
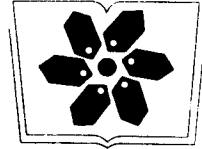


赵坚行 著

A large, stylized graphic of a flame in shades of yellow and white, occupying the central and right portions of the cover. The flame has three main upward-pointing lobes.

热动力装置的 排气污染与噪声

科学出版社



中国科学院科学出版基金资助项目

热动力装置的排气污染与噪声

赵坚行 著

科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

燃烧过程的污染是涉及到环境保护、人类健康及生态平衡的重要问题,本书全面而系统地阐述了各种热力装置的排气污染与噪声。

全书共分七章,前两章阐述排气污染物的生成机理,包括空气污染化学、各种污染物的生成和破坏动力学以及污染物的测量,第三至五章分别介绍燃气轮机、内燃机、锅炉和工业用炉等热力装置排气污染物的形成理论,先进低污染燃烧装置的工作原理和新的低污染燃烧技术,以及污染物排放特性、排气污染标准与排放控制试验规范,第六章叙述噪声污染与控制,包括燃烧噪声和排气射流噪声的理论分析,以及降低噪声的新技术措施,第七章扼要介绍燃烧装置中污染物特性数值模拟,包括有关的数学模型和计算方法。

本书的体系不同于其他类似书籍,它详细论述了各种热力装置低污染的燃烧理论与噪声理论,把理论分析、近代计算机模拟方法与适用于工程的研究成果相互结合起来,力求内容新颖,重点突出,系统性强。

本书可作为热能工程、航空航天、工程热物理、化工、冶金、交通运输等领域的高等院校教师、研究生和高年级本科生的教学和学习用书,也可供有关专业的科技人员参考。

热力装置的排气污染与噪声

赵坚行 著

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100017

北京科地亚印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995年10月第一版 开本:850×1168 1/32

1995年10月第一次印刷 印张:10 1/8 插页:2

印数:1—1 200 字数:261 000

ISBN 7-03-004743-5/TB·129

定价:20.80元

序

燃烧对大气造成的污染,包括氮氧化物、硫化物、未燃碳氢化物、一氧化碳、二氧化碳、烟粒、粉尘与噪声等污染,日益构成越来越严重的公害,危及人类的生存及健康,因此已成为当前世界各国燃烧科学与技术方面研究人员公认的重要研究领域,是各种国际和国内燃烧学学术会议,包括 1991 年以来召开的三次国际清洁燃烧会议的重要议题。但是,由于燃烧污染物生成的反应动力学机理相当复杂,又由于污染物生成于湍流单相与多相流动中,污染物生成的反应与燃料燃烧主反应之间有相互作用,而且各种燃烧装置中污染物生成有不同特点,因此其研究中存在不少困难。虽然近年来各国学者从化学、流体力学、燃烧等不同角度来研究燃烧污染,并取得了显著进展,但尚有待于大力进行研究。

本书作者多年来从事燃烧的理论、数值模拟、实验与应用的科研工作与教学工作,特别是航空发动机燃烧数值模拟研究工作,取得了国内外同行公认的显著成果。近年来作者又致力于研究燃烧污染问题。本书正是作者根据这方面几年来的教学和科研成果及当前国内外这方面的最新成就写成的。

和现有国内外有关燃烧污染的书籍不同之处是,本书全面地阐述了有关燃烧污染的各个方面的重要问题,包括气体、液体、固体燃料燃烧生成的污染及噪声,大气污染与燃烧生成污染的基本过程和锅炉、内燃机、航空发动机燃烧污染的专门问题,污染物生成反应动力学机理,实际燃烧过程污染物生成数值模拟及其测量,低污染燃烧技术和污染物及噪声的降低与防治。作者力图将燃烧污染物生成的基础研究与实际工程应用相结合,污染物生成的降低与防治和低污染燃烧技术相结合,污染物生成的反应动力学与湍流流动的研究相结合,从而形成了本书的独到之处,使本书达到

了由化学流体力学角度来研究污染的高度.到目前为止,尚未见到国内外有这样类似内容和特点的燃烧污染方面的专著.

本书的出版无疑为热能、航空航天、化工、冶金及各相关领域的科研和设计人员及高校师生提供了一本有价值的专著,有助于他们从事燃烧污染方面的教学、学习和科研工作.我很高兴地向燃烧学界广大同行及读者推荐本书.谨祝本书出版成功和作者在燃烧污染物生成的研究方面取得更丰硕的成果.

周力行

1995年5月于清华园

前 言

现在许多国家尤其是工业化国家的工业迅速发展,城市人口过分集中,各种热动力装置燃烧化石燃料排放出大量污染物,使环境污染严重,由局部地区污染扩大到全球性污染.目前,世界各国每年都有数亿吨计的各种污染物排到自然环境中,超过了自然环境的自净能力,严重地破坏了生态平衡,影响了人类的身体健康.例如,烟雾事件造成死亡率增高,呼吸系统和心血管系统发病率增多,甚至导致死亡.此外,环境污染也使其他生物受到威胁.根据近2000年以来的统计,大约有110种兽类和130种鸟类已经灭绝,估计全世界有25000种植物和1000多种脊椎动物正处于灭绝的边缘.环境污染也给工农业生产造成重大损失,大气污染已成为全球所关注的问题.

近几十年来,随着能源消耗的不断增加,从燃烧的矿物燃料与工业废气中排入大气的二氧化硫和氮氧化物愈来愈多.这些污染物在远距离扩散中,因受气象条件的影响,遇到水滴或潮湿空气便转化成硫酸与硝酸,溶解在雨水中形成酸雨沉降.酸雨使森林死亡,湖泊酸化,土壤肥力降低,农作物减产,生态系统破坏乃至生物灭绝,建筑物和衣服被腐蚀.酸雨已成为世界环境污染问题,特别是西欧、北美等工业集中地方,酸雨危害更为突出.我国遭受酸雨危害的土地有4000平方公里,使每年农业生产损失高达20亿元.据1981年在全国23个省、121个城市调查表明,酸雨的组成90%是硫酸型并在全国广泛存在,尤以南方严重.目前,我国 SO_2 的年排放量为1565万吨,为全世界 SO_2 排放量9900万吨(1989年)的15%,仅次于美国和前苏联,居世界第三位.日本 SO_2 年排放量为108万吨,仅是我国 SO_2 排放量的1/15.我国 NO_x 年排放量为600万吨,世界 NO_x 年排放量为6300万吨,因此我国是一个接近

世界 NO_x 排放量 10% 的 NO_x 排放国, 而日本 NO_x 年排放量约为 142 万吨, 只有我国的 1/4。有数字表明, 我国粉尘年排放量为 2200 万吨, 约为日本粉尘排放量的 5 倍。

由此可知, 我国的大气污染十分严重, 主要是在工业、人口以及能源消耗都较为集中的城市。其中以粉尘污染最严重, 其次是 SO_2 , 再次是 NO_x 。

为了防治大气污染, 1989 年 11 月在荷兰召开了国际大气污染和气候变化部长会议。在会后发表的宣言中指出: “所有国家尤其是工业化国家应该认识到他们需要使自己的社会经济活动和生活方式有益于环境”。1990 年美国布什政府对《大气净化法》进行了大幅度的修正, 明确了酸雨对策, 决定每五年削减一次 SO_2 排放量, 到 2000 年 SO_2 排放量由目前的 2000 万吨降至 1000 万吨。

1992 年在巴西的里约热内卢举行的联合国环境和发展大会上, 有 154 个国家在大会期间签署了《气候变化公约》以及有关森林的原则声明。这些都说明世界各国已认识到控制排气污染的必要性, 并采取了具体对策。

我国于 1979 年颁布了《中华人民共和国环境保护法(试行)》, 为保护环境提供了法律依据。1983 年在国务院召开的第二次全国环境保护会议上, 提出了我国到 2000 年环境保护的战略目标, 确定了环境保护是我国的一项基本国策。

根据我国对烟尘、 SO_x 、 NO_x 和 CO 四种污染物来源统计分析, 燃料燃烧产生的空气污染物占全部污染物的 70%, 机动车产生的占 10%。可见燃料燃烧是空气污染物的主要来源。为此, 许多燃烧科学研究工作者已开展对燃烧排放污染物的形成机理的研究, 探索低污染燃烧技术, 以减少污染物排放量。

虽然我国大气污染的研究工作起步较晚并还处于开始阶段, 但随着国民经济迅速发展, 污染物排放量不断增加以及对有害污染物排放标准要求越来越严格, 这将促进控制污染的技术发展, 也要求广大研究工作者结合我国具体情况开展防止污染的研究。

噪声污染同大气污染一样, 也是一种公害。随着工业和交通运

输业的发展,噪声污染及其对人体健康的危害,已受到人们的高度重视.如何降低噪声,为人们创造舒适的生活环境,也是环境保护和劳动保护的一项重要课题.

目 录

序

前言

主要符号表	(ix)
第一章 空气污染	(1)
§ 1.1 空气污染物的组成及其危害	(1)
§ 1.2 空气污染的化学	(11)
§ 1.3 光化学烟雾的特性	(21)
§ 1.4 空气污染物的测定	(27)
参考文献	(36)
第二章 燃烧时污染物的生成和破坏	(38)
§ 2.1 氧化氮的生成动力学	(38)
§ 2.2 有机污染物	(53)
§ 2.3 一氧化碳的生成	(56)
§ 2.4 硫化物的形成	(59)
参考文献	(61)
第三章 锅炉及工业用炉的排气污染和控制	(64)
§ 3.1 燃料燃烧与大气污染	(64)
§ 3.2 煤粉燃烧时 NO_x 的生成	(70)
§ 3.3 降低 NO_x 的燃烧技术	(81)
§ 3.4 SO_x 的生成与控制	(113)
§ 3.5 烟尘的生成和控制	(118)
参考文献	(124)
第四章 内燃机的排放与控制	(127)
§ 4.1 汽油机污染物的排放及控制	(128)
§ 4.2 压缩式内燃机污染物的排放与控制	(158)

§ 4.3 内燃机排放控制的试验规范	(171)
参考文献	(180)
第五章 燃气涡轮发动机的排气污染和控制	(182)
§ 5.1 排气污染的标准	(182)
§ 5.2 燃气轮机燃烧室排气污染物的生成机理及其 控制	(189)
§ 5.3 先进低污染的燃烧室	(204)
参考文献	(213)
第六章 噪声污染及其控制	(216)
§ 6.1 环境噪声与防治	(216)
§ 6.2 燃烧噪声的机制和预测	(226)
§ 6.3 振荡燃烧噪声	(238)
§ 6.4 空气动力噪声	(243)
§ 6.5 内燃机的噪声及其控制	(256)
参考文献	(263)
第七章 数值模拟燃烧过程中污染物生成	(265)
§ 7.1 燃烧数值模拟	(265)
§ 7.2 污染物的生成模型	(288)
§ 7.3 经验-分析法	(298)
参考文献	(306)
索引	(309)

主要符号表

拉丁字母符号			
A	前置因子	h	焓, 普朗克常量
A_E	焦炭反应表面积	K	波数, 常数
a	热扩散系数	k	反应速度常数, 紊流动能, 平衡常数
B	燃烧区因次特性	L_{eq}	等效声级
C	声速	l_m	紊流尺度
C_1, C_2	双方程紊流模型系数	l_f	火焰厚度
C_{g1}, C_{g2}	g 方程中系数	M	分子量
C_p	定压比热, 静压分布系数	Ma	马赫数
C_R	EBU 模型中系数	m	质量, 质量分数
C_w	紊流粘性表达式中系数	N	点声源的数目, 氮
D	扩散系数, 直径, 扩散项	N_R	基元反应个数
Da	Damköhler 数	N_S	化学反应中组分数目
d	直径	n	摩尔浓度, 频带宽度的倍频程数
E	活化能, 混气燃烧前后膨胀比	P, p	压力, 声压, 概率, 产生项
F	油气比, 燃油质量分数, 推力, 进入主燃区流量比, 燃油流量	$P(\Phi)$	变量 Φ 的概率密度分布函数
F_N	推力	Pr	Prandtl 数
f	频率, 混合分数, 修正系数	Q	低热值
G_k	紊流动能产生项	q	每个单数声源可燃气体容积消耗率
g	标量脉动均方值, 燃油消耗率, 吉布斯能量	R	气体常数, 反射率, 压力比
ΔH	反应热	R_F	火焰特征结构因子
H	热值	R_{fs}	燃烧反应速率
		r	再循环率
		S, s	比熵, 源项, 表面积, 化学当量比, 反应率张量

Sc	Schmidt 数	Φ, φ	通用形式因变量, 压力应变
S_L	层流火焰传播速度		张量, 瞬时量
S_N	发烟指数	ϕ	燃料与空气的当量比
St	Strouhal 数	Ω	旋度张量, 气动载荷参数
T	温度, 周期	ω	角速度, 化学反应速率
Tu	紊流特性		
t	时间, 停留时间		下角标
u, v, w	速度分量	A	空气
V	体积, 速度, 燃烧室容积	α	标量, 组分, 反应级数, 空气
W	分子量, 声功率, 流量, 紊流 燃烧速率	c	焦炭
W_f	燃油流量	e	有效
x, y, z	坐标	ev	蒸发
Y	组分质量分数	F, fu	燃料
	希腊字母符号	i, j, k	坐标
α	吸收系数, 过剩空气系数, 煤 中氮释放挥发分部分, 理论 当量比, 空燃比	l	层流
β	化学当量比	m	混合物
Γ	输运系数	ox	氧
ϵ	紊流脉动动能耗散率	p	燃烧产物
η	燃烧效率, 系数	pr	燃气
η_c	焦炭燃尽率	qc	猝熄
η_N	煤氮转换率	r	参考条件, 额定状态
λ	波长	rms	均方根值
μ	粘性系数, 组分化学势	s	化学当量比, 反应物
ν	运动粘度, 随机量, 光的频率	t	紊流
π	压比	∞	无穷远的
ρ	密度		上角标及上标
τ	剪切应力, 停留时间, 时间	$\bar{\quad}$	雷诺时间平均
		\sim	Favre 密度加权平均
		$'$	雷诺时均法中脉动值
		$"$	Favre 平均中脉动量

第一章 空气污染

§ 1.1 空气污染物的组成及其危害

近几十年来,现代工业迅速发展,大量矿物燃料燃烧向大气排放的污染物种类和数量愈来愈多,并且经济发达引起人口大量集中城市和能源消耗量剧增,使城市空气污染严重,影响人类健康和自然环境,成为一种社会公害.世界各国对此都十分关心,并采取各种措施,以降低空气污染,保护环境.

§ 1.1.1 空气及空气污染

空气是多种物质的混合物.清洁干燥的空气,即离开人类活动频繁的地点以及其他不良影响而有一定距离的地方的大气,有一定组成,以体积百分比计,其中氮占 78.09%,氧占 20.94%,氩占 0.93%,二氧化碳占 0.032%.这四种气体占大气总体积的 99.99%.此外,大气中还含有氦、氖、氫、氙、氢、一氧化碳、二氧化硫、二氧化氮、臭氧、甲烷、氨等微量气体,但它们的总和还不到大气总体积的 0.01%.干燥大气中不包括水蒸气.实际上在低层空间,水蒸气也是大气的一个主要组分,但它在大气中的含量并不固定,而是随地理位置和气候条件不同在 0—4% 的范围内变化.从人们对大气组成的实测结果来看,清洁干燥大气的组成几乎是固定不变的.但是,随着人口的增长、现代工业和交通运输业的发展及石化燃料(煤和石油)的大量使用,热动力装置和喷气发动机排气中许多有害物质(如烟尘、二氧化碳、氮氧化物、一氧化碳和碳氢化合物等)排放到大气中,使局部地区大气中这些物质的“收入”超过了“支出”,即它们在大气中含量增加.尽管这些有害物质浓度增加值很小(一般是 ppm 数量级甚至更小),但它们的含量一旦超出

环境标准的限值,就会直接或间接地危害人体健康,影响动植物生长和生存.因此大气污染是指有害物质浓度超过大气环境所能允许的极值并持续一定的时间,使大气质量恶化,从而危害人类的生活、工作和健康,破坏生态的自然平衡,并使设备和财物直接和间接地遭到破坏.引起大气污染的有害物质称为大气污染物.

一般有两种方法表示空气污染物的浓度.第一种方法是以气体污染物占体积的百万分之一(体积比 $\times 10^6$)来表示,缩写为ppm.例如,空气中 N_2 占体积的78.084%,是780840 ppm.与此相对应的气态空气污染物的一般浓度是体积的0.0001%或1ppm.第二种常用的浓度测量单位是根据单位体积内空气污染物的重量,用每立方米体积中有几微克表示的,缩写为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.这种测量单位一般用于颗粒状物质,有时也用于气体.ppm和 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间的换算依赖于分子量及一个摩尔物质所占的体积,在标准温度(25°C)和压力1 atm时,换算关系为

$$1 \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{\text{分子量} \times 10^{-3}}{24.45} \text{ ppm} \quad (1.1)$$

表 1.1 列举了清洁空气与污染空气中某些污染物成分的含量,以资比较.

表 1.1 清洁空气与污染空气某些成分比较

成 分	清 洁 空 气	污 染 空 气
二氧化硫	0.001—0.01 ppm	0.02—2 ppm
二氧化碳	310—330 ppm	350—370 ppm
一氧化碳	< 1 ppm	5—200 ppm
氮氧化物	0.001—0.01 ppm	0.01—0.5 ppm
碳氢化合物	1 ppm	1—20 ppm
氧化剂	0.02 ppm	0.2—0.4 ppm
颗粒物	10—20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	70—700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

在污染物测定时,一般还规定含氧量的条件,对于不同基准含氧量的 NO_x 值换算公式如下:

$$(\text{NO}_x)_{\text{待换值}} = (\text{NO}_x)_{\text{测量值}} \times \frac{20.9 - (\text{O}_2\%)_{\text{待换值}}}{20.9 - (\text{O}_2\%)_{\text{测量值}}}$$

例如,在含氧量为 4% 的烟气中,测得的 NO_x 为 250 ppm,换算到 6% 含氧量为基准的值为

$$\text{NO}_x = 250 \times \frac{20.9 - 6}{20.9 - 4} = 220.41 \quad (\text{ppm})$$

§ 1.1.2 空气污染物的组成

空气污染物很多,其中大部分是有机物. 在环境科学中,通常按下列两种方法对空气污染物进行分类.

1. 按形成过程分类

空气污染物按其形成过程的不同,可分为原始污染物和次生污染物.

(1) 原始污染物:直接从污染源排放到大气中的有害物质. 最常见的原始污染物有 SO_2 , CO , NO_x (主要是 NO 和 NO_2) 及颗粒物.

(2) 次生污染物:进入大气中原始污染物之间相互作用,或它们与大气中正常组分发生一系列化学或光化学反应而后生成新的污染物. 最常见的次生污染物有臭氧,醛类(甲醛、乙醛和丙烯醛等),过氧乙酰硝酸酯(PAN)以及硫酸烟雾和硝酸烟雾.

2. 按存在状态分类

由于各种污染物的物理化学性质不同,产生它们的过程和环境条件各异,因而空气污染物的存在状态也不相同. 根据它们存在状态可分为下列两类:

(1) 颗粒状污染物:是指除了纯水以外的任何一种在正常状态下以液态或固态形式存在于大气中的物质,例如尘(指散布于气

体中固体微粒,粒径一般为1—200 μm 左右),烟(指由较高浓度的低蒸气压物质过饱和的蒸气凝结形式的小颗粒组成,粒径为0.01—1 μm ,如燃烧过程中产生的悬浮粒子),轻雾和雾(由水蒸气凝结生成的悬浮的小体积液滴,或由雾化引起。轻雾由相当大的颗粒物组成,在浓度比较低时其直径可超过10 μm 。如果浓度很高,使能见度变坏,则称为雾)。所谓烟雾通常是指固液混合气溶胶。它具有烟、雾的二重性,即当烟和雾同时形成时就构成烟雾。烟雾又分成硫酸烟雾和硝酸烟雾。硫酸烟雾主要由燃烧时所产生的高浓度 SO_2 被氧化成 SO_3 ,后者与水蒸气结合成硫酸雾并与烟混合在一起构成硫酸烟雾。硝酸烟雾主要是汽车排气中氮氧化物和碳氢化合物所形成的。这些物质在大气中通过光化学反应并与水蒸气形成硝酸雾,再与烟混合在一起构成硝酸烟雾。

(2) 气态污染物:是指以 SO_3 为主的含硫化合物,以 NO 和 NO_2 为主的含氮化合物,碳的氧化物,碳氢化合物及卤素化合物等(见表1.2)。

表 1.2 气态污染物的分类

类 别	原始污染物	次生污染物	人为源
含硫化合物	$\text{SO}_2, \text{H}_2\text{S}$	$\text{SO}_3, \text{H}_2\text{SO}_4,$ MSO_4 ^①	燃烧含硫的燃料
含氮化合物	NO, NH_3	$\text{NO}_2, \text{MNO}_3$ ^①	在高温燃烧时 N_2 和 O_2 的化合物
碳氢化合物	HC	醛, 酮, 过氧乙酰 基硝酸酯(PAN)	燃料燃烧, 精炼石 油
碳的氧化物	CO, CO_2	无	燃烧
卤素化合物	HF, HCl	无	冶金作业

① MSO_4 和 MNO_3 分别表示一般的硫酸盐和硝酸盐。

表中 CO 和 CO₂ 两者都是碳氢化合物燃烧的产物,分别由不完全和完全燃烧产生.实际上 CO₂(和水一起,是碳氢化合物燃料完全燃烧的产物)一般不认为是污染物.然而,全球的 CO₂ 浓度一直在稳定地增加,引起了人们对于它对全球气象可能产生的影响的注意.

某些卤素化合物,像氟化氢(HF)和氯化氢(HCl)是在冶金和其他作业中产生的.即使氟化氢浓度很低,它对人类、动物和植物也是有害的,并还有刺激性.但是,因为卤素化合物通常在城市空气污染物中所占比例很小,因此这里不准备作进一步阐述.

§ 1.1.3 空气污染的影响

大量资料表明,空气污染严重影响人类和动物的健康,危害植物的生长,弄脏并毁坏原材料,改变气候,降低能见度和减少太阳辐射,损害生产过程,造成安全事故以及常常有害于生命财产.虽然其中有些影响是明确的并可以测量,像毁坏植物和原材料,以及降低能见度,但大多数影响都是难以测量的,像对人类和动物健康的影响,对人们安宁生活的干扰,因此随着大气污染日益严重,迅速发展大气分析方法成为迫切需要解决的问题.

1. 空气污染对大气性质的影响

空气污染影响大气性质:降低能见度;形成雾及降水;减少太阳辐射和改变温度和风的分布.其中以降低能见度对大气性质影响最为显著,因为能见度降低可能导致安全事故发生.所谓能见度,是指在某一指定方向刚可以看见或辨认下列目标物的最大距离:(1)在白天为一个明显的深色目标物;(2)在夜间为一个不聚焦中等强度的光源,四周水平范围内至少有一半达到或超过这一距离,但不一定是连续的水平区域.能见度的降低是由于气体分子和颗粒物以光的吸收和光的散射两种效应作用在可见光的辐射上.光的吸收使气体分子和颗粒物吸收某一波长光线,有时影响大气颜色;光的散射是指光线传播方向因受污染物影响而发生偏转,或