

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

B01D 51/02 (2006.01)

B01D 53/78 (2006.01)

B01D 47/06 (2006.01)



# [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200710133987.4

[45] 授权公告日 2010年3月17日

[11] 授权公告号 CN 100594051C

[22] 申请日 2007.10.26

[21] 申请号 200710133987.4

[73] 专利权人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市四牌楼2号

[72] 发明人 杨林军 张霞 颜金培 沈湘林

[56] 参考文献

CN1294938A 2001.5.16

US6284022B1 2001.9.4

审查员 王卫刚

[74] 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司

代理人 陆志斌

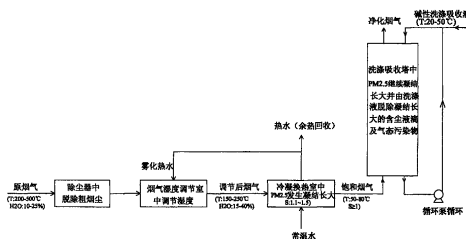
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

## [54] 发明名称

应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和 气态污染物的方法及装置

## [57] 摘要

本发明涉及一种应用蒸汽相变协同脱除高温高湿烟气中  $PM_{2.5}$  和 气态污染物的方法及装置，它由除尘器、烟气湿度调节室、冷凝换热器、洗涤吸收塔组成；其方法于烟气经除尘器脱除粗烟尘后进入烟气湿度调节室，喷入雾化热水调节烟气含湿量；经湿度调节的烟气引入冷凝换热器达到过饱和，过饱和水汽以  $PM_{2.5}$  为凝结核发生相变，使  $PM_{2.5}$  粒度增大，然后进入洗涤吸收塔，在塔内烟气与中低温碱性洗涤吸收液逆流接触，并继续发生以  $PM_{2.5}$  为凝结核的蒸汽相变过程，由碱性洗涤吸收液脱除凝结核大的含尘液滴和气态污染物。本发明结合高温高湿烟气特点，应用蒸汽相变原理促使  $PM_{2.5}$  凝结核长大，不仅可协同脱除  $PM_{2.5}$  和 气态污染物，还可回收水蒸汽冷凝放出的汽化潜热及烟气降温显热。



1. 一种应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物的方法, 其特征在于高温高湿烟气经除尘器脱除粒径大于  $2.5\ \mu\text{m}$  的粗烟尘后进入烟气湿度调节室, 喷入雾化热水, 利用高温烟气使雾化水蒸发, 提高烟气含湿量, 经湿度调节的烟气引入冷凝换热器, 以温水为热交换媒质, 使烟气达到过饱和态, 过饱和水汽以  $PM_{2.5}$  微粒为凝结核发生相变, 使  $PM_{2.5}$  微粒粒度增大; 经冷凝换热器的烟气由洗涤吸收塔下部烟气进口进入塔内, 与中低温碱性洗涤吸收液逆流接触, 烟气被增湿冷却, 继续发生以  $PM_{2.5}$  为凝结核的蒸汽相变过程, 由碱性洗涤吸收液和除雾器脱除凝结长大的含尘液滴和气态污染物。

2. 根据权利要求 1 所述的应用蒸汽相变协同脱除  $PM_2$ , 和气态污染物的方法, 其特征在于所述高温高湿烟气指燃油锅炉、天然气锅炉及垃圾、污泥固体废弃物焚烧产生的烟气, 烟气中水蒸汽含量为 10~25%, 温度为 200~500℃, 气态污染物为酸性气态污染物。

3. 根据权利要求 1 所述的应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物的方法, 其特征在于所述雾化热水来自冷凝换热器, 雾化热水的粒径为 20~30  $\mu\text{m}$ , 经调节后烟气中水蒸汽含量增至 15~40%, 温度 150~250℃。

4. 根据权利要求 1 所述的应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物的方法, 其特征在于所述冷凝换热器中烟气过饱和度控制在 1.1~1.5, 以主要发生  $PM_{2.5}$  微粒为凝结核的异质核化长大过程。

5. 根据权利要求 1 所述的应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物的方法, 其特征在于所述洗涤吸收塔进口烟气为饱和或过饱和烟气, 烟气温度 50~80℃, 洗涤吸收液为碱性溶液, 液相进口温度为 20~50℃, 比进口烟温低 30~60℃。

6. 根据权利要求 1 所述的应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物的方法, 其特征在于所述碱性溶液为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液、 $\text{CaCO}_3$  溶液、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液、 $\text{NaOH}$  溶液或氨水。

7. 一种实施权利要求 1 所述的应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物方法的装置, 其特征在于该装置包括除尘器(1)、烟气湿度调节室(2)、冷凝换热器(4)和洗涤吸收塔(5), 烟气湿度调节室(2)设置于除尘器(1)烟气出口和冷凝换热器

器(4)烟气进口之间，冷凝换热器(4)烟气出口与洗涤吸收塔(5)烟气进口相连通，烟气湿度调节室(2)内设有雾化水喷嘴(3)，洗涤吸收塔(5)顶部设有洗涤吸收液喷嘴(6)，洗涤吸收液喷嘴上方设有除雾器(7)，洗涤吸收液喷嘴(6)通过管道与设在洗涤吸收塔底的循环泵相连。

8. 根据权利要求7所述的装置，其特征在于以具有增进相变效果和防腐双重功效的耐蚀低表面能材料作冷凝换热器内壁面或壁面衬里涂料，所述涂料为聚四氟乙烯。

9. 根据权利要求7所述的装置，其特征在于所述除雾器(7)为丝网除雾器、挡板除雾器或旋流板除雾器。

10. 根据权利要求7所述的装置，其特征在于所述洗涤吸收塔为喷淋塔、湍球塔、填料塔、旋流板塔或筛板塔。

## 应用蒸汽相变协同脱除 PM<sub>2.5</sub> 和气态污染物的方法及装置

### 一、技术领域

本发明属于烟道气中 PM<sub>2.5</sub> 微粒及气态污染物的脱除技术领域，特别涉及一种应用蒸汽相变原理协同脱除高温高湿烟气中 PM<sub>2.5</sub> 和气态污染物的方法及装置。

### 二、背景技术

可吸入颗粒物是目前我国城市大气环境的首要污染物，尤其是其中空气动力学直径小于 2.5 $\mu\text{m}$  的 PM<sub>2.5</sub> 污染问题十分严重，主要原因在于 PM<sub>2.5</sub> 微粒比表面积大、易富集各种重金属及化学致癌物质，而常规除尘技术对其难以有效捕集，造成大量 PM<sub>2.5</sub> 排入大气环境。燃烧是引起大气环境中 PM<sub>2.5</sub> 含量增加的主要原因，控制燃烧源 PM<sub>2.5</sub> 排放是迫切需要解决的关键问题，技术发表的主要途径是在除尘设备前设置预处理措施，使其通过物理或化学作用长大成较大颗粒后加以清除，其中应用过饱和水汽在 PM<sub>2.5</sub> 微粒表面核化凝结的特性是促使 PM<sub>2.5</sub> 粒度增大的重要措施，特别适合于高温高湿烟气环境。目前，燃油锅炉、天然气锅炉、焚烧法处理固体废弃物（如垃圾焚烧发电、污泥的焚烧处理等）已越来越普及；因油、天然气燃料中氢元素含量高，垃圾、污泥等固体废物富含水分，导致燃烧产生的烟气中水汽含量高，如天然气锅炉烟气中水蒸汽含量为 15~19%（体积百分含量，下同），燃油锅炉烟气中水蒸汽含量为 10~15%，垃圾焚烧烟气中水汽含量可高达 20%以上；同时，排烟温度大多在 200 $^{\circ}\text{C}$  以上。鉴于燃油、天然气锅炉烟气中水蒸汽含量及排烟温度高，国外常设置冷凝换热器，回收利用烟气中水蒸汽冷凝时放出的汽化潜热及烟气降温的显热，其目的是回收烟气热量，提高锅炉热效率，不属于 PM<sub>2.5</sub> 的控制技术领域。燃油、天然气锅炉烟气中污染物主要有烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等，因烟尘浓度低，尚未引起足够重视，气态污染物的脱除主要有湿法、干法，虽烟尘总质量浓度低于相应的燃煤烟气，但烟尘粒度细小，烟气中 PM<sub>2.5</sub> 浓度与燃煤烟气相当，且富含有机组分，对环境危害更大。垃圾、污泥等固体废物焚烧烟气中污染物主要有烟尘、重金属及 SO<sub>2</sub>、HCl、HF、NO<sub>x</sub> 等酸性气态污染物，烟尘的去除主要利用布袋除尘器、静电除尘器，虽除尘效率可高于 99%，但对于 PM<sub>2.5</sub> 的捕集率不高，SO<sub>2</sub>、HCl、HF 等气态污染物的去除主要有湿法、干法、半干法三种，重金属如 Cr、Cd、Ni、Pb、Se 等主要富集于细颗粒中，特别是 PM<sub>2.5</sub> 中，只有除掉烟气中的细颗粒，才能有效脱除

重金属。目前，针对上述排放源，尚未有效的  $PM_{2.5}$  脱除技术及协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物的技术。

### 三、发明内容

本发明的目的是针对燃油锅炉、天然气锅炉及垃圾、污泥等固体废弃物焚烧烟气中水蒸汽含量和排烟温度高的特点，提供一种应用蒸汽相变原理协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物的方法及装置。

本发明的技术解决方案为：一种应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物的方法，步骤为：

(1)  $PM_{2.5}$  的凝并长大：高温高湿烟气（温度：200~500℃， $H_2O$ ：10~25%）经除尘器脱除粒径 $\geq 2.5\mu m$ 的粗烟尘后，进入烟气湿度调节室，喷入雾化热水，利用高温烟气使雾化水蒸发，烟气中水汽含量增至15~40%，调节湿度后的烟气进入冷凝换热器，水汽达到过饱和，过饱和水汽以  $PM_{2.5}$  微粒为凝结核发生相变，使  $PM_{2.5}$  微粒粒度增大、质量增加；

(2) 凝结长大含尘液滴及气态污染物的脱除：经上步处理后，饱和或过饱和烟气由冷凝换热器进入洗涤吸收塔，与中低温碱性洗涤吸收液逆流接触，一方面，烟气被增湿冷却，过饱和度进一步增大，继续发生以  $PM_{2.5}$  为凝结核的蒸汽相变过程，同时由碱性洗涤吸收液和高效除雾器脱除凝结长大的含尘液滴及其气态污染物。

一种应用蒸汽相变实现协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物方法的装置，由除尘器、烟气湿度调节室、冷凝换热器、洗涤吸收塔组成，烟气湿度调节室置于除尘器烟气出口和冷凝换热器烟气进口之间，内置雾化水喷嘴，冷凝换热器烟气出口与洗涤吸收塔烟气进口相连通，以具有增进相变效果和防腐双重功效的耐蚀低表面能材料作冷凝换热器内壁面或壁面衬里、涂料；洗涤吸收塔为喷淋塔、湍球塔、填料塔或旋流板塔、筛板塔等板式塔，顶部设有高效除雾器，如丝网除雾器、挡板除雾器、旋流板除雾器，优选丝网除雾器。本发明中的冷凝换热器主要作为使  $PM_{2.5}$  凝结长大的预处理设备，其作用相当于核化凝结室，同时，兼作烟气余热回收设备，以回收利用烟气中水蒸汽冷凝放出的汽化潜热及烟气降温的显热。

根据本发明，应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物的方法为：高温高湿含尘烟气经除尘器（如布袋除尘器、静电除尘器）脱除粒径 $\geq 2.5\mu m$ 的粗烟尘后进入烟气湿度调节室，喷入粒径为20~30 $\mu m$ 的微细热水雾，利用烟气热量使水雾化汽化，烟气中水蒸汽含量增至15~40%；经湿度调节的烟气进入冷凝换热器，以常温水作热交换介质，使烟气中水蒸汽达到过饱和态，过饱和水汽在  $PM_{2.5}$  微粒表面发生核化凝结，使  $PM_{2.5}$  粒度增大、质量增加，热交换产生的热水一部分供烟气湿度调节室作雾化水水源，其余回收利用；经冷凝换热器的饱和或过饱和烟

气从洗涤吸收塔底部烟气进口进入塔内，与中低温碱性洗涤吸收液逆流接触，发生强烈的传热传质过程；一方面，烟气被增湿冷却，过饱和度进一步增大，继续发生以  $PM_{2.5}$  微粒为凝结核的蒸汽相变过程，同时由碱性洗涤吸收液及高效除雾器脱除凝结长大的含尘液滴及气态污染物。

高温高湿烟气指燃油锅炉、天然气锅炉、垃圾、污泥等固体废弃物焚烧产生的烟气，烟气中水蒸汽含量在 10~25%以上，排烟温度在 200~500℃以上，气态污染物主要指  $SO_2$ 、HCl、HF、 $NO_x$  等酸性气态污染物，洗涤吸收液指  $Ca(OH)_2$ 、 $CaCO_3$ 、 $Na_2CO_3$ 、NaOH、氨水等碱性溶液，溶液中碱性吸收剂的重量百分比浓度为 0.5-20%。

洗涤吸收塔进口烟气温度 50~80℃，烟气中水蒸气处于饱和或过饱和状态（过饱和度  $S \geq 1$ ），进口洗涤吸收液温度为 20~50℃，比进口烟温低 30~60℃，以实现烟气和洗涤吸收液逆流接触过程中可继续发生水汽在  $PM_{2.5}$  微粒表面的核化凝结过程，使  $PM_{2.5}$  粒度进一步增大，操作液气比控制在 1~5L/Nm<sup>3</sup>，冷凝换热器内烟气过饱和度控制在 1.1~1.5，以主要发生  $PM_{2.5}$  为凝结核的异质核化过程，减弱均质核化现象。

本发明的有益效果为：利用过饱和水汽在微粒表面核化凝结是促使其粒度增大的重要措施，但需首先建立过饱和水汽环境，而单纯依靠添加蒸汽或冷却手段使烟气达到过饱和能耗过高，只有针对烟气原有水蒸气含量及烟温较高的过程才有实用价值。本发明针对燃油及天然气锅炉、垃圾、污泥等固体废弃物焚烧烟气中水蒸气含量及排烟温度高的特点（水蒸气含量在 10~25%以上，排烟温度 200~500℃以上），在可同时实现除尘和吸收气态污染物的塔设备前设置烟气湿度调节室和冷凝换热器，于烟气湿度调节室中喷入雾化热水，利用高温烟气使雾化水蒸发，提高烟气含湿量，热水取自冷凝换热器，无需额外消耗能量；以常温水作热交换介质，使烟气在冷凝换热器中达到过饱和态，利用过饱和水汽在  $PM_{2.5}$  微粒表面核化凝结促使  $PM_{2.5}$  凝并长大，同时还可回收烟气中水蒸气冷凝放出的汽化潜热及烟气降温显热，实现促使  $PM_{2.5}$  凝并长大和余热回收双重功效；以耐蚀的低表面能材料作冷凝换热器内壁或壁面衬里、涂料，一方面可促进水汽在  $PM_{2.5}$  微粒表面凝结而抑制其在冷凝换热器壁面凝结，进而增进相变效果，同时还可解决因  $SO_3$ 、HCl 等酸性污染物结露而导致的腐蚀问题。经冷凝换热器的饱和烟气进入洗涤吸收塔，通过合理调节进口烟气和洗涤吸收液温差，使塔内可继续发生  $PM_{2.5}$  凝结长大过程，进而提高  $PM_{2.5}$  脱除效果，并由碱性洗涤液脱除凝结长大的含尘液滴及气态污染物。本发明工艺简单，只需在现有气态污染物湿法脱除装置-塔设备前增设烟气湿度调节室和冷凝换热器，即可实现  $PM_{2.5}$  和气态污染物的协同高效脱除，并可脱除富集于细颗粒中的重金属，可广泛应用于各类高温高湿烟气中污染物的治理。

#### 四、附图说明

图 1 是本发明的装置结构示意图；

图 2 是本发明的工艺方法流程框图。

图中：1—除尘器；2—烟气湿度调节室；3—雾化水喷嘴；4—冷凝换热器；  
5—洗涤吸收塔；6—洗涤吸收液喷嘴；7—高效除雾器；8—循环泵

#### 五、具体实施方式

如图 1 所示，本发明的应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物方法的装置，主要由除尘器 1、烟气湿度调节室 2、冷凝换热器 4、洗涤吸收塔 5 组成；烟气湿度调节室 2 置于除尘器 1 烟气出口与冷凝换热器 4 烟气进口之间，湿度调节室 2 尺寸根据喷入的雾化水滴完全蒸发确定，内设雾化水喷嘴 3；冷凝换热器 4 烟气出口与洗涤吸收塔 5 烟气进口相连通，以具有增进相变效果和防腐双重功效的耐蚀低表面能材料作冷凝换热器 4 内壁面或壁面衬里、涂料；洗涤吸收塔 5 可采用旋流板塔、筛板塔等板式塔，以及填料塔、湍球塔、喷淋塔等，塔内设置高效除雾器 7 和洗涤吸收液喷嘴 6，除雾器 7 可采用丝网除雾器、挡板除雾器、旋流板除雾器，优选丝网除雾器。

如图 2 所示，应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物的方法为：高温高湿烟气（水蒸气含量 10~25%，温度：200~500℃）经除尘器 1 脱除粒径 $\geq 2.5\mu m$ 的粗烟尘后，进入烟气湿度调节室 2，经雾化水喷嘴 3 喷入粒径为 20~30 $\mu m$ 的微细热水雾，利用烟气热量使微细水雾在湿度调节室 2 内完全蒸发，雾化水添加量由烟气经调节后水蒸气含量由 10~25%增至 15~40%确定；经湿度调节的高湿烟气进入冷凝换热器 4，以常温水作热交换介质，使烟气达到过饱和态，通过调节冷却水量控制冷凝换热器 4 中烟气过饱和度在 1.1~1.5，以保证  $PM_{2.5}$  凝结长大后的含尘液滴粒径在 3~5 $\mu m$  以上，同时应减弱均质核化现象，使冷凝换热器 4 内主要发生以  $PM_{2.5}$  微粒为凝结核的异质核化过程；热交换产生的热水一部分供烟气湿度调节室 2 作雾化水水源，其余回收利用。经冷凝换热器 4 的饱和或过饱和烟气由洗涤吸收塔 5 底部烟气进口进入塔内，与经循环泵 8、洗涤吸收液喷嘴 6 喷出的中低温  $Ca(OH)_2$ 、 $CaCO_3$ 、 $NaOH$ 、 $Na_2CO_3$  或氨水等碱性溶液逆流接触，洗涤吸收塔进口烟气温度控制在 50~80℃，呈饱和或过饱和态 ( $S\geq 1$ )， $Ca(OH)_2$ 、 $NaOH$ 、 $Na_2CO_3$  或氨水等碱性溶液的进口温度控制在 20~50℃，比进口烟温低 30~60℃，使饱和烟气与洗涤吸收液逆流接触过程中被增湿冷却，过饱和度进一步增大，继续发生以  $PM_{2.5}$  为凝结核的蒸汽相变过程，操作液气比控制在 1~5L/Nm<sup>3</sup>；凝结长大的含尘液滴和  $SO_2$ 、 $HCl$ 、 $HF$  等酸性气态污染物由  $Ca(OH)_2$ 、 $CaCO_3$ 、 $NaOH$ 、 $Na_2CO_3$ 、或氨水等碱性洗涤吸收液及高效除雾器脱除，净化烟气从塔顶烟气出口排出。

以下结合实施例对本发明作进一步说明，但本发明不只限于此实施例。

### 实施例 1

烟气由全自动燃油锅炉产生，烟气量为  $65\text{Nm}^3/\text{h}$ ，烟气中水蒸气含量为 12%，排烟温度  $282^\circ\text{C}$ ，烟尘浓度峰值粒径为  $0.07\mu\text{m}$ ，大部分在  $0.03\sim 0.5\mu\text{m}$  之间，烟气中  $\text{SO}_2$  浓度为  $624\text{mg}/\text{Nm}^3$ ；湿式洗涤塔采用塔径 150mm、塔高 1500mm 的喷淋塔，喷淋塔顶部安装丝网除雾器，洗涤吸收液为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  悬浮液。燃油锅炉产生的含尘烟气直接进入湿度调节室，由雾化喷嘴喷入温度  $70^\circ\text{C}$ 、粒径为  $20\sim 30\mu\text{m}$  的微细水雾，喷入量为每  $\text{Nm}^3$  烟气  $0.01\text{kg}$ ，经调节后，出口烟气水蒸气含量增至 24%，温度为  $235^\circ\text{C}$ ；然后进入内衬聚四氟乙烯的列管式冷凝换热器，通过调节冷却水量，冷凝换热器内烟气过饱和度控制在 1.2~1.3；洗涤吸收塔进口烟温为  $65^\circ\text{C}$ ，烟气中水蒸气处于饱和状态， $\text{Ca}(\text{OH})_2$  悬浮液进口温度为  $30^\circ\text{C}$ ，与烟气逆流接触，液气比  $2.5\text{L}/\text{Nm}^3$ 。经电称低压冲击器 ELPI 在线测试， $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度脱除效率为 82%，数浓度脱除效率为 67%，烟气脱硫效率为 83%。

### 实施例 2

除下述变化外，其余同实施例 1。

洗涤吸收塔采用旋流板塔，内置 3 块旋流板，顶部安装旋流板除雾器，洗涤吸收液为  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液，液气比  $3.5\text{L}/\text{Nm}^3$ ；经测试， $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度脱除效率为 86%，数浓度脱除效率为 72%，烟气脱硫效率为 89%。

### 实施例 3

烟气由垃圾焚烧产生，烟气量为  $70\text{Nm}^3/\text{h}$ ，烟气中水蒸气含量为 21%，温度  $243^\circ\text{C}$ ，烟气中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$  浓度分别为  $729\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、 $876\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、 $21\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，除尘器出口烟尘浓度峰值粒径为  $0.7\mu\text{m}$ ，数浓度为  $10^6$  个/ $\text{cm}^3$ ；洗涤吸收塔为塔径 150mm、塔高 1500mm 的旋流板塔，内置 3 块旋流板，顶部安装旋流板除雾器，洗涤吸收液为  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液。垃圾焚烧烟气经旋风除尘器脱除粗烟尘后，进入湿度调节室，由雾化喷嘴喷入温度  $65^\circ\text{C}$ 、粒径为  $20\sim 30\mu\text{m}$  的微细水雾，喷入量为每  $\text{Nm}^3$  烟气  $0.008\text{kg}$ ，经调节后，出口烟气中水蒸气含量增至 27%，温度为  $225^\circ\text{C}$ ，然后进入内衬聚四氟乙烯的列管式冷凝换热器，调节冷却水量控制冷凝换热器内烟气过饱和度在 1.2~1.3；洗涤吸收塔进口烟温为  $67^\circ\text{C}$ ，烟气中水蒸气处于饱和状态， $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液进口温度为  $30^\circ\text{C}$ ，液气比为  $3.5\text{L}/\text{Nm}^3$ ，与烟气逆流接触。经电称低压冲击器 ELPI 在线测试， $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度脱除效率为 90%，数浓度脱除率为 78%， $\text{SO}_2$  脱除率为 88%， $\text{HCl}$  脱除率为 92%， $\text{HF}$  脱除率为 91%。

实施例 4：高温高湿烟气经除尘器脱除粒径大于  $2.5\mu\text{m}$  的粗烟尘后进入烟气湿度调节室，喷入雾化热水，利用高温烟气使雾化水蒸发，提高烟气含湿量，经



湿度调节的烟气引入冷凝换热器，以常温水为热交换媒质，使烟气达到过饱和态，过饱和水汽以  $PM_{2.5}$  微粒为凝结核发生相变，使  $PM_{2.5}$  微粒粒度增大；经冷凝换热器的烟气由洗涤吸收塔下部烟气进口进入塔内，与中低温碱性洗涤吸收液逆流接触，烟气被增湿冷却，继续发生以  $PM_{2.5}$  为凝结核的蒸汽相变过程，由碱性洗涤吸收液和高效除雾器脱除凝结长大的含尘液滴和气态污染物。高温高湿烟气指燃油锅炉、天然气锅炉及垃圾、污泥等固体废弃物焚烧产生的烟气，烟气中水蒸汽含量为 10~25%，温度为 200~500℃，气态污染物为酸性气态污染物。雾化热水来自冷凝换热器，雾化热水的粒径为 20~30 $\mu m$ ，经调节后烟气中水蒸汽含量增至 15~40%，温度 150~250℃。冷凝换热器中烟气过饱和度控制在 1.1~1.5，以主要发生  $PM_{2.5}$  微粒为凝结核的异质核化长大过程。洗涤吸收塔进口烟气为饱和或过饱和烟气，烟气温度 50~80℃，洗涤吸收液为碱性溶液，吸收液进口温度为 20~50℃，比进口烟温低 30~60℃。碱性溶液为  $Ca(OH)_2$ 、 $CaCO_3$ 、 $Na_2CO_3$ 、 $NaOH$  或氨水，溶液中碱性物质的重量百分比浓度为 0.5-20%。

实施例 5：一种实施应用蒸汽相变协同脱除  $PM_{2.5}$  和气态污染物方法的装置，该装置包括除尘器 1、烟气湿度调节室 2、冷凝换热器 4 和洗涤吸收塔 5，烟气湿度调节室 2 设置于除尘器 1 烟气出口和冷凝换热器 4 烟气进口之间，冷凝换热器 4 烟气出口与洗涤吸收塔 5 烟气进口相连通，烟气湿度调节室 2 内设有雾化水喷嘴 3，洗涤吸收塔 5 内设有洗涤吸收液喷嘴 6，洗涤吸收液喷嘴上方设有高效除雾器 7，洗涤吸收液喷嘴 6 通过管道与设在洗涤吸收塔底的循环泵相连。以具有增进相变效果和防腐双重功效的耐蚀低表面能材料作冷凝换热器内壁面或壁面衬里、涂料，优选聚四氟乙烯。高效除雾器 7 为丝网除雾器、挡板除雾器或旋流板除雾器，优选丝网除雾器。洗涤吸收塔为喷淋塔、湍球塔、填料塔、旋流板塔或筛板塔。

#### 对比例 1

除下述变化外，其余同实施例 1。

冷凝换热器采用不锈钢列管式冷凝换热器，无聚四氟乙烯内衬；经测试， $PM_{2.5}$  质量浓度脱除率为 74%，数浓度脱除率为 57%，烟气脱硫效率为 83%。

#### 对比例 2

烟气由全自动燃油锅炉产生，烟气参数、洗涤吸收塔及吸收液同实施例 1，烟气不经湿度调节室和冷凝换热器预处理，直接进入洗涤吸收塔；经测试， $PM_{2.5}$  质量浓度脱除效率为 31%，数浓度脱除效率为 19%，烟气脱硫效率为 78%。

#### 对比例 3

烟气由全自动燃油锅炉产生，烟气参数、洗涤吸收塔及吸收液同实施例 1，烟气不经湿度调节室预处理，而是直接进入冷凝换热器，换热器内烟气过饱和度控制在 1.2~1.3，洗涤吸收塔进口烟温 48℃，烟气呈饱和态；经测试，PM<sub>2.5</sub> 质量浓度脱除率为 68%，数浓度脱除率为 51%，烟气脱硫效率为 85%。

对比例 4

烟气由垃圾焚烧产生，烟气参数、洗涤吸收塔及吸收液同实施例 2，烟气不经湿度调节室和冷凝换热器预处理，而是经旋风除尘器脱除粗烟尘后，直接进入洗涤吸收塔；经测试，PM<sub>2.5</sub> 质量浓度脱除效率为 38%，数浓度脱除率为 28%，SO<sub>2</sub> 脱除率为 83%，HCl 脱除率为 87%，HF 脱除率为 89%。

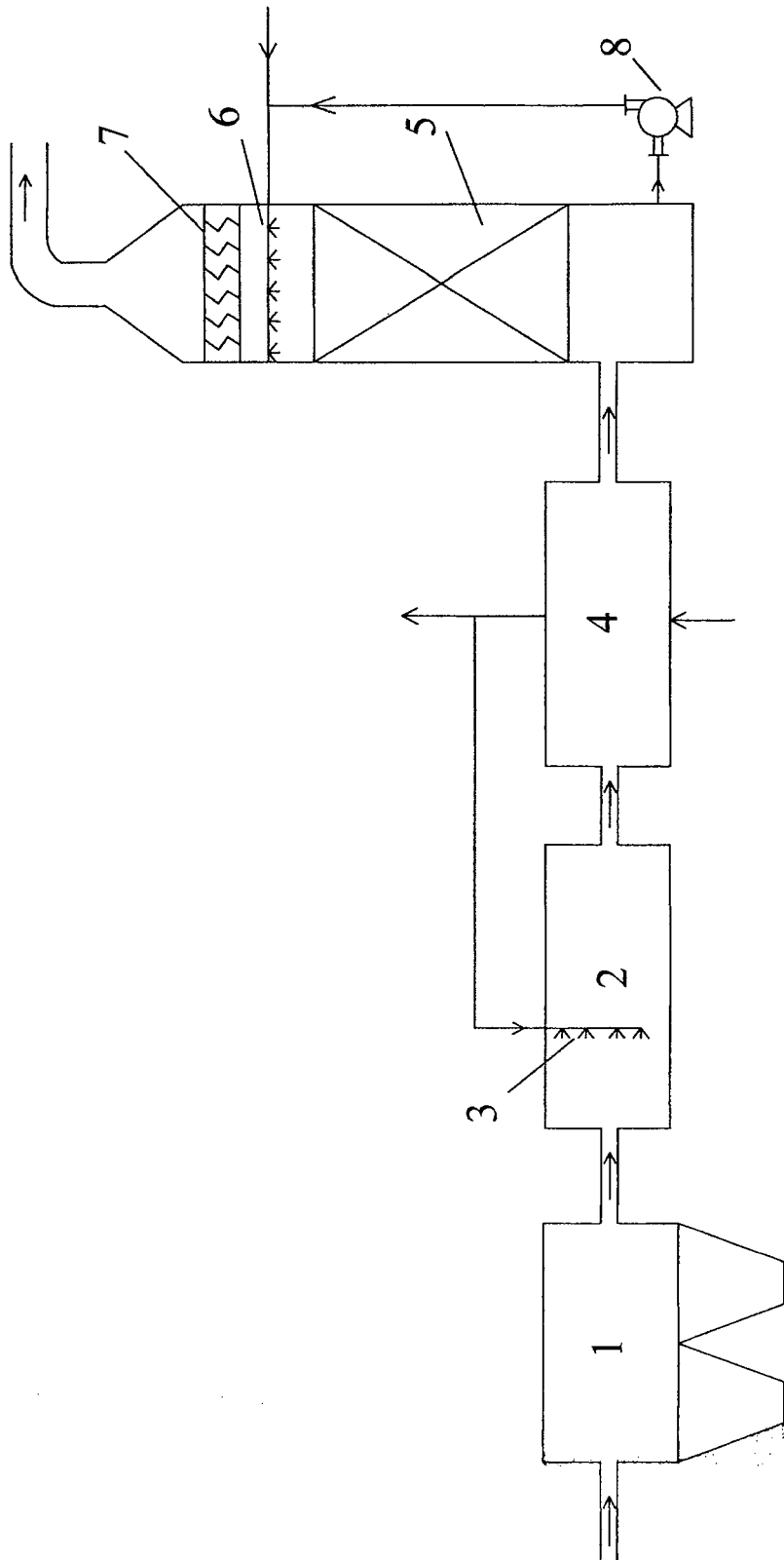


图1

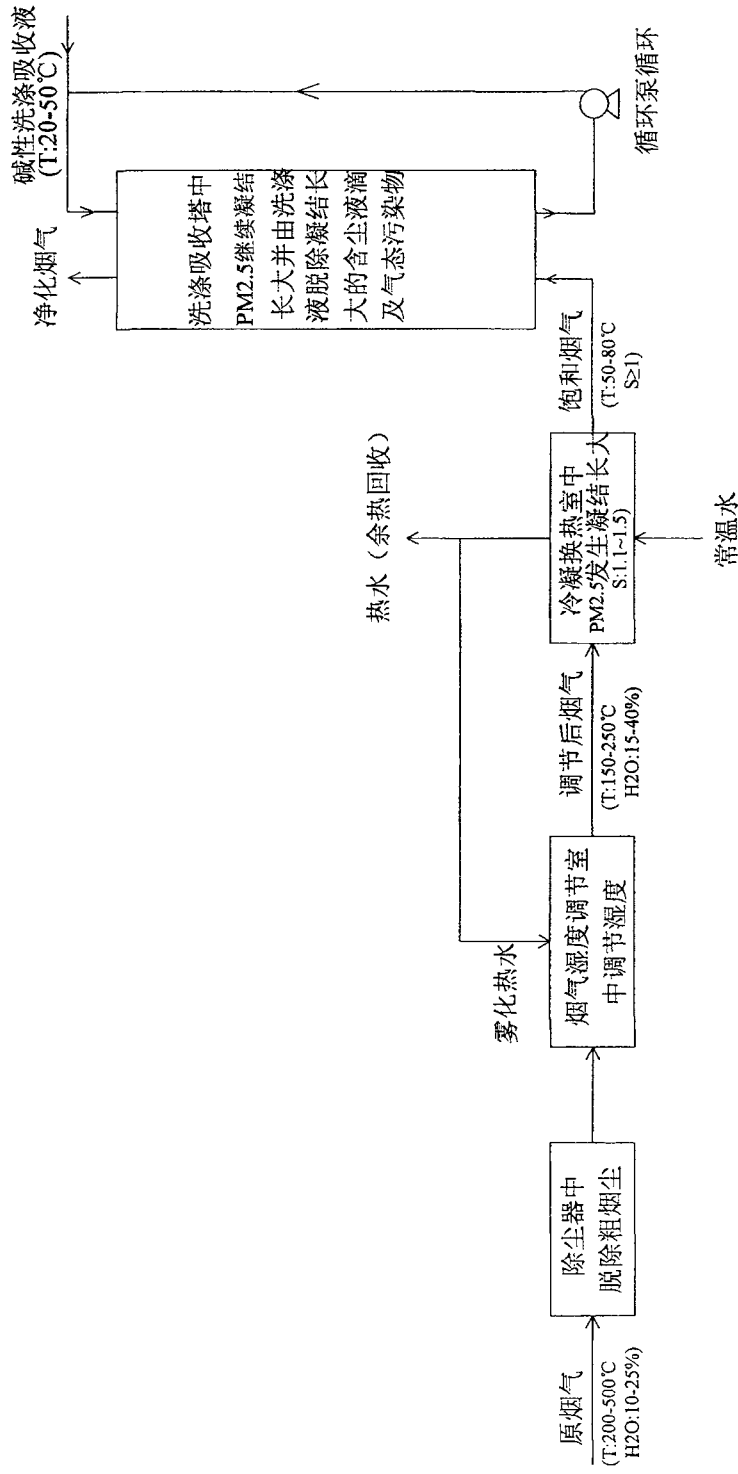


图2