



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101940871 A

(43) 申请公布日 2011. 01. 12

(21) 申请号 201010296492. 5

(22) 申请日 2010. 09. 29

(71) 申请人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市四牌楼 2 号

(72) 发明人 刘杨先 张军 盛昌栋 张永春

赵亮 丁启忠

(74) 专利代理机构 南京天翼专利代理有限责任

公司 32112

代理人 汤志武

(51) Int. Cl.

B01D 53/78 (2006. 01)

B01D 53/60 (2006. 01)

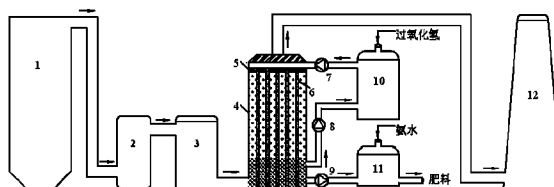
权利要求书 1 页 说明书 13 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统

(57) 摘要

一种基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统, 设有燃烧器、静电除尘器、换热器、喷淋塔、添液塔、烟囱以及分离塔构成的燃烧及排放系统, 燃烧器产生的烟气通入静电除尘器脱除烟气颗粒物后通入换热器进行冷却降温后通入喷淋塔, 喷淋塔内设有紫外灯管, 来自添液塔内的过氧化氢溶液由循环泵抽取并通过雾化喷嘴喷入喷淋塔内经紫外光激发分解过氧化氢, 产生强氧化性的羟基自由基 (·OH) 与烟气在喷淋塔内接触后发生气液吸收反应, 氧化脱除烟气中的 NO<sub>x</sub> 与 SO<sub>2</sub>, 经吸收洗涤后的烟气从喷淋塔顶部通入烟囱排放, 喷淋塔内生成的硫酸和硝酸溶液由循环泵抽入分离塔并与添加的氨水反应生成包括硫酸铵、硝酸铵在内的农业肥料。



1. 一种基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统,其特征在於:设有燃烧器、静电除尘器、换热器、喷淋塔、添液塔、烟囱以及分离塔构成的燃烧及排放系统,燃烧器产生的烟气通入静电除尘器脱除烟气颗粒物后通入换热器进行冷却降温后通入喷淋塔,喷淋塔内设有紫外灯管,来自添液塔内的过氧化氢溶液由循环泵抽取并通过雾化喷嘴喷入喷淋塔内经紫外光激发分解过氧化氢,产生强氧化性的羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )与烟气在喷淋塔内接触后发生气液吸收反应,氧化脱除烟气中的 $\text{NO}_x$ 与 $\text{SO}_2$ ,经吸收洗涤后的烟气从喷淋塔顶部通入烟囱排放,喷淋塔内生成的硫酸和硝酸溶液由第二循环泵抽入分离塔并与添加的氨水反应生成包括硫酸铵、硝酸铵在内的农业肥料。

2. 根据权利要求1所述基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统,其特征在於:喷淋塔内生成的部分硫酸和硝酸溶液还经过第三循环泵重新抽入添液塔循环利用以提高硫酸和硝酸溶液的浓度,抽取的循环溶液的体积占总溶液体积的比例在20-50%。

3. 根据权利要求1或2所述基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统,其特征在於:紫外光波长范围为120nm-360nm,紫外光强度需要保持在5W/L-80W/L,此处单位W/L是指喷淋塔内未安装紫外灯前以及未通入烟气和溶液前,整个喷淋塔空塔的单位体积的紫外光辐射功率,紫外灯管与喷淋塔底面垂直设置。

4. 根据权利要求3所述基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统,其特征在於:设置多根紫外灯管时,多根紫外灯管在喷淋塔底面上呈同心圆设置,相邻同心圆之间距离相同,取值为2cm-20cm,多根紫外灯管均布在不同直径的圆周上,沿同一直径线设置,各相邻两直径线之间的中心角相同,取值为10-45度,圆心处设有紫外灯管;雾化喷嘴设置在喷淋塔顶部且位于紫外灯管同心圆之间的同心圆上,设置在紫外灯管中心角内的直径线上。

5. 根据权利要求1或2或4所述基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统,其特征在於,反应参数的取值范围如下:静电除尘器脱除粒径大于 $5\mu\text{m}$ 的烟气颗粒物;烟气经换热器进行冷却降温后至 $5-60^\circ\text{C}$ 通入喷淋塔;喷入喷淋塔内的过氧化氢溶液的pH值0.5-8.0;过氧化氢溶液投加量为 $0.05\text{mol/L}-2.5\text{mol/L}$ ;过氧化氢溶液的浓度为 $0.05\text{mol/L}-2.5\text{mol/L}$ ;雾化喷嘴对过氧化氢溶液的雾化后粒径 $0.01\text{mm}-0.5\text{mm}$ ;喷淋塔内液气比 $2\text{L}/\text{m}^3-30\text{L}/\text{m}^3$ ;加入氨水的流量控制在进入分离塔内硫酸和硝酸混合溶液总流量的20-50%;烟气中的 $\text{NO}_x$ 初始浓度为5ppm-2500ppm, $\text{SO}_2$ 的初始浓度为5ppm-8000ppm,添加的氨水摩尔浓度按下式计算:

$$n(\text{NH}_3) = \frac{\eta_{\text{NO}} \cdot C_{\text{in}}(\text{NO}) \cdot Q_{\text{F}} \cdot t}{M_{\text{NO}}} + \frac{1}{2} \frac{\eta_{\text{SO}_2} \cdot C_{\text{in}}(\text{SO}_2) \cdot Q_{\text{F}} \cdot t}{M_{\text{SO}_2}}$$

式中, $n(\text{NH}_3)$ -添加氨水的摩尔浓度, $\text{mol/L}$ ;  $\eta_{\text{NO}}$ ,  $\eta_{\text{SO}_2}$ -分别为NO与 $\text{SO}_2$ 的脱除效率,%;  
 $C_{\text{in}}(\text{NO})$ ,  $C_{\text{in}}(\text{SO}_2)$ -分别为烟气中NO与 $\text{SO}_2$ 的入口初始浓度,ppm; $Q_{\text{F}}$ -烟气总流量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $M_{\text{NO}}$ ,  
 $M_{\text{SO}_2}$ -分别为NO与 $\text{SO}_2$ 的摩尔质量, $\text{g/mol}$ ;  $t$ -系统的运行时间,h。

## 一种基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及包括电厂锅炉、工业窑炉和垃圾焚烧炉等烟道气中的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放污染控制技术,尤其涉及一种基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统。

### 背景技术

[0002] 燃烧过程中产生的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  能够引起酸雨和光化学烟雾,给人类健康和生态环境带来了极大地危害,因此研发有效的脱硫脱硝方法是各国环保科技人员的重要任务之一。近些年来,尽管人们开发了大量的脱硫脱硝技术,但应用最为广泛的烟气脱硫脱硝技术主要为湿法石灰石-石膏法烟气脱硫技术 (Ca-WFGD) 和氨选择性催化还原法 ( $\text{NH}_3$ -SCR),两种工艺联合使用可实现同时脱硫脱硝,但两个系统简单叠加造成工艺流程和系统复杂,占地面积大,投资和运行成本高,而且产生的大量的石膏副产物市场销售前景不佳,造成后处理困难,难以在发展中国家大规模推广应用。

[0003] 湿法烟气脱硫脱硝技术是传统的烟气净化技术,具有初投资小和工艺流程简单等特点,但是传统的湿法同时脱硫脱硝工艺的研究进展一直相对缓慢,其主要原因就在于  $\text{NO}_x$  中含有 90% 以上难溶于水的  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}$  在室温下 ( $25^\circ\text{C}$ ) 的亨利常数仅为  $1.94 \times 10^{-8} \text{mol/L} \cdot \text{Pa}$ , 比  $\text{SO}_2$  低 3 个数量级。由双膜理论可知,  $\text{NO}$  必须首先由气态经传质和扩散过程转入液相,然后才能发生化学反应固定到吸收液中,  $\text{NO}$  的难溶特性使得其液相吸收的阻力大大增加,仅通过调控 pH 和温度的方法难以显著提高  $\text{NO}$  在液相的溶解度,这一特性造成了传统的湿法脱硫脱硝技术普遍存在脱硫效率高,但脱硝效率低的问题,实际上难以达到同时脱硫脱硝的目的,最终阻碍了其工业化应用。因此,寻找将  $\text{NO}$  快速转化为易溶形态并固定于吸收液中的有效途径是解决该问题的关键之一。

### 发明内容

[0004] 本发明公开了一种基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统,利用紫外光激发分解过氧化氢,并产生具有强氧化性的羟基自由基 ( $\cdot\text{OH}$ ) 氧化脱除烟气中的  $\text{NO}_x$  与  $\text{SO}_2$ , 反应产物为可资源化利用的硫酸与硝酸溶液,添加氨水后即可生成农业肥料,该系统具有工艺流程简单,无二次污染以及可实现一体化脱硫脱硝等优点。

[0005] 为实现以上目的,本发明采用的实施方案是:一种基于光化学高级氧化的同时脱硫脱硝系统,其特征在于:设有燃烧器、静电除尘器、换热器、喷淋塔、添液塔、烟囱以及分离塔构成的燃烧及排放系统,燃烧器产生的烟气通入静电除尘器脱除烟气颗粒物后通入换热器进行冷却降温后通入喷淋塔,喷淋塔内设有紫外灯管,来自添液塔内的过氧化氢溶液由循环泵抽取并通过雾化喷嘴喷入喷淋塔内经紫外光激发分解过氧化氢,产生强氧化性的羟基自由基 ( $\cdot\text{OH}$ ) 与烟气在喷淋塔内接触后发生气液吸收反应,氧化脱除烟气中的  $\text{NO}_x$  与  $\text{SO}_2$ , 经吸收洗涤后的烟气从喷淋塔顶部通入烟囱排放,喷淋塔内生成的硫酸和硝酸溶液由第二循环泵抽入分离塔并与添加的氨水反应生成包括硫酸铵、硝酸铵在内的农业肥料。

[0006] 所述喷淋塔内生成的部分硫酸和硝酸溶液还经过第三循环泵重新抽入添液塔

循环利用以提高硫酸和硝酸溶液的浓度,抽取的循环溶液的体积占总溶液体积的比例在 20-50%。

[0007] 所述紫外光波长范围为 120nm-360nm,紫外光强度需要保持在 5W/L-80W/L,此处单位 W/L 是指喷淋塔内未安装紫外灯前以及未通入烟气和溶液前,整个喷淋塔空塔的单位体积的紫外光辐射功率,紫外灯管与喷淋塔底面垂直设置。

[0008] 设置多根紫外灯管时,多根紫外灯管在喷淋塔底面上呈同心圆设置,相邻同心圆之间距离相同,取值为 2cm-20cm,多根紫外灯管均布在不同直径的圆周上,沿同一直径线设置,各相邻两直径线之间的中心角相同,取值为 10-45 度,圆心处设有紫外灯管;雾化喷嘴设置在喷淋塔顶部且位于紫外灯管同心圆之间的同心圆上,设置在紫外灯管中心角内的直径线上。

[0009] 脱硫脱硝反应参数的取值范围如下:静电除尘器脱除粒径大于 5 μ m 的烟气颗粒物;烟气经换热器进行冷却降温后至 5-60℃ 通入喷淋塔;喷入喷淋塔内的过氧化氢溶液的 pH 值 0.5-8.0;过氧化氢溶液投加量为 0.05mol/L-2.5mol/L;过氧化氢溶液的浓度为 0.05mol/L-2.5mol/L,雾化喷嘴对过氧化氢溶液的雾化后粒径 0.01mm-0.5mm;喷淋塔内液气比 2L/m<sup>3</sup>-30L/m<sup>3</sup>;加入氨水的流量控制在进入分离塔内硫酸和硝酸混合溶液总流量的 20-50%;烟气中的 NO<sub>x</sub> 初始浓度为 5ppm-2500ppm, SO<sub>2</sub> 的初始浓度为 5ppm-8000ppm。

[0010] 过氧化氢在紫外光照射下的反应机理:

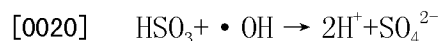
[0011] (1) 过氧化氢在紫外光照射下能够分解释放羟基自由基 (·OH):



[0013] (2) NO<sub>x</sub> 被氧化生成硝酸溶液:



[0018] (3) SO<sub>2</sub> 被氧化生成硫酸溶液:



[0023] 本发明的优点及显著效果:

[0024] (1) 本发明能够在在一个系统内实现同时脱硫脱硝,具有工艺流程简单可靠,占地面积小,初投资和运行费用低等优点。

[0025] (2) 与亚硫酸盐和尿素等还原法、钠基和钙基碱法以及高锰酸钾和次氯酸钠氧化法等现有的湿法同时脱硫脱硝工艺相比,由于·OH 具有高达 2.80eV 的氧化还原电势(仅次于氟的 2.87eV),具有极强的氧化能力。在 25℃ 时,·OH 与 NO 的反应速率常数高达 5.5×10<sup>14</sup> mol/L·s,能够快速将 NO 氧化为易溶于吸收液的 NO<sub>2</sub> 或者 HNO<sub>2</sub>,从而大大增加了 NO 由气相到液相的传质推动力,提高了 NO 的吸收速率,有效地克服了传统湿法工艺脱硫效率高但硝效率低的不足;

[0026] (3) 由于·OH 和过氧化氢均为洁净环保氧化剂,反产物为可资源化利用的硫酸和

硝酸溶液,整个脱除过程无二次污染,而高锰酸钾和次氯酸钠等传统氧化法会产生复杂的副产物,给后处理带来很大困难。

[0027] (4) 鉴于 $\cdot\text{OH}$ 的强氧化性和无选择性,该技术有同时脱除多种常见气相污染物,比如重金属元素, $\text{H}_2\text{S}$ 以及挥发性有机污染物(VOCs)的潜力,随着人们对环保要求的不断提高,这一潜力和优势将逐渐得到凸显,而现有的湿法同时脱硫脱硝工艺则缺乏进一步处理烟气多污染的开发潜力。

#### 附图说明

[0028] 图1是本发明系统流程图;

[0029] 图2.是本发明系统中紫外灯的安装布置横截面图;

[0030] 图3.是本发明系统中雾化喷嘴的安装布置横截面图。

#### 具体实施方式

[0031] 参看图1,燃烧器1产生的烟气通入静电除尘器2脱除烟气颗粒物后通入换热器3进行冷却降温后通入喷淋塔4,喷淋塔4内设有紫外灯管6,来自添液塔10内的过氧化氢溶液由循环泵7抽取并通过雾化喷嘴5喷入喷淋塔4内经紫外光激发分解过氧化氢,产生强氧化性的羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )与烟气在喷淋塔4内接触后发生气液吸收反应,氧化脱除烟气中的 $\text{NO}_x$ 与 $\text{SO}_2$ ,经吸收洗涤后的烟气从喷淋塔4顶部通入烟囱12排放,喷淋塔4内生成的硫酸和硝酸溶液由循环泵9抽入分离塔11并与添加的氨水反应生成包括硫酸铵、硝酸铵在内的农业肥料。

[0032] 由于燃烧器1流出的烟道气含有大量的颗粒物,如果直接进入喷淋塔4后会引引起紫外光的反射,导致喷淋塔4内紫外光的穿透率、辐照距离大幅度下降,进而降低了光能利用率。因此,喷淋塔4必须置于静电除尘器2之后,即只有经过静电除尘后的烟气方可进入喷淋塔4接受洗涤脱除,烟气中粒径大于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒物必须脱除。

[0033] 在烟气经过静电除尘之后,由于烟气的温度通常在 $200\text{--}400^\circ\text{C}$ 之间,烟气温度太高将会导致喷淋塔4内的溶液温度增加。随着溶液温度的增加,气体在溶液中的溶解度将会大大下降,污染物的脱除效率也会随之降低。此外,随着温度的增加,过氧化氢将会自分解为水和氧气,而不是分解为羟基自由基,这将使得过氧化氢的有效利用率大幅度降低,最终增加了应用成本。因此,在烟气流过静电除尘器2进入喷淋塔4之前,烟气还需经过热交换器3的冷却降温,待烟气温度降为 $5\text{--}60^\circ\text{C}$ 时方可进入喷淋塔4内参与气液吸收反应。

[0034] 紫外灯6套有石英套管,采用浸没式安装,紫外灯6主要是通过向环绕在周围的过氧化氢溶液辐射紫外光,并产生羟基自由基。此外,由光辐射原理可知,光垂直辐射到表面时光强度最大,因而为了能够最大限度地利用紫外光能,提高光辐射强度,紫外灯6需要与喷淋塔4底部表面保持垂直,且紫外灯6之间必须保持平行,以达到光能的最大化利用;喷淋塔4内安装紫外灯6后,塔内烟气流动阻力将会增加,从而增加了引风机的运行负荷。因此,紫外灯6在喷淋塔4内的布置密度不能太小,但如果紫外灯6布置密度太大,则会导致喷淋塔4的体积急剧增加,整个系统的占地面积也会随之增大,导致应用成本增大;此外,紫外灯6布置密度太小还会降低单位体积溶液的紫外光辐射强度,造成污染物脱除效果恶化。因此,紫外灯6之间的间距a和中心角b不宜太大也不宜太小,紫外灯间距和中心角的

最佳范围分别是 2cm-20cm 和 10-45 度,在满足以上间距和中心角的条件下,紫外灯 6 之间的间距 a 和中心角 b 还必须保持相同(图 2),若间距和中心角如果不相等则势必引起喷淋塔 4 内溶液的紫外光辐射的不均匀,进而导致喷淋塔 4 内的光化学反应速率差异较大,不利于污染物的脱除和光能的有效利用。紫外灯 6 辐照强度关系到光量子产率的大小,进而影响到羟基自由基的产率。紫外光辐照强度太小则难以产生足够的羟基自由基氧化脱除污染物,但紫外光辐照强度太大时,系统的能耗则显著增加,导致应用成本大幅度增加。因此,紫外光强度需要保持在 5W/L-80W/L,其中单位 W/L 是指喷淋塔在未安装紫外灯以及未通入反应溶液和烟气之前,喷淋塔为空塔时单位体积所需要的紫外光辐射功率(或者辐射强度)。紫外光波长的选择对于光化学反应过程具有重要的影响,紫外光波长关系到紫外光的有效传播距离和光子的活化程度,进而关系到单位功率紫外光的污染物处理能力和单位光子的激发能大小。紫外光波长较短时,尽管此时紫外光的光子激发能变大,但紫外光的传播距离却较短,表现为单位功率紫外光的污染物处理能力较低,难以实际应用,但当紫外光波长较长时,尽管紫外光的传播距离将会增加,但此时紫外光光子的激发能却大大减小,导致紫外光光子激发分解过氧化氢释放羟基自由基的能量严重不足,最终导致污染物的脱除效率难以满足要求。因此,紫外光的波长应保持在 120nm-360nm 范围内;

[0035] 过氧化氢溶液从喷淋塔 4 的顶部喷入时,为了能够实现最佳的气液传质条件,降低气液反应过程的传质阻力,过氧化氢溶液在喷入喷淋塔 4 之前实现充分的雾化,以尽量达到足够大的气液接触面积。因此,在过氧化氢喷入喷淋塔 4 前需要经过雾化喷嘴 5 的强力雾化,经过雾化后的小液滴喷洒入喷淋塔 4,才能与烟气充分接触并发生气液吸收反应;此外,雾化后的液滴粒径如果太大则难以保证足够的气液接触面积,太小则增加了循环泵 7 的运行负荷和能耗。因此,过氧化氢溶液的雾化粒径不宜过大也不宜过小,需要保持在 0.01mm-0.5mm 范围内,同时雾化喷嘴 5 在安装时必须安装在紫外灯 6 之间的同心圆上。(图 3 中的 A,B,C 线上),同心圆上需要安装雾化喷嘴的数量则需要根据所选雾化喷嘴的型号和大小而定。

[0036] 过氧化氢作为羟基自由基的释放剂,如果投加量太小,则生成的羟基自由基数量太少,不足以充分氧化脱除污染物,但当过氧化氢的投加量太大时,过氧化氢还会引发若干副反应自消耗大量的羟基自由基,导致脱除效率反而下降,而且过氧化氢投加量太大也会带来应用成本过高的问题。因此,过氧化氢的投加量应保持在 0.05mol/L-2.5mol/L。过氧化氢溶液的有效浓度为 0.05mol/L-2.5mol/L

[0037] 液气比在气液吸收反应过程中是一个极为关键的参数,关系到系统的脱除效率和运行成本。当液气比太小时,污染物无法得到充分的气液接触反应,导致污染物的脱除效率下降,但当液气比太大时,整个系统的体积将显著增加,循环泵(7)的运行负荷和能耗也将增加,最终导致系统运行成本大大增加。因此,液气比保持在  $2\text{L}/\text{m}^3$ - $30\text{L}/\text{m}^3$  范围内。

[0038] 过氧化氢溶液的 pH 值也是一个非常重要的参数,当溶液 pH 值太低时,整个吸收过程的吸收平衡将会向左移动,导致气液吸收反应不能充分进行,进而影响脱除效率。但当溶液 pH 值太高时,由于过氧化氢具有水解的特性,水解产物过氧化氢跟离子是一种极为有效的羟基自由基侵蚀剂,能都明显降低羟基自由基的浓度。此外,溶液 pH 值太高将强化过氧化氢的水解反应,导致过氧化氢的自分解速率增加,最终将大大增加过氧化氢的消耗量,增加了实际应用成本。因此,溶液 pH 应当保持在 0.5-8.0 之间;

[0039] 脱除过程的产物为硫酸与硝酸溶液,考虑反应产物的回收利用问题是十分重要的。如果硫酸与硝酸溶液浓度太小,则将会使得反应过程的耗水量增加。同时,硫酸与硝酸溶液浓度太小也会使得反应产物的后处理量增加,势必也会导致产物的后处理成本增加。因此,系统需要设计反应产物部分再循环装置,即硝酸和硫酸溶液部分被返回喷淋塔 4 内继续参与气液吸收反应,仅部分被抽入分离塔 11 接受后处理,这样既可以保证硫酸和硝酸的浓度,又可以保证后处理成本不至于太高,但抽取的循环液占总溶液的比例不宜太高,否则会影响系统的脱除效率和安全性,故应抽取的循环溶液的体积占总溶液体积的比例应该控制在保持在 20-50%之间;

[0040] 反应产物硝酸和硫酸溶液经过后处理后,可通过添加氨水的方法产生农业肥料,这样既能保证整个反应过程无二次排放,还能将反应产物直接转化为经济效益,实现真正的高效低污染低减排目标,但添加的氨水需要有严格的浓度和流量要求,氨水添加流量过大势必会导致溶液处理量也增大,太小则会导致分离塔内的化学反应不均匀。因此,建议氨水的流量控制在进入分离塔内硫酸和硝酸混合溶液总流量的 20-50%。此外,如果氨水浓度太高,未来得及参与反应的挥发性氨气会随烟气溢出反应器并引发二次污染,太少则不能充分有效中和硫酸和硝酸溶液。因此,添加的氨水摩尔浓度(国际单位:mol/L)一股可根据以下方程计算获得,具体计算方法如下所示:

$$[0041] \quad n(\text{NH}_3) = \frac{\eta_{\text{NO}} \cdot C_{\text{in}}(\text{NO}) \cdot Q_{\text{F}} \cdot t}{M_{\text{NO}}} + \frac{1}{2} \frac{\eta_{\text{SO}_2} \cdot C_{\text{in}}(\text{SO}_2) \cdot Q_{\text{F}} \cdot t}{M_{\text{SO}_2}}$$

[0042] 式中,  $n(\text{NH}_3)$ -添加氨水的摩尔浓度, mol/L;  $\eta_{\text{NO}}$ ,  $\eta_{\text{SO}_2}$ -分别为 NO 与 SO<sub>2</sub> 的脱除效率, %;  $C_{\text{in}}(\text{NO})$ ,  $C_{\text{in}}(\text{SO}_2)$ -分别为烟气中 NO 与 SO<sub>2</sub> 的入口初始浓度, ppm;  $Q_{\text{F}}$ -烟气总流量, m<sup>3</sup>/h;  $M_{\text{NO}}$ ,  $M_{\text{SO}_2}$ -分别为 NO 与 SO<sub>2</sub> 的摩尔质量, g/mol;  $t$ -系统的运行时间, h。

[0043] 实施例 1.

[0044]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	88.2%						

[0045] 实施例 2.

[0046]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	312nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	81.6%						

[0047] 实施例 3.

[0048]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	172nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	84.5%						

[0049] 由实施例 1, 2, 3 可以看出, 表格上部份内容为操作参数, 下部分为污染物脱除率的变化情况, 具体的操作方法是: 单改变紫外光波长, 其它参数均保持不变, 由结果看出, 紫外光在 253.7nm 处可取得最佳的脱除效率。

[0050] 实施例 4.

[0051]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	1.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	96.1%	78.9%						



[0052] 实施例 5.

[0053]

操作 参数	紫外光波 长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强 度
	253.7nm	3.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱 除 指 标	SO <sub>2</sub> 脱 除 率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	91.6%						

[0054] 由实施 1,4,5 可以看出,单改变过氧化氢浓度,其它参数均保持不变。由结果可以看出,污染物脱除效率随着过氧化氢浓度的增加而增加,但为了保持较低的应用成本,过氧化氢的浓度也不宜设的太高,可保持一个最佳值 2.0mol/L。

[0055] 实施例 6.

[0056]

操作 参数	紫外光波 长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强 度
	253.7nm	2.0mol/L	5℃	400ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱 除 指 标	SO <sub>2</sub> 脱 除 率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	90.7%						

[0057] 实施例 7.

[0058]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	50℃	400ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	96.6%	85.0%						

[0059] 由实施 1,6,7 可以看出,表格上部份内容为操作参数,下部分为污染物脱除效率的变化情况。具体的操作方法是:单改变溶液温度,其它参数均保持不变。由结果可以看出,污染物脱除效率随着溶液温度的增加而下降。因此,溶液温度应当保持一个相对较低值,但溶液温度设定不过则会导致换热器冷却成本增加,溶液温度可保持一个最佳值 25℃。

[0060] 实施例 8.

[0061]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	1000ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	94.5%	80.0%						

[0062] 实施例 9.

[0063]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	200ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	97.3%						

[0064] 由实施 1,8,9 可以看出,表格上部份内容为操作参数,下部分为污染物脱除效率的变化情况。具体的操作方法是:单改变 NO<sub>x</sub> 的浓度,其它参数均保持不变。由结果可以看出,污染物脱除效率随着 NO<sub>x</sub> 的浓度增加而下降。因此,NO<sub>x</sub> 的浓度值应当保持一个最佳范围内,NO<sub>x</sub> 的浓度太低则使得该技术使用范围变窄,NO<sub>x</sub> 的浓度太高则导致脱除效率达不到环保要求,宜设定在 10ppm-1500ppm 范围内。

[0065] 实施例 10.

[0066]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	500ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	91.6%						

[0067] 实施例 11.

[0068]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	3000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	89.9%	79.7%						

[0069] 由实施 1, 10, 11 可以看出, 单改变 SO<sub>2</sub> 的浓度, 其它参数均保持不变。由结果可以看出, 污染物脱除效率随着 SO<sub>2</sub> 的浓度增加而下降。因此, SO<sub>2</sub> 的浓度值应当保持一个最佳范围内, SO<sub>2</sub> 的浓度太低则使得该技术使用范围变窄, SO<sub>2</sub> 的浓度太高则导致脱除效率达不到环保要求, 宜设定在 10ppm-6000ppm 范围内。

[0070] 实施例 12.

[0071]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	1.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	85.4%						

[0072] 实施例 13.

[0073]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	6.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	94.8%						

[0074] 由实施 1, 12, 13 可以看出, 表格上部份内容为操作参数, 下部分为污染物脱除效率的变化情况。具体的操作方法是: 单改变溶液的 pH 值, 其它参数均保持不变。由结果可以看出, 污染物脱除效率随着溶液 pH 值的增加而增加, 但溶液 pH 值过高则会导致过氧化氢的自分解率急剧上升, 最终导致应用成本增加。因此, 溶液 pH 值宜设定在 0.5-8.0 之间。

[0075] 实施例 14.

[0076]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	3.0	5 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	90.3%	78.1%						

[0077] 实施例 15.

[0078]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	3.0	25 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	94.2%						

[0079] 由实施 1, 14, 15 可以看出, 单改变溶液的液气比, 其它参数均保持不变。由结果可以看出, 污染物脱除效率随着液气比的增加而增加, 但液气比过高则会导致反应系统体积庞大, 最终导致应用成本大大增加。因此, 溶液液气比宜设定在 2-30L/m<sup>3</sup> 之间。

[0080] 实施例 16.

[0081]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	10W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	89.9%	75.4%						

[0082] 实施例 17.

[0083]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	1000ppm	3.0	15 L/m <sup>3</sup>	80W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	96.1%						

[0084] 由实施例 1, 16, 17 可以看出, 表格上部份内容为操作参数, 下部分为污染物脱除效率的变化情况。具体的操作方法是: UV 强度, 其它参数均保持不变。由结果可以看出, 污染物脱除效率随着 UV 强度的增加而增加, 但 UV 强度过高则会导致能耗过大, 最终导致应用成本大大增加。因此, UV 强度值宜设定在 5-80W 之间。

[0085] 最佳实施例参数:

[0086]

操作参数	紫外光波长	过氧化氢浓度	反应温度	NO <sub>x</sub> 浓度	SO <sub>2</sub> 浓度	溶液 pH	液气比	UV 强度
	253.7nm	2.0mol/L	25℃	400ppm	1500ppm	1.0	15 L/m <sup>3</sup>	40W/L
脱除指标	SO <sub>2</sub> 脱除率	NO <sub>x</sub> 脱除率						
	100%	92.8%						

[0087] 结合现场的实际情况, 并且在综合考虑污染物的脱除效率和应用成本的前提下, 本发明按照最佳实施例参数能够取得良好的同时脱硫脱硝效果, SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的脱除效率可分别达到 100% 和 92.8%, 在实验污染物一体化脱除的基础上, 反应产物还可资源化利用, 无二次污染。SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的进出口浓度由 MRU-VARIO PLUS 综合燃煤烟气分析仪在线测量。

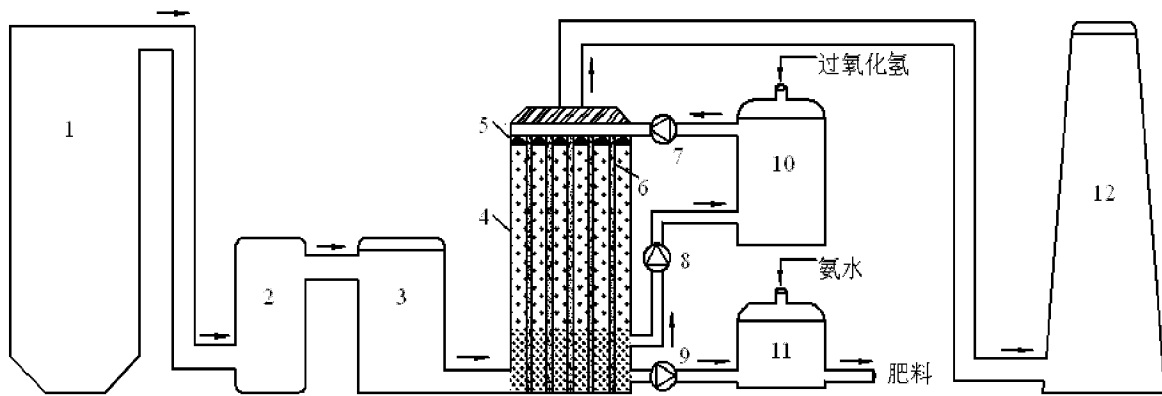


图 1

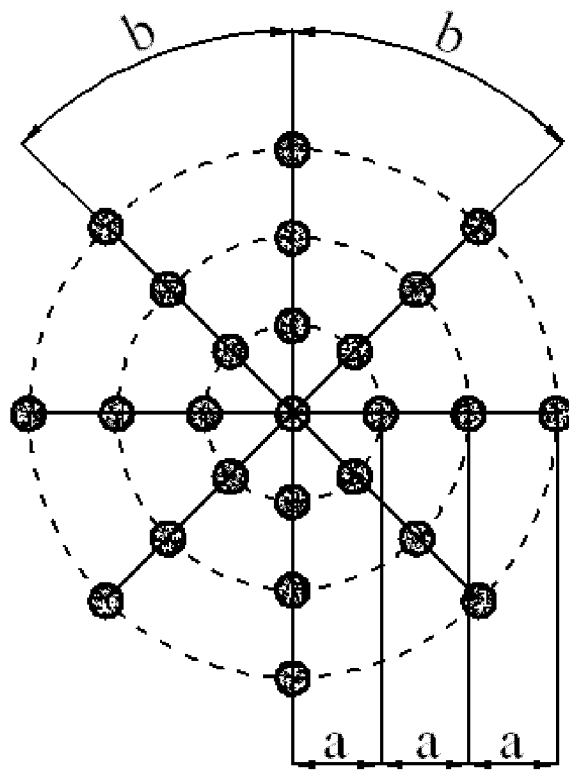


图 2



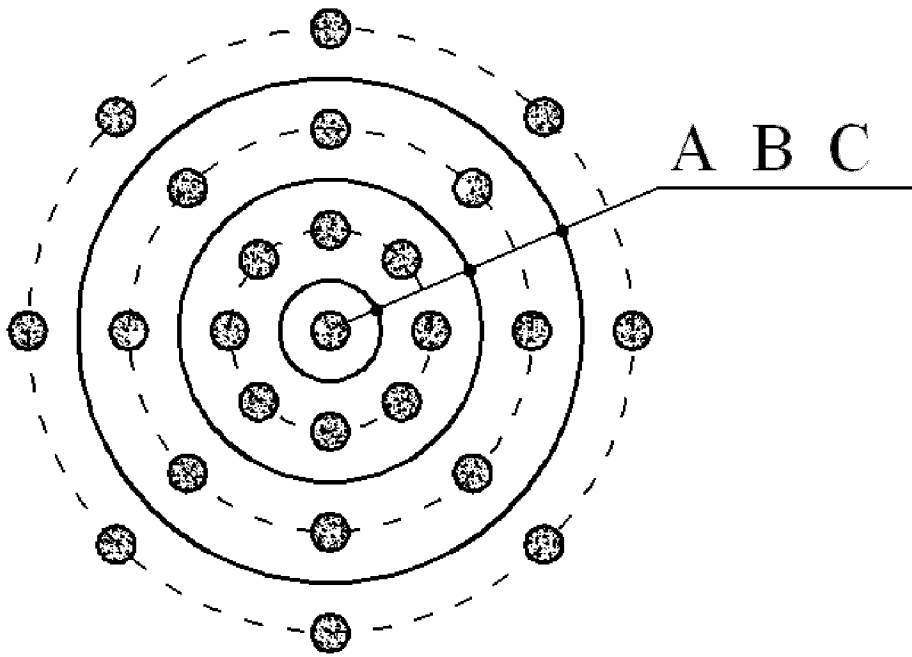


图 3