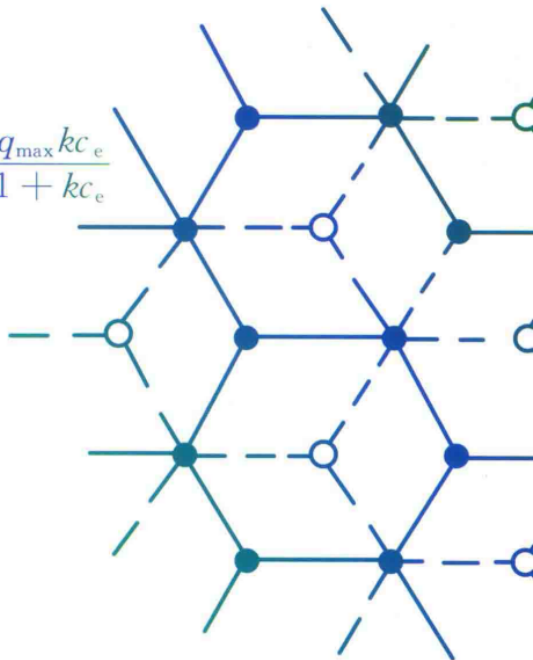


$$\theta = \frac{bp}{1+bp}$$

Activated Coke Flue Gas

$$q_e = \frac{q_{\max}kc_e}{1+kc_e}$$



$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{c_e}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max}k}$$

活性焦烟气净化 关键技术 与工程应用

$$\frac{p}{v} = \frac{1}{bV_m} + \frac{p}{V_m}$$

熊敬超 著

$$K_a p(1-\theta) = K_d \theta$$



华中科技大学出版社
http://www.hustp.com

图书在版编目(CIP)数据

活性焦烟气净化关键技术与工程应用/熊敬超著. —武汉:华中科技大学出版社, 2021. 7

ISBN 978-7-5680-7023-2

I. ①活… II. ①熊… III. ①煤烟污染-空气污染控制-研究 IV. ①X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 109448 号

活性焦烟气净化关键技术与工程应用

熊敬超 著

Huoxingjiao Yanqi Jinghua Guanjian Jishu yu Gongcheng Yingyong

策划编辑: 叶胜武 孙 念

责任编辑: 孙 念

封面设计: 璞茜设计

责任监印: 朱 玢

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编: 430223

录 排: 华中科技大学惠友文印中心

印 刷: 湖北金港彩印有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 24

字 数: 550 千字

版 次: 2021 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 88.00 元



本书若有印装质量问题, 请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

《活性焦烟气净化关键技术与工程应用》 编写组名单

主 编:熊敬超

副主编:宋自新 邵 雁 何 焱

编 者:

中冶南方都市环保工程技术股份有限公司	熊敬超
中冶南方都市环保工程技术股份有限公司	宋自新
中冶南方都市环保工程技术股份有限公司	邵 雁
西安交通大学	何 焱
中冶南方都市环保工程技术股份有限公司	向 浩
中冶南方都市环保工程技术股份有限公司	刘子豪
中冶南方都市环保工程技术股份有限公司	郭华军
中冶南方都市环保工程技术股份有限公司	胡 鑫
中冶南方都市环保工程技术股份有限公司	熊 劲
中冶南方都市环保工程技术股份有限公司	夏 龙
西安交通大学	姜泽宇
西安交通大学	建艳飞
西安交通大学	田明姣
西安交通大学	武雅妮

目 录

第 1 章 活性焦烟气净化技术概论	(1)
1.1 大气污染与污染物	(3)
1.1.1 大气污染	(3)
1.1.2 大气污染物	(4)
1.1.3 大气污染物的来源与特征	(7)
1.2 我国大气污染现状与特征	(9)
1.2.1 我国大气污染现状	(9)
1.2.2 我国大气污染特征	(15)
1.3 大气污染控制标准及综合防治措施	(17)
1.3.1 环境空气质量控制标准	(17)
1.3.2 大气污染综合防治措施	(20)
1.4 烟气污染物组成与危害	(23)
1.4.1 烟气组成	(23)
1.4.2 危害	(24)
1.5 烟气净化技术概述	(33)
1.5.1 烟气主要污染物的控制技术	(33)
1.5.2 脱硫技术	(33)
1.5.3 脱硝技术	(46)
1.5.4 脱汞技术	(52)
1.5.5 除尘技术	(55)
1.5.6 多种污染物联合控制技术	(56)
1.6 活性焦烟气净化技术	(61)
1.6.1 活性焦的性质	(61)
1.6.2 活性焦吸附法	(63)
1.6.3 活性焦烟气净化研究进展	(65)
第 2 章 活性焦的物化属性分析	(81)
2.1 引言	(83)
2.1.1 分析方法	(83)
2.1.2 多孔材料性质表征的特点	(84)
2.1.3 常用的表征方法及分析范畴	(85)

2.2	比表面积和孔隙结构	(86)
2.2.1	吸附等温线及吸附模型	(87)
2.2.2	比表面积的测量及计算	(94)
2.2.3	活性炭孔径分布的测定	(97)
2.2.4	活性炭孔容积的测定	(101)
2.3	晶体结构分析	(104)
2.3.1	活性炭的晶体结构	(104)
2.3.2	活性炭晶体结构的表征	(107)
2.3.3	X射线粉末衍射及其他衍射方法	(108)
2.4	微观结构特征	(121)
2.4.1	微观结构及元素组成	(121)
2.4.2	微观结构表征手段及分析	(122)
2.4.3	微观结构表征分析	(129)
2.5	表面官能团组成与分布	(130)
2.5.1	活性炭的表面官能团	(130)
2.5.2	红外光谱法表征	(132)
2.5.3	X射线光电子能谱(XPS)分析表征技术	(136)
2.6	催化氧化/还原性	(141)
2.6.1	表面氧化物模式介绍	(141)
2.6.2	H ₂ 程序升温还原(H ₂ -TPR)表征	(142)
2.7	常用的现代分析技术在多孔材料分析中的应用	(145)
第3章	活性炭的性能及表征	(153)
3.1	堆积密度	(155)
3.1.1	活性炭堆积密度	(155)
3.1.2	活性炭堆积密度测定	(156)
3.2	粒度	(157)
3.2.1	活性炭粒度	(157)
3.2.2	粒径分布	(158)
3.2.3	平均粒径	(159)
3.2.4	测定	(160)
3.3	着火点	(161)
3.3.1	自燃与着火点	(161)
3.3.2	测定	(162)
3.3.3	影响因素	(164)
3.4	耐磨强度	(167)
3.4.1	测定	(167)

3.4.2 影响因素	(168)
3.5 耐压强度	(170)
3.5.1 测定	(170)
3.5.2 影响因素	(171)
3.6 碘吸附值	(174)
3.6.1 测定	(174)
3.6.2 影响因素	(177)
3.7 脱硫能力	(180)
3.7.1 测定	(181)
3.7.2 影响因素	(185)
3.8 脱硝能力	(197)
3.8.1 测定	(197)
3.8.2 影响因素	(199)
第4章 活性焦制备	(207)
4.1 原料类型与来源	(209)
4.1.1 生物质类型与来源	(209)
4.1.2 煤种类型与来源	(211)
4.2 制备技术与工艺优化	(213)
4.2.1 原料配比	(216)
4.2.2 捏合造粒	(222)
4.2.3 炭化(干馏)	(227)
4.2.4 活化	(236)
4.2.5 烟气处理及余热回收	(244)
4.3 活性焦改性	(247)
4.3.1 改性剂	(247)
4.3.2 新型黏结剂	(250)
4.3.3 改性工艺	(255)
第5章 活性焦脱硫脱硝机理	(267)
5.1 活性焦脱硫机理	(271)
5.1.1 Langmuir-Hinshelwood 机理	(272)
5.1.2 Eley-Rideal 机理	(273)
5.1.3 竞争吸附机理	(274)
5.1.4 两种吸附位点机理	(275)
5.2 活性焦脱硝机理	(275)
5.2.1 吸附机理	(276)
5.2.2 催化机理	(277)

5.3	活性焦脱除其他污染物机理	(279)
5.3.1	活性焦脱汞机理	(279)
5.3.2	活性焦脱甲醛机理	(281)
5.4	影响活性焦脱硫脱硝性能的因素	(282)
5.4.1	影响活性焦脱硫性能的因素	(283)
5.4.2	影响活性焦脱硝性能的因素	(289)
5.5	活性焦再生方法及机理	(296)
5.5.1	加热再生	(297)
5.5.2	水洗再生	(298)
5.5.3	还原再生	(299)
5.5.4	微波再生	(300)
5.6	再生活性焦结构与物化性质分析	(300)
5.6.1	再生活性焦孔隙结构变化	(301)
5.6.2	再生活性焦表面性质变化	(306)
5.7	再生活性焦性能评价与改性优化	(313)
5.7.1	脱硫性能的变化	(313)
5.7.2	脱硝性能的变化	(321)
5.8	废旧活性焦处理处置	(324)
第6章	活性焦制备工程实施及关键装备	(329)
6.1	活性焦制备原料与工艺	(331)
6.1.1	制备原料	(331)
6.1.2	制备工艺	(332)
6.2	活性焦制备工程关键装备	(335)
6.2.1	磨粉装备	(335)
6.2.2	造粒捏合装备	(336)
6.2.3	炭化装备	(337)
6.2.4	活化装备	(338)
6.2.5	余热利用装备和尾气处理装备	(340)
第7章	活性焦烟气净化工程实施及装备	(343)
7.1	烟气净化装备	(345)
7.1.1	吸附反应塔	(345)
7.1.2	脱附再生塔	(348)
7.1.3	物料输送系统	(352)
7.1.4	SO ₂ 回收工艺	(356)
7.1.5	氨站	(363)

7.2 工程建设及运营要点	(365)
7.2.1 工程系统配置要点	(365)
7.2.2 工程建设与运营	(369)
7.2.3 超低排放保证	(371)

第 1 章 活性焦烟气净化技术概论

1.1 大气污染与污染物

1.1.1 大气污染

国际标准化组织(ISO)对大气的定义是:大气是指环绕地球的全部空气的总和。大气中含有各种自然过程和人类活动排放的悬浮微粒和气态物质。大气中的悬浮微粒,除了水蒸气凝结成的水滴和冰晶外,主要由各种有机或无机的固体微粒组成。其中,有机微粒种类较少,主要是植物花粉、微生物等。无机微粒种类较多,主要有岩石或土壤风化后的尘粒,流星在大气层中燃烧后产生的灰烬,火山喷发后留在空中的火山灰,海洋浪花溅起后在空中蒸发留下的盐粒,以及地面上燃料燃烧和人类活动产生的烟尘等。

大气中的各种气态物质,主要有硫氧化物、氮氧化物、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢、氨、甲烷、甲醛、烃蒸气以及其他恶臭气体等。在大气中的各种悬浮微粒和气态物质中,有许多是引起大气污染的来源。它们的分布是随时间、地点和气象条件的变化而变化的,通常是陆上多于海上,城市多于乡村,冬季多于夏季。它们的存在,对辐射的吸收和散射,对云、雾和降水的形成,对大气中的各种光学现象,皆具有重要影响,对大气污染也具有重要影响。

大气污染是指由于人类活动或自然过程引起某些物质进入大气中,呈现出足够的浓度,达到足够的时间,并因而危害了人体的舒适、健康和福利或危害了生态环境。所谓人类活动,不仅包括生产活动,而且包括生活活动,如做饭、取暖、交通等。自然过程包括火山活动、森林火灾、海啸、土壤和岩石的风化及大气圈中空气的运动等。一般来说,自然环境所具有的物理、化学和生物机能(即自然环境的自净作用),会使自然过程造成的大气污染,经过一定时间后自动消除(即使生态平衡自动恢复)。因此,大气污染主要是由人类活动造成的。

大气污染对人体舒适、健康的危害,是指大气污染对人体正常生活环境和生理机能的影响,引起急性病、慢性病乃至死亡等。按照大气污染的范围来分,大气污染大致可以分为四类:①局部地区大气污染——局限于小范围的大气污染,如受到某些烟囱排气直接影响的区域;②地区性大气污染——涉及一个地区的大气污染,如工业区及其附近地区或整个城市大气受到污染;③广域大气污染——涉及比一个地区或大城市更广泛地区的大气污染;④全球性大气污染——涉及全球范围的大气污染。随着近代工业的发展,大气中硫氧化物、氮氧化物、二氧化碳和飘尘的不断增加造成了酸性降雨、温室效应以及臭氧层破坏等全球性的大气污染问题,因此,全球性大气污染已经达到了必须采取措施进行控制的境地。

1.1.2 大气污染物

大气污染物是指由于人类活动或自然过程排入大气中的并对人体和环境造成有害影响的物质,按其存在状态可以分为两大类:气溶胶状态污染物和气体状态污染物。

1.1.2.1 气溶胶状态污染物

气溶胶是指悬浮在气体介质中的固态或液态颗粒所组成的气态分散系统。主要气溶胶状态污染物的性质特征如表 1-1 所示。

表 1-1 主要气溶胶状态污染物的性质特征

形态	分散质	粒径/ μm	形成特征	主要效应
粉尘(dust)	固体粒子	1~200	机械粉碎、扬尘、煤燃烧	能形成水核
烟(fume)	固体微粒	0.01~1	蒸发、凝聚、升华等过程,一旦形成很难再分散	影响能见度
飞灰(fly ash)	固体微粒	1~100	燃烧、升华、冷能过程	降低能见度,影响人体健康
黑烟(smoke)	固体粒子	0.05~1	升华、冷凝、燃烧过程	降低能见度,影响人体健康
雾(fog)	液滴	<200	雾化、蒸发、冷凝过程	降低能见度
霾(haze)	液滴、固粒	<1	凝聚过程、化学反应	湿度小时有吸水性,影响能见度

按照气溶胶粒子的来源和物理性质,可以将气溶胶状态污染物分为如下几类。

(1) 粉尘(dust)。

粉尘是指悬浮于气体介质中的细小固体粒子,受重力作用能发生沉降,但在一段时间内能保持悬浮状态,通常是由于固体物质的破碎、分级、研磨等机械过程或土壤、岩石风化等自然过程形成的。粉尘颗粒的形状往往是不规则的,粉尘粒径一般在 1~200 μm 范围内,大于 10 μm 的粒子靠重力作用能在较短时间内沉降到地面,称为降尘;小于 10 μm 的粒子能长期在大气中漂浮,称为飘尘。

(2) 烟(fume)。

烟通常指在冶金过程中形成的固体粒子的气溶胶。在工业生产过程中总是伴有诸如氧化之类的化学反应,熔融物质挥发后生成的气态物质经冷凝便生成各种烟尘。烟尘颗粒的粒径范围一般为 0.01~1 μm 。

(3) 飞灰(fly ash)。

飞灰是指经燃料燃烧所排出烟气灰分中的细微固体颗粒物。灰分是含碳物质燃烧后残留的固体渣,在分析测定时假定是完全燃烧的。

(4)黑烟(smoke)。

黑烟通常指由燃料燃烧产生的可见的气溶胶,是燃料不完全燃烧的产物,除炭粒外,还有碳、氢、氧、硫等组成的化合物,不包括水蒸气。黑烟的粒径范围为 $0.05\sim 1\mu\text{m}$ 。

(5)雾(fog)。

雾是气体中液滴悬浮体的总称。在工程中,雾一般指小液体粒子的悬浮体,是由于液体蒸气的凝结、液体的雾化以及化学反应等过程形成的,如水雾、酸雾、碱雾、油雾等,液滴的粒径在 $200\mu\text{m}$ 以下。

(6)霾(haze)。

霾天气是指大气中悬浮的大量微小尘粒导致空气浑浊,能见度降低到 10 km 以下的天气现象,易出现在逆温、静风、相对湿度较大等气象条件下。霾的核心物质是空气中悬浮的灰尘颗粒,气象学上称为气溶胶颗粒。

按照气溶胶粒径大小,又可将气溶胶状态污染物分为以下几类。

(1)总悬浮颗粒物(total suspended particulates, TSP)。

总悬浮颗粒物是指悬浮在空气中,空气动力学当量直径 $\leq 100\mu\text{m}$ 的颗粒物。它是分散在大气中各种粒子的总称。总悬浮颗粒物可分为一次颗粒物和二次颗粒物。一次颗粒物是由直接污染源释放到大气中造成污染的颗粒物,例如土壤粒子、海盐粒子、燃烧烟尘等。二次颗粒物是由大气中某些污染气体组分(如二氧化硫、氮氧化物、碳氢化合物等)之间,或这些组分与大气中的正常组分(如氧气)之间通过光化学氧化反应、催化氧化反应或其他化学反应转化生成的颗粒物,例如二氧化硫转化生成硫酸盐。

(2)飘尘。

飘尘是指悬浮在空气中的空气动力学当量直径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的颗粒物。当粒径 $< 2.5\mu\text{m}$ 时,飘尘可以进入呼吸道,最终沉积在肺部,对人体健康产生巨大威胁,因此飘尘是重点研究的大气污染物之一。

(3)降尘(dust fall)。

降尘是指由于自身重力作用自然沉降的颗粒物,粒径一般大于 $10\mu\text{m}$ 。单位面积的降尘量可作为评价大气污染程度的指标之一。

(4)可吸入颗粒物(inhalable particles, IP)。

可吸入颗粒物是指易于通过呼吸过程进入呼吸道的粒子,空气动力学当量直径在 $10\mu\text{m}$ 以下的颗粒物,又称为 PM_{10} 。

(5) $\text{PM}_{2.5}$ (particulate matter)。

$\text{PM}_{2.5}$ 是指空气动力学当量直径在 $2.5\mu\text{m}$ 以下的颗粒物。

1.1.2.2 气体状态污染物

气体状态污染物是以分子状态存在的污染物,简称气态污染物。气态污染物的种类很多,总体上可以分为五大类:以二氧化硫为主的含硫化合物,以一氧化氮和二

氧化氮为主的含氮化合物,以一氧化碳和二氧化碳为主的碳氧化物,有机化合物,以及卤素化合物等,如表 1-2 所示。

表 1-2 气体状态污染物的分类

污 染 物	一次污染物	二次污染物
含硫化合物	SO ₂	SO ₃ 、H ₂ SO ₄
含氮化合物	NO _x 、NH ₃	NO ₂ 、HNO ₃ 、
碳氧化物	CO、CO ₂	无
有机化合物	CH ₄	醛、酮、酸、过氧乙酰硝酸酯、臭氧
卤素化合物	HCl、HF	无

气态污染物按形成过程又可分为一次污染物和二次污染物。一次污染物是指从污染源直接排入环境并且没有发生化学反应的污染物;二次污染物是指排入环境中的一次污染物在物理、化学或生物作用下性质发生变化,或者与环境中其他的化合物发生化学反应或光化学反应形成的物理化学性质与一次污染物不同的新污染物,它的毒性比一次污染物强。

(1) 含硫化合物。

大气中的含硫化合物包括硫化氢(H₂S)、二氧化硫(SO₂)以及三氧化硫(SO₃),其中 SO₂、SO₃统称为硫氧化物(SO_x)。

(2) 氮氧化物。

氮和氧的化合物有 N₂O、NO、NO₂、N₂O₃、N₂O₄ 和 N₂O₅,总体用氮氧化物(NO_x)表示。氮氧化物是造成大气污染的主要污染物之一,主要以一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO₂)的形式存在。

(3) 碳氧化物。

CO、CO₂是各种大气污染物中产生量最多的一类污染物。

(4) 卤素化合物。

大气中以气体状态存在的卤素化合物一般分为卤代烃、氯化物、氟化物、溴化物。卤代烃包括卤代脂肪烃和卤代芳香烃,其中高级卤代烃如多氯联苯(PCBs)、有机氯农药(如 DDT、六六六等)以气溶胶的状态存在。

(5) 有机化合物。

有机化合物的种类众多,大气中的挥发性有机化合物(VOCs)一般是指 C₁~C₁₀可挥发的所有碳氢化合物,其中许多物质是可疑的致癌物,如卤代甲烷、卤代乙烷、卤代丙烷、氯芳烃以及芳烃等。

(6) 硫酸烟雾。

硫酸烟雾又称还原型烟雾、伦敦烟雾,大气中的 SO₂等硫氧化物,与水蒸气、含有重金属的颗粒物或氮氧化物发生化学反应或光化学反应生成硫酸烟雾或硫酸盐气溶

胶。硫酸烟雾的毒性强于硫氧化物,对呼吸道有刺激作用,严重时会导致死亡,多发生于气温较低、湿度较高以及日光较弱的冬季。

(7)光化学烟雾。

光化学烟雾又称氧化型烟雾、洛杉矶烟雾,是指由汽车和工厂等污染源排入大气中的碳氢化合物和氮氧化物等一次污染物在阳光(紫外光)的作用下发生光化学反应生成二次污染物如臭氧(O_3)、醛类以及过氧乙酰硝酸酯(PAN)等强氧化物,并与一次污染物混合后形成的浅蓝色的烟雾,发生于阳光强烈的夏秋季节。

1.1.3 大气污染物的来源与特征

(1)硫氧化物。

SO_2 是大气中数量较多并且影响广泛的一种大气污染物,为无色透明气体,有刺激性臭味,本身毒性不大,但在大气环境中易被氧化为 SO_3 , SO_3 与水蒸气发生反应生成硫酸气溶胶,同时与其他物质发生化学反应产生硫酸盐。大气中的硫酸和硫酸盐可能造成硫酸烟雾和酸雨,对人体健康和生态环境产生较大的威胁。

环境中的 SO_2 来源广泛,其自然排放源为火山活动、森林火灾以及天然原始微生物活动等,人为活动是导致 SO_2 大量排放的主要原因。绝大部分的工业生产过程,如含硫燃料的燃烧过程,火力发电厂、炼油厂以及所有烧煤或油的工业锅炉等都会排放 SO_2 烟气。大气中的 SO_2 通过干湿沉降从大气中去除,大部分进入海洋。

(2)氮氧化物。

NO 是一种无色无味的有毒气体,本身的毒性不强,但化学性质非常活泼,在大气环境中会被氧化为 NO_2 ,并且是形成光化学烟雾的活跃成分,会诱导产生大气污染物的一系列化学反应。

NO_2 是一种红棕色的活泼气体,具有刺激性和腐蚀性,毒性约为 NO 的5倍,在大气环境中发生光化学反应,生成光化学烟雾后,毒性更强。大气环境中的 NO_2 主要来源于 NO 的氧化反应,与水反应能生成硝酸和一氧化氮,与碱反应生成硝酸盐。

大气中的 NO_x 主要来源于自然活动和人为活动两方面。天然排放源为土壤和海洋中有机物的分解以及雷电等自然过程。人类活动所产生的 NO_x ,绝大部分来源于燃料高温燃烧,如汽车、飞机以及工业窑炉的燃烧过程;其次来源于硝酸生产以及使用的过程,如氮肥厂和金属冶炼厂等。 NO_x 不仅是形成酸雨的主要物质之一,也是形成光化学烟雾以及消耗臭氧的主要因素之一,会导致多种环境效应。大气中的 NO_x 最终转化为硝酸(HNO_3)和硝酸盐颗粒,经湿沉降和干沉降从大气中去除。

(3)碳氧化物。

CO 在通常状况下是无色、无臭、无味的窒息性气体,是煤、石油等含碳燃料不完全燃烧的产物。由于大气扩散稀释作用以及氧化作用,大气中的 CO 通常不会造成危害,但是当气象条件不利于扩散稀释时, CO 的浓度可能达到危害身体健康的水平,短时间内吸入高浓度的 CO 会造成 CO 中毒,使人出现中毒症状,引起脑、心、肝、肾及

其他组织的继发性营养不良性损伤。

CO₂是一种无色无味的气体,也是一种常见的温室气体。低浓度的CO₂对人体没有危害,但大气中的CO₂的浓度过高,使得O₂含量相对减少,会对人产生不良的影响。

CO和CO₂主要的来源是燃料燃烧和机动车排气,此外还有森林火灾、农业废弃物焚烧。CO还来源于自然活动,如甲烷转化、海水中CO挥发、植物排放物转化、植物叶绿素光解,如表1-3所示。

表 1-3 CO 全球性排放源的估计排放量

CO 全球性排放源		估计排放量/($\times 10^5$ t/a)
天然源	甲烷氧化	50~5000
	天然有机烃转化	50~1300
	海洋中微生物活动	20~200
	植物排放	20~200
	总量	140~6700
人为源	化石燃料燃烧	250~1000
	森林火灾	10~60
	总量	260~1060

(4) 卤素化合物。

大气中以气体状态存在的卤素化合物一般分为四类:卤代烃、氯化物、氟化物、溴化物。

①卤代烃:甲基氯(CH₃Cl)、甲基溴(CH₃Br)和甲基碘(CH₃I)等是在天然过程中产生的,主要来自海洋;三氯甲烷(CHCl₃)、三氯乙烷(CH₂CCl₃)、四氯化碳(CCl₄)、氯乙烯(C₂H₃Cl)等是重要的化学溶剂,也是有机合成工业的重要原料和中间体,在生产使用过程中因挥发而进入大气。

②氯化物:大气中含氯的无机物主要是氯气(Cl₂)和氯化氢(HCl)。Cl₂的人为源来自化工厂、塑料厂、自来水净化厂的排放,自然活动中的火山活动也会释放一定量的Cl₂。

③氟化物:包括氟化氢(HF)、氟化硅(SiF₄)、氟气(F₂)等,主要由人为活动排放,污染源主要是使用萤石、冰晶石、磷矿石和氟化氢的企业,如炼铝厂、炼钢厂、玻璃厂、磷肥厂、火箭燃料厂等。

④溴化物:甲基溴(CH₃Br)大约一半来源于人为活动,如熏蒸和生物质燃烧;而另一半来自生物活动等天然过程。

(5) 有机化合物。

有机化合物广泛应用于包装印刷、汽车喷涂、合成革、橡胶再利用等工业领域。它的人为源主要有汽油燃烧(典型成分为CH₄、C₂H₄、C₃H₆等碳氢化合物)、焚烧、溶

剂蒸发、石油蒸发和运输损耗、废物提炼。

(6) 颗粒物。

大气中的一次颗粒物和二次颗粒物约各占一半。颗粒物大部分是由天然源产生的,但在局部地区,如在人口集中的大城市和工矿区,人为源产生的数量可能较多。

(7) 光化学氧化剂。

光化学氧化剂指大气中除氧以外具有氧化性质的全部污染物,通常指能将碘化钾氧化为碘的物质,主要是大气光化学反应的产物,如臭氧(O_3)、二氧化氮(NO_2)、过氧乙酰硝酸酯(PAN)、过氧苯酰硝酸酯(PBzN)、过氧化氢(H_2O_2)及过氧自由基(如过氧烷基 RO_2)等。

1.2 我国大气污染现状与特征

造成我国大气污染的原因主要包括五个方面:一是以煤炭为主的能源消费结构以及工业结构和布局不合理,使大气中颗粒悬浮物超标和二氧化硫浓度较高;二是随着人们生活水平的提高,机动车保有量激增,大量机动车尾气排放,使大气中一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物和颗粒物含量剧增;三是以大规模的房地产开发为主的建筑施工活动,使扬尘污染加重;四是部分地区生态环境的破坏导致北方沙尘暴污染加重;五是硫氧化物、氮氧化物等总量排放控制不到位,导致酸雨地区及酸雨增多。总之,中国目前的大气污染类型是以二氧化硫、氮氧化物和烟(粉)尘为主的复合型大气污染^[1]。

1.2.1 我国大气污染现状

作为全球最大的发展中国家,中国是全球大气污染最严重的国家之一。2014年,中国社会科学院发布的《全球环境竞争力报告(2013)》显示:中国在全球133个国家中生态环境竞争力排名第124位,其中空气质量位列倒数第2位;在反映空气污染程度的三项关键指标上,PM_{2.5}排名第130位、NO₂排名第132位、CO₂排放量排名第131位^[2]。

1.2.1.1 城市环境空气质量不容乐观

根据《中国生态环境状况公报(2019年)》发布的数据显示:2019年,在全国337个地级及以上城市(以下简称337个城市)中,城市空气质量达标的有157个;而城市环境空气质量超标的城市达到180个,占全部检测城市总数的53.4%,如图1-1所示。这表明全国环境空气质量状况依然不容乐观。

337个城市中,平均超标天数占比18%,以PM_{2.5}、O₃、PM₁₀、NO₂和CO为首要污染物的超标天数分别占总超标天数的45.0%、41.7%、12.8%、0.7%和不足0.1%,未出现以SO₂为首要污染物的超标天。337个城市中,累计发生重度污染为1666天,