅炉机组超低排放设计改造中,采用 SNCR 协同降低 NO_x,炉外脱硝效率达到了 75%。

在电厂烟气脱硝技术的开发与推广中,可以通过 SCR 和 SNCR 与低 NO_x 燃烧技术的有效结合,实现 NO_x 的超低排放;在有效控制氨逃逸的基础上,通过增加催化剂层数、增加喷氨量等措施,达到 NO_x 的限排标准。

4　脱汞技术

汞是煤中一种剧毒微量元素,伴随煤的燃烧过程排入大气。汞具有低熔点、低沸点、高挥发性等物理性质,对环境、人体产生极大的危害。燃煤烟气所产生的汞通常有单质汞(Hg^0)、二价汞(Hg^{2+})和颗粒汞(Hg^p)3 种形态[15-17]。烟气中汞的脱除很大程度上取决于汞的形态。二价汞具有水溶性,故可以通过湿式静电除尘器脱除,效率可达 90%[18]。颗粒汞可以很容易通过电厂现有的除尘装置进行脱除[19]。但由于单质汞的挥发性、不溶于水和化学稳定性,不容易通过电厂现有的空气污染物脱除设备将其脱除,因此在燃煤电厂脱除单质汞是一个巨大的挑战。其关键点是将单

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

质汞转化为二价汞。

为此，要有效脱除烟气中的汞，最主要的是降低单质汞的含量，主要采用以下两种方法：一是吸附方法，主要的烟气汞吸附剂有活性炭、飞灰以及钙基吸附剂等；二是将单质汞氧化成易脱除的二价汞的新型脱汞技术，如等离子体脱汞技术、催化氧化技术等。此外，还有在燃烧过程中添加添加剂脱汞等技术。

4.1 碳基吸附剂吸附脱汞技术

活性炭的研究较为成熟，其比表面积大，空隙较为发达，具有很强的吸附能力[20]。研究发现，单纯的活性炭对汞的脱除效率并不高，通过掺杂改性可以提高其脱除效率。常采用卤元素[21-22]和硫单质等方法来提高活性炭的脱汞能力。此外，通过掺杂飞灰等也可提高脱汞效果。

ZHAO Z 等人[23]利用浸渍法制备了 Ce-Mn 共改性活性炭催化剂。研究表明，经掺杂改性的活性炭有着较好的脱汞能力。掺杂 CeO_2 的活性炭催化脱汞能力最高达到 70%，再掺入 Mn 之后脱汞效率达 90% 左右。究其原因，主要是 Ce-Mn 固溶体的形成促进了氧化反应的发生。

4.2 新型脱汞技术

一是低温等离子体脱汞技术，其重粒子温度只有室温左右，而电子温度可达上千万度，反应条件温和，有利于工艺操作和防止高温副反应的发生[16]。主要有电晕放电技术和介质阻挡放电技术。

二是催化氧化脱汞技术。利用催化剂的光催化氧化性，在光照的条件下，产生强氧化性的自由基，氧化脱除污染物。具有光催化作用的半导体催化剂，在用能量大于禁带宽度的光照射时，电子从充满的价带被激发跃迁到空的导带，在价带上产生带正电的空穴(h^+)，并在催化剂表面形成电子空穴对。光生空穴具有极强的氧化性，能将其表面吸附的 OH^- 和 H_2O 氧化成 $\cdot OH^-$。$\cdot OH^-$ 具有强氧化性，几乎可以氧化大多数的污染物。光催化氧化脱汞技术的催化效率高，环境友好无污染，并能充分利用紫外光或可见光，成本低，具有其他传统烟气脱汞技术不可比拟的优点，已逐步成为国内外研究的热点，拥有广阔的应用前景。常用的催化剂一般可分为 SCR 催化剂、金属和金属氧化物催化剂以及光催化剂等。

SCR 催化剂和 V_2O_5/WO_3 体系对 Hg 都有催化氧化作用，但当烟气中 HCl 的浓度较低时，其氧化催化效果较差[19]。因此，研究者利用现有的 SCR 催化剂负载其他金属活性组分，来进一步提高其催化效率[24-25]。

贵金属具有很好的氧化催化性能，但其价格昂贵不利于应用发展；经济性较好的金属及其氧化物如 Mn，Fe，Cu 等则更有研究价值[26]。LIU D J 等人[27]研究了掺杂 Ce 和 La 的 CuO/ZSM-5 或 MnOx/ZSM-5 催化剂，在 120～240 ℃温度下进行了脱汞试验，结果表明，其脱汞效率较高。

JIANG Z F 等人[28]通过溶胶热法制备的 TiO_2/In_2O_3@g-C_3N_4 能够有效地降解烟气污染物。研究发现，通过氧化铟与二氧化钛形成的异质结化合物，具有抑制电子空穴对复合的能力，由于其比表面积较小，利用石墨相-氮化碳修饰(为载体)，使复合物的比表面积增大，提高了在可见光范围内的催化和抑制电子-空穴对的复合，从而提升了光催化能力。

传统的 TiO_2，由于其较大的带隙宽度(锐钛矿 3.20 eV，金红石 3.02 eV)仅能在紫外光照射下具有活性[29]，同时，激发的电子-空穴对极易复合，且难以转移到催化剂表面进行下一步反应，严重导致量子化产率较低和氧化能力不足，从而阻碍了 TiO_2 光催化剂的广泛应用。因此，开发新型的、在可见光下可被激发的光催化剂已成为当前的研究热点。其中，铋基光催化剂由于其奥利维里斯层状结构受到了越来越多学者的关注[30]。

目前，Bi_2WO_6[30]，Bi_2MoO_6[31]，$BiVO_4$[32]，$BiOIO_3$[33]等铋基化合物已经应用在有机污染物的降解上。研究发现，$BiOIO_3$ 在紫外线的照射下，其光催化效率高于同等条件下 TiO_2 的效率；在 LED 灯光下，Hg^0 的移除效率接近 100%，充分显示了其杰出的光催化性能。通过对铋基物质的分析，发现 BiOI 与 $BiOIO_3$ 拥有相似的晶体结构，而且 BiOI 的禁带宽度更窄，可以在波长 $\lambda < 700$ nm 时被激发，使用窄带隙的 BiOI(1.75 eV)掺杂 $BiOIO_3$，可以缩小 BiOI/$BiOIO_3$ 化合物的带隙，增加对可见光的响应，也可分离光生电子-空穴对。

通过水热法可以制备 $BiOIO_3$[34]，在室温下通过化学沉淀法合成 BiOI/$BiOIO_3$ 异质结纳米复合材料。通过紫外线和可见光照射氧化汞的试验

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表明,$BiOI/BiOIO_3$ 异质结材料对去除 Hg^0 具有显著的光催化活性:随着 BiOI 含量的增加,Hg^0 的去除率有所增加,然后随着 BiOI 含量的加大,Hg^0 去除率反而下降;当 $BiOI/BiOIO_3$ 化合物的摩尔比为 3∶1 时,Hg^0 的去除效率最高,约达到 98.53%。研究表明,该化合物的光催化活性高于其单一组分,p 型半导体 BiOI 的费米能级接近于价带,而 n 型半导体 $BiOIO_3$ 的费米能级接近导带。当 $BiOIO_3$ 和 BiOI 之间形成 p-n 结时,p 型半导体 BiOI 和 n 型半导体 $BiOIO_3$ 的费米能级达到平衡,同时 BiOI 的价带和导带位置向更负的电负性移动,$BiOIO_3$ 的价带和导带位置向更正的电负性移动。

因此,开发表面积大、光生空穴率高、固化性能高的光催化剂,使其在可见光范围内发生氧化还原反应,进一步研究光催化脱汞反应机理,将成为光催化氧化脱汞领域的发展方向。

5　多种污染物联合脱除技术

联合脱除污染物技术是联合除尘、脱硫以及脱硝技术,通过优化燃烧,结合电厂现有脱除设备,适当增加脱汞设备等达到协同脱除污染物目的的一种技术。目前,国内除尘、脱硫、脱硝技术系统大多单独运行,单独控制,分级处理,系统占地面积大且费用昂贵,很少有一体化的脱除技术。脱硫脱硝协同脱除技术是将单独脱硫、脱硝系统整合而成的一体化技术。其方法有固相吸附/再生脱硫脱硝工艺、气/固催化脱硫脱硝工艺、液相脱硫脱硝工艺、高能电子活化氧化工艺等。姜未汀等人[35]将 $KMnO_4$-H_2SO_4 溶液作为吸收液,研究了 $KMnO_4$ 浓度、H_2SO_4 浓度、NO 浓度对脱除 NO_x 和 Hg 效果的影响。结果表明,其脱除效率分别为 43.33% 和 98.95%。

脱硫脱汞协同技术是利用现有的湿式烟气脱硫设备脱除烟气中的二价汞,经研究发现,其脱除效率可达 90%[36]。赵毅等人[37]通过湿式脱硫系统同时进行脱汞,其脱除汞的效率达 87%。

利用活性炭吸附烟气污染物,是脱除多种污染物技术手段之一。活性炭吸附剂在吸附烟气汞的同时,也能吸附脱除一定的 NO 和 SO_2。在活性炭的表面化学研究中,活性炭表面的官能团在吸附和催化性能中发挥着极为重要的作用。施雪等人[38]采用氯化锌作为活化剂制备了生物质活性炭,研究表明,所制备的活性炭对汞具有良好的吸附性能。

6　结　语

综合比较上述各净化技术,建议在对电厂烟气多种污染物进行控制时,利用电厂现有设备或在现有设备的基础上进行改造,在满足污染物排放限值的基础上,实现多污染物的协同脱除。特别是对电厂烟气中氨、细颗粒物、汞和 SO_3 等污染物,应加强排放检测技术和在线监测技术的研发与推广;加强脱硝设施运行管理,开发经济高效的催化剂,在脱除硫、硝的基础上实现汞的脱除;注重低低温电除尘器、电袋复合除尘器以及湿法脱硫等措施对 SO_3 和汞的协同脱除作用,从而实现电厂尾气的超低排放,全面落实"节约、清洁、安全"的能源战略方针,促进电力行业的高效、清洁、可持续发展。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国年鉴统计 2015 [M]. 北京:中国统计出版社,2015:2.

[2] 环境保护局,国家质量监督检验检疫总局. 火电厂大气污染物排放标准:GB 13223—2011 [EB/OL]. (2011-07-29) [2018-02-28]. https://wenku.baidu.com/view/451b248c680203d8cf2f2404.html.

[3] 王凯,张庆国,田富中. 湿法脱硫石膏特性研究进展 [J]. 环境工程,2016,34(增刊 1):448-451.

[4] 顾承昱,阚竟生,沈恒根,等. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺湿量平衡分析与计算 [J]. 环境工程,2015,33(S1):502-505.

[5] 先元华. 内压式中空纤维超滤膜污染模型研究 [J]. 环境科学与技术,2015,32(4):166-169.

[6] 兰天. 海水法燃煤烟气脱硫中 S(Ⅳ) 的氧化规律与吸收——催化氧化一体化技术研究 [D]. 杭州:浙江大学,2013.

[7] 刘洁岭,汤争光,陈杰,等. 新型生物质活性炭烟气脱硫研究 [J]. 环境科学,2013,34(4):1623-1627.

[8] 刘丹瑶,张成,夏季,等. 大容量锅炉炉内喷钙辅助脱硫系统可行性研究 [J]. 热能动力工程,2012,27(4):472-477.

[9] 贾东坡,王明毅,宋魏鑫,等. 循环流化床锅炉尾部增湿活化深度脱硫工艺研究 [J]. 电站系统工程,2014,30(5):41-43.

[10] 沈伦,吴国勋,张忠梅,等. 单级多喷嘴 CFB-FGD 技术研究及应用 [J]. 环境工程,2014,32(12):73-75.

[11] 汪建慧. NID 循环半干法烟气脱硫装置脱硫效率的分析 [J]. 环境工程,2011,29(增刊 1):150-152.

[12] 段守保. 300 MW CFB 锅炉大气污染物超低排放改造技术研究 [J]. 洁净煤技术,2016,22(6):88-94.

[13] GAO F,TANG X,YI H. Promotional mechanisms of activity

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

and SO_2 tolerance of Co-or Ni-doped MnO_x-CeO_2 catalysts for SCR of NO_x with NH_3 at low temperature [J]. Chemical Engineering Journal,2017,317:20-31.

[14] FU S L,SONG Q,YAO Q. Mechanism study on the adsorption and reactions of NH_3,NO,and O_2 on the CaO surface in the SNCR deNO_x process [J]. Chemical Engineering Journal,2016,285:137-143.

[15] 周瑞兴,张静,吴江,等. CuO/ZnO 纳米复合物的制备及其光催化脱汞的评价 [J]. 上海电力学院学报,2017,33(3):289-294.

[16] WU J,LI C E,CHENG X T,et al. Photocatalytic oxidation of gas-phase Hg^0 by carbon spheres supported visible-light-driven CuO-TiO_2 [J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry,2016,46:416-425.

[17] WU J,LI C E,ZHAO X Y,et al. Photocatalytic oxidation of gas-phase Hg^0 by carbon spheres supported visible-light-driven CuO-TiO_2 [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry,2016,176:559-569.

[18] 陈先托,张冲,吴江,等. N-Fe 共掺杂 $BiVO_4$ 的制备及其光催化活性的研究 [J]. 上海电力学院学报,2015,31(5):456-460.

[19] 黄永健,周蓉生. 大气环境中汞污染的研究进展 [J]. 物探与化探,2002,26(4):296-298.

[20] WU S,YANG W,ZHAO J,et al. Effects of properties of activated carbon on its activity for mercury removal and mercury desorption from used activated carbons [J]. Energ Fuel,2015,29(3):1946-1950.

[21] ZHAO H,SUN S,JIANG P,et al. Graphitic C_3N_4 modified by Ni_2P cocatalyst: an efficient,robust and low cost photocatalyst for visible-light-driven H_2 evolution from water [J]. Chemical Engineering Journal,2017,315:598-607.

[22] MIMACHI H,TAKAHASHI M,TAKEYA S,et al. Effect of long-term storage and thermal history on gas content of natural gas hydrate pellets under ambient pressure [J]. Energ Fuel,2015,29(8):1507-1512.

[23] WU J,ZHAO Z,HUANG T,et al. Removal of elemental mercury by Ce-Mn co-modified activated carbon catalyst [J]. Catal Commun,2017,93:62-66.

[24] 程广文,张强,白博峰. 一种改性选择性催化还原催化剂及其对零价汞的催化氧化性能 [J]. 中国电机工程学报,2015,35(3):623-630.

[25] ZHOU Z J,LIU X W,LIAO Z Q,et al. A novel low temperature catalyst regenerated from deactivated SCR catalyst for Hg^0 oxidation [J]. Chemical Engineering Journal,2016,304:121-128.

[26] DONG T,CAO S,XU G. Highly efficient and recyclable depth filtrating system using structured kapok filters for oil removal and recovery from wastewater [J]. Journal of Hazardous Materials,2017,321:859-867.

[27] LIU D J,ZHOU W G,Wu J. Effect of Ce and La on the activity of CuO/ZSM-5 and MnOx/ZSM-5 composites for elemental mercury removal at low temperature [J]. Fuel,2017,194:115-122.

[28] JIANG Z F,JIANG D L,YAN Z X,et al. A new visible light active multifunctional ternary composite based on TiO_2-In_2O_3 nanocrystals heterojunction decorated porous graphitic carbon nitride for photocatalytic treatment of hazardous pollutantand H_2 evolution [J]. Applied Catalysis B: Environmental,2015,170-171:195-205.

[29] CHEN C. Synthesis of visible-light responsive graphene oxide/TiO_2 composites with p/n heterojunction [J]. Acs Nano,2010,4(11):6425-6432.

[30] ZHOU R,WU J,ZHANG J,et al. Photocatalytic oxidation of gas-phase Hg^0 on the exposed reactive facets of BiOI/$BiOIO_3$ heterostructures [J]. Applied Catalysis B: Environmental,2017,204:465-474.

[31] QIX M,GU M L,ZHU X Y,et al. Fabrication of $BiOIO_3$ nanosheets with remarkable photocatalytic oxidation removal for gaseous elemental mercury [J]. Chemical Engineering Journal,2016,285:11-19.

[32] ZAHNG J,WU J,LU P,et al. The effect of pH on Synthesis of BiOCl and its photocatalytic oxidization performance [J]. Materials Letters,2017,186:353-356.

[33] WU J,CHEN X T,LI C E,et al. Hydrothermal synthesis of carbon spheres-BiOI/$BiOIO_3$ heterojunctions for photocatalytic removal of gaseous Hg^0 under visible light [J]. Chemical Engineering Journal,2016,304:533-543.

[34] SUN X M,WU J,LI Q F,et al. Fabrication of $BiOIO_3$ with induced oxygen vacancies for efficient separation of the electron-hole pairs [J]. Applied Catalysis B: Environmental,2017,218:80-90.

[35] 姜未汀,张艳艳,吴江,等. 燃煤烟气污染物 NO 和 Hg 的联合脱除 [J]. 华东电力,2011,39(7):1163-1166.

[36] 鲍静静,印华斌,杨林军,等. 湿法烟气脱硫系统的脱汞性能研究 [J]. 动力工程学报,2009,29(7):664-670.

[37] 赵毅,陈周燕,汪黎东. 湿式烟气脱硫系统同时脱汞研究 [J]. 环境工程学报,2008,2(1):64-69.

[38] 施雪,赵丽丽,吴江,等. 生物质活性炭对模拟烟气汞吸附特性的实验研究 [J]. 上海理工大学学报,2013,35(5):435-438.

(责任编辑 胡小萍)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net