

“十三五”国家重点研发计划项目基金资助

Air Purification Equipment

# 空气净化装备

杜峰 主编



科学出版社

“十三五”国家重点研发计划项目基金资助

# 空气净化装备

杜峰 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

我国经济的高速发展大大提高了人民的生活水平,随之而来的环境污染问题,尤其是空气污染问题日渐凸显。本书针对民用、医用、工程、畜牧业及工业等领域的空气污染治理技术特点,结合学术界及产业界的最新发展方向,系统介绍这些领域空气污染治理所涉及的检测、监测及治理装备。同时对该领域空气污染治理的基本原理和重要国内外空气污染治理标准进行阐述,并提出合理化建议。

本书不仅适合从事空气污染治理行业的专业技术人员和高校科研机构的师生参阅,而且适合民众科普阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

空气净化装备 / 杜峰主编. —北京: 科学出版社, 2018.12

ISBN 978-7-03-059681-9

I. ①空… II. ①杜… III. ①气体净化设备 IV. ①TU834.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 263783 号

责任编辑: 惠 雪 邢 华 / 责任校对: 杨聪敏

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 许 瑞

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年12月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年12月第一次印刷 印张: 30 3/4

字数: 615 000

定价: 199.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

现代工业和城市文明的快速发展，催生了社会进步和物质丰富，随之而来的空气污染也与日俱增，空气污染不断威胁着人类的生存环境。最新发布的《2018全球环境绩效指数报告》指出，中国空气质量全球排名为第177位，空气污染已经成为制约我国经济发展、危害人民身体健康的主要因素之一，空气污染治理刻不容缓。

空气污染治理，离不开空气清洁标准的建立，离不开空气检测、监测、治理装备的开发和应用。本书系统研究了当前我国民用、医用、工程、畜牧业及工业等领域的空气污染特点，深入解析各领域空气污染治理的基本原理和治理标准，对治理各领域空气污染的检测、监测、治理装备做了详尽的介绍。全书准确概括了当代空气净化装备的技术原理、性能指标和发展趋势，剖析了各装备的优势和不足，对空气净化装备的性能改善提出了合理化建议。

本书引文权威，数据准确，内容丰富，逻辑严谨，表述规范，旨在让读者全面了解我国各生产领域空气污染的特点，掌握空气污染治理的技术路线和治理标准，通晓主流空气净化装备的性能指标，为科学运用空气净化装备提供了必要的认知基础。本书学术性和实用性兼备，既是空气净化装备的大众科普阅读资料，又是从事空气污染治理行业的技术人员和高校科研机构师生的专业参阅资料。

全书由绪论（第1章）、民用空气净化检测监测装备（第2章）、民用空气净化装备（第3章）、民用工程及作业用空气净化装备（第4章）、畜牧业空气净化装备（第5章）、工业废气净化检测监测装备（第6章）、工业废气净化装备（第7章）、工业废气治理装备评价（第8章）构成。全书由杜峰负责书稿架构、统稿编辑。第1章、第3章、第4章和第7章由杜峰编写；第2章由沈浩编写；第5章由马兵编写；第6章由邹巍巍编写；第8章由涂睿编写。潘志刚、毛淑滑等参与书稿文献的搜集和书稿润色，在此一并表示感谢。

由于空气净化装备涉及面广，加之受编者学术水平、时间及经验所限，书中可能有疏漏和不当之处，敬请广大读者批评指正。

杜 峰

2018年6月于南京

# 目 录

## 前言

1 绪论	1
1.1 背景介绍	1
1.1.1 固态污染物	2
1.1.2 气态污染物	4
1.1.3 微生物污染	11
1.2 国内外空气污染防治标准	12
1.2.1 大气污染物排放标准体系	12
1.2.2 大气污染物排放标准的特点及问题	13
1.2.3 室内空气污染物标准	15
1.3 空气净化装备及其发展	16
1.3.1 空气净化装备概念	16
1.3.2 空气净化装备发展	18
参考文献	24
2 民用空气净化检测监测装备	28
2.1 空气中颗粒物检测监测装备	28
2.1.1 空气中典型颗粒物取样装置分类及范围	28
2.1.2 颗粒物取样装置工作原理及计量标准	32
2.1.3 空气中常见颗粒物检测装置分类及工作原理	37
2.1.4 国内外空气颗粒物检测技术标准对比	41
2.1.5 其他检测监测方法与设备	45
2.2 空气中有害气体检测监测装备	46
2.2.1 典型有害气体取样装置分类及应用范围	46
2.2.2 空气中常见有害气体检测方法装置	49
2.2.3 国内外有害气体检测技术标准	62
2.3 空气中生物菌类检测监测装备	64
2.3.1 微生物气溶胶的采样仪器及原理概述	64
2.3.2 空气中典型生物菌类取样装置分类及范围	67
2.3.3 生物菌类取样装置工作原理及计量标准	71

2.3.4	空气中常见生物菌类检测装置分类及工作原理	84
	参考文献	86
<b>3</b>	<b>民用空气净化装备</b>	<b>89</b>
3.1	引言	89
3.2	家用空气净化器	90
3.2.1	空气净化器应用领域	90
3.2.2	空气净化器工作原理与结构	93
3.2.3	空气净化器主要净化技术	126
3.2.4	空气净化器性能评价	133
3.2.5	空气净化器选择存在问题及优化	136
3.3	空调过滤器	136
3.3.1	空调过滤器基本概念	136
3.3.2	空调过滤器工作原理	137
3.3.3	空调与空气净化功能复合技术	137
3.3.4	空调空气净化性能评价	139
3.3.5	发展存在问题及优化	140
3.4	新风系统	140
3.4.1	新风系统概念及应用范围	140
3.4.2	新风系统结构工作原理	141
3.4.3	新风系统国内外研究及发展现状	143
3.4.4	新风系统空气净化性能评价	145
3.4.5	新风系统空气净化意义及存在问题	145
3.5	医用空气净化器	146
3.5.1	医用环境空气质量调查分析	146
3.5.2	医用空气净化器概念及原理	148
3.5.3	医用空气净化器技术简介	149
3.5.4	医用空气净化器性能评价	150
3.5.5	医用空气净化器发展前景	150
3.6	学校用空气净化装备	151
3.6.1	学校环境空气质量调查分析	151
3.6.2	学校用空气净化装备介绍	154
3.6.3	学校用空气净化装备种类使用进展	154
3.6.4	学校用空气净化装备性能评价	155
3.6.5	学校用空气净化装备发展存在问题及优化	156
3.7	个人呼吸防护用空气净化装备	157

3.7.1	个人呼吸防护装备概念	157
3.7.2	国内外个人呼吸防护装备技术发展与应用分析	158
3.7.3	个人呼吸防护装备评价	160
3.7.4	新型呼吸防护装备研究及发展前景	161
	参考文献	162
4	民用工程及作业用空气净化装备	166
4.1	典型工程用空气净化装置及设备	166
4.1.1	工程用空气净化装置分类及技术原理	166
4.1.2	应用领域	168
4.1.3	工程用空气净化装备性能评价	192
4.2	典型作业用空气净化装置及设备	196
4.2.1	作业用空气净化装备分类及技术原理	196
4.2.2	作业用空气净化装备性能评价	208
4.2.3	国内外作业用空气净化装备性能标准对比	212
	参考文献	229
5	畜牧业空气净化装备	232
5.1	畜牧业空气净化背景	232
5.1.1	我国畜禽场空气污染及危害分析	232
5.1.2	畜牧业产固废及废气治理技术概要	239
5.2	畜牧业空气净化装备	242
5.2.1	畜牧业粉尘净化治理装备介绍	242
5.2.2	畜牧业恶臭气体净化治理装备介绍	244
5.3	畜牧业空气质量检测监测设备	260
5.3.1	牧场PM检测监测技术及设备	260
5.3.2	畜禽场恶臭气体检测监测技术及设备	263
5.3.3	牧场病原微生物检测监测技术及设备	273
5.4	畜牧业空气污染物净化控制标准	275
5.4.1	畜牧业污染物排放政策分析	275
5.4.2	污染物达标排放关键指标	278
5.4.3	国外畜牧业污染物排放法规	279
5.5	畜禽舍空气净化装备选择、使用与维护	280
	参考文献	281
6	工业废气净化检测监测装备	291
6.1	废气中颗粒物检测监测装备	291
6.1.1	典型颗粒物取样装置分类及应用范围	291

6.1.2	颗粒物取样装置工作原理及计量标准	291
6.1.3	常见颗粒物检测装置分类及工作原理	297
6.1.4	国内外颗粒物检测相关标准	303
6.1.5	颗粒物在线监测装备类别	305
6.2	废气中有害气体检测监测装备	311
6.2.1	典型有害气体取样装置分类及应用范围	311
6.2.2	有害气体取样装置工作原理及计量标准	315
6.2.3	国内外有害气体检测技术标准	319
6.2.4	有害气体在线监测装备类别	321
6.3	放射性污染物检测监测装备	324
6.3.1	放射性污染物产生源及种类	324
6.3.2	放射性污染物取样装置类别、工作原理及应用范围	326
6.3.3	放射性污染物检测装置分类及工作原理	327
6.3.4	国内外放射性污染物检测技术标准	338
6.3.5	放射性污染物在线监测装备类别	342
	参考文献	342
7	工业废气净化装备	345
7.1	工业废气净化治理技术	345
7.1.1	固态污染物治理技术	345
7.1.2	气态污染物治理技术	349
7.1.3	放射性污染物治理技术	358
7.2	工业废气净化治理材料研究现状	362
7.2.1	固态污染物治理材料	362
7.2.2	气态污染物治理材料	366
7.2.3	放射性污染物治理材料研究现状	369
7.3	工业废气污染物净化治理装备	370
7.3.1	固态污染物治理装备	370
7.3.2	有机废气污染物治理装备	381
7.3.3	无机废气污染物治理装备	384
7.3.4	放射性污染物治理装备	400
7.4	工业废气净化装备运行管理与维护	405
7.4.1	机械除尘器的运行管理和维护	405
7.4.2	袋式除尘器的运行管理和维护	407
7.4.3	静电除尘器的运行管理和维护	409
7.4.4	湿式除尘器的运行管理和维护	410



---

7.4.5	SCR 脱硝装置的运行管理和维护	412
7.4.6	燃煤烟气湿法脱硫设备的运行管理和维护	414
7.4.7	循环流化床烟气脱硫设备的运行管理和维护	417
	参考文献	417
<b>8</b>	<b>工业废气治理装备评价</b>	<b>423</b>
8.1	工业废气治理质量标准	423
8.1.1	废气排放指标类别及内涵	423
8.1.2	国内不同来源工业废气排放标准	424
8.1.3	国外不同来源工业废气排放标准	437
8.1.4	国内外工业空气净化装备能效分析	449
8.2	工业废气净化设备市场准入	458
8.2.1	工业废气净化现状及发展趋势	458
8.2.2	标准制定与产品认证	464
8.3	工业废气治理装备经济效益	471
8.3.1	脱硫工程	471
8.3.2	脱硝工程	474
8.3.3	除尘工程	476
	参考文献	478

# 1 绪 论

## 1.1 背景介绍

空气污染通常是指由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，并因此危害了人类的舒适、健康或环境的现象<sup>[1,2]</sup>。换言之，只要是某一种物质其存在的量、性质及时间足够对人类或其他生物、财物产生影响，就可以称其为空气污染物；而其存在造成的现象，就是空气污染<sup>[3-5]</sup>。

空气污染物是指由人类的活动或自然过程直接排入大气或在大气中新转化生成的对人或环境产生有害影响的物质。空气污染物按其存在状态可以分为两大类，一种是气溶胶状态污染物，另一种是气体状态污染物。气溶胶状态污染物主要有粉尘、烟、雾、降尘、飘尘、悬浮物等；气体状态污染物主要有以二氧化硫为主的硫氧化物，以二氧化氮为主的氮氧化物，以二氧化碳为主的碳氧化物以及碳、氧结合的碳氧化合物。大气中不仅含有无机污染物，而且含有有机污染物，主要污染物是大气气溶胶、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳、氯气和光化学烟雾，随着人类不断合成新的物质，空气污染物的种类和数量也不断增加。空气污染的种类很多，有煤烟型污染、光化学烟雾污染、混合型污染等。煤烟型污染主要是指燃烧煤炭排放出的二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳、碳氢化合物和烟尘等造成的空气污染。光化学烟雾污染主要是指大量的汽车排放的废气中的一氧化氮和碳氢化合物造成的空气污染。这些物质在阳光照射下会同有机烃、氧发生一系列化学反应，产生一些有毒物质。混合型污染是指煤炭和石油在燃烧或加工过程中产生的混合污染物以及企业排放的各种混合污染物造成的空气污染<sup>[6,7]</sup>。

迄今为止，从环境空气中已识别出的人为空气污染物超过 2800 种，其中 90% 以上为有机化合物（包括金属有机物），而无机污染物不到 10%。常见的空气污染物主要有 13 种，分别是二氧化硫、悬浮颗粒物（如粉尘、烟雾、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>）、氮氧化物 NO<sub>x</sub>（如 NO、NO<sub>2</sub> 等）、一氧化碳、挥发性有机化合物（volatile organic compound, VOC，如苯、碳氢化合物）、光化学氧化物（如臭氧）、有毒微量有机污染物（如多环芳烃、多氯联苯、二噁英、甲醛）、重金属（如铅、镉）、有毒化学品（如氯气、氨气）、氟化物、难闻气体、放射性物质、温室气体（如二氧化碳、甲烷、氯氟烃）。燃料燃烧是污染源，尤其是机动车，排放出大约 500 种组分的污

染物。城市中影响健康的主要空气污染物是二氧化硫、悬浮颗粒物（烟雾、灰尘、PM<sub>1.0</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>）等，对人体的慢性危害，主要包括中毒、致癌、致畸以及刺激眼睛和呼吸道。它增加了人体对病毒感染的敏感性而易于患上肺炎、支气管炎，同时还加重了心血管疾病。许多情况下空气污染物还具有协同效应，例如，二氧化硫的危害会因颗粒物的存在而成倍增加。城市地区的呼吸道疾病很大程度上是空气污染的结果之一<sup>[8-10]</sup>。

空气污染的形成包括自然因素和人为因素两种，且以后者为主，空气污染的主要来源是工业、生活炉灶和采暖锅炉、交通运输等；影响空气污染范围和强度的因素有污染物的性质（物理和化学）、污染源的性质（源强、源高、源内温度、排气速率等）、气象条件（风向、风速、温度层结等）、地表性质（地形起伏、粗糙度、地面覆盖物等）。防治方法很多，根本途径是改革生产工艺，综合利用，将污染物消灭在生产过程之中；全面规划，合理布局，减少居民稠密区的污染；在高污染区，限制交通流量；选择合适厂址，设计恰当的烟囱高度，减少地面污染；在最不利气象条件下，采取措施，控制污染物的排放量。国家已颁布《中华人民共和国环境保护法》，并制定废气排放标准，以减轻空气污染，保护人民健康<sup>[11]</sup>。

### 1.1.1 固态污染物

固态污染物主要指悬浮颗粒物。悬浮颗粒物不是一种单一成分的污染物，而是由各种各样的人为源和自然源排放的大量成分复杂的化学物质所组成的混合物，并在粒径、形貌、化学组成、时空分布、来源、大气过程及寿命等方面均具有很大的变化。目前大气环境科学所研究的悬浮颗粒物的空气动力学直径通常都为0.1~100 $\mu\text{m}$ 。悬浮颗粒物的粒径是描述颗粒物的一个重要指标。空气中的悬浮颗粒物通常分为总悬浮颗粒物（TSP，指空气动力学当量直径 $\leq 100\mu\text{m}$ 的颗粒物）、PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>（PM<sub>10</sub>是指空气动力学当量直径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的颗粒物，PM<sub>2.5</sub>是指空气动力学当量直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物）<sup>[12-14]</sup>。大气悬浮颗粒物对空气质量、人体健康、大气能见度、酸沉降、云和降水、大气辐射平衡、全球气候变化、平流层和对流层大气化学过程等均产生重要的影响。可以说，大气悬浮颗粒物正在深刻地改变着地球环境。

根据悬浮颗粒物污染源划分：工业污染源包括火电、钢铁、建材、化工、炼油、冶金、各种锅炉、窑炉、垃圾焚烧装置等；移动污染源包括机动车、机动船舶等；生活污染源包括饮食业、干洗业、家庭厨房、取暖煤炉、生活垃圾和城建废弃物、露天焚烧等<sup>[15]</sup>。

悬浮颗粒物是目前室外空气常见污染物之一，也是雾霾天气的元凶。空气中

的悬浮颗粒物主要包括固态和液态两种形态，主要来源于两个方面<sup>[16,17]</sup>：一是各种污染源和发生源向空气中直接释放的细颗粒物，包括烟尘、粉尘、扬尘、油烟、油雾、细菌微生物和花粉等；二是具有化学活性的气态污染物在空气中发生反应后生成的细颗粒物，这些活性污染物包括  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、VOC 和  $\text{NH}_3$  等。

《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)规定，总悬浮颗粒物是指  $100\mu\text{m}$  以下的微粒，即小于  $10\mu\text{m}$  的飘尘及大于  $10\mu\text{m}$  的降尘的总称，大家习惯称它为“粉尘”。长期吸入高浓度粉尘可产生不良影响，其中最严重的是尘肺。由于尘肺纤维化病变有进行性和不可逆性，迄今为止，尚未找到有效的治疗方法。因此，尘肺严重影响劳动者的劳动能力和寿命，据某地调查，接触沙尘工人的平均寿命为 55 岁，较一般居民的平均寿命短 10 年以上。粉尘在呼吸道会沉积下来，虽然人体对粉尘有清除的功能，但若吸入粉尘量过大或者长期吸入粉尘，鼻黏膜、气管、支气管纤毛上皮受损，吞噬粉尘的巨噬细胞数量相对不足，或巨噬细胞吞噬过多粉尘而不能移动，或细胞中毒崩解死亡，而使清除功能受损，导致肺内粉尘沉积量逐渐增加，从而引起各种肺病<sup>[18-20]</sup>。

不同行业有不同的排放标准，要求也不尽相同，有的以单位体积的粉尘含量来控制，一般用每立方米排放物中的尘含量表示，即单位为  $\text{g}/\text{m}^3$ ；有的则以时间计，一般是控制单位时间内排出的粉尘总量，即单位为  $\text{kg}/\text{h}$ ，理解为每小时最大允许排粉尘总量不许超过该值<sup>[21-23]</sup>。表 1-1 是《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)关于粉尘的要求<sup>[22]</sup>，表 1-2 是《工业炉窑大气污染物排放标准》(GB 9078—1996)关于粉尘的要求<sup>[24]</sup>。

表 1-1 《大气污染物综合排放标准》关于粉尘的要求

污染物	最高允许排放浓度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	最高允许排放速率			无组织排放监控浓度限值	
		排气筒 高度/m	二级 ( $\text{kg}/\text{h}$ )	三级 ( $\text{kg}/\text{h}$ )	监控点	浓度/ $(\text{mg}/\text{m}^3)$
颗粒物	22(炭黑尘、染料尘)	15	0.6	0.87	周界外浓度最高点	肉眼不可见
		20	1.0	1.50		
		30	4.0	5.90		
		40	6.8	10.00		
	80(玻璃棉尘、石英 粉尘、矿渣棉尘)	15	2.2	3.1	无组织排放源上风向设 参照点，下风向设监控点	2.0(监控点与参照点 浓度差值)
		20	3.7	5.3		
		30	14.0	21.0		
		40	25.0	37.0		
	150(其他)	15	4.1	5.9	无组织排放源上风向设 参照点，下风向设监控点	5.0(监控点与参照点 浓度差值)
		20	6.9	10.0		
		30	27.0	40.0		
		40	46.0	69.0		
50		70.0	110.0			
60		100.0	150.0			

表 1-2 《工业炉窑大气污染物排放标准》关于粉尘的要求

设置方式	炉窑类别	无组织排放烟(粉)尘最高允许浓度/(mg/m <sup>3</sup> )
车间厂房	熔炼炉、铁矿烧结炉	25
	其他炉窑	5
露天(或有顶无围墙)	各种工业炉窑	5

常见的除尘装备技术有机械式除尘、过滤式除尘、湿式除尘、静电除尘,表 1-3 是常见不同除尘装备技术的对比<sup>[25]</sup>。每一种除尘技术及装备均存在一定的优缺点,应根据实际需要选择合适的除尘技术。

表 1-3 常见不同除尘装备技术对比

技术方法	原理	特点
机械式除尘	通过质量力的作用达到除尘目的	适用于非黏性及非纤维性粉尘的去除,对大于 5 $\mu\text{m}$ 以上的颗粒具有较高的去除效率,且可用于高温烟气的净化。缺点是对细小尘粒(<5 $\mu\text{m}$ )的去除效率较低
过滤式除尘	使含尘气体通过多孔滤料,把气体中的尘粒截留下来,使气体得到净化	属于高效除尘器,除尘效率大于 99%,对细粉有很强的捕集作用,对颗粒性质及气量适应性强。缺点是不适于处理含油、含水及黏结性粉尘,同时也不适于处理高温含尘气体
湿式除尘	也称洗涤除尘。用液体(一般为水)洗涤含尘气体,使气体得到净化	除尘效率高,在处理高温、易燃、易爆气体时安全性好,在除尘的同时还可去除气体中的有害物。缺点是用水量大,易产生腐蚀性液体,产生的废液或泥浆须进行处理,并可能造成二次污染。在寒冷地区和季节,易结冰
静电除尘	利用高压电场产生的静电力(库仑力)作用实现固体粒子或液体粒子与气流分离,使气体得到净化	对细微粉尘及雾状液滴捕集性能优异,除尘效率达 99% 以上,阻力小、能耗低、处理气量大,可应用于高温、高压的场合。缺点是设备庞大,占地面积大,投资费用高

## 1.1.2 气态污染物

### 1.1.2.1 挥发性有机化合物

挥发性有机化合物(VOC)是一类普遍存在于室内外空气中的污染物。VOC 在美国的 ASTM D3960—1998 标准中定义为任何能参加大气光化学反应的有机化合物;美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)将 VOC 定义为除一氧化碳、二氧化碳、碳酸、金属碳化物、金属碳酸盐和碳酸铵外,任何参加大气光化学反应的碳化合物;世界卫生组织(WHO)在 1989 年认为总挥发性有机化合物(TVOC)为熔点低于室温且沸点为 50~260 $^{\circ}\text{C}$ 的 VOC 的总称。

VOC 的成分比较复杂,主要包括烃类、醇类、酯类、醛类、酮类、卤代烃以及低沸点的芳香族化合物等。工业上,其来源主要包括石油化工、造纸、纺织、制药等行业排放的有机废气<sup>[26]</sup>。建筑材料、室内装饰材料、生活用品、办公用品

等是室内 VOC 的主要产生源, 同样如计算机、打印机等设备及烹饪过程等也会产生一部分 VOC 污染。

VOC 污染较重时对生态环境和人类健康都会造成严重的危害<sup>[27,28]</sup>, 主要表现在: 某些 VOC 在紫外线的激发下, 能与大气中的  $\text{NO}_x$  发生光化学反应, 形成毒性更大的光化学烟雾; 某些 VOC 对人体的毒性很大, 一定浓度的 VOC 对呼吸道、眼、鼻等人体器官有刺激性, 容易造成急性或慢性中毒, 甚至可致癌或引发突变。长期处在 VOC 污染环境中, 将导致机体免疫水平失调, 影响中枢神经系统功能, 出现头晕、头痛、嗜睡、无力、胸闷等自觉症状; 还可能影响消化系统, 出现食欲不振、恶心等, 严重时可损伤肝脏和造血系统<sup>[29]</sup>。为此, 针对 VOC 污染, 《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002) 以 TVOC 限量指标规定居室空气 VOC 浓度不得超过  $0.60\text{mg}/\text{m}^3$ 。

低沸点芳香族化合物苯、甲苯、二甲苯等是与甲醛并重的 VOC 中的典型污染物, 该污染物也称苯系物污染, 源于油漆、涂料、胶黏剂、防水材料等的释放与富集, 装饰程度较高的轿车等常为苯系物污染重灾区。因为具有脂溶性的特点, 可以通过完好无损的皮肤进入人体, 对皮肤有刺激作用, 能诱发人的染色体畸变, 世界卫生组织已经把苯系物定为强烈致癌物质。浓度很高的苯蒸气具有麻醉作用, 短时间内可使人昏迷, 发生急性中毒, 甚至可导致生命危险。长期吸入高浓度的苯系物蒸气, 会破坏人体的循环系统和造血机能, 导致白血病。此外, 妇女对苯系物的吸入, 反应格外敏感, 妊娠期妇女长期吸入苯系物会导致胎儿发育畸形和流产<sup>[30]</sup>。鉴于苯系物的危害性巨大, 《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002) 分别对苯、甲苯和二甲苯浓度做了限定, 分别不得超过  $0.11\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $0.20\text{mg}/\text{m}^3$  和  $0.20\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### 1.1.2.2 甲醛

甲醛是 VOC 中最为典型的有害气体, 它是一种全身性毒物, 是室内环境污染的罪魁祸首之一。1995 年甲醛就被国际癌症研究机构确定为可以致癌物, 在我国有毒化学品优先控制名单上高居第二位, 已经被世界卫生组织确定为致癌和致畸形物质, 是公认的变态反应源, 也是潜在的强致突变物之一。甲醛污染多见于室内, 主要来源于室内装饰的胶合板、细木工板、中密度纤维板和刨花板等人造板材, 甲醛黏合剂, 含甲醛组分并可能释放的其他各类装饰材料, 香烟、燃料及有机材料燃烧等<sup>[31-33]</sup>。

甲醛不仅能引发眼刺激、头痛、咳嗽、过敏性鼻炎和支气管炎, 造成肝脏、心肌、肺和肾脏神经毒性损伤, 还会导致失眠、精神不集中、记忆力下降、情绪反常、食欲不振、流产和不孕等, 甚至能引发鼻咽癌、结肠癌、脑瘤等疾病, 还是一种典型的气道和眼部的刺激性气态污染物。甲醛是学术界公认的多重化学物敏感症的化学致敏物, 是一种环境致敏原, 可引起皮肤致敏化, 甲醛诱导性哮喘已经成为我国一种典型疾病。甲醛能降低机体各个器官的抗氧化能力, 导致器官

的氧化损伤,浓度越高损伤越严重。甲醛可以与空气中的离子型氯化物产生致癌物(二氯甲基醚)。不仅如此,甲醛也被证实对生殖系统有一定副作用,长期接触可引发受孕推迟、孕妇流产等问题,并具有遗传毒性,可引起DNA损伤。在所有接触者中,老人、小孩和孕妇所受危害最大<sup>[34]</sup>。

鉴于甲醛污染的普遍性、长久性及较大的危害性,甲醛一直是室内空气污染管控的重点,我国《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)规定居室空气中甲醛卫生标准(最高容许浓度)为 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ,而《民用建筑工程室内环境污染控制规范》(GB 50325—2010)中规定居室空气中甲醛最高容许浓度为 $0.08\text{mg}/\text{m}^3$ 。

总的来说,VOC的处理方法主要有两类<sup>[35]</sup>:一类是回收法。回收法是通过物理方法,在一定温度、压力下,用选择性吸附剂和选择性渗透膜等方法来分离VOC,主要包括活性炭(AC)吸附法、变压吸附法、冷凝法和生物膜法等。另一类是消除法。消除法是通过化学或生物反应,用光、热、催化剂和微生物等将有机物转化为水和二氧化碳,主要包括热氧化法、催化燃烧法、生物氧化法、电晕法、等离子体分解法、光分解法等。对于每一种方法,其适用范围、去除性能、投资运行费用等多方面因素,皆制约了单元处理技术的应用。目前,除了推广有机物的单元处理技术,重点是开发不同处理技术的组合,以达到提高去除效率、降低去除成本、减少二次污染的目的。

### 1.1.2.3 酸性气体

酸性气体是指煤转化过程中产生的硫氧化物( $\text{SO}_x$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )及二氧化碳( $\text{CO}_2$ )等气体。酸性气体能与碱作用生成盐。有些酸性气体对人类是有害的,例如,空气被污染情况下,其中就含有二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、三氧化硫( $\text{SO}_3$ )等,这些气体在下雨天生成强酸性化学物质,具有强腐蚀作用,对地面的物体产生腐蚀,这就是酸雨。酸雨对树木的影响最大,可以致死,严重影响人类生存环境,所以受到全世界特别关注。人们已制定许多措施来减少生产污染空气的工厂,同时发展绿色经济,倡导绿色生活<sup>[36,37]</sup>。

#### 1) 氮氧化物

空气氮氧化物( $\text{NO}_x$ )污染主要以NO和 $\text{NO}_2$ 为主。室内空气中的 $\text{NO}_x$ 主要源于烹饪过程中煤气的燃烧、液化石油气的燃烧、煤炭的燃烧、吸烟以及室外 $\text{NO}_x$ 扩散入内等<sup>[38-40]</sup>。

$\text{NO}_2$ 在室温下为有刺激性气味的红棕色气体,易溶于水,易损害呼吸道。吸入 $\text{NO}_2$ 气体初期仅有轻微的眼及上呼吸道刺激症状,如咽部不适、干咳等。经长时间潜伏后会发生迟发性肺水肿、成人呼吸窘迫综合征,出现胸闷、呼吸窘迫、咳嗽、咯泡沫痰、发绀等,可并发气胸和纵隔气肿。儿童暴露在 $\text{NO}_2$ 中,对其肺功能和呼吸系统的危害更大。NO则为无色无味、难溶于水的有毒气体。NO化学

性质非常活泼, 在空气中很快转变为  $\text{NO}_2$  产生刺激作用, 高浓度  $\text{NO}$  可致高铁血红蛋白血症。 $\text{NO}_x$  不仅对人体伤害极大, 对生态环境也有着极大的危害, 可以生成光化学烟雾、形成酸雨、破坏臭氧层等<sup>[41-43]</sup>。

为有效控制  $\text{NO}_x$  的排放, 降低其对大气、环境造成的污染, 我国在《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 中具体规定了  $\text{NO}_2$  的排放浓度一级标准, 日均浓度不得高于  $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996) 中强调硝酸、氮肥、炸药等企业应对  $\text{NO}_x$  排放采取控制措施, 明确废气中  $\text{NO}_x$  浓度  $\leq 0.15\text{mg}/\text{m}^3$ ; 《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002) 则规定室内空气中  $\text{NO}_x$  (以  $\text{NO}_2$  计) 1h 均值最高容许浓度为  $0.24\text{mg}/\text{m}^3$ <sup>[44-46]</sup>。

## 2) 二氧化硫

二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ ) 是无色气体, 有强烈刺激性气味, 是大气主要污染物之一。大气中  $\text{SO}_2$  的产生既来自天然释放又来自人为污染。天然源的  $\text{SO}_2$  主要来自陆地和海洋生物残体的腐解和火山喷发等; 人为源的  $\text{SO}_2$  主要来自化石燃料的燃烧, 如煤炭、石油、天然气等。室内  $\text{SO}_2$  主要来自厨房与取暖设备所用的矿物燃料与石油液化气燃烧, 这是由于煤和石油通常含有硫化物, 燃烧时会生成  $\text{SO}_2$ , 因此燃煤、燃气、燃油、取暖等成为室内  $\text{SO}_2$  的主要来源。尤其是冬季, 我国北方的家庭, 取暖的同时密闭室内空间, 以及我国农村地区燃煤比较普遍, 都造成室内  $\text{SO}_2$  浓度较高。其次, 含硫杀虫剂、杀菌剂、漂白剂和还原剂等, 常用于家庭清洁用品及食物防腐剂, 也是室内  $\text{SO}_2$  的来源之一<sup>[47]</sup>。

$\text{SO}_2$  对人体健康产生影响主要通过两种途径: 一是  $\text{SO}_2$  气体本身刺激, 二是  $\text{SO}_2$  易被湿润的黏膜表面吸收生成亚硫酸、硫酸, 对眼及呼吸道黏膜有强烈的刺激作用。轻度中毒时, 发生流泪、畏光、咳嗽, 咽、喉灼痛等; 严重中毒时可在数小时内发生肺水肿。长期暴露于室内  $\text{SO}_2$  中可导致人体呼吸系统慢性疾病, 严重时促使肺功能急性降低<sup>[48-52]</sup>。

为此,  $\text{SO}_2$  作为室内污染物之一被列入管控范围, 我国《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002) 规定居室空气中  $\text{SO}_2$  容许浓度为  $0.50\text{mg}/\text{m}^3$ 。

## 3) 硫化氢

硫化氢 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 气体是一种无色、高毒的酸性有害气体。它能在空气中燃烧, 与空气混合可形成爆炸物, 对人体有剧毒, 对金属设备有腐蚀性。 $\text{H}_2\text{S}$  污染钻井时使 pH 迅速降低、钻井液发生絮凝。 $\text{H}_2\text{S}$  很少用于工业生产中, 一般作为某些化学反应和蛋白质自然分解过程的产物;  $\text{H}_2\text{S}$  作为某些天然物质的成分或杂质, 经常存在于多种生产过程及自然界中, 如采矿, 提炼铜、镍、钴等 (尤其是硫化矿), 煤的低温焦化, 含硫石油的开采和提炼; 橡胶、人造丝、鞣革、硫化染料、颜料、甜菜制糖、动物胶等工业中都有  $\text{H}_2\text{S}$  的产生; 开挖整治沼泽地、沟渠、水井、下水道、隧道, 以及清除垃圾、污物、粪便等作业都会产生  $\text{H}_2\text{S}$ <sup>[53-55]</sup>。



有报告称人的嗅觉阈为  $0.012\sim 0.03\text{mg}/\text{m}^3$  或  $0.14\text{mg}/\text{m}^3$ ，远低于引起危害的最低浓度。起初臭味的增强与浓度的升高成正比，当浓度超过  $10\text{mg}/\text{m}^3$  时，浓度继续增高而臭味反而减弱，在高浓度时很快引起嗅觉疲劳而不能觉察  $\text{H}_2\text{S}$  的存在，故不能依靠臭味强烈与否来判断有无危险浓度的存在<sup>[56]</sup>。

$\text{H}_2\text{S}$  能够直接妨碍机体对氧的摄取和运输，从而造成细胞内呼吸酶失去活力，造成细胞缺氧窒息死亡。 $\text{H}_2\text{S}$  的毒性很强，人的绝对致死浓度为  $1000\text{mg}/\text{m}^3$ 。当空气中的  $\text{H}_2\text{S}$  浓度为  $10\sim 15\text{mg}/\text{m}^3$  时，人会出现中毒症状，国家标准《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素》（GBZ 2.1—2007）中明确指出  $\text{H}_2\text{S}$  最高容许浓度为  $10\text{mg}/\text{m}^3$ <sup>[57]</sup>。

净化酸性气体一般有以下 3 种方法<sup>[58,59]</sup>：①化学吸收法，即通过化学吸收剂与酸性气体进行化学反应而达到吸收的目的。这类方法一般不受操作压力的限制，对  $\text{SO}_2$  等酸性气体的净化度高，但其通常对杂质的适应性小，溶剂解吸时所需的能量大。②物理化学吸收法，采用两种以上溶剂的混合物作为吸收剂，既有化学反应过程，又有物理吸收过程。③物理吸收法，采用极性有机溶剂作为脱除剂。物理溶剂一般依据有机溶剂的极性性能来吸收酸性杂质，它们之间不发生化学反应，因而溶剂在解吸时所需能量极少，同时，物理溶剂不存在化学平衡状态，吸收酸性杂质的容量与其分压成正比。目前已被工业应用的众多的物理溶剂方法皆不尽如人意，要么在低温下才能充分显示其经济效益，工艺流程复杂，设备费用高；要么溶液有毒、价格昂贵；要么溶剂损耗大，对  $\text{H}_2\text{S}$  选择性不好，使其应用范围受到了限制。

#### 1.1.2.4 碱性气体

引起空气污染的碱性气体是氨气 ( $\text{NH}_3$ )。  $\text{NH}_3$  是一种无色而具有强烈刺激性恶臭味的气体，比空气轻，人体可感受嗅阈值浓度为  $5.3\text{mg}/\text{m}^3$ ，按毒理学分类属于低毒类化合物。其污染多来源于建材及添加剂、日用美容美发产品（以美容美发店为代表）、生物排泄物（以养殖场、厕所为代表）等，除此之外，工业场所的生产活动或泄漏也可导致严重的  $\text{NH}_3$  污染。室内  $\text{NH}_3$  的主要来源是建筑施工中使用的混凝土外加剂。许多建筑都使用了高碱混凝土膨胀剂或者含尿素的混凝土防冻剂，这些含有大量氨类物质的外加剂随着环境因素的变化而还原成  $\text{NH}_3$  从墙体中缓慢释放出来，造成室内空气中  $\text{NH}_3$  的浓度不断升高<sup>[60,61]</sup>。

$\text{NH}_3$  对皮肤组织和上呼吸道有腐蚀和刺激作用。 $\text{NH}_3$  可以吸收皮肤组织中的水分，使组织蛋白变形，破坏细胞膜结构；它还能麻痹呼吸道纤毛和损害黏膜上皮组织，使病原微生物易于侵入，降低人体对疾病的抵抗力。由于  $\text{NH}_3$  的溶解度极高，所以常被吸附在皮肤黏膜和眼结膜上，从而产生刺激和炎症。而一旦  $\text{NH}_3$  通过肺泡进入血液，就会与血红蛋白结合从而破坏运氧功能，严重时会引起肺气肿和呼吸窘