

烟气组分及飞灰对汞形态转化的影响

罗津晶^{1 2)}✉ 张龙东^{1 2)} 黄华伟²⁾ 张杰儒^{1 2)}

1) 厦门大学福建省等离子体与磁共振研究重点实验室, 厦门 361005 2) 厦门大学环境科学研究中心, 厦门 361005

✉ 通信作者, E-mail: luojj27@xmu.edu.cn

摘要 模拟研究 O₂、SO₂ 和 HCl 三种烟气体与飞灰存在状态对汞形态转化的影响, 并探讨温度对其转化的作用. 结果表明: 在不同气氛中, 反应温度升高有利于汞的氧化, 但 N₂-SO₂ 的烟气体系则相反; O₂、SO₂ 和 HCl 单独存在于烟气中时, 对汞的氧化起到不同程度的促进作用, 其中 HCl 的效果最好; 烟气中含有 O₂ 和 HCl 将使汞的氧化率明显提高; 当 SO₂ 与 HCl 同时存在于烟气中时, SO₂ 会通过 HCl 反应抑制汞的氧化过程. 飞灰为氧化反应提供反应介质和催化剂, 促进烟气中汞的形态转化.

关键词 煤燃烧; 烟气; 飞灰; 汞; 氧化分类号 TK411⁺.5

Effects of flue gas components and fly ash on mercury oxidation

LUO Jin-jing^{1 2)}✉, ZHANG Long-dong^{1 2)}, HUANG Hua-wei²⁾, ZHANG Jie-ru^{1 2)}

1) Fujian Key Laboratory of Plasma and Magnetic Resonance, Xiamen University, Xiamen 361005, China

2) Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China

✉ Corresponding author, E-mail: luojj27@xmu.edu.cn

ABSTRACT The effects of gas components such as O₂, SO₂ and HCl, the existence of fly ash, and temperature on mercury speciation were investigated. It is shown that high temperature is positive to mercury oxidation in most of the simulated flue gas system except for the N₂-SO₂ system. The existence of O₂, SO₂ and HCl in the system separately improves the oxidation process, and among them HCl performs the best. When both SO₂ and HCl are in the system, the oxidation efficiency of HCl decreases due to the reaction between SO₂ and HCl. Fly ash provides reaction media and catalysts for the mercury oxidation reaction, and consequently, the existence of fly ash in the simulated flue gas can increase mercury speciation.

KEY WORDS coal combustion; flue gases; fly ash; mercury; oxidation

汞是煤中的有毒痕量元素, 随着煤的燃烧被释放到大气中, 并通过干湿沉降等形式返回地表和水体. 由于具有较强的生理毒性和生物累积性, 进入食物链的汞化合物会危害人类健康. 煤中赋存的汞化合物在高温燃烧器中分解形成元素汞, 伴随烟气的冷却, 元素汞经历一系列物理和化学变化, 形成不同形态的汞化合物, 其中除部分凝结在亚微米级飞灰颗粒表面外, 大部分以气相形式存在于烟气中, 最终随烟气排入大气. 在燃煤烟气中, 汞的主要存在形式有元素态汞(Hg⁰)、氧化态汞(Hg²⁺)和颗粒态

汞(Hg(p)). 氧化态汞由于水中溶解度高, 且易被烟气中的颗粒物吸附, 可由湿法脱硫装置或除尘设备分离. 颗粒汞可由传统的除尘器分离去除. 元素汞的饱和蒸汽压低, 难溶于水, 由传统的工业净化设备很难分离, 是目前烟气中最难控制的一种汞形态. 如何在烟气氛围下促进汞的形态转化, 提高汞的氧化率成为目前解决燃煤烟气汞污染的关键和难点.

影响烟气中汞形态分布的因素很多, 朱燕群等^[1]的研究发现 O₂、HCl 有助于汞的转化; 尤其是在低温环境下, SO₂ 的体积分数越大, 汞的转化温度

收稿日期: 2010-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 20707018); 福建省科技重点资助项目(No. 2008I0024); 中央高校基础业务费资助项目(No. 2010121078); 厦门市科技计划资助项目(No. 3502Z20103014)

越高. Diamantopoulou 等^[2]认为硫元素的存在可以促进汞元素以固相硫酸汞的形式沉积,但烟气中高硫含量又会抑制元素汞的氧化以及氯化汞的形成. Hutson^[3]的研究发现,烟气和飞灰组成能影响汞的捕集. Na^+ 和 Ca^{2+} 可能与 SO_2 结合,在飞灰表面形成强的酸性位点. 次烟煤飞灰中的 Na_2O 和 CaO 可能会有效地中和烟气中的 HCl ,从而导致烟气中 Hg^0 的含量升高. 前人的研究表明烟气中的酸性气体及飞灰组分对汞的形态转化有明显作用,但酸性气体含量与汞转化之间的关系不同学者的研究尚有矛盾之处^[1-2],且飞灰对汞形态转化的影响程度也需要进一步地补充与完善.

本研究立足飞灰、烟气组分和元素汞三者间的相互作用,考察飞灰在模拟烟气汞的氧化过程中的作用及其受不同气体组分的影响,并探讨 O_2 、 SO_2 和 HCl 三种气体与汞形态转化之间的关系,以及在实际工况温度范围内受温度变化的影响.

1 实验方法

1.1 实验装置

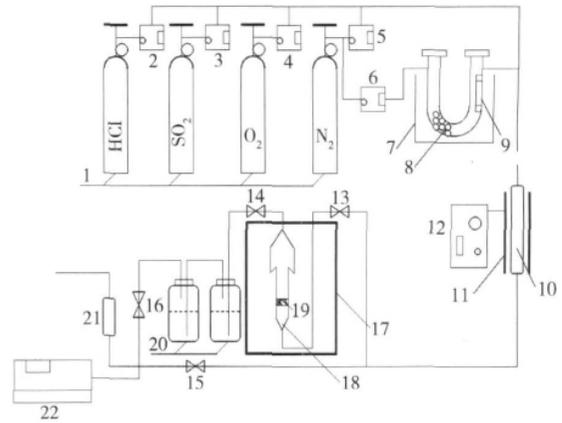
实验装置由模拟烟气单元、氧化反应单元、汞形态检测单元和尾气处理单元四部分组成,如图 1 所示. 模拟烟气单元包含汞蒸气发生装置^[4]和酸性气体(HCl , SO_2)及 N_2 、 O_2 供应装置. 各种气体经混合器充分混合后,被引入下一单元. 氧化反应单元由石英反应器和控温装置组成,反应器温度由热电偶实时监控. 汞形态检测单元包含氧化态汞检测装置和元素态汞分析仪器,氧化态汞检测装置由两个各装有 100 mL 浓度为 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液的吸收瓶和原子荧光光谱仪(AF-610B,北京瑞利)组成, KCl 溶液被用来吸收气体中存在的 Hg^{2+} ,原子荧光光谱仪用来检测吸收液中的 Hg^{2+} 浓度. 尾气处理单元由串联的活性炭吸附柱构成,以防止实验过程中残留的汞被排入大气.

1.2 样品分析

飞灰的矿物组成采用荷兰帕纳科公司 X'pert PRO X 射线衍射仪进行分析. 气态汞的形态分析参照 Ontario-Hydro 标准方法^[5]进行. 元素汞的分析采用美国亚利桑那仪器公司 JEROME431-X 测汞仪进行分析.

1.3 氧化率的计算

本实验中汞的氧化率定义为仪器检测到的二价汞(Hg^{2+})的浓度与由汞源产生的总汞浓度的比值. 氧化率 R 由下式计算:



1—载气; 2~6—质量控制器; 7—水浴加热装置; 8—玻璃珠; 9—汞渗透管; 10—石英预热管; 11—加热带; 12—温控箱; 13~16—石英阀门; 17—恒温加热箱; 18—石英反应管; 19—石英棉; 20— KCl 吸收液; 21—活性炭吸附管; 22—测汞仪

图 1 实验流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

$$R = \frac{\text{Hg}_0}{C_0 Q t}$$

式中: Hg_0 为总氧化态汞, μg ; C_0 为测汞仪所测到的初始元素汞的质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; Q 为管路中总的气体流量, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; t 为反应时间 $t = 60 \text{ min}$.

1.4 参数设置

本实验以 N_2 作为平衡气体,气体总流量控制为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; 初始气态汞(Hg^0)质量浓度在 $19 \sim 22 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围; 飞灰样品质量为 3 g; 反应温度为 120°C . 混合气体中各组分的体积分数分别为: O_2 10%; SO_2 500×10^{-6} ; HCl 50×10^{-6} .

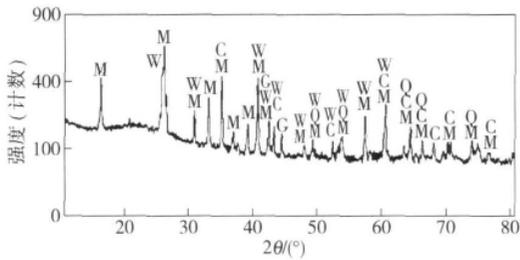
1.5 质量控制

采用 Ontario-Hydro 标准方法定期分析检测实验装置中各种形态(元素态和氧化态)汞的浓度,并与测汞仪所测总汞浓度进行比较,当两者比值在 $(0.9 \sim 1.1)$ 时,实验方可进行,每次实验开始前均做空白实验. 实验中所用玻璃仪器在使用前均在 10% 的硝酸溶液中浸泡 4 h,再用去离子水反复冲洗后烘干,以消除残余汞对容器的影响.

2 结果与讨论

2.1 飞灰的矿物组成

飞灰样品的矿物组成主要包括莫来石、石英、石墨和沸石等,以铝和硅两种元素含量最多. 图 2 为经 X 射线衍射仪 XRD 分析的飞灰样品矿物组成. 可以发现样品中含有较多的 Al_2O_3 和 SiO_2 ,同时也包含 Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 等物质.



C—刚玉; G—石墨; M—多铅红柱石; Q—石英; W—斜钙沸石

图 2 飞灰样品的 X 射线衍射谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of fly ash sample

2.2 飞灰的影响

Laudal 等^[6]的研究发现: 没有飞灰存在时, 汞的氧化率在 SO₂-Cl₂ 气氛下仅为 1.9%, 而当存在飞灰组分时, 汞的氧化率上升到 28.5%。本实验在 160 °C 反应温度下, 测试了飞灰的存在对烟气组分氧化效果的影响(图 3)。由图 3 可见, 飞灰的存在显著提高了烟气组分对汞的氧化效果, 其中 N₂-O₂-HCl 烟气体系效果提高最明显, 增长幅度近 124 倍, N₂-O₂ 体系提高 19 倍, N₂-SO₂ 体系提高 10 倍, N₂-HCl 体系提高 7 倍。实验结果表明: 在单气体组分氛围(N₂ 为平衡气体), 飞灰对 O₂ 促进作用最明显; 在多气体组分氛围下, 除 N₂-O₂-HCl 体系外, 飞灰的促进作用均低于单气体组分氛围的效果。飞灰的存在为烟气组分与汞的反应提供了反应介质和催化剂, 使得烟气中汞的氧化同时存在均相反应和异相反应, 但不同烟气组分间存在协同与竞争。在本实验中, HCl 和 O₂ 表现出协同关系, 而 SO₂ 分别对 O₂ 和 HCl 表现出明显的竞争关系。

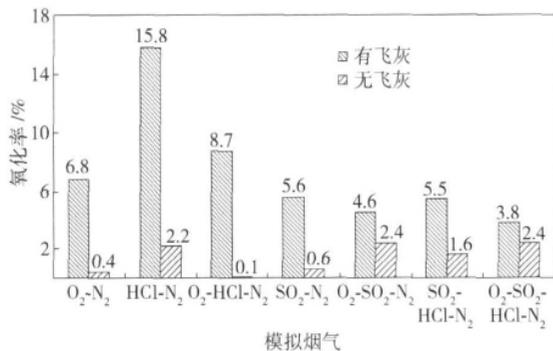


图 3 不同气氛下飞灰对汞氧化效果的影响

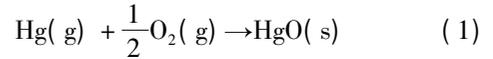
Fig. 3 Effects of fly ash on mercury oxidation under different flue gas components

2.3 单气体组分的影响

2.3.1 O₂ 的影响

汞的氧化率随烟气中氧气量的增加呈线性上

升, 如图 4 所示。当模拟烟气中仅有 N₂ 一种组分时, 汞的氧化率为 1.05%, 即在 120 °C 反应温度下, 飞灰的催化氧化作用是系统内 Hg⁰ 转化为 Hg²⁺ 的主要原因。当系统内通入氧气后, Hg⁰ 与 O₂ 可发生如下反应:



当反应温度低于 500 K 时生成产物 HgO 相对稳定, 使得烟气中汞的氧化率随氧气含量的增加呈上升趋势。Hg⁰ 与 O₂ 可以在飞灰表面发生异相反应, 增加飞灰对汞的吸附和氧化效果^[2, 7]。由于本实验仅考虑汞的氧化效果, 在计算氧化率时, 以系统出口检测到的 Hg²⁺ 占总汞的比例为依据, 即在系统内经均相或非均相(异相)反应后以 Hg²⁺ 形式存在于气体中的汞被列为本实验的考虑范围, 由飞灰吸附导致的总汞的减少在本实验中暂不考虑。

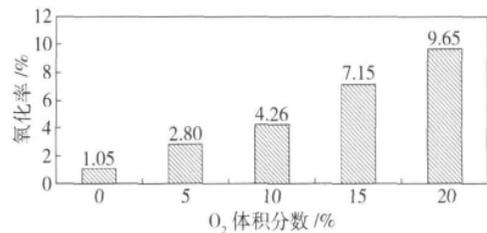


图 4 120 °C 时氧气含量对汞氧化率的影响

Fig. 4 Effects of O₂ content on mercury oxidation at 120 °C

2.3.2 HCl 的影响

图 5 为氯化氢含量对元素态汞氧化的影响。图 5 可见, 当 HCl 体积分数从 0 增加到 100 × 10⁻⁶ 时, 汞的氧化率由 1.05% 上升到 19.28%, 系统中 HCl 含量的增加使得烟气中 Hg²⁺ 含量上升, 这与 Hall 等^[8]的结论相同。烟气中的 Hg²⁺ 可与 HCl 发生均相反应:



当反应温度低于 600 K 时, 由热力学计算可知, 该反应具有很高的能垒, 反应速率极慢, Hg 与 HCl 的直接反应受到限制^[9]。Sliger 等^[10]认为, 燃煤烟气中 HgCl₂ 的形成关键在于 Cl 原子, Cl 原子可在任何烟气温度下快速氧化 Hg⁰。烟气中的 HCl 气体在较高温度下可通过中间反应产生 Cl₂ 和 Cl 原子, 促使反应快速进行, 生成产物 HgCl₂。由于本实验模拟环境是燃煤电站的静电除尘设备, 其工况温度在 120 ~ 180 °C 范围, 在实验过程中(120 °C)难以生成大量的活性 Cl 原子, 故 HCl 对 Hg⁰ 的实际氧化作用相较理论反应而言并不明显。

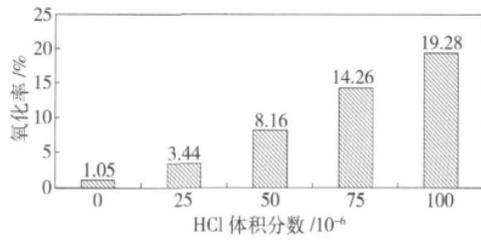


图 5 120 °C 时氯化氢含量对单质汞氧化的影响

Fig. 5 Effects of HCl content on mercury oxidation at 120 °C

2.3.3 SO₂ 的影响

在 N₂-SO₂ 烟气体系中,汞的形态转化受 SO₂ 含量的影响不明显,这与王帅等^[11]的研究结果相似.他们在 90 °C 温度下,考察体积分数为 1 200 × 10⁻⁶ 的 SO₂ 气体与 Hg⁰ 在脱硫灰表面的异相氧化反应,发现 SO₂ 在大多数气氛下抑制汞的氧化反应.但是,Norton 等^[12]在 180 °C 温度下,发现体积分数为 1 600 × 10⁻⁶ 的 SO₂ 对汞的氧化有明显的促进作用.由图 6 可以看出,在本实验中当 SO₂ 体积分数达到 500 × 10⁻⁶ 以上时,汞的氧化率才有少量增长,达到 1 000 × 10⁻⁶ 时汞的氧化率为 4.91%.由此可以推测:在一定温度下,烟气中 SO₂ 的体积分数是决定其对汞的氧化起抑制作用还是促进作用的关键.

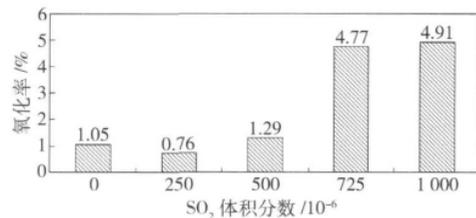
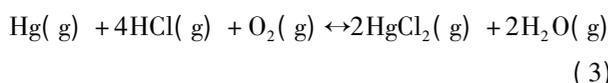


图 6 120 °C 时二氧化硫含量对汞氧化的影响

Fig. 6 Effects of SO₂ content on mercury oxidation at 120 °C

2.4 混合气体组分的影响

图 7 所示为 O₂、SO₂ 和 HCl 气体中两种或三种组分混合存在时对汞转化率的影响.由图 7 可知,各种烟气气氛对汞氧化的影响由高到低依次是: N₂-HCl, N₂-HCl-O₂, N₂-O₂, N₂-HCl-SO₂, N₂, N₂-SO₂, N₂-O₂-SO₂ 和 N₂-HCl-SO₂-O₂. 氧化性气氛对汞的氧化有明显促进作用,其中 HCl 气体的效果最显著.当 HCl 与 O₂ 同时存在时,汞的氧化率较单独存在 HCl 气体时低,但比单独存在 O₂ 时高.在烟气中,HCl、O₂ 以及 Hg⁰ 除了可发生式(1)和(2)的反应外,还可能发生如下反应:



在烟气中,由 HCl 产生的 Cl 原子具有比 O₂ 更

高的活性,更易与 Hg⁰ 结合生成氧化态的 HgCl₂;且在低温条件下,HgCl₂ 比 HgO 具有更强的稳定性,反应更易朝着生成 HgCl₂ 的方向发展.但是,烟气中 HCl 和 O₂ 的相互竞争在一定程度上减弱了对汞的氧化效果,使得汞的氧化效果在 N₂-HCl-O₂ 气氛下较 N₂-HCl 气氛下低.

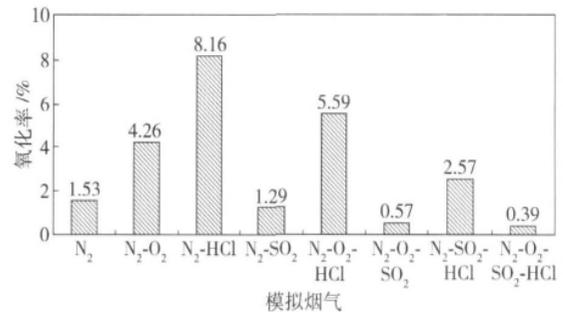
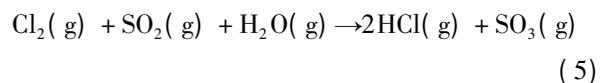
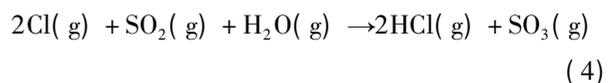


图 7 120 °C 时不同烟气气氛下汞氧化率的比较

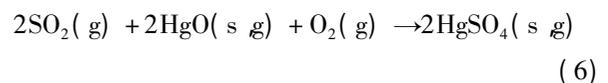
Fig. 7 Comparison of mercury oxidation efficiency under different flue gas components at 120 °C

烟气中 SO₂ 的存在会明显降低其他气体组分对汞的氧化效果.在 N₂-HCl-SO₂ 气氛下,汞的氧化率为 2.57%,远低于 N₂-HCl 氛围的 8.16%.在 N₂-O₂-SO₂ 气氛下,汞的氧化率为 0.57%,远低于 N₂-O₂ 氛围时的 4.26%.汞氧化率降低的原因可能是 SO₂ 气体通过与烟气中其他氧化性气体反应,减弱了烟气的氧化性气氛,对汞的氧化起到抑制作用.在含有 HCl 的烟气体系中,HCl 产生的少量活性 Cl 原子或 Cl₂ 可与 SO₂ 发生反应(4)和(5):



SO₂ 通过消耗烟气中 Cl 原子或 Cl₂,减少 HgCl₂ 的生成量.Laudal 等^[6]由实验也发现 SO₂ 对 Cl₂ 的氧化效果有强烈抑制作用,使汞的氧化率由 84.8% 降为 28.5%.有研究认为,SO₂ 会与 HCl 竞争活性炭表面的活性位,从而抑制汞的氧化过程^[13].

在 N₂-O₂-SO₂ 的烟气体系中,SO₂ 能与 HgO 和 O₂ 通过反应(6)生成 HgSO₄,当温度低于 320 °C 时,HgSO₄ 被认为可以稳定形式存在^[14].O₂ 在反应中被消耗导致汞的氧化率在 N₂-O₂-SO₂ 气氛远低于其在 N₂-O₂ 气氛.



王帅等^[11]认为,SO₂ 与氧化性气体竞争脱硫灰

表面的活性位,降低氧化性气体所占的活性位数量,可能是导致汞氧化率下降的主要原因。也有学者^[15]认为,SO₂对烟气中汞氧化的抑制作用在于SO₂本身可以和飞灰表面某些活性基团反应,进而降低飞灰对汞转化的催化氧化作用。

2.5 反应温度的影响

以N₂、O₂、SO₂和HCl为基本烟气组分,混合其中两种或多种气体组分得到不同模拟烟气。分别测定反应温度120、140、160、180和200℃下汞的转化率,得到转化率变化如图8所示。由图8可知,在此温度范围内随着温度的升高,除N₂-SO₂烟气体体系外,各烟气体系中汞的氧化率均有所升高。说明在低温范围内,温度的升高对元素汞的形态转化亦有积极作用。同时对比图中的各种模拟气氛可以发现,随着温度的上升,N₂-HCl气氛中汞的氧化率提高的幅度最大,N₂-HCl-O₂和N₂-O₂次之,即在氧化性气氛中,温度对汞形态转化的促进作用表现显著。

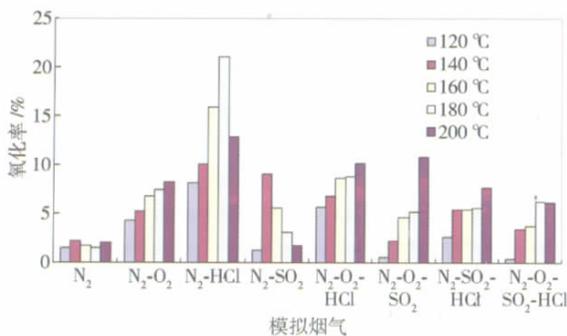
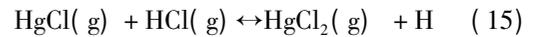
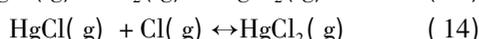
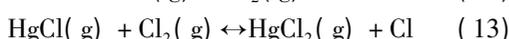
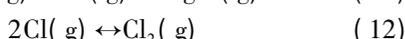
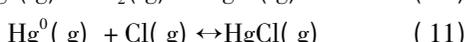
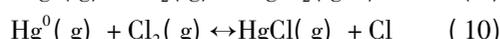
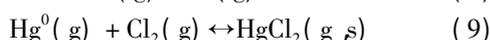
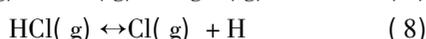
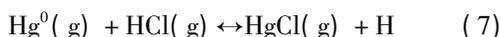


图8 温度对模拟烟气汞氧化率的影响

Fig. 8 Effects of temperature on mercury oxidation efficiency under different flue gas components

在N₂-HCl的烟气体系中,当反应温度由120℃上升到180℃时,汞的氧化率从8.16%上升到21.09%。HCl对汞的氧化关键在于烟气中活性Cl原子的含量。温度升高HCl更容易产生Cl原子,在N₂-HCl烟气体系中,烟气中Hg的氧化可能存在如下反应:



因此,在烟气中生成更多HgCl₂,汞的氧化率随之增加。Hall等^[8]的研究得出同样的结论。由于在900K以下,HgCl₂是氧化态汞较稳定的存在形式,在本实验所有含HCl的烟气体系中,温度的增加都能促进汞氧化率不同程度的提高。当反应温度由120℃升到200℃后,N₂-HCl-O₂烟气体系的汞氧化率由5.59%增加到10.18%,N₂-HCl-SO₂烟气体系的汞氧化率由2.57%增加到7.71%,N₂-HCl-O₂-SO₂烟气体系的汞氧化率由0.39%增加到6.13%。

在N₂-O₂烟气体系中,当温度由120℃上升到200℃时,烟气中汞的氧化率由4.26%增加到8.2%。温度的升高有利于O₂与Hg的迅速反应,形成HgO产物。

在N₂-SO₂-O₂烟气体系中,当温度由120℃升到200℃后,烟气中汞的氧化率由0.57%增加到10.76%。在此烟气体系中,可能发生反应(1)和(6),当SO₂与O₂同时存在时,系统中的Hg²⁺主要以HgSO₄而非HgO的形式存在。温度的升高有利于反应的进行,促进更多氧化产物的生成。

在N₂-SO₂烟气体系中汞的氧化率随温度的升高逐渐降低,当反应温度由140℃升到200℃后,汞的氧化率由9.02%下降到1.17%。究其原因可能是:在较高温度下,对氧化反应起催化作用的金属氧化物在与SO₂反应中被消耗,导致汞的氧化率明显下降。温度升高后,促进了SO₂与飞灰中的金属氧化物如Al₂O₃、Fe₂O₃等的反应,而这些金属氧化物是发生氧化反应的主要催化剂^[15]。催化剂的减少导致汞的异相反应被抑制,汞的氧化率降低。

在纯N₂氛围下,烟气中的Hg²⁺主要来自飞灰对Hg的催化氧化反应。在120~200℃范围内,温度对催化剂的影响不明显,因此在本实验中飞灰对汞的氧化效果变化不大,均保持在1%左右。

3 结论

(1) 飞灰的存在明显促进汞的氧化。当烟气中没有飞灰时,由均相反应产生的汞的氧化程度均很低;飞灰的存在为烟气组分与汞的反应提供了反应介质和催化剂,使得烟气中汞的氧化同时存在均相反应和异相反应,明显促进汞的氧化效果。

(2) 烟气中O₂、HCl和高体积分数的SO₂(500×10⁻⁶以上)单独存在时(N₂为平衡气体),都能对汞的氧化起促进作用,其中HCl的效果最好,

其次是 O_2 ; 当 O_2 、 SO_2 和 HCl 混合存在于烟气中时, SO_2 通过与氧化性气体的反应抑制烟气中汞的氧化。

(3) 在不同气氛下 随着反应温度的升高 烟气中汞的氧化率随之升高, 但 N_2-SO_2 烟气体系则相反。

参 考 文 献

- [1] Zhu Y Q, Zhou J S, Cai X S, et al. Effect of various flue gas compositions on mercury speciation transformation during coal combustion. *J Zhejiang Univ Eng Sci*, 2007, 41(2): 356
(朱燕群, 周劲松, 蔡小舒, 等. 燃煤过程中不同烟气组分对汞形态转化的影响. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(2): 356)
- [2] Diamantopoulou I, Skodras G, Sakellariopoulos G P. Sorption of mercury by activated carbon in the presence of flue gas components. *Fuel Process Technol*, 2010, 91(2): 158
- [3] Hutson N D. Mercury capture on fly ash and sorbents: the effects of coal properties and combustion conditions. *Water Air Soil Pollut Focus*, 2008, 8(3/4): 323
- [4] Luo J Y, Luo J J, Huang H W, et al. Experimental study on modified activated carbons for elemental mercury adsorption. *Proc CSEE*, 2009, 29(35): 77
(罗锦英, 罗津晶, 黄华伟, 等. 改性活性炭吸附气态汞的试验研究. 中国电机工程学报, 2009, 29(35): 77)
- [5] *Standard Test Method for Mercury from Coal-fired Stationary Sources (Ontario Hydro Method)*. Washington D C: Environmental Protection Agency, USA, 1999
- [6] Laudal D L, Brown T D, Nott B R. Effects of flue gas constituents on Mercury speciation. *Fuel Process Technol*, 2000, 65: 157
- [7] Uddin MA, Yamada T, Ochiai R, et al. Role of SO_2 for elemental mercury removal from coal combustion flue gas by activated carbon. *Energy Fuels*, 2008, 22(4): 2284
- [8] Hall B, Schager P, Lindqvist O. Chemical reactions of mercury in combustion flue gases. *Water Air Soil Pollut*, 1991, 56(1): 3
- [9] Pan W G, Wu J, Wang W H, et al. Study on the effect of NH_4Cl addition on Hg and NO produced by coal combustion. *Proc CSEE*, 2009, 29(29): 41
(潘卫国, 吴江, 王文欢, 等. 添加 NH_4Cl 对煤燃烧生成 Hg 和 NO 影响的研究. 中国电机工程学报, 2009, 29(29): 41)
- [10] Sliger R N, Kramlich J C, Marinov N M. Towards the development of a chemical kinetic model for the homogeneous oxidation of mercury by chlorine species. *Fuel Process Technol*, 2000, 65/66: 423
- [11] Wang S, Gao J H, Wu Y Y, et al. Effects of flue gas components on Hg adsorption and catalytic oxidation by flue gas. *Proc CSEE*, 2010, 30(29): 30
(王帅, 高继慧, 吴燕燕, 等. 烟气组分对脱硫灰吸附及催化氧化汞的影响. 中国电机工程学报, 2010, 30(29): 30)
- [12] Norton G A, Yang H Q, Brown R C, et al. Heterogeneous oxidation of mercury in simulated post combustion conditions. *Fuel*, 2003, 82(2): 107
- [13] Yang H Q, Xu Z H, Fan M H, et al. Adsorbents for capturing mercury in coal-fired boiler flue gas. *J Hazard Mater*, 2007, 146(1/2): 1
- [14] Lopez-Anton M A, Yuan Y, Perry R, et al. Analysis of mercury species present during coal combustion by thermal desorption. *Fuel*, 2010, 89(3): 629
- [15] Meng S L, Duan Y F, Huang Z J, et al. Effect of flue gas components on mercury adsorption by coal-fired fly ash. *Proc CSEE*, 2009, 29(20): 66
(孟素丽, 段钰锋, 黄治军, 等. 烟气成分对燃煤飞灰汞吸附的影响. 中国电机工程学报, 2009, 29(20): 66)