

O_2/CO_2 燃烧方式下燃煤 Hg 排放试验研究

吴 辉, 邱建荣, 曾汉才, 温 存

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘 要: 采用沉降炉实验系统及燃煤烟气汞在线分析仪, 试验研究了空气和 O_2/CO_2 气氛下, O_2 浓度、CaO 和 F_2O_3 对煤样 Hg 排放的影响。从空气气氛切换至 20% O_2/CO_2 气氛时, 褐煤烟气中气态单质汞 ($Hg^0(g)$) 浓度略降低, 气态总汞 ($Hg^T(g)$) 浓度略升高, 烟煤则呈现相反趋势。 O_2/CO_2 气氛下, O_2 浓度为 20%~25% 时, 烟煤的 $Hg^T(g)$ 浓度变化不大, 约 $19 \mu g/m^3$; O_2 为 30% 时, $Hg^T(g)$ 浓度显著升高至 $23.2 \mu g/m^3$; $Hg^0(g)$ 浓度基本未受影响。CaO 和 F_2O_3 可抑制 Hg 排放, 且 O_2/CO_2 气氛下的效果优于空气气氛。CaO 添加后可显著降低 $Hg^0(g)$ 浓度, 同等 O_2 浓度下, O_2/CO_2 气氛更有利于 $Hg^T(g)$ 的减排。 F_2O_3 加入后, $Hg^T(g)$ 浓度有所降低, O_2 浓度升高, $Hg^0(g)$ 氧化随之增强。

关键词: 煤燃烧; Hg 排放; 沉降炉; O_2/CO_2 燃烧; Hg 在线分析仪

中图分类号: TK16 X701 文献标识码: A

引 言

Hg 是一种对生态环境具有严重危害的重金属元素。据统计, 2000 年全球人为 Hg 排放的 2/3 来自煤、石油、天然气等化石燃料的燃烧^[1]。尽管 Hg 在煤中是痕量元素, 但由于煤炭是世界一次能源的重要组成部分, 燃烧量巨大, 燃煤所造成的 Hg 排放, 不容忽视。

随着人们环保意识的增强, 对燃煤污染物的排放控制也日益严格, 少数发达国家已开始实施或拟实施燃煤电厂汞排放限制法规^[2]。然而, 面对日趋严格的环保标准, 单一的燃煤污染物控制技术从经济上难以满足要求。研究开发一种技术可行、成本低廉的污染物综合控制技术势在必行。已有研究表明^[3]: 基于回收温室气体 CO_2 而提出的 O_2/CO_2 燃烧技术, 在实现直接分离回收 CO_2 的同时, 还可大大降低 NO_x 排放, 对 SO_x 也有一定的控制作用。且现有机组基本无需改造便可采用该种燃烧方式,

是一种潜在的燃煤污染物综合控制技术。

Hg 是煤中最易挥发的痕量元素之一, 有关 O_2/CO_2 燃烧方式下 Hg 释放迁徙的研究还很缺乏, 仅有少量零星报道。同传统空气气氛相比, O_2/CO_2 燃烧方式下, B&W 和 AirLiquid 的中试试验提及汞的脱除率可增加 50%^[4], CANMET 的试验显示 Hg 在气相和灰中的分布几无变化^[5], 小型沉降炉烟气采样得出两种气氛下 Hg 形态分布基本相同的结论^[6], 本课题组已开展的相关试验和模拟研究则显示 O_2/CO_2 燃烧方式可在一定程度上抑制痕量元素的蒸发^[7]。

综上所述, O_2/CO_2 燃烧方式是一种潜在的污染物联合脱除技术, 深入了解该燃烧方式下煤中 Hg 的释放迁徙规律, 并将已有的 Hg 污染控制技术与具有发展前景的 O_2/CO_2 清洁燃烧方式相结合, 有利于实现多种污染物的高效低成本脱除。本研究利用沉降炉实验系统, 结合先进的燃煤烟气 Hg 在线分析仪, 试验研究了传统空气气氛和 O_2/CO_2 气氛下, 不同煤种的 Hg 的释放迁徙规律, 分析探讨了空气和 O_2/CO_2 燃烧气氛、 O_2 浓度、煤粉添加剂 CaO 和 F_2O_3 对 Hg 排放的影响。

1 试 验

1.1 煤 样

试验选取了两种西部煤 DHB 褐煤和 SJT 烟煤, 煤粉粒径 250 目。表 1 为煤样的工业分析、元素分析和汞含量。

1.2 试验方法

试验在如图 1 所示的沉降炉系统上进行。沉降炉系统主要由微量给粉器、空气预热器、刚玉管炉体和加热控温装置组成。为使煤粉充分燃烧, 空气预热器出口气体的温度控制在 $300^\circ C$ 左右, 反应段温

收稿日期: 2009-07-13 修订日期: 2009-09-19

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目 (50525619); 国家自然科学基金资助项目 (50721005 20677020)

作者简介: 吴 辉 (1981-), 女, 湖北孝感人, 华中科技大学博士研究生。

度 1 400 °C, 给粉量 0.26 g/min, 使用纯 O₂/N₂/CO₂ 气瓶模拟所需空气气氛和 O₂/CO₂ 气氛, 模拟空气气氛的体积比为 [O₂]/[N₂]=1/4, O₂/CO₂ 气氛的体积比分别为 [O₂]/[CO₂]=1/4, 1/3 和 3/7. Hg 的测量由 Hg 在线分析仪 SM3 和 VM3000 (Mercury Instruments GmbH 德国) 完成, 详细介绍见文献 [8].

表 1 煤样的工业分析和元素分析

		DHB褐煤	SJT烟煤
工业分析 /%	M _{ad}	0.93	1.19
	A _{ad}	31.25	41.11
	V _{ad}	26.94	15.39
	FC _{ad}	40.88	43.49
元素分析 /%	C _{ad}	55.57	46.90
	H _{ad}	1.47	1.09
	S _{ad}	1.59	5.46
	N _{ad}	0.78	0.82
	O _{ad}	8.41	3.43
	Hg/mg·kg ⁻¹	0.34	0.46
C/mg·kg ⁻¹	164	438	

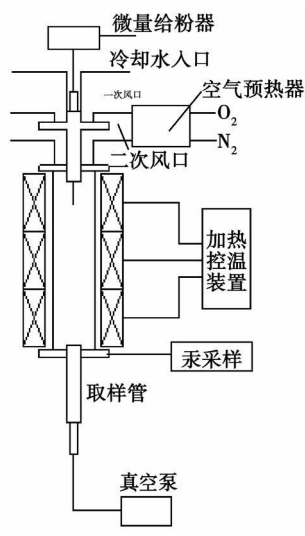


图 1 沉降炉试验系统示意图

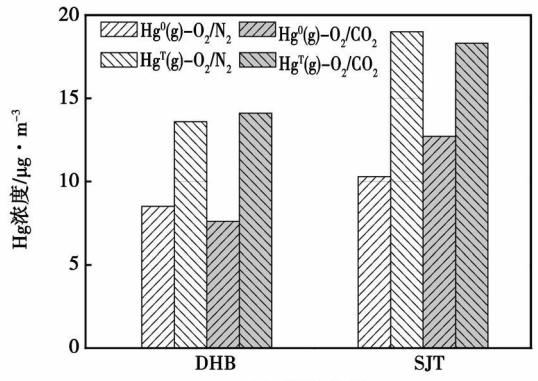
除了 Si、Al 外, Ca 和 Fe 为煤中普遍存在、含量相对较高且具有污染物脱除活性的元素^[9-11]. 本试验中, 考察了 DHB 褐煤添加 CaO 和 Fe₂O₃ 后, 不同气氛下, 以及不同 O₂ 浓度下, Hg 的排放情况. CaO 按摩尔比 Ca:S=2:1 添加, Fe₂O₃ 的添加量为每 100 g 煤粉添加 2 g Fe₂O₃.

2 试验结果及分析

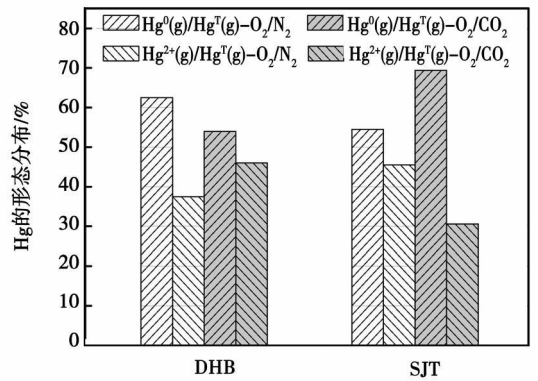
煤燃烧过程中, Hg 从煤中释放出来并以 Hg⁰

(g) 的形态存在于烟气中, 在烟气降温过程中与其它烟气组分发生复杂的均相、多相反应, 一部分 Hg⁰ 仍以 Hg⁰ (g) 的形态存在于烟气中, 一部分 Hg⁰ 被氧化成 Hg²⁺ (g), 同时一部分 Hg⁰ (g) 和被氧化的 Hg²⁺ (g) 将被吸附至颗粒表面, 形成颗粒态 Hg 即煤燃烧后, Hg 将分布于气相和固相中. 试验中, 给粉量恒定, 燃烧系统输入的 Hg 量不变, 燃烧后分布于气相和固相的汞总量恒定, 因此气相中的 Hg 浓度降低, 意味着 Hg 在固相中的富集增加, 反之亦然. Hg 在线分析仪测量的为气相中的单质汞 Hg⁰ (g) 和总汞 Hg^T (g) 浓度, 实际电厂中, 富集于颗粒上的 Hg 基本上可被电除尘或布袋除尘装置除去, 因此以下分析讨论关注于气相中的单质汞 Hg⁰ (g) 和总汞 Hg^T (g) 排放情况.

2.1 燃烧气氛对 Hg 排放的影响



(a) 浓度分布



(b) 形态分布

图 2 空气和 (20% O₂)/CO₂ 气氛下煤样 Hg 排放

图 2 为煤样在模拟空气气氛 (20% O₂/N₂) 和 20% O₂/CO₂ 两种气氛下, 燃烧烟气中单质汞 (Hg⁰ (g)) 和气态总汞 (Hg^T (g)) 的浓度分布, 以及所排放的气态总汞中, Hg⁰ (g) 和氧化汞 (Hg²⁺ (g)) 的形态分布. 图中显示, 两种气氛下, DHB (褐煤) 烟气中的 Hg⁰ (g) 和 Hg^T (g) 浓度相当, 分别为 8 和 14 μg/m³ 左右, 均低于 SJT (烟煤), 这可能与 SJT 煤样

含量较高有关。对于烟气中 $Hg^0(g)$ 和 $Hg^{2+}(g)$ 的形态分布, 如图 (b) 所示, 空气气氛下, DHB(褐煤) 烟气的 $Hg^0(g)$ 比例为 62.5%, 高于 SJT(烟煤) 的 54.5%, 这应该是由褐煤、烟煤氯含量和飞灰未燃尽炭 (UBC) 含量的差异造成的。一般褐煤的氯含量相对较低, 燃烧飞灰 UBC 含量也较低, 而烟煤则具有相对较高的氯含量和飞灰 UBC 含量, 有利于 Hg 的氧化吸附。试验所用 DHB(褐煤) 和 SJT(烟煤) 的氯含量分别为 164 和 438 mg/kg。

燃烧气氛切换至 20% O_2/CO_2 气氛后, DHB(褐煤) 的 $Hg^0(g)$ 排放浓度略降低, $Hg^{2+}(g)$ 略升高, 而 SJT(烟煤) 则呈现相反趋势, 使得烟气中的 DHB 煤的 $Hg^0(g)$ 比例降低到 54%, SJT 煤的则升至 69.4%。由于 O_2/CO_2 气氛会降低亚微米颗粒的排放浓度^[6-12], 而 Hg 易富集于亚微米颗粒上, 因此高浓度 CO_2 气氛会削弱多相颗粒物对气态 Hg 的吸附程度, 导致 DHB(褐煤) 烟气中 $Hg^{2+}(g)$ 浓度略升高; 且由于 CO_2 气氛下, SO_2 、NO 的排放浓度均有所降低, SO_2 和 NO 对含氯组分氧化 $Hg^0(g)$ 的抑制作用也会有所减弱, 有利于 $Hg^0(g)$ 的氧化, 使得 DHB(褐煤) 烟气中 $Hg^0(g)$ 的浓度和比例降低。对于 SJT(烟煤) 而言, CO_2 的高热容会使得煤粉颗粒温度降低, 煤粉燃尽难度加大, 一方面会使得部分 Hg 残留未释放, 另一方面灰中 UBC 含量升高, 有利于 Hg 吸附, 更多 Hg 富集于固相, 导致气相的 $Hg^{2+}(g)$ 浓度降低; 同时高浓度 CO_2 营造的还原性气氛, 不利于 $Hg^0(g)$ 氧化, 使得 $Hg^0(g)$ 排放升高, 烟气中 $Hg^0(g)$ 的比例呈现升高趋势。

2.2 O_2 浓度对 Hg 释放的影响

由于不同煤种受 CO_2 影响幅度不同, 高挥发分的煤, 如褐煤, 所受影响较弱。试验考察了 O_2/CO_2 气氛下, O_2 浓度分别为 20%、25% 和 30% 时, SJT(烟煤) 的 Hg 释放特性, 如图 3 所示。从图中可看出, O_2/CO_2 气氛下, SJT(烟煤) 在 3 种 O_2 浓度的 $Hg^0(g)$ 排放浓度相当, 在 $13 \mu g/m^3$ 左右, 均高于空气气氛下的 $10.3 \mu g/m^3$; O_2 浓度从 20% 升至 25% 时, $Hg^{2+}(g)$ 和 $Hg^0(g)$ 排放浓度变化不大, 烟气中的 $Hg^0(g)$ 比例约为 69%, 高于空气气氛下的 54.5%; 当 O_2 浓度升高至 30% 时, $Hg^{2+}(g)$ 浓度显著升高至 $23.2 \mu g/m^3$, $Hg^0(g)$ 浓度基本维持不变。

O_2/CO_2 气氛下, 随着 O_2 浓度升高, 煤粉颗粒温度升高, 燃烧更剧烈充分, 燃尽率提高, 更多的 Hg 从煤中释放出来, 而飞灰对 Hg 的吸附减弱, 烟气中 $Hg^0(g)$ 浓度逐渐增加。同时, CO_2 浓度降低, 其营

造的还原性气氛减弱, 对 $Hg^0(g)$ 的氧化有利, 使得更多 Hg 以氧化态形式存在, 烟气中 $Hg^0(g)$ 的比例降低。

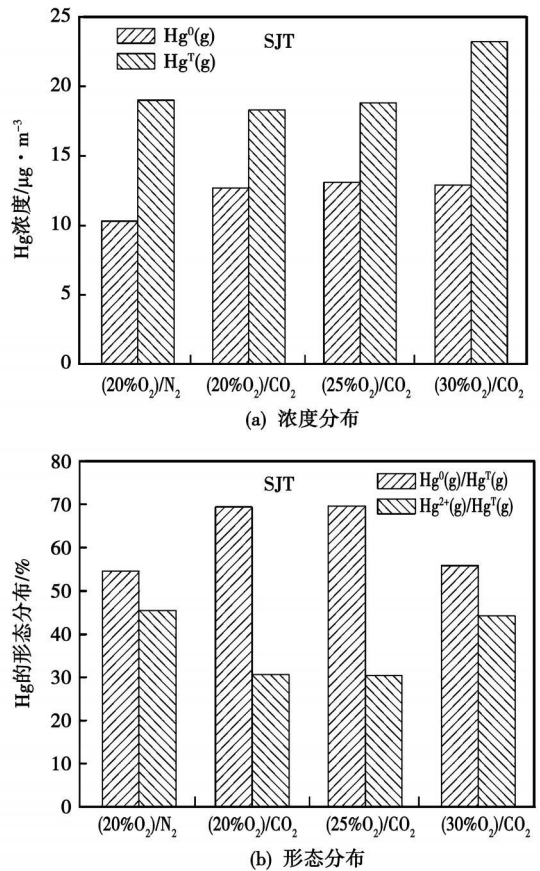


图 3 O_2 浓度变化对 Hg 排放的影响

2.3 CaO 添加剂对 Hg 排放的影响

添加 CaO 前, DHB 原煤在空气气氛和 20% O_2/CO_2 气氛下, 所排放的 $Hg^0(g)$ 和 $Hg^{2+}(g)$ 浓度分别为 8.5、13.6 和 7.6、14.1 $\mu g/m^3$, 添加 CaO 后, 烟气中 $Hg^0(g)$ 和 $Hg^{2+}(g)$ 的浓度均降低, 如图 4 所示。

空气气氛下, $Hg^0(g)$ 的排放浓度降低了 4.3 $\mu g/m^3$, 高于 $Hg^{2+}(g)$ 的降低幅度 1.5 $\mu g/m^3$, 显示 CaO 加入后, 一部分 $Hg^0(g)$ 转变成了氧化态 Hg^{2+} 或颗粒态 Hg^{2+} 。由于 $Hg^0(g)$ 难被吸附, 一般认为 $Hg^0(g)$ 的脱除为先氧化后吸附, 含氯组分是烟气中 $Hg^0(g)$ 的主要氧化剂。煤样添加 CaO 后, CaO 以碱性氧化物存在于燃烧后的飞灰中, 吸附烟气中的含氯组分后, 在颗粒表面形成含氯活性位, 提供了 $Hg^0(g)$ 的多相氧化吸附活性位, 使得 $Hg^0(g)$ 浓度显著降低。

20% O_2/CO_2 气氛下, $Hg^0(g)$ 的降低幅度为 3.5 $\mu g/m^3$, 低于空气气氛下的 4.3 $\mu g/m^3$, 这和高浓度

CO₂营造的还原性气氛不利于 Hg⁰ (g)氧化有关。随着 O₂ 浓度升高, 氧化性气氛增强, Hg⁰ (g)的浓度进一步降低; 而 CO₂ 浓度升高, NO、SO₂ 等的排放也随之增加^[6-12], 与 Hg⁰ (g)竞争活性吸附位, 在这两种因素的共同影响之下, 烟气中 O₂ 浓度为 25%时, Hg⁰ (g)的排放浓度最低。

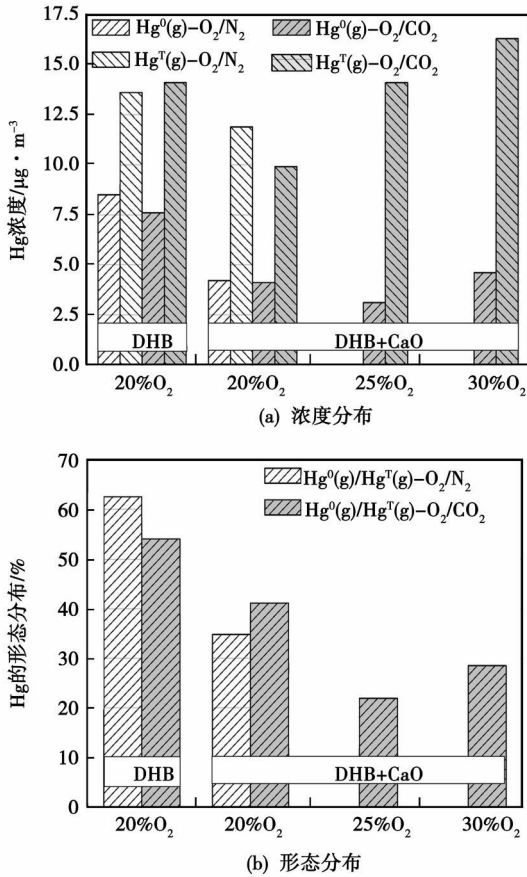


图 4 煤粉添加 CaO后 Hg的排放

对于 Hg^T (g)的变化, 20% O₂ /CO₂ 气氛下的降低幅度显著高于空气气氛, 显示高浓度 CO₂ 尽管对 Hg⁰ (g)的氧化有一定抑制, 但可大大促进 Hg^T (g)的吸附。由于氧化态 Hg吸附主要取决于吸附剂的比表面积和吸附温度^[11], O₂ /CO₂ 气氛中颗粒燃烧温度略低, 可降低 CaO烧结, 使得 CaO具有更丰富的比表面积和孔隙结构, 同时 NO/SO₂ 的排放浓度也降低, 与 Hg的竞争吸附减弱, 更多的 Hg转移到固相中, 这是 Hg^T (g)浓度降低的重要原因。而随着 O₂ 浓度升高, CO₂ 浓度降低, 情况均向相反方向发展, 不利于 Hg^T (g)的吸附, 因而导致烟气中 Hg^T (g)的浓度升高, 图 4中显示, Hg⁰ (g)排放的浓度, 由 9.9 μg/m³增加到了 14.1和 16.3 μg/m³。

2.4 Fe₂O₃ 添加剂对 Hg排放的影响

Fe₂O₃ 加入后, 可在一定程度上抑制 Hg⁰ (g)的排放, 如图 5所示。空气气氛下, Hg⁰ (g)的浓度略升高, Hg^T (g)浓度降低了 1.7 μg/m³; 20% O₂ /CO₂ 气氛下, Hg⁰ (g)和 Hg^T (g)均有降低, 幅度分别为 0.8和 2.1 μg/m³。添加 Fe₂O₃ 后, Hg⁰ (g)浓度的变化幅度低于 Hg^T (g)的, 因此, 添加 Fe₂O₃ 主要是降低了烟气中 Hg⁰ (g)的浓度, 即促进了氧化态 Hg的吸附。

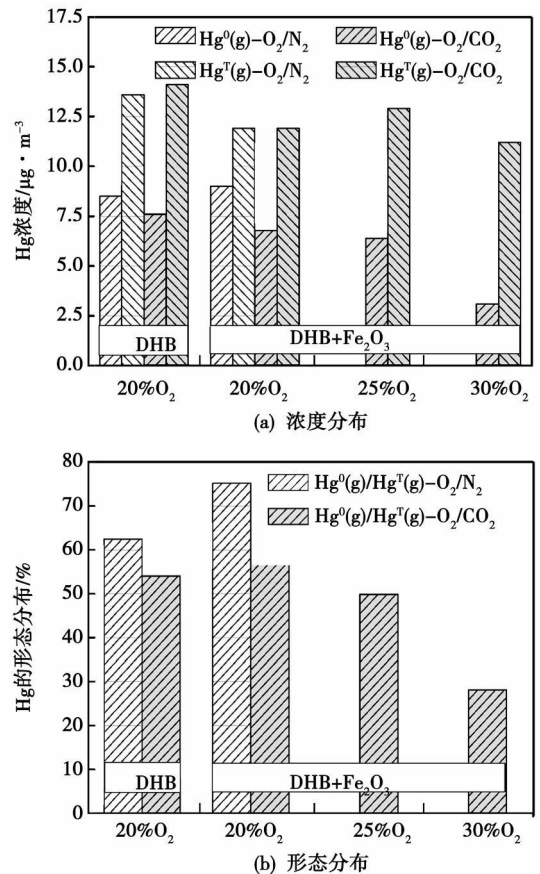


图 5 煤粉添加 Fe₂O₃后 Hg的排放

比较而言, 两种气氛下, 煤粉添加 Fe₂O₃ 对 Hg⁰ (g)的氧化并不显著, 直至 O₂ 浓度升高到 30%时才出现明显的 Hg⁰ (g)氧化, Hg⁰ (g)浓度降低至 3.1 μg/m³, 这由多种因素作用引起。烟气中的酸性气体组分本身影响含氯组分对 Hg⁰ (g)的氧化, 也影响 Fe₂O₃ 对 Hg⁰ (g)的氧化吸附, 试验显示, SO₂ 可促进飞灰高磁性部分对 Hg⁰ (g)的氧化^[13]; 同 CaO与含氯组分的直接吸附反应相比, Fe₂O₃ 更类似于 Deacon反应中的催化剂^[14], 可催化含氯组分与 O₂ 间的反应生成 Cl₂ 促进 Hg⁰ (g)氧化。

O₂ /CO₂ 气氛下, 高浓度的 CO₂ 气氛可削弱烟

气组分与 Hg 在飞灰表面的竞争吸附,随着 O_2 浓度升高,烟气组分的竞争吸附增强,不利于 Hg 吸附,但另一方面, $F\zeta O_3$ 对 $Hg^0(g)$ 的氧化也随之增强,烟气中 $Hg^{2+}(g)$ 比例升高,更易于吸附脱除。两方面因素综合作用,导致 $Hg^0(g)$ 排放先略升高后降低。

由上述分析可知,相比空气气氛, O_2/CO_2 气氛下煤粉添加 CaO 和 $F\zeta O_3$ 有利于降低 Hg 排放。随着 O_2 浓度升高, CaO 和 $F\zeta O_3$ 呈现了不同的 Hg 脱除变化趋势。CaO 的 Hg 脱除性能降低,而 $F\zeta O_3$ 则表现了更强的 $Hg^0(g)$ 氧化活性。

3 结 论

本研究在沉降炉实验系统上,结合先进的燃煤烟气 Hg 在线分析仪,试验研究了空气气氛和 O_2/CO_2 气氛下,不同煤种的 Hg 的释放迁徙规律,分析探讨了空气和 O_2/CO_2 燃烧气氛、 O_2 浓度、煤粉添加剂 CaO 和 $F\zeta O_3$ 对 Hg 排放的影响,得出如下结论:

(1) 两种气氛下,褐煤的 Hg 排放浓度均低于烟煤。当气氛从空气气氛切换至 20% O_2/CO_2 气氛时,褐煤烟气中 $Hg^0(g)$ 浓度略降低, $Hg^{2+}(g)$ 浓度略升高,烟煤则呈现相反趋势。

(2) O_2/CO_2 气氛下, SJT(烟煤)的 $Hg^0(g)$ 排放浓度基本未受 O_2 浓度影响,在 $13 \mu g/m^3$ 左右,均高于空气气氛下的 $10.3 \mu g/m^3$; O_2 浓度在 20% ~ 25% 时, $Hg^{2+}(g)$ 浓度变化不大,与空气气氛相当,约 $19 \mu g/m^3$; O_2 浓度为 30% 时, $Hg^{2+}(g)$ 排放显著升高至 $23.2 \mu g/m^3$ 。

(3) 煤粉添加 CaO 后,可显著降低烟气中 $Hg^0(g)$ 的浓度,且空气气氛下 $Hg^0(g)$ 的减排效果优于 20% O_2/CO_2 气氛。 $Hg^{2+}(g)$ 排放浓度也有所降低,同等 O_2 浓度下, O_2/CO_2 气氛下的吸附效果优于空气气氛;随着 O_2 浓度升高, $Hg^{2+}(g)$ 的排放浓度也升高。

(4) $F\zeta O_3$ 加入后, $Hg^0(g)$ 浓度的变化幅度低于 $Hg^{2+}(g)$ 的,即 $F\zeta O_3$ 促进了 $Hg^{2+}(g)$ 的吸附; O_2/CO_2 气氛下, $F\zeta O_3$ 对 $Hg^{2+}(g)$ 的吸附脱除效果略优于空气气氛。对 $Hg^0(g)$ 的影响与 O_2 浓度有关: O_2 浓度升高, $Hg^0(g)$ 的氧化随之增强。

致谢:感谢本课题组的刘豪博士、刘峰和李缓硕士在本文试验过程中给予的协助,感谢王泉海博士在本文修改方面提出的宝贵意见。

参考文献:

- [1] PACYNA E G, PACYNA J M, STEENHUISEN F et al. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000 [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 4048-4063.
- [2] U.S. EPA. Clean air mercury rule 40 CFR parts 60, 63, 72, and 75 [R]. OAR-2002-0056. USEPA, 2005.
- [3] CROISET E, DOUGLAS P L, TAN Y. Coal oxy-fuel combustion: a review // The 30th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems [C]. Florida: Clearwater, 2005.
- [4] CHATEL P, LAGE F, MARIN O, PERRIN N et al. A Pilot scale demonstration of oxy-combustion with flue gas recirculation in a pulverized coal fired boiler // The 28th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems [C]. Florida: Clearwater, 2003.
- [5] TAN Y, CROISET E. Emissions from oxy-fuel combustion of coal with flue gas recycle // The 30th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems [C]. Florida: Clearwater, 2005.
- [6] SURIYAWONG A, GAMBLE M, LEE M H et al. Submicrometer particle formation and mercury speciation under O_2 - CO_2 coal combustion [J]. Energy & Fuels, 2006, 20: 2357-2363.
- [7] 王泉海, 邱建荣, 温存, 等. 氧燃烧方式下痕量元素形态转化的热力学平衡模拟 // 中国工程热物理学会第十一届年会燃烧学论文集 [C]. 北京: 中国工程热物理学会, 2005: 642-646.
- [8] 吴辉, 邱建荣, 王泉海, 等. 氧燃料燃烧方式下燃煤汞析出规律的初步实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 185-188.
- [9] 王泉海. 煤燃烧过程中汞排放及其控制的实验及机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [10] GUNHAM K C, ZYGARLIS C J, TIBBETTS J E et al. Effects of NO_x , α - Fe_2O_3 , γ - Fe_2O_3 and HCl on mercury transformations in a 7-kW coal combustion system [J]. Fuel Processing Technology, 2004, 86: 429-448.
- [11] DUNHAM G E, DEWALL R A, SENIOR C L. Fixed-bed studies of the interactions between mercury and coal combustion fly ash [J]. Fuel Processing Technology, 2003, 83: 197-213.
- [12] 温存, 邱建荣, 徐志英, 等. 氧燃烧方式下矿物质与重金属行为特征的试验及模拟研究 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 181-184.
- [13] GHORISHI B, LEE C W, OZEWICZ W S et al. Effects of fly ash transition metal content and flue gas HCl/SO_2 ratio on mercury speciation in waste combustion [J]. Environmental Engineering Science, 2005, 22: 221-231.

直流锅炉垂直管圈水冷壁低流速自补偿特性的试验研究 = Experimental Study of the Low Flow Speed Self-compensation Characteristics of the Vertical Coil-tube Water Wall of an Once-through Boiler [刊, 汉] / ZHU Xào-jing, BIQín-cheng, YANG Dong, et al (College of Energy Source and Power Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 418 ~ 422

With $\phi 28.6 \times 5.84$ -head optimized inner threaded tubes serving as a structure under test conditions, experimentally studied were the self-compensation characteristics of two vertical parallel tubes at a low mass flow speed. The test results show that such a vertical parallel tube group enjoys conspicuous self-compensation characteristics within the test parameter range. During the vaporization of the working medium in the tubes, the mass flow speed in the branch tubes with a relatively small heat load will first decrease and then increase with an increase of the heat absorbed. When the dryness of the working medium in the tubes reaches a relatively high one with an increase of the heat absorbed, the mass flow speed of the medium in the tubes will gradually approach or exceed the average mass flow speed and the self-compensation characteristics of the system will gradually disappear. The test results also indicate that when the medium dryness is relatively low, a relatively big heat load deviation can strengthen the self-compensation characteristics of the system. When the medium dryness is relatively high, a relatively big heat load deviation can weaken the self-compensation characteristics of the system. On the other hand, when the medium dryness is relatively low, an increase of the system pressure may weaken the self-compensation capability of the vertical tube plate. When the medium dryness is relatively high, an increase of the system pressure may result in a decrease of the two-phase friction pressure drop, leading to an enhancement of the self-compensation characteristics of the system. Key words: once-through boiler; self-compensation characteristics; optimized inner threaded tube; low mass flow speed

新型自蓄热燃烧器设计与实验研究 = Design and Experimental Study of a New Type Self-heat storage Burner [刊, 汉] / ZHANG Jian-jun, XU Jin-qiang, ZOU De-qiu (Postgraduate College, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100039), FENG Zi-ping (Guangzhou Energy Source Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 423 ~ 426

Based on a high-temperature air combustion technology, designed was a new type self-heat storage burner to realize a continuous high-temperature air combustion. The new type burner is composed of a burner, a heat accumulation body and a four-way inverter valve totaling three portions. To verify the thermodynamic and resistance characteristics of the burner, a testing system was set up on the basis of straight tube type radiant tubes. The research results show that the above burner can realize a stable high-temperature air combustion and during the operation, the exhaust flue gas temperature is below 150°C . The temperature efficiency can hit over 88%. The maximal longitudinal temperature difference on the external wall of the straight tube type radiant tubes is not higher than 58°C . The concentration of NO_x emissions is not greater than 3.85 mg/m^3 . Moreover, the burner in question is relatively simple in structure and flexible for installation, thus enjoying a relatively strong adaptability to various boiler types. Key words: high-temperature air combustion; self-heat storage burner; temperature efficiency; low NO_x emissions

O_2/CO_2 燃烧方式下燃煤 Hg 排放试验研究 = Experimental Study of Hg Emissions from Coal Combustion Under O_2/CO_2 Combustion Mode [刊, 汉] / WU Hui, QIU Jian-rong, ZENG Han-cai, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 427 ~ 431

By using a sedimentation furnace test system and an on-line coal-fired flue gas Hg analyzer, experimentally studied

was the influence of O_2 concentration, CaO and Fe_2O_3 on coal sample Hg emissions in an air and O_2/CO_2 atmosphere. When a conversion is made from an air atmosphere to a 20% O_2/CO_2 concentration atmosphere, the gas state single substance mercury ($Hg^0(g)$) concentration in the flue gas produced by burning lignite will slightly decrease and the total gas state mercury ($Hg^T(g)$) will slightly increase while bituminous coal will exhibit a contrary tendency. In the O_2/CO_2 atmosphere when O_2 concentration ranges from 20% to 25%, $Hg^T(g)$ concentration of the bituminous coal will change insignificantly, i.e. around $19 \mu g/m^3$. When O_2 concentration is 30%, the $Hg^T(g)$ concentration will conspicuously increase to $23.2 \mu g/m^3$ while the $Hg^0(g)$ concentration will basically not be affected. CaO and Fe_2O_3 can curb the Hg emissions and the effectiveness achieved in the O_2/CO_2 atmosphere is superior to that in an air atmosphere. After CaO has been added, the $Hg^0(g)$ concentration will decrease remarkably. At a same O_2 concentration, the O_2/CO_2 atmosphere will be more favorable for the reduction of $Hg^T(g)$ emissions. After Fe_2O_3 has been added, the $Hg^T(g)$ concentration will somewhat decrease while the O_2 concentration will increase, so that $Hg^0(g)$ oxidation will be enhanced accordingly. Key words: coal combustion; Hg emissions; sedimentation boiler; O_2/CO_2 combustion; on-line Hg analyzer

烟气直接加热结晶硫酸铵的实验研究 = Experimental Study of Crystallized Ammonium Sulfate Directly Heated by Flue Gases [刊, 汉] / ZHANG Ting-fa, WANG Zhu-liang (Harbin Power Plant Engineering Co. Ltd., Harbin, China; Post Code: 150040) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(4). — 432~436

Improved and innovated were the traditional ammonium method-based flue gas desulfurization technologies and developed was a new type gas-liquid heat exchange ring flow crystallizer with crystallized ammonium sulfate directly heated by boiler flue gases. The crystallizer features a high thermal efficiency, a small drag and resistance to fouling, thus enjoying a very big development potential. Through experiments studied was the influence of the air bubble distribution in the pop flow crystallizer, hot air flow rate and temperature on the main and average crystal particle diameter. The research results show that the average diameter of air bubbles in the ring flow crystallizer using an air ammonium sulfate system is only about 0.5 mm, the particle diameter distribution is uniform and the change of the average air content rate ranges from 0.12 to 0.25. The hot air temperature becomes a key control method for controlling the crystal particle diameter of ammonium sulfate. Through a regulation of initial hot air temperature, the average particle diameter of the ammonium sulfate can increase by over 20%. Key words: ammonium method-based flue gas desulfurization; crystallization of ammonium sulfate; ring flow crystallizer; gas-liquid direct heat exchange

我国 SCR脱硝成本分析及脱硝电价政策探讨 = Analysis of the SCR (Selective Catalytic Reduction)-based Denitration Cost in China and Exploratory Study of Its Policies on Denitration Electricity Price [刊, 汉] / GUO Bin, LIAO Hong-kai, XU Cheng-hong et al. (Guangdong Electric Grid Company Academy of Electric Power Science, Guangzhou, China; Post Code: 510600) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(4). — 437~440

Analyzed was the cost for a SCR-based denitration device. It has been pointed out that the expenses for reduction and catalytic agent as well as fixed asset depreciation cost constitute the three largest ones in the cost of a SCR-based denitration device. On this basis, from such aspects as design denitration rate, reduction agent price, reduction agent type and SCR-based denitration device construction form etc., the factors influencing the on-line electricity price increment of the foregoing device were quantitatively analyzed and a denitration electricity price calculation formula was proposed. The formula comprehensively takes into account the main factors influencing the on-line electricity price increment of the SCR-based denitration device. It is of definite reference significance for calculating