

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

B01D 53/48 (2006.01)

B01D 53/64 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200710052128.2

[45] 授权公告日 2009年6月10日

[11] 授权公告号 CN 100496672C

[22] 申请日 2007.4.30

[21] 申请号 200710052128.2

[73] 专利权人 武汉凯迪电力环保有限公司

地址 430223 湖北省武汉市东湖新技术开发区江夏大道特1号凯迪大厦

[72] 发明人 韩旭 徐尹生 徐志安 李雄浩
高翔鹏 余福胜 李瑞鑫 朱敬

[56] 参考文献

CN1895745A 2007.1.17

EP1524023A1 2005.4.20

CN1883768A 2006.12.27

WO2006/096993A1 2006.9.21

CN1864813A 2006.11.22

CN1562445A 2005.1.12

CN1923337A 2007.3.7

审查员 苏敏

[74] 专利代理机构 武汉开元专利代理有限责任公司

代理人 胡镇西

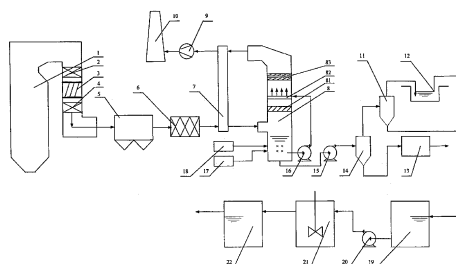
权利要求书3页 说明书10页 附图1页

[54] 发明名称

基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺及其系统

[57] 摘要

一种基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺及其系统。该工艺采用紫外线和卤素类氧化剂对烟气中的单质汞 Hg^0 进行两级氧化处理，并通过改进的石灰石-石膏湿法脱硫工艺使其中的气相二价离子汞 Hg^{2+} 转化为液相二价离子汞 Hg^{2+} ，进而通过液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂使液相二价离子汞 Hg^{2+} 转化为稳定的硫化汞 HgS 沉淀。其系统包括紫外线照射器、静电除尘器、氧化剂喷射装置和反应吸收塔等脱硫脱汞装备、脱硫副产物石膏处理装备和硫化汞 HgS 沉淀处理装备。采用该工艺及其系统能有效提高烟气中单质汞的氧化率，同时能有效克服所生成二价离子汞的还原释放问题，避免二次汞污染，也能大幅提高石灰石-石膏湿法脱硫系统的脱硫脱汞效率。



1、一种基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺，包括如下步骤：

1) 采用紫外线作为初级氧化的光触媒，用其照射燃煤锅炉机组所排放出的烟气，使烟气中大部分的单质汞 Hg^0 与二氧化硫和氧气发生充分的氧化反应，生成固相汞化合物硫酸亚汞和氧化汞；

2) 对经过紫外线照射的烟气进行静电除尘处理，脱除烟气中所含有的尘粒和所生成的固相汞化合物；

3) 采用卤素单质作为深度氧化剂，将其喷射到经过静电除尘处理的烟气中，使烟气中残存的单质汞 Hg^0 与卤素单质发生充分的氧化反应，生成易于脱除的气相二价离子汞 Hg^{2+} ；

4) 将经过深度氧化的烟气导入石灰石—石膏湿法脱硫系统，使烟气中的二氧化硫和气相二价离子汞 Hg^{2+} 分别与石灰石浆液发生反应，生成亚硫酸钙和液相二价离子汞 Hg^{2+} ，同时在石灰石浆液中添加液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂，使液相二价离子汞 Hg^{2+} 转化为稳定的硫化汞 HgS 沉淀，防止液相二价离子汞 Hg^{2+} 还原释放成单质汞 Hg^0 ；

5) 对经过脱硫脱汞反应的石灰石浆液进行强制氧化，使其中的亚硫酸钙转化成硫酸钙，再通过旋流分离和脱水处理，获得副产品石膏，并排出脱硫废水；

6) 对经过脱硫脱汞反应的烟气进行除雾处理，脱除烟气中所携带的液滴，同时分离出洁净烟气。

2、根据权利要求 1 所述的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺，其特征在于：所说的步骤 1) 中，采用波长为 220~280nm 的紫外线照射温度为 536~662℃ 的烟气。

3、根据权利要求 1 所述的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺，其特征在于：所说的步骤 3) 中，采用氯气 Cl_2 作为深度氧化剂，将其喷射到温度为 110~130℃ 的烟气中，其喷射量与烟气中残存的单质汞 Hg^0 的化学计量比为 $10\sim 10^3:1$ 。

4、根据权利要求 1 所述的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺，其特征在于：所说的步骤 4) 中，液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂采用硫氢化钠 NaHS 。

5、根据权利要求 1 所述的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺，其特征在于：所说的步骤 5) 中，在排出的脱硫废水中加入助凝剂和液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂，使脱硫废水中残留的液相二价离子汞 Hg^{2+} 完全转化为稳定的硫化汞 HgS 沉淀。

6、根据权利要求 5 所述的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺，其特征在于：所说的助凝剂采用聚乙酰胺，液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂采用硫化钠 Na_2S 或有机硫。

7、一种采用权利要求 1 所述工艺而专门设计的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞设备，包括用于烟气预除尘处理的静电除尘器 (5)、用于烟气脱硫脱汞处理的反应吸收塔 (8)、以及构成脱硫副产物处理设备的石膏旋流器 (14)、石膏脱水器 (13) 和脱硫废水旋流器 (11)，其特征在于：

所述静电除尘器 (5) 进口之前的烟道上设置有紫外线照射器 (3)，所述静电除尘器 (5) 出口之后的烟道上设置有氧化剂喷射装置 (6)，所述氧化剂喷射装置 (6) 的出口烟道与反应吸收塔 (8) 的进口相连；

所述反应吸收塔 (8) 自下而上依次设有底部浆池区、下部烟气输入区、中部吸收剂喷淋区、以及上部烟气除雾区，其中：反应吸收塔 (8) 的底部浆池区连接有石灰石浆液补给装置 (17) 和空气给进装置 (18)，反应吸收塔 (8) 的下部烟气输入区设置有烟气进口，反应吸收塔 (8) 的中部吸收剂喷淋区布置有石灰石浆液喷淋层 (82)，反应吸收塔 (8) 的上部烟气除雾区布置有除雾器 (83)，反应吸收塔 (8) 的底部浆池区与石灰石浆液喷淋层 (82) 之间通过外置的浆液循环泵 (16) 相连。

8、根据权利要求 7 所述的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞设备，其特征在于：所述脱硫废水旋流器 (11) 的下溢流口与废水缓冲池 (19) 相连，所述废水缓冲池 (19) 通过输液泵 (20) 与液相离子汞反应箱 (21) 相连，所述液相离子汞反应箱 (21) 与澄清池 (22) 相通。

9、根据权利要求 7 或 8 所述的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞设备，其特征在于：所述紫外线照射器 (3) 设置在燃煤锅炉机组 (1) 的省煤器 (2) 和空气预热器 (4) 之间的烟道上。

10、根据权利要求 7 或 8 所述的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞设备，其特征在于：所述反应吸收塔（8）内的石灰石浆液喷淋层（82）下方设置有烟气均匀装置（81），所述烟气均匀装置（81）呈托盘状结构，其盘面上均匀分布有许多便于石灰石浆液滞留和穿过的通孔。

基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺及其系统

技术领域

本发明涉及燃煤电站的烟气净化技术，具体地指一种基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺及其系统。

背景技术

煤是中国目前及今后相当长时期内电站燃料的主体，煤粉燃烧在提供必需热源和电力资源的同时，也会带来严重的汞 Hg 和二氧化硫 SO₂ 污染。据统计，2003 年我国燃煤电站向大气中排放的汞为 86.8 吨，废渣汞排放量为 28.94 吨，汞具有剧毒、高挥发性、在生物体内易于沉积且迟滞性长等特点，特别是排入大气的汞，其污染具有全球性。2005 年我国燃煤电站排放的二氧化硫总量高达 2549 万吨，由此造成的酸雨区域已接近国土面积的 40%，给我国生态环境和工农业生产带来了巨大的损失。因此，从根本上控制燃煤电站汞 Hg 和二氧化硫 SO₂ 的排放已迫在眉睫。

目前，燃煤烟气脱汞的手段主要有燃烧前脱汞、燃烧中脱汞和燃烧后脱汞三种。由于燃烧前脱汞和燃烧中脱汞的技术对燃煤中汞的去除能力有限，故燃烧后脱汞仍是最主要的控制途径。燃煤电站烟气中的汞主要以气态单质汞 Hg⁰、气态二价离子汞 Hg²⁺ 和颗粒汞 Hg^P 这三种形式存在，其中气态单质汞 Hg⁰ 约占烟气总汞含量的 30~80%。通常，单质汞 Hg⁰ 不溶于水，且挥发性极强，较难脱除，而二价离子汞 Hg²⁺ 易溶于水，较易去除。

对于燃烧后烟气脱汞技术而言，人们通常采用吸收剂脱汞。吸收剂脱汞可以去除大部分的气态二价离子汞 Hg²⁺，而单质汞 Hg⁰ 却很难治理，即使采用国外普遍应用的活性炭烟气喷射技术（ACI），对单质汞 Hg⁰ 的去除效果也不理想，且活性炭消耗量过高，影响飞灰再利用，同时运行成本也很高。科技人员一直在努力研究能否直接利用已有的烟气净化装置如脱硫设备，通过合理改进，使之兼具脱汞的作用。

对于燃煤烟气脱硫技术而言，石灰石—石膏湿法脱硫工艺具有

技术成熟、脱硫效率高、吸收剂来源广和脱硫副产品可资源化利用等优点，是目前燃煤电厂主要采用的脱硫技术。因此，利用现有的石灰石—石膏湿法脱硫设备，通过合理改进增强其脱汞性能，实现联合脱硫脱汞是一种极具潜力的烟气净化技术。

研究表明：石灰石—石膏湿法脱硫系统对烟气中的二价离子汞 Hg^{2+} 具有较高的吸收效率，可以同时实现脱硫脱汞，但采用现有的石灰石—石膏湿法脱硫系统脱汞还存在以下问题：其一，因烟气中的单质汞难溶于水，当烟气中的汞多以单质汞形式存在时，该法的脱汞效率并不高；其二，吸收到脱硫剂浆液中的二价离子汞容易被铁、锰、镍等金属离子和亚硫酸根离子还原，并以单质汞的形态重新进入烟气，从而降低了实际除汞的效率；其三，进入脱硫废水或脱硫渣中的汞仍存在二次污染的可能。因此，提高石灰石—石膏湿法脱硫系统的脱汞能力，同时减少二价离子汞的还原，并对捕集下来的汞进行合理处理，使之形成稳定、低毒的物质，是需要解决的核心问题。

公开号为 CN1923337A 的中国发明专利申请公开说明书介绍了一种利用臭氧 O_3 作为氧化剂同时氧化二氧化硫 SO_2 、一氧化氮 NO 和单质汞 Hg^0 、然后利用碱液洗涤塔同时脱硫、脱硝和脱汞的方法，但该方法没有解决所吸收的二价离子汞 Hg^{2+} 在洗涤塔内的还原问题，其实际脱汞效率不高，同时利用臭氧 O_3 将二氧化硫 SO_2 氧化成三氧化硫 SO_3 反而不利于脱硫，这是因为三氧化硫 SO_3 在洗涤塔内容易形成细小的气溶胶颗粒，阻止吸收浆液与三氧化硫 SO_3 的进一步反应。公开号为 CN1895745A 的中国发明专利申请公开说明书提出了一种强化湿法烟气脱硫系统除汞作用的方法，该方法通过在烟道内喷入卤素分子或其化合物将单质汞 Hg^0 氧化为二价离子汞 Hg^{2+} ，再将烟气导入湿法脱硫系统，并向脱硫剂浆液中添加液相汞稳定剂，达到脱汞的目的。但该方法同样没有解决吸收塔内二价离子汞 Hg^{2+} 的还原释放问题。此外，该方法对单质汞 Hg^0 进行一级氧化处理，若要实现较高的汞氧化率，必须喷入过量的氧化剂，而过量氧化剂必然会造成二次污染。公开号为 CN1933894A 的中国发明专利申请公开说明书公开了一种从煤中或锅炉燃烧器中加入含溴化合物来增强汞的氧化的方法，该方法通过溴元素的氧化作用提高烟气中二价

离子汞的含量，以期提高湿式脱硫系统的除汞能力，但在燃烧过程中加入含溴化合物对单质汞的氧化能力十分有限，从而限制了湿式脱硫系统的除汞能力。

发明内容

本发明的目的就是要提供一种基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺及其系统。采用该工艺及其系统能有效提高烟气中单质汞的氧化率，同时能有效克服所生成二价离子汞的还原释放问题，还能大幅提高石灰石—石膏湿法脱硫系统的脱硫脱汞效率。

为实现上述目的，本发明将多个工艺步骤有机结合为一体，相互协同作用，分层次实现烟气中汞的初级氧化、深度氧化，脱硫脱汞和二价离子汞固定。所设计的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺，采用紫外线和卤素类氧化剂对烟气中的单质汞 Hg^0 进行两级氧化处理，并通过改进的石灰石—石膏湿法脱硫工艺使其中的气相二价离子汞 Hg^{2+} 转化为液相二价离子汞 Hg^{2+} ，进而通过液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂使液相二价离子汞 Hg^{2+} 转化为稳定的硫化汞 HgS 沉淀。其具体工艺过程包括如下步骤：

1) 采用紫外线作为初级氧化的光触媒，用其照射燃煤锅炉机组所排放出的烟气，使烟气中大部分的单质汞 Hg^0 与二氧化硫、氧气发生充分的氧化反应，生成固相汞化合物硫酸亚汞和氧化汞；

2) 对经过紫外线照射的烟气进行静电除尘处理，脱除烟气中所含有的尘粒和所生成的固相汞化合物硫酸亚汞和氧化汞；

3) 采用卤素类单质或其化合物作为深度氧化剂，将其喷射到经过静电除尘处理的烟气中，使烟气中残存的单质汞 Hg^0 与卤素类单质或其化合物发生充分的氧化反应，生成易于脱除的气相二价离子汞 Hg^{2+} ；

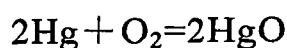
4) 将经过深度氧化的烟气导入石灰石—石膏湿法脱硫系统，使烟气中的二氧化硫和气相二价离子汞 Hg^{2+} 分别与钙基吸收剂浆液发生反应，生成亚硫酸钙和液相二价离子汞 Hg^{2+} ，同时在钙基吸收剂浆液中添加液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂，使液相二价离子汞 Hg^{2+} 转化为稳定的硫化汞 HgS 沉淀，防止液相二价离子汞 Hg^{2+} 还原释放成单质汞 Hg^0 ；

5) 对经过脱硫脱汞反应的钙基吸收剂浆液进行强制氧化，使其

中的亚硫酸钙转化成硫酸钙，再通过旋流分离和脱水处理，获得副产品石膏，并排出脱硫废水；

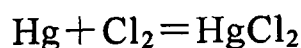
6) 对经过脱硫脱汞反应的烟气进行除雾处理，脱除烟气中所携带的液滴，同时分离出洁净烟气。

上述步骤 1) 中，优先采用波长为 220~280nm 的紫外线照射温度为 536~662℃ 的烟气。在此适合反应的温度和波长条件下，紫外线光触媒可以促使 80% 以上的单质汞 Hg^0 与二氧化硫和氧气进行反应，生成固相汞化合物硫酸亚汞和氧化汞，从而实现单质汞 Hg^0 的初级氧化。其化学反应的方程式如下：



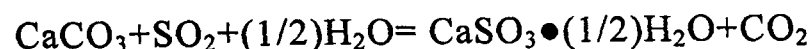
上述步骤 2) 中，经紫外线催化反应所生成的绝大部分固相汞化合物硫酸亚汞和氧化汞被静电除尘器清除掉，可大幅降低后续脱汞工艺中氧化剂的用量，从而使后续工艺简单化。

上述步骤 3) 中，优先采用氯气 Cl_2 或其化合物作为深度氧化剂，将其喷射到温度为 110~130℃ 的烟气中，其喷射量与烟气中残存的单质汞 Hg^0 的化学计量比为 10~10³:1。当然也可以采用其它性质类似的卤素类单质如溴气 Br_2 或其化合物作为深度氧化剂。在该优选的温度和计量配比下，更加有利于氯气 Cl_2 与单质汞 Hg^0 的氧化反应。其反应方程式如下：

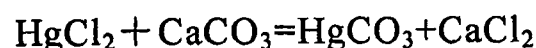


与此同时，烟气中的飞灰颗粒也能促进单质汞 Hg^0 的氧化，由此只需喷入少量的氯气 Cl_2 就能对烟气中残存的单质汞 Hg^0 进行深度氧化，实现单质汞 Hg^0 到二价离子汞 Hg^{2+} 的完全转化。同时，小剂量的氯气 Cl_2 也减轻了其对烟道的腐蚀作用，便于解决过量氧化剂带来的工艺缺陷。

上述步骤 4) 中，二氧化硫 SO_2 与钙基吸收剂浆液发生化学反应的方程式如下：



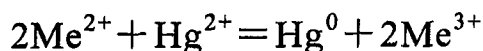
气相二价离子汞 Hg^{2+} 与钙基吸收剂浆液发生化学反应的方程式如下：



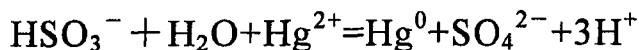
过量的氧化剂氯气 Cl_2 也与钙基吸收剂浆液发生化学反应，生成氯化钙。这样，在烟气脱硫的同时，也将烟气中的气相二价离子汞 Hg^{2+} 转化为了液相二价离子汞 Hg^{2+} 。

上述步骤 4) 中，液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂优先采用硫化化钠 NaHS 。硫化化钠 NaHS 可以有效抑制液相二价离子汞 Hg^{2+} 被铁、锰、镍、钴等金属离子和亚硫酸根离子还原释放：

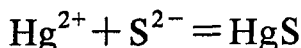
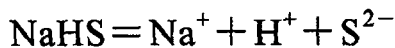
以 Me^{2+} 代表上述金属离子，其与液相二价离子汞 Hg^{2+} 的反应方程式如下：



亚硫酸根离子与液相二价离子汞 Hg^{2+} 的反应方程式如下：

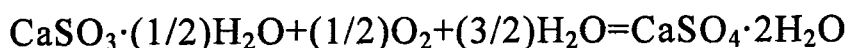


而在添加了硫化化钠 NaHS 后，其反应方程式如下：



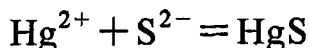
硫化汞 HgS 为稳定的沉淀，这样通过加入硫化化钠 NaHS ，可有效抑制液相离子汞 Hg^{2+} 的还原释放。

上述步骤 5) 中，对经过脱硫脱汞反应的钙基吸收剂浆液进行强制氧化处理的反应方程式如下：



由此将钙基吸收剂浆液中的亚硫酸钙转化成硫酸钙，所得硫酸钙可经过旋流分离、脱水处理、获得副产品石膏。

上述步骤 5) 中，在排出的脱硫废水中加入助凝剂和液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂，助凝剂优先采用聚乙酰胺，液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂优先采用硫化钠 Na_2S 或有机硫，其反应方程式如下：



由此可将脱硫废水中残留的液相二价离子汞 Hg^{2+} 完全转化为稳定的硫化汞 HgS 沉淀，从而有效抑制汞的二次污染。

为实现上述工艺而专门设计的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞系统，主要由用于烟气预除尘处理的静电除尘器、用于烟气脱硫脱汞处理的反应吸收塔、以及构成脱硫副产物处理系统的石膏旋流器、石膏脱水器和脱硫废水旋流器等组成。所述静电除尘器进口之前的烟道上设置有紫外线照射器，所述静电除尘器出口之后的

烟道上设置有氧化剂喷射装置，所述氧化剂喷射装置的出口烟道与反应吸收塔的进口相连。所述反应吸收塔自下而上依次设有底部浆池区、下部烟气输入区、中部吸收剂喷淋区、以及上部烟气除雾区，其中：反应吸收塔的底部浆池区连接有石灰石浆液补给装置和空气给进装置，反应吸收塔的下部烟气输入区设置有烟气进口，反应吸收塔的中部吸收剂喷淋区布置有石灰石浆液喷淋层，反应吸收塔的上部烟气除雾区布置有除雾器，反应吸收塔的底部浆池区与石灰石浆液喷淋层之间通过外置的浆液循环泵相连。

进一步地，所述脱硫废水旋流器的下溢流口与废水缓冲池相连，所述废水缓冲池通过输液泵与液相离子汞反应箱相连，所述液相离子汞反应箱与澄清池相通。在液相离子汞反应箱中，脱硫脱汞废水中残留的液相二价离子汞 Hg^{2+} 可完全转化为硫化汞 HgS 沉淀，再通过重力沉降，将硫化汞 HgS 沉淀从脱硫脱汞废水中分离出来，得到脱汞副产品，同时排出符合排放标准的脱硫脱汞废水，实现脱硫脱汞产物的无害化和资源化利用。

与现有技术相比，本发明具有如下优点：

其一，本发明将烟气脱硫脱汞工艺和装置有机地组合成一个完整的工艺体系，既简化了工艺流程、简化了系统结构，减小了设备占地面积，又大幅降低了设备的投资和运行费用。

其二，本发明采用两级烟气氧化工艺，用于初级氧化的紫外线已将 80% 左右的单质汞 Hg^0 氧化为二价离子汞 Hg^{2+} ，这样大幅减少了深度氧化所需卤素类氧化剂的量，避免了引入过量卤素类氧化剂而造成烟道腐蚀的难题，也有效控制了由于卤素类氧化剂过量而造成的二次污染。同时两级氧化程序可以确保烟气中的单质汞 Hg^0 完全转化成二价离子汞 Hg^{2+} ，进而大幅提高脱硫系统的除汞效率。

其三，本发明通过向石灰石—石膏湿法脱硫工艺的钙基吸收剂浆液中注入液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂，有效抑制了液相二价离子汞 Hg^{2+} 的还原释放，同时将捕集下来的汞转化为低毒稳定的化合物硫化汞 HgS ，既极大地提高了整个系统的脱汞效率，又有效地抑制汞的二次污染。

其三，本发明的脱硫脱汞副产品为石膏和硫化汞，可实现脱硫脱汞副产物无害化和资源化利用。

综上所述,本发明具有投资小、能耗低、工艺系统简单、运行成本低、吸收剂利用率高、运行可靠性高等特点,其不仅能有效抑制汞及氧化剂的一次污染和二次污染,而且可大幅提高石灰石-石膏湿法脱硫工艺的脱硫脱汞效率,其脱硫效率可达95%以上,脱汞效率可达90%以上,经过处理的烟气完全符合燃煤烟气污染物排放的国家标准。

附图说明

附图作为一种基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞系统的结构示意图。

具体实施方式

以下针对一台燃煤锅炉机组,结合附图对本发明作进一步的详细描述:

图中所示的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞系统,由紫外线照射器3、静电除尘器5和氧化剂喷射装置6等设备及其连接烟道构成的两级烟气氧化系统;由烟气换热器7、反应吸收塔8、引风机9和烟囱10等设备及其连接烟道构成的烟气脱硫脱汞系统;由石膏旋流器14、石膏脱水器13和脱硫废水旋流器11等设备及其连接管线构成脱硫副产物石膏处理系统;由废水缓冲池19、液相离子汞反应箱20、澄清池21等设备及其连接管线构成硫化汞 HgS 沉淀处理系统。

紫外线照射器3采用波长为253.7nm紫外线发射装置,布置在燃煤锅炉机组1的省煤器2和空气预热器4之间的烟道上,该处的烟气温度比较容易控制在536~662℃的范围内,这也是单质汞 Hg^0 与二氧化硫和氧气发生氧化反应的最佳温度范围。空气预热器4的出口与静电除尘器5的进口相连,静电除尘器5的出口与氧化剂喷射装置6的进口相连,氧化剂喷射装置6采用带有隔栅的雾化喷射器,可根据烟道截面大小具体设置若干根母管和支管,以及支管上雾化喷嘴的数量,氧化剂喷射装置6的出口通过烟气换热器7与反应吸收塔8的进口相连。氧化剂喷射装置6与反应吸收塔8之间的烟道内壁上衬防腐材料。

反应吸收塔8为筒形结构,自下而上依次设有底部浆池区、下部烟气输入区、中部吸收剂喷淋区、以及上部烟气除雾区。其中:

反应吸收塔 8 的底部浆池区连接有石灰石浆液补给装置 17 和空气给进装置 18。反应吸收塔 8 的下部烟气输入区设置有烟气进口。反应吸收塔 8 的中部吸收剂喷淋区布置有石灰石浆液喷淋层 82。反应吸收塔 8 的上部烟气除雾区布置有除雾器 83, 除雾器 83 采用组合除雾装置, 由上、下层除雾滤网和位于上、下层除雾滤网之间的清洗喷淋部件构成, 可以完全有效地将烟气中所含有的水份分离出来。反应吸收塔 8 的顶部烟气出口通过烟气换热器 7、引风机 9 与烟囱 10 相连, 反应吸收塔 8 的底部浆池区与石灰石浆液喷淋层 82 之间通过外置的浆液循环泵 16 相连, 以确保石灰石吸收剂浆液不间断循环。

为了改善反应吸收塔 8 内烟气与石灰石浆液的反应条件, 在石灰石浆液喷淋层 82 下方还设置有烟气均匀装置 81, 烟气均匀装置 81 呈托盘状结构, 其盘面上均匀分布有许多便于石灰石浆液滞留和穿过的通孔。这样设计, 一方面在烟气向上穿越多孔托盘时, 可使烟气在反应吸收塔 8 内的横截面上分布趋于均匀, 从而加大烟气中的二氧化硫和气相二价离子汞 Hg^{2+} 与石灰石浆液的接触面, 大大提高石灰石浆液与烟气的反应速率; 另一方面从石灰石浆液喷淋层 82 中向上喷出的石灰石浆液, 在回落至多孔托盘时, 在其上形成一定厚度的浆液层, 此浆液层在向上烟气流体的穿射作用下, 产生剧烈的鼓泡现象, 不仅可延长烟气与石灰石浆液的接触时间, 提高整个装置的脱硫脱汞效率, 而且可有效除去一部分飞灰, 进而提高整个系统的除尘效率。石灰石浆液喷淋层 82 与烟气均匀装置 81 之间的距离设计在 0.8~1.5m 之间, 该间距不需增加任何辅助支架就能方便地对石灰石浆液喷淋层 82 进行常规的安装拆卸和维护。

反应吸收塔 8 底部的排浆口通过排浆泵 15 与石膏旋流器 14 的进口相连, 石膏旋流器 14 的下溢流口与石膏脱水器 13 相连; 石膏旋流器 14 的上溢流口与脱硫废水旋流器 11 相连。脱硫废水旋流器 11 的下溢流口与废水缓冲池 19 相连, 废水缓冲池 19 通过输液泵 20 与液相离子汞反应箱 21 相连, 液相离子汞反应箱 21 与澄清池 22 相通; 脱硫废水旋流器 11 的上溢流口与滤液箱 12 相连。

本发明的基于两级氧化反应的湿法烟气脱硫脱汞工艺过程是这样的:

首先, 从燃煤锅炉机组 1 生产的高温烟气通过省煤器 2 进入到

紫外线照射器 3 中，控制烟气的温度在 536~662℃ 的范围内，紫外线照射器 3 发射出波长为 253.7nm 的紫外线，均匀照射烟气，使烟气中 80% 以上的单质汞 Hg^0 与二氧化硫和氧气发生充分的氧化反应，生成固相汞化合物硫酸亚汞和氧化汞，实现烟气的初级氧化。

其次，被初级氧化的烟气通过空气预热器 4 进入到静电除尘器 5 中，烟气中所含有的大部分粉尘和颗粒态固相汞化合物被静电除尘器 5 脱除。

再次，烟气从静电除尘器 5 的出口流出，进入到氧化剂喷射装置 6 中，控制烟气的温度在 110~130℃ 的范围内，氧化剂喷射装置 6 向烟气喷入适量的氯气 Cl_2 ，其喷射量与烟气中残存的单质汞 Hg^0 的化学计量比为 100:1，使烟气中残存的单质汞 Hg^0 与氯气 Cl_2 发生充分的氧化反应，生成易于脱除的气相二价离子汞 Hg^{2+} ，实现烟气的深度氧化。通过上述两级氧化，可使烟气中的单质汞 Hg^0 完全转化为气相二价离子汞 Hg^{2+} 。

然后，经过两级氧化的烟气通过烟气换热器 7 进入到反应吸收塔 8 中，与从石灰石浆液喷淋层 82 喷出的石灰石浆液逆向接触，发生激烈的气液两相反应，使烟气中的二氧化硫 SO_2 转化成亚硫酸钙，同时将烟气中的气相二价离子汞 Hg^{2+} 转化成液相二价离子汞 Hg^{2+} 。烟气中过量的氯气 Cl_2 也会与石灰石浆液发生反应生成氯化钙。与此同时，在石灰石浆液补给装置 17 中添加液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂，液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂采用硫氢化钠 NaHS ，使液相二价离子汞 Hg^{2+} 转化为稳定的硫化汞 HgS 沉淀，防止液相二价离子汞 Hg^{2+} 还原释放成单质汞 Hg^0 。

再后，经过脱硫脱汞反应的石灰石浆液被空气给进装置 18 喷射出的氧气强制氧化，其中的亚硫酸钙转化成硫酸钙，含硫酸钙的浆液从反应吸收塔 8 底部的排浆口输出，由排浆泵 15 送至石膏旋流器 14，石膏旋流器 14 的下溢流进入到石膏脱水器 13 中进行处理，最终得到脱硫脱汞副产品石膏。石膏旋流器 14 的上溢流进入到脱硫废水旋流器 11 中再次旋流，脱硫废水旋流器 11 的上溢流送入滤液箱 12 中，经过滤后送回反应吸收塔 8 循环利用。脱硫废水旋流器 11 的下溢流则进入废水缓冲池 19 中，废水缓冲池 19 中的废水再通过输液泵 20 送至液相离子汞反应箱 21。在液相离子汞反应箱 21 中添加

有助凝剂和液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂，助凝剂采用聚乙酰胺，液相二价离子汞 Hg^{2+} 稳定剂则采用硫化钠 Na_2S 或有机硫，废水中残留的液相二价离子汞 Hg^{2+} 在此可完全转化为稳定低毒的硫化汞 HgS 沉淀。从液相离子汞反应箱 21 排出的废水流进澄清池 22，利用重力沉降作用得到脱汞副产品硫化汞 HgS ，而达到排放标准的脱硫脱汞工艺废水由澄清池 22 上部溢水口排出。

最后，经过脱硫脱汞处理的烟气进入反应吸收塔 8 上部的除雾器 83 中，脱除烟气中所携带的液滴，所分离出的洁净烟气由顶部烟气出口排出，经过烟气换热器 7 将温度升到 80°C 左右，再由引风机 9 抽送至烟囱 10。

