

燃煤烟气脱汞技术研究进展

毛吉献^{1,2}, 王凡¹, 王红梅¹, 张凡¹, 刘宇¹, 路迈西²

(1.中国环境科学研究院, 北京 100012;

2.中国矿业大学(北京), 北京 100083)

摘要:中国作为燃煤大国,汞污染非常严重,燃煤汞排放的控制技术将会是一个十分重要的环保课题。了解了一些经典脱汞技术的新进展,同时也关注了一些新兴脱汞技术。通过对比分析,认为可以同时脱除 NO_x、SO_x 和 Hg 的多污染控制技术将会是一个有前途的环保技术。

关键词:烟气;脱汞;活性炭喷入;飞灰;多污染控制技术

中图分类号:X51

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2010)02-0001-05

1 概述

汞是煤中最易挥发的重金属元素之一,大气中的汞可以通过呼吸作用随气体进入人体,也可以沿食物链通过消化系统被人体吸收,对人体的危害极大。随着世界各国对大气中汞污染问题的日益关注,燃煤烟气中排放的汞已成为目前我国迫切需要解决的一个重大环境问题。

在美国和欧洲,燃煤锅炉排放的汞是大气汞污染的主要来源^[1,2]。燃煤锅炉所排放的汞约占人为汞排放量的1/3。1963年美国制定了《1963年联邦清洁空气法》(Federal Clean Air Act of 1963),但是当时没有把汞排放纳入控制范围。随后《清洁空气法》进行了多次修订^[3]。1990年修订后的《清洁空气法》授权美国环保局(United States Environmental Protection Agency)将汞作为危害性气体进行控制^[4]。2000年12月,美国环保局决定根据《清洁空气法》第112条对燃煤电力系统的汞排放进行控制,计划到2018年使汞的排放量减少到15t/a^[5]。

据2002年UNEP(United Nations Environment Programme)的评估报告表明^[6],中国是全球范围内汞污染最严重的地区之一,大气中汞的平均值为5~22 t/a,平均沉降值大于70 μg/m²。这与我国的

能源结构有很大关系。中国是煤炭消费大国,在能源结构中煤炭所占比例高达75%,并且中国煤炭的平均含汞量约0.58 μg/g 远高于世界平均含量0.13 μg/g^[7,8]。燃煤电站的汞排放占人为汞排放的一大部分,1999~2003年中国燃煤电站煤炭消耗量平均每年递增9.3%,因此造成大气汞排放量年平均增长率达到了9.59%,2003年我国燃煤电厂排入大气的汞为89.4 t,如图1所示。

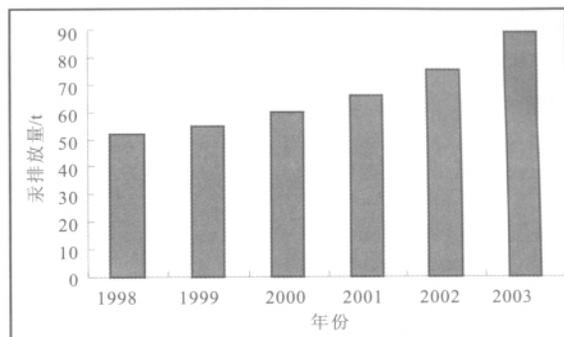


图1 中国燃煤电站大气汞排放量图^[9]

我国除对垃圾焚烧炉以及与汞有关的化工生产过程出台相关的控制标准外,还没有制定针对燃煤过程汞排放的控制标准。但在不久的将来,在汞排放领域制定相应标准也必是大势所趋。所以通过对国内外现有烟气脱汞技术的了解和总结,对我国研究和开发燃煤烟气脱汞技术有重要的现实意义。

2 现有烟气脱汞技术与进展

赋存在煤中的汞经过燃烧后的烟气汞主要有三种形态:气态单质汞 $Hg^0(g)$,气态二价汞 $Hg^{2+}(g)$,固态颗粒汞 $Hg(p)$ 。仅就气态汞而言,气态单质汞 $Hg^0(g)$ 占主要存在形式。Kevin C. Galbreath 等人^[10]的研究表明,在锅炉烟气出口处(970 °C)86 %的气态汞为 $Hg^0(g)$ 。

烟气脱汞关键是 Hg^0 的脱除,由于 Hg^0 难溶于水,所以一般的化学脱汞技术都需要把 Hg^0 催化氧化为能溶于水的 Hg^{2+} ,然后再做进一步处理。而吸附剂法脱汞技术通常为物理、化学混合吸附,不仅能吸附 Hg^{2+} ,也能吸附 Hg^0 。

2.1 活性炭脱汞

活性炭主要有普通活性炭、化学改性活性炭和活性炭纤维等。普通活性炭是相对于其它经过物理或化学处理的活性炭而言的,这种活性炭价格相对较低,但是对汞的吸附效率不高,一般只有30 %左右^[11],吸附量约为 $10 \mu g/g$ (烟气温度 140 °C,汞浓度 $110 \mu g/m^3$)^[12]。化学改性活性炭主要是经过 S、Cl、Br、I 等元素处理的活性炭,改性后的活性炭吸附效率和吸附量均有明显提高,但是成本很高。活性炭纤维是第三代炭基吸附剂,其对污染物的吸附性能大大优于粉末状活性炭和颗粒状活性炭。活性炭纤维对汞有较好的吸附效果,活性炭纤维汞吸附效率较传统活性炭颗粒高 2~3 个数量级。活性炭纤维表面含氧、含氮官能团以及水分对汞的吸附,特别是对 Hg^0 的吸附氧化有促进作用^[13],因而在汞吸附的过程中既有物理吸附又有化学吸附,所以汞吸附能力明显提高,而经化学改性后可进一步提高除汞性能^[14]。

活性炭脱汞在工业上一般采用活性炭喷入技术(ACI, Activated Carbon Injection),该技术是目前为止较为成熟且应用最多的一种烟气脱汞技术,脱汞率可达 96 %。活性炭喷入技术脱汞效果显著,由于活性炭脱汞属于物理吸附脱汞,因此其对零价汞、二价汞及颗粒汞都有很好的吸附效果,尤其对零价汞的脱除率可高达 99 %。

然而活性炭价格昂贵,这严重影响了该技术的推广。在美国,活性炭的价格是 500~3 000 美元/t,一个 500 MW 的燃煤电厂每年用活性炭脱汞的费用约为 100 万美元^[15]。

美国能源部国家能源技术实验室(United States Department of Energy, National Energy Technology Laboratory)的 Evan J. Granite 等人^[15]提

出的“thief”流程(如图 2 所示)采用活性炭喷入技术脱除烟气中的汞蒸气。该流程是在活性炭喷入工艺的基础上进行的一点改进。该流程把锅炉炉膛内的部分燃烧的粉煤引入到空气预热器处,然后进入活性炭喷入点,可以部分甚至全部替代工业用活性炭。由于“thief”吸附剂成本较低(90~200 美元/t),这样就可以在一定程度上降低活性炭喷入工艺的成本。

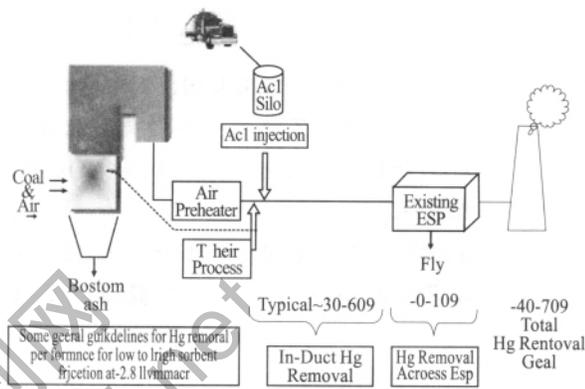


图2 “Thief”流程与活性炭喷入技术

2.2 飞灰及钙基吸附剂吸附法

在汞浓度比较低的情况下,飞灰与商业活性炭的吸附能力相差不大^[16]。而燃煤烟气的汞浓度较低($0.05\sim 1.2 \text{ mg}/\text{m}^3$),所以与商业活性炭相比,用飞灰作为燃煤烟气的汞吸附剂在经济上具有成本优势。

一般把飞灰可以吸附汞归因于飞灰中含未燃尽的残炭,然而 Pavlish JH^[17]和 Laudal DL^[18]等认为飞灰的吸附效果不仅仅与 LOI 直接相关。飞灰的 BET 表面积不大,仅为活性炭的 1/10,飞灰的主要成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 Fe_2O_3 。David J. Hassett 等人^[19]指出, MgO 、 Fe_2O_3 和 MnO 作为催化剂,在一定温度、有碳参与情况下对汞有明显的催化氧化作用。M. Antonia López-Antón 等人^[20]对不同粒度飞灰吸附汞的能力进行研究表明,大颗粒的飞灰一般具有较高的 LOI,因此吸附汞的能力要好于小颗粒飞灰;飞灰吸附 Hg^0 的能力普遍要好于 Hg^{2+} 。

把飞灰与生石灰作为混合吸附剂是现在研究的一个热点。刘建忠等人^[21]的研究表明,直径在 $8\sim 9 \mu m$ 的飞灰一般为规则的球形,直径在 $4.5 \mu m$ 以下的飞灰为正球形。这样的形状更易使超细的生石灰粉末(约 $1 \mu m$)分布在飞灰表面。Liming Shi 等人^[22]指出,飞灰-生石灰吸附剂的转化率要大于生石灰吸附剂。这是因为飞灰可以作为生

石灰的载体,增加其与被吸附物的接触面积。另外,Fe₂O₃含量高的飞灰表面更易粘附生石灰粉末,如图3所示,经研究发现右侧飞灰(图片中心最大球体)中的Fe₂O₃含量明显高于左侧飞灰中的Fe₂O₃含量。

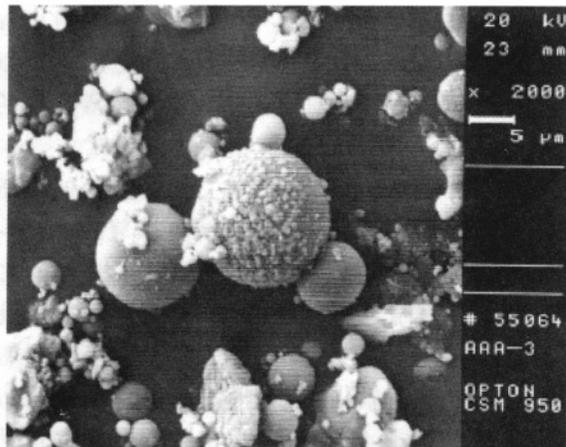


图3 飞灰-石灰吸附剂的电镜图片:飞灰表面

事实上,飞灰、生石灰对汞、二氧化硫都有脱除效果,而通过150℃水蒸汽活化处理后的飞灰-生石灰吸附剂,其生石灰颗粒发生破碎,飞灰表面粘结了大量含钙颗粒,吸附剂转化率可以提高0.8~1.5倍^[23]。

任建莉等人^[24]研究表明,SO₂可以促进熟石灰-飞灰混合吸附剂与Hg⁰的反应。在SO₂存在时,对单质汞的脱除效率可增加15%~20%,30min时吸附量可增加50%以上。

张凡等人^[25]采用干法脱硫脱汞技术对汞、二氧化硫进行脱除,取得十分理想的效果。该技术采用石灰作为脱硫剂,使用循环应用脱硫灰作为辅助脱硫剂。采用锅炉废水进行增湿降温,利用锅炉蒸汽输送脱硫剂及脱硫灰,并激活粉煤灰中10%以上的碱性物质,可以降低脱硫剂的用量。

2.3 金属及金属氧化物吸附脱汞

刘杨先等人^[26]提出,Pd、Pt、Au、Ir等贵金属元素对汞均有良好的吸附能力,吸附剂仅通过提高温度即获得再生,而捕获的汞可以获得回收利用,无二次污染。Poulston等^[27]对负载型Pd与Pt的脱汞性能进行了研究,结果显示,Pd/Al₂O₃与Pt/Al₂O₃均具有良好的吸附活性,Pd/Al₂O₃的脱汞效率要比Pt/Al₂O₃强。两者的脱汞效率均随着负载量的增加而增加,随温度升高而下降,经检测发现,Hg在金属表面主要以固态形式溶于贵金属表面,升温后即可对捕获汞进行回收利用。

金属氧化物脱汞吸附剂主要有Fe₂O₃、MnO₂、Co₃O₄等。Wu等^[28]发现,H₂S气体对氧化铁吸附剂的脱汞效率起着至关重要的作用,H₂S在氧化铁表面首先被催化氧化为Sad,而Sad与Hg⁰反应生成HgS,达到Hg⁰脱除的目的。Fe₂O₃、MnO₂、Co₃O₄等金属氧化物脱汞需要载体支撑,这些载体通常为TiO₂、Ca(OH)₂、活性炭等。但是这种脱汞方法的一大缺陷就是在有SO₂存在的条件下,吸附剂容易中毒,难以获得实际应用。

Lee等人^[29]对TiO₂、CaO、SiO₂的脱汞性能进行研究,结果表明,在紫外线照射下,TiO₂对元素汞的脱除率大于98%,CaO对元素汞的脱除率为33%,SiO₂元素汞没有脱除效果。

2.4 其它脱汞方法或技术

矿物类吸附剂由于具有储量丰富、价格低廉、对环境无毒无害等优点而倍受人们关注,包括沸石、蛭石、高岭土、膨润土、硅土、钒土、麦饭石、铝土矿、海泡石、生物质半焦等^[30]。任建莉等人^[31]研究了沸石、蛭石、膨润土及其化学改性剂作为吸附剂对气态汞的吸附能力。试验表明用MnO₂、FeCl₃金属氧化物对矿石样品进行改性后,矿石的吸附能力均有所提高,吸附时间大为延长。这是因为改性后的矿石与汞不仅发生了物理吸附,还发生了化学吸附。

Seok Ho Jeon等人^[32]用一定比例(10:1或12:1)的钛酸四异丙醇酯(TTIP)和正硅酸乙酯(TEOS)与液化石油气混合燃烧,制出纳米TiO₂~SiO₂纤维。用空气作为载气,在荧光灯的照射下,纳米TiO₂~SiO₂纤维对气态元素汞的吸附率可以接近90%。Ying Li等人^[33]在室内条件下,用紫外线照射TiO₂~SiO₂纳米复合材料,该材料对元素汞的吸附率高达99%;同时也研究了HCl、SO₂、NO_x对该材料脱汞的影响,研究表明,HCl、SO₂可以促进Hg的脱除,而NO₂对汞的脱除并无明显影响。

Ligy Philip等人^[34]在实验室用生物滴滤装置对烟气汞的脱除率进行了试验。试验结果表明,用载有硫化细菌的生物滴滤管对汞蒸汽的脱除率可以达到100%(入口浓度300~650 μg/m³,接触时间6s)。该方法对烟气汞的脱除效果特别好,但是由于该装置是通过细菌脱汞反应,所以反应速率特别慢,而且存在细菌中毒问题,因此该技术只是在实验室中进行了理论研究,并未进行过工业化试验。

美国能源部国家能源技术实验室(NETL)采用模拟燃煤烟气,在实验室内研究了紫外线照射烟气脱汞技术,该技术被称为 GP-254/PCO 工艺^[35]。在536℃~662℃下、采用波长为253.7nm的紫外线进行照射,这种波长的紫外光能促进汞与烟气中的其它组分发生反应,生成硫酸亚汞和氧化汞,以便于脱除,在实验室试验中,汞的脱除率达70%。经许可运用于燃煤电厂(Powerspan公司),对汞的氧化脱除率达到了91%^[36]。但是,紫外线照射脱汞技术的投资比活性炭喷射法还要高,这给该技术的推广带来困难。

3 多污染控制技术

目前已经有了针对颗粒物、二氧化硫、氮氧化物的排放标准,随着汞排放标准的出台,如何经济、高效地脱除这些大气污染物将成为一个现实问题。对每种污染物都设计一套控制技术和设备显然是不经济,也是不必要的。因此在对现有污染控制设备进行技术改造或新建更为紧凑高效的设备进行多污染控制成为了一个热门课题。

多污染控制技术一般可分为湿法多污染控制技术和干法多污染控制技术,它们分别是基于湿法和干法脱硫技术基础发展而来的。由于脱硫脱硝技术已经十分成熟,所以多污染控制技术重点在汞的脱除。

就湿法多污染控制技术而言,为了提高脱汞效率,必须在烟气进入湿法系统之前加强单质汞向离子汞的转化;部分溶解的离子汞会在湿法系统被还原为单质汞而随烟气逃逸,必须采取措施抑制该过程^[37]。

而要把单质汞转化为离子汞就要用到汞的催化氧化技术,汞的催化氧化本身不能脱除汞,但却可以对汞的脱除起到促进作用,是多污染控制技术中的重要环节。

3.1 汞的催化氧化

烟气脱汞的重点和难点在元素汞的脱除,元素汞不易溶于水,而离子汞易溶于水,所以如果能把元素汞催化氧化为离子汞,烟气脱汞将变得比较容易了。

影响元素汞氧化为离子汞的因素有很多,首要因素有烟气中的酸性气体 SO_2 、 NO_x 、 HCl 等酸性气体,由于这些气体是燃煤烟气中都有的,也可称之为内部因素。Everett A.Sondreal等^[38]研究发

现,在没有酸性气体的存在下,温度为107℃时,活性炭吸附的 Hg^0 仅仅只有10%~20%左右,并且出口检测显示 Hg^0 没有被氧化。一般不存在于燃煤烟气中的 Br_2 、 Cl_2 等气体对汞的脱除也有促进作用,LIU等^[39]在用 Br_2 促进飞灰对汞的吸附试验中发现,在没有飞灰参与的情况下,用52ppm的 Br_2 在410K(137℃)的温度下反应15s,可以氧化50%的 Hg^0 ; Br_2 对汞的氧化率会随着温度的升高而降低。

YANG Hong-min等^[40]对六个火电厂的SCR系统研究表明,电厂的SCR系统可以氧化70%~80%的元素汞,可以提高汞的脱除率。煤中的Cl对元素汞的氧化有重要影响,S对元素汞的氧化没有重要影响。刘洪涛^[41]研究了在SCR反应过程中不同因素对汞氧化的影响,结果表明, HCl 可以显著促进SCR反应过程中汞单质的氧化和催化剂的吸附性能,氨气浓度的增大则会使汞的氧化效率和催化剂对其的吸附效率都下降。通过对比六种不同的催化剂($\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 、 WO_3/TiO_2 、 $\text{V}_2\text{O}_5-\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{CuO}/\gamma-\text{Al}_2\text{O}_3$)在模拟烟气中对汞的催化氧化情况发现, $\text{CuO}/\gamma-\text{Al}_2\text{O}_3$ 对汞的总吸附量最大,但是氧化效率略低(5.68%); WO_3/TiO_2 的催化氧化效率最高(7.56%),吸附效率17.4%;而 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 催化效率为5.5%左右,吸附效率为16.6%,这三种催化吸附剂的综合效率(氧化和吸附效率)比较好。

3.2 多污染控制技术的研究进展

Zhihua Wang等^[42]研究了在流动反应管中注入臭氧同时脱除 NO_x 、 SO_2 和 Hg 的方法。试验表明, NO 、 Hg 的氧化率很大程度上决定于臭氧的注入量;注入200ppm的臭氧可以氧化约82%的 NO ,在250ppm臭氧的条件下 Hg 氧化率为89%; NO 会先于 Hg 与臭氧发生反应。

XU Fei等^[43]采用脉冲电晕放电对 NO 、 SO_2 和 Hg 进行氧化,试验结果表明 NO 、 SO_2 、 Hg^0 的氧化率主要取决于脉冲电晕放电而激发出来的自由基(OH 、 HO_2 、 O)和活性物(O_3 、 H_2O_2 等)。 NO 、 SO_2 、 Hg^0 的氧化率会随着脉冲的峰值电压、脉冲频率、电极数和滞留时间的增加而增加,随着 NO 、 SO_2 、 Hg^0 的初始浓度的升高而降低。在 NO 、 SO_2 、 Hg^0 的初始浓度分别为479 mg/m^3 、1040 mg/m^3 、15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的情况下对 NO 、 SO_2 、 Hg^0 的氧化率可分别达到40%、98%、55%。

段钰锋等^[44]对 100 MW 燃煤锅炉的新式整体脱硫工艺 (NID) 半干法脱硫系统进行了联合脱 Hg 和 SO₂ 试验, 结果表明, NID 系统具有 84.9 %~97.3 % 的脱硫效率, 83.5 %~90.8 % 的烟气总汞脱除效率, 气态单质汞的转化和脱除效率达到 100 %。NID 系统中, 脱硫循环灰的高循环倍率、高浓度、高利用率、高活性、高比表面积等特性, 不仅促进了脱硫反应, 而且促进烟气中气态单质汞向氧化汞和颗粒汞的转化, 从而实现燃煤烟气中 Hg 和 SO₂ 的高效联合脱除。

现有的污染控制技术在一定程度上对汞也有脱除效果, 如除尘设备可以脱除 Hg(p), 湿法脱硫技术在脱除 Hg²⁺ 上有优势, SCR 则有利于单质汞向离子汞转化。所以在现有的脱硫脱硝装置上进行技术改造或设备升级也可以起到脱硫脱硝脱汞多污染控制的目的, 且这种方法具有成本优势。

4 结论与展望

(1) 汞污染对人类及环境危害很大; 中国汞污染严重, 燃煤对汞污染的贡献率非常大。

(2) 现有烟气脱汞技术种类多, 且多处于机理探索或技术研发阶段。有些技术 (如紫外线脱汞技术) 有很强的实用性, 但需解决成本问题。

(3) 目前的烟气脱汞技术应用成本较高, 开发多污染控制技术是非常必要的, 尤其是利用现有脱硫脱硝装置进行脱汞研究将会是一个很有前景的方向。

(4) 新兴的多污染控制技术也值得关注, 已经有学者在超声波一体化脱硫脱硝脱汞方面进行了研究, 其效果有待进一步验证。

(5) 欧美等发达国家已开始对燃煤汞排放进行控制, 我国应尽快出台相应的排放标准。

参考文献:

[1] US Environmental Protection Agency, Mercury. <http://www.epa.gov/mercury>.

[2] <http://europa.eu.int/comm/environment/chemicals/mercury/index.htm>.

[3] 曹凤中, 周国梅等. 美国实施清洁空气法的效益与启迪[J]. 环境科学与技术, 2000(3):20~22.

[4] http://www.epa.gov/mercury/control_emissions/index.htm

[5] 杨宏昱, 曹昱, 潘伟平. 吸附剂的汞吸附特性实验[J]. 燃烧科学与技术. 2006(12), 489~490.

[6] UNEP. Report of the global mercury assessment working group on the work of its first meeting[R]. Geneva: UNEP, 2002

[7] 党民团, 刘娟. 中国汞污染的现状及防治对策 [J]. 应用化工, 2005, 34(7):394~396.

[8] 黄文辉, 杨宜青. 中国煤中的汞[J]. 中国煤田地质, 2002, 14(增刊): 37~40.

[9] 柴发合. 中国燃煤电厂大气汞排放及控制对策[J]. 烟气污染物排放控制、水处理和清洁能源技术研讨会, 2006:32~37.

[10] Kevin C. Galbreath, Christopher J. Zygarić. Mercury transformations in coal combustion flue gas. *Fuel Processing Technology*, 65~66 (2000):289~310.

[11] 熊银伍, 杜铭华, 朱书全等. 煤基吸附剂脱除烟气中气态汞的研究现状[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(1):37~39.

[12] G.P.Reed, A.Ergüdenler, J.R.Grace et al. Control of gas filter mercury emissions in a hot gas filter: the effect of temperature[J]. *Fuel*, 2001, 80:623~634.

[13] 曾汉才, 王欣, 李松柳等. 活性炭纤维脱除燃煤烟气中汞的试验研究[J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2006, 34(7):1~4.

[14] 况敏, 杨国华, 胡文佳等. 燃煤电厂烟气脱汞技术现状分析与展望[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(5):66~70.

[15] Evan J. Granite, Mark C. Freeman, Richard A. Hargis et al. The thier process for mercury removal from flue gas. *Journal of Environmental Management* 84 (2007):628~634.

[16] 王立刚, 陈昌和. 飞灰残炭对零价汞蒸汽的吸附特征[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(4):353~356.

[17] Pavlish JH, Gerlach TR, Zygarić CJ, Pflughoeft-Hassett DF. Mitigation of air toxics from lignite generation facilities. Energy and Environmental Research Center Final Report, 1995.

[18] Laudal DL, Galbreath KC, Heidt MK. A state-of-the-art review of flue gas mercury speciation methods. Electric Power Research Institute Report TR-107680 3471, 1996.

[19] David J. Hassett, Kurt E. Eylands. Mercury capture on coal combustion fly ash. *Fuel*, 1999, 78(2):243~248.

[20] M. Antonia López-Antón, Patricia Abad-Valle, Mercedes Díaz-Somoano, et al. The influence of carbon particle type in fly ashes on mercury adsorption. *Fuel*, 2009, 88:1194~1200.

[21] 刘建忠, 张光学, 周俊虎等. 燃煤细灰的形成及微观形态特征[J]. 化工学报, 2006, 57(12):2976~2980.

[22] Liming Shi, Xuchang Xu. Study of the effect of fly ash on desulfurization by lime. *Fuel*, 2001, 80:1969~1973.

[23] 时黎明, 徐旭常, 祁海鹰等. 粉煤灰-石灰中温烟气脱硫和蒸汽活化的机理[J]. 环境科学, 2000, 21(4):25~28.

[24] 任建莉, 周劲松, 骆仲泱等. 钙基类吸附剂脱除烟气中气态汞的试验研究[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(5):557~561.

[25] 张凡, 王凡, 石英杰等. 燃煤电厂汞测定和干法烟气脱硫脱汞技术[C]. 第十四届全国大气环境学术会议论文集——大气环境科学技术研究进展, 2007:421~427.

[26] 刘杨先, 张军, 盛昌栋等. 燃煤烟气脱汞吸附剂最新研究进展[J]. 现代化工, 2008, 28(11):19~23.

[27] Poulston S, Granite E J, Pennline H W, et al. Metal sorbents for high temperature mercury capture from fuel gas [J]. *Fuel*, 2007, 86: 2201~2203.

除尘设备在低浓度的粉尘环境中特别是在空调净化系统中的应用提供了机会。

因此,随着滤筒式除尘净化技术的不断研究和发展,这种除尘净化技术很可能会成为今后在低浓度的粉尘环境中特别是在空调净化系统中所采用的一种新的空气净化方式。

3 结论

(1)脉冲喷吹滤筒除尘器可以解决目前低浓度粉尘环境特别是空调净化系统中存在的一系列问题,如过滤器阻力大,滤料清洗困难,易造成二次污染等问题,对低浓度粉尘环境具有很好的除尘净化效果。

(2)脉冲喷吹滤筒式除尘净化方式可以代替目前低浓度粉尘环境特别是空调净化系统中其他的除尘净化方式,且具有这些空气净化方式所不具有的优势,如净化效率高、过滤面积大、过滤风速小、阻力小、日常维护所需费用少,采用自动清灰减少污染等。

(3)滤筒净化是一种很好的空调系统净化方式,能够使人们享受到更加健康舒适的室内环境,使真正意义上的洁净空调系统推广开来。

(4)脉冲喷吹滤筒式除尘净化方式适合低浓度粉尘环境的特殊要求,实际使用时可行、可靠,从

而进一步拓宽了滤筒式除尘器的应用范围。

参考文献:

- [1] 邱新标. 非织造布滤筒除尘器的结构与应用 [J]. 非织造布, 2007.1:28~30.
- [2] 唐群, 杜仁忠等. 新型高效节能滤筒式除尘器的研究[J]. 中国硅酸盐学会环境保护分会学术年会论文集, 2007.3:113~115.
- [3] 胡鉴中. 袋式收尘器手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.7:182~190.
- [4] Croom ML. Effective selection of filter dust collectors[J]. Chemical Engineering, 1993.7:86~91.
- [5] Anthony C. Select the Right Cartridge Filter [J]. Chemical Engineering, 1988.1:72~77.
- [6] 王刚. 中央空调系统的筒式过滤[J]. 节能与环保, 2001.6:47.
- [7] 孙一坚. 卷烟厂空调研究[J]. 暖通空调, 2000.5:12~14.
- [8] 孙一坚. 滤筒式除尘器及其应用[J]. 通风除尘, 1995.2:7~10.
- [9] 孙一坚, 万超举等. 长沙卷烟厂出口烟车间空调除尘系统的设计和运行[J]. 暖通空调, 1998.28:5~7.
- [10] Sandy Gomez, Rafael Gomez, Duane S. Smith. Air purification system for a central air conditioning unit [J]. U.S patents documents, 2002.23:12~16.
- [11] Hassovon Blucher, Ludovic Ouvey, Stefan Kamper, Michael Moskopp, Ernest de Ruiter, Bertram Biihringer. Air filter unit with several filter elements [J]. U.S patents documents, 2006.7:12~19.
- [12] Robert M. Allen, Mark Miller. An air purification assembly. U.S patents documents [J], 2003.8:57~62.
- [13] 姚秀华. 滤筒式除尘器的原理和选用[J]. 玻璃, 2007.5:65~67.
- [14] 崔九思. 大气污染监测方法[M]. 化学工业出版社, 2001.5:28.

(上接第 5 页)

- [28] Wu S J, Uddin M A, Sasaoka E, et al. Characteristics of the removal of mercury vapor in coal derived fuel gas over iron oxide sorbents[J]. Fuel, 2006,85:213~218.
- [29] I.G.Lee, P.Biswas, E.Hedrick. Comparison of Hg⁰ capture efficiencies of three in situ generated sorbents, AIChE J. 47(2001):954~961.
- [30] 孟素丽, 段钰锋, 杨立国等. 燃煤烟气中汞脱除技术的研究进展[J]. 锅炉技术, 2008,39(4):77~80.
- [31] 任建莉, 周劲松, 骆仲浚等. 新型吸附剂脱除烟气中气态汞的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007,27(2):48~53.
- [32] Seok Ho Jeon, Yujin Eom, Tai Gyu Lee. Photocatalytic oxidation of gas-phase elemental mercury by nanotitanosilicate fibers. Chemosphere, 2008,71:969~974.
- [33] Ying Li, Patrick Murphy, Chang-Yu Wua. Removal of elemental mercury from simulated coal-combustion fule gas ueing a SiO₂-TiO₂ nanocomposite. Fuel Processing Technology, 89(2008):567~573.
- [34] Ligy Philip, Marc A. Deshusses. The control of mercury vapor using biotrickling filters. Chemosphere, 2008,70: 411~417.
- [35] Evan G. The PCO Process for Photochemical Removal of Mercury from Flue Gas. DOE/NETL Mercury Control Conference. Pittsburgh PA, December 2006.
- [36] 胡念武. Hg 催化氧化剂的制备及其氧化机理研究[J]. 中国优秀

- 硕士学位论文全文数据库, 2007.
- [37] 姚强. 洁净煤技术[M]. 北京化学工业出版社. 2005:175~176.
- [38] Zhihua Wang, Junhu Zhou, Yanqun Zhu, et al. Simultaneous removal of NO_x, SO₂ and Hg in nitrogen flow in a narrow reactor by ozone injection: Experimental results. Fuel Processing Technology, 88(2007):817~823.
- [39] XU Fei, LUO Zhongyang, CAO Wei, et al. Simultaneous oxidation of NO, SO₂ and Hg⁰ from flue gas by pulsed corona discharge. Journal of Environmental Sciences, 21(2009):328~332.
- [40] 段钰锋, 王运军, 杨立国. 100 MW 煤粉锅炉 NID 半干法脱硫装置的 Hg 和 SO₂ 联合脱除特性[C]. 中美多种大气污染物防治国际研讨会论文集, 2008:137~142.
- [41] Eberett A. Sondreal, Steven S. Benson, John H. Pavlish. Status of research on air quality: mercury, trace elements, and particulate matter. Fuel Processing Technology, 2000,65~66:5~19.
- [42] SHOU-HENG LIU, NAI-QIANG YAN, ZHAO-RONG LIU, et al. Using bromine gas to enhance mercury removal from flue gas of coal-fired power plants. Environ. Sci. Technol. 2007,41:1405~1412.
- [43] YANG Hong-min, PAN Wei-Ping. Transformation of mercury speciation through the SCR system in power plants. Journal of Environmental Sciences 2007,19:181~184.
- [44] 刘洪涛. SCR 系统中汞氧化与吸附实验研究[D]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2007.