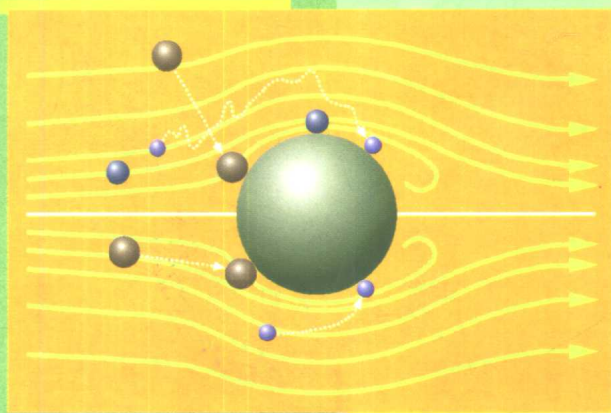


现代除尘 理论与 技术

向晓东 著

**Modern Aerosol
Particle Collection
Theory and Technology**

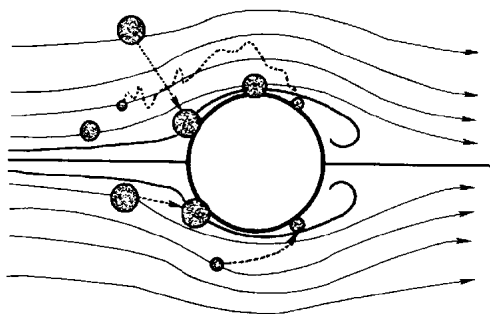


冶金工业出版社

现代除尘理论与技术

Modern Aerosol Particle Collection Theory
and Technology

向晓东 著



冶金工业出版社

2002

内 容 简 介

《现代除尘理论与技术》共分 8 章,前两章介绍了在进行颗粒污染物控制的研究与应用中所必备的空气动力学基础和气溶胶力学基础。后 6 章则是根据前两章所建立的基本概念和基本理论,讨论各种除尘方法的分离机理,阐述除尘设备的性能、构造、设计和工程应用。本书既可供设计科研单位、高等院校、管理部门从事环境科学工作的科研人员和工程设计人员阅读和参考,也可作为环境工程专业本科生教材,还特别适合于作为建筑、热能、通风、空调和空气污染控制等方向的硕士和博士研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代除尘理论与技术/向晓东著. —北京:冶金工业出版社, 2002.6

ISBN 7-5024-2999-9

I. 现… II. 向… III. ①除尘—理论②除尘—技术 IV. X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 022582 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 朱华英 美术编辑 王耀忠 责任校对 栾雅谦 责任印制 李玉山

利森达印务有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2002 年 6 月第 1 版,2002 年 6 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;10 印张;265 千字;305 页;1-3000 册

26.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序 言

新中国成立以来,党和政府一直十分重视环境保护工作,取得了举世瞩目的成就。在环保技术方面,经过我国广大科技工作者的不懈努力,现在已大大缩小了与西方发达国家之间的差距。在环保产业方面,目前,全国从事环保产业的企事业单位约1万家,从事环保产业的职工近200万人,年产值超过1000亿元,环保产业年经济增长率将保持在15%左右。其中,烟尘净化设备在环保产业中占有相当大的比重。

烟尘净化设备性能的不断提 高,应归结于除尘理论与技术的不断发展。回顾我国除尘技术发展的历程,可粗略地分3个阶段:

20世纪60~70年代,主要是介绍西方关于颗粒污染物净化技术和引进成套的除尘设备,以应用于中国的除尘实践。

80年代,主要是对除尘理论与技术进行归纳总结,除了借鉴西方发达国家的研究成果外,日本在除尘方面的实用技术对我们建立较完善的除尘理论与技术体系也产生了较大影响。其中有代表性的著作有嵇敬文编著的《除尘器》,陈明绍等编著的《除尘技术的基本理论与应用》,谭天佑、梁凤珍编写的《工业通风除尘技术》等。在这一阶段,我国的除尘设备制造业有了高速的发展,可自行生产许多大型除尘设备,如静电除尘器、袋式除尘器等。

90年代以后,由于环境科学、计算机科学,特别是作为除尘技术的理论基础——气溶胶科学的发展,极大地促进了除尘理论与技术的发展。除了对传统除尘方法的净化机理有了更深刻的认识以外,还出现了许多新的除尘理论、除尘方法和新型除尘设备。这一阶段的突出特点是:除尘技术的创新、除尘设备的创新以及环保

高科技产品的产业化。尽管在除尘技术领域出现了很多新的科技成果,但关于除尘方面的书籍在内容上还基本停留在 20 世纪 80 年代的水平。因此,有必要对除尘科技书注入新的内容,以推动除尘技术的进步,这也是写本书的初衷。

为了适应除尘技术的发展,本书从理论到应用对颗粒污染物净化技术做了较全面的阐述,特别注重对分离机理的分析和处理方法的论述,同时还融入了作者和其他研究者的一些新成果。本书与以往除尘技术方面的著作有许多不同之处:为增强除尘理论与技术的系统性和完整性,添加了空气动力学和气溶胶力学方面的内容;虽然本书基本继承了以往除尘技术教科书的写作体系,沿用了传统的除尘器分类方法,但几乎在每个净化机理的论述中,都提出了新的分离理论或新的数理模型;在综述除尘技术研究现状的基础上,介绍了许多新的除尘技术,而且还探讨了当前一些具有研究价值的课题和未来除尘理论与技术的发展方向。这将有助于提高读者处理和解决实际问题的能力、了解除尘技术的发展现状与趋势,并为读者深入研究某一专题提供有用的技术路线。

环保标准的愈益提高,将进一步促进除尘理论与技术的发展。中国加入 WTO 之后,环保标准与国际接轨是必然趋势,许多现行的国家环保标准将被加以修改和补充。因此,本书没有列出与烟尘净化有关的空气质量标准。如果想知道这方面的内容,读者不难从有关的手册中查到。

由于除尘技术领域的研究内容非常广泛,而且作者一直处在不断探索和学习的过程中,书中定有论述不周、叙述不清的地方。又由于在空气动力分离、过滤净化、静电收集等除尘理论和方法上,作者都提出了自己的新的研究结果,所以,书中定有一些不妥之处,恳请广大读者不吝赐教。

本书能够得以完成,首先要感谢我的恩师张国权教授多年的辛勤教诲和为本书提供的许多研究成果,我所取得的每一点进步都离不开他的引导。我还要感谢我的博士导师陈宝智教授的热忱指导和支持,特别是他严谨的治学态度对我起到了潜移默化的作

用。在我成长的道路上,王金波教授给了我多方面的关心,还为本书提供了重要的参考资料,在此表示由衷的感激。在这里还要感谢我的英国导师 Essex 大学环境科学研究所所长 Ian Colbeck 教授,他不仅使我接触了许多气溶胶科学的前沿知识,而且为我从事电凝聚除尘理论的研究提供了良好的实验条件和学术帮助。另外,在本书的撰写中还得到我以前的学生涂虬博士、陈旺生硕士的帮助,减轻了我许多校对工作。武汉科技大学对本书的出版给予了大力资助。在此一并表示感谢。

谨将此书献给我的母校——东北大学,献给我的老师、我的亲人和所有从事环境保护事业的人们!

向晓东

2002.2 武汉



作者简介

向晓东, 1958年生, 武汉科技大学环境工程系教授。本科、硕士和博士均就读于东北大学。主要从事烟尘净化理论及其应用技术研究。1991~1993年作为访问学者, 先后到英国Essex大学和德国Duisburg大学从事气溶胶科学与技术研究。曾参与并完成多项国家自然科学基金资助项目、国家科技攻关项目、省部级科研项目 and 工业空气污染控制方面的工程项目。在国内外刊物上已发表论文40余篇, 其中有多篇论文被SCI和EI收录。曾获4项国家实用新型专利, 其中1项已得到工程应用。现任武汉科技大学环境科学与工程中心副主任。

目 录

1 空气动力学基础	1
1.1 气体的物理性质	1
1.1.1 气体的密度和质量体积	1
1.1.2 气体的体积、压力和温度	1
1.1.3 气体的连续性和压缩性	4
1.1.4 气体的黏性	4
1.1.5 气体的湿度	6
1.2 流体一维流动的基本方程	6
1.2.1 连续性方程	6
1.2.2 欧拉运动方程与伯努利公式	7
1.2.3 动量定理	8
1.3 流体多维流动的基本方程	9
1.3.1 连续方程	10
1.3.2 旋流与势流	10
1.3.3 流线与迹线	11
1.3.4 平面势流与流函数	12
1.3.5 旋涡流与源汇流	16
1.3.6 绕封闭体的流动	16
1.3.7 管道中的实际流动与边界层流动	18
 2 气溶胶力学基础	 22
2.1 气溶胶粒子的基本性质	22
2.1.1 粒状污染物的来源	22

2.1.2	粒状污染物的分类	22
2.1.3	气溶胶粒子的基本性质	24
2.2	气溶胶粒子的粒径分布	29
2.2.1	粒径的表示方法	29
2.2.2	粒径分布	30
2.3	气溶胶粒子的分形几何特征	35
2.3.1	分形理论简介	36
2.3.2	粉尘的分形几何特征	40
2.3.3	粉尘分形几何特征在除尘技术中的应用探讨	42
2.4	气溶胶粒子的运动	43
2.4.1	气体对球形粒子的阻力	43
2.4.2	滑移修正与非球形粒子的阻力特征	45
2.4.3	重力作用下粒子的运动	45
2.4.4	离心力作用下粒子的运动	47
2.4.5	电场力作用下带电粒子的运动	47
2.4.6	热泳现象	48
2.5	气溶胶粒子的扩散	49
2.5.1	扩散的基本定律	49
2.5.2	在静止介质中气溶胶粒子的扩散	50
2.5.3	在流动介质中气溶胶粒子的扩散	53
2.5.4	在外力作用下气溶胶粒子的扩散	60
2.6	气溶胶粒子的凝聚	62
2.6.1	热凝并基本理论	63
2.6.2	声凝并	64
2.6.3	电凝并	65
3	机械式除尘器	67
3.1	除尘效率的表示方法	67
3.1.1	总效率的计算	67
3.1.2	分级效率的计算	68

3.1.3 串联除尘系统的效率计算	69
3.2 重力沉降室	69
3.2.1 重力沉降室的分级效率	69
3.2.2 重力沉降室的设计	72
3.2.3 重力沉降室的结构形式	73
3.3 惯性除尘器	74
3.3.1 惯性分离机理	74
3.3.2 惯性除尘器的结构形式	80
3.4 旋风除尘器	82
3.4.1 旋风除尘器的流场	83
3.4.2 旋风除尘器的分级效率	85
3.4.3 二次扬尘对旋风器除尘效率的影响分析	90
3.4.4 旋风除尘器的阻力	94
3.4.5 旋风除尘器的结构形式与尺寸比	94
3.4.6 旋风除尘器的设计或选型计算	97
3.4.7 新型旋风除尘器	103
4 过滤式除尘器	107
4.1 过滤机理	107
4.1.1 拦截效应	108
4.1.2 惯性碰撞效应	110
4.1.3 扩散效应	112
4.1.4 重力沉降作用	114
4.1.5 静电力作用	115
4.2 过滤层的收集效率	118
4.2.1 纤维层过滤理论	119
4.2.2 颗粒层过滤理论	123
4.2.3 表面过滤理论	126
4.3 过滤层压力损失	129
4.3.1 纤维层压力损失	130

4.3.2 颗粒层压力损失	132
4.4 纤维滤料	134
4.4.1 滤料的性能	134
4.4.2 常用滤料的种类及性能	138
4.4.3 滤料的选用	142
4.5 袋滤式除尘器	145
4.5.1 袋式除尘器的分类及命名	145
4.5.2 常用袋式除尘器的结构及性能	145
4.5.3 袋式除尘器的应用	148
4.6 颗粒层除尘器	155
4.6.1 颗粒层除尘器的结构形式	155
4.6.2 耙式颗粒层除尘器	155
4.6.3 沸腾式颗粒层除尘器	157
4.6.4 垂直颗粒层除尘器	158
4.6.5 影响颗粒层除尘器性能的因素	159
 5 湿式气体洗涤器	162
5.1 洗涤器的性能	162
5.1.1 洗涤器的压力损失	162
5.1.2 洗涤器的除尘效率	162
5.2 喷淋塔	166
5.3 旋风洗涤器	168
5.4 筛板塔	169
5.4.1 筛板塔的几何参数与运行参数	169
5.4.2 筛板塔的压力损失	171
5.4.3 筛板塔的分级效率	171
5.5 填料塔	172
5.5.1 填料塔的几何参数与运行参数	173
5.5.2 填料塔的分级效率	174
5.6 文丘里洗涤器	175

5.6.1	文氏管的运行参数与几何尺寸设计	175
5.6.2	文氏管的压力损失	176
5.6.3	文氏管洗涤器的除尘效率	177
6	静电除尘器	180
6.1	静电除尘器的基本原理与分类	180
6.1.1	气体的电离	181
6.1.2	离子迁移率	183
6.1.3	静电除尘器的分类	184
6.2	静电除尘的基本理论	187
6.2.1	电场分布数理模型	187
6.2.2	粒子的荷电与荷电粒子的运动	197
6.2.3	粒子带电量的测定	199
6.2.4	荷电粒子的收集	200
6.3	影响静电除尘器性能的主要因素	205
6.3.1	粉尘特性的影响	206
6.3.2	烟气性质的影响	208
6.3.3	结构因素的影响	210
6.3.4	操作因素的影响	213
6.4	静电除尘器的设计与选型	214
6.4.1	设计静电除尘器所需原始数据	214
6.4.2	静电除尘器的总体设计	215
6.4.3	振打清灰装置	224
6.4.4	静电除尘器的选型	226
6.5	静电除尘器的工业应用	227
6.5.1	钢铁工业	227
6.5.2	燃煤电厂	228
6.5.3	其他工业	228
7	除尘新技术	229

7.1 长芒刺静电除尘器	229
7.1.1 长芒刺静电除尘器的收尘机理	230
7.1.2 方筒立式宽通道长芒刺静电除尘器	233
7.1.3 卧式长芒刺静电除尘器	235
7.2 复合式除尘器	238
7.2.1 惯性冲击静电除尘器	238
7.2.2 静电旋风除尘器	241
7.2.3 静电增强纤维过滤除尘器	243
7.3 新机理除尘技术	246
7.3.1 磁力除尘技术	246
7.3.2 电凝聚除尘技术	251
8 除尘系统的设计	263
8.1 集气罩的设计	263
8.1.1 罩口气流分布的基本理论	263
8.1.2 集气罩的基本形式	267
8.1.3 集气罩的设计	269
8.2 除尘系统的管道设计	280
8.2.1 管内气体流动的压力损失计算	281
8.2.2 管道计算	285
8.2.3 除尘设备的确定	288
8.2.4 除尘系统的动力设备能耗计算	288
8.2.5 除尘系统管道计算实例	289
8.3 除尘设备的防爆	293
8.3.1 粉尘爆炸的影响因素	293
8.3.2 粉尘爆炸的危险性分级	295
8.3.3 除尘设备的防爆技术	297
参考文献	301

1 空气动力学基础

悬浮于气体中的固体和液体颗粒物称为气溶胶粒子,国内习惯上统称粉尘。除尘技术是空气污染控制领域的一个重要组成部分。它的基础理论是空气动力学和气溶胶力学。因此,了解与除尘技术相关的空气动力学基础知识是必要的。

1.1 气体的物理性质

1.1.1 气体的密度和质量体积

室外的正常空气成分为氧气、氮气、二氧化碳及少量的其他气体、杂质和水气。在空气净化中,所处理的气体中经常含有腐蚀性气体(如 SO_2)、有毒有害气体(如 CO , NO_x)、爆炸性气体(如 CO , 碳氢化合物)及大量的水蒸气。

单位体积气体的质量称为气体密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$,其数学表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

式中 m ——气体质量, kg ;

V ——气体体积, m^3 。

质量体积为密度的倒数,即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.2)$$

1.1.2 气体的体积、压力和温度

气体的物理状态取决于3个要素:体积 V 、压力 p 及温度 T 。其中任意两个量发生变化将会引起第三个量的变化。它们之间的关系可通过状态方程来确定

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \text{常数} \quad (1.3)$$

式中, V_0 、 p_0 和 T_0 分别为标准状态下气体的体积、压力和温度。
式(1.3)还可写成

$$\frac{pV}{T} = Rm \quad \text{或} \quad \rho = \frac{p}{RT} \quad (1.4)$$

式中 R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

m ——气体的质量, kg 。

从式(1.4)看出:知道气体常数、压力及温度即可算出密度。
在空气净化中,常用标准状态进行计算。所谓标准状态,即:温度
 $T_0 = 273\text{K}$, 压力 $p_0 = 1$ 个标准大气压 $= 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。故标准状态
下气体的密度为

$$\rho_0 = \frac{p_0}{RT_0} = \frac{372}{R} \quad (1.5)$$

在温度和压力相同的条件下,不同气体在相同容积中所包含
的分子数目相同。在标准状态下, 1mol (摩尔)任何气体的体积均
相同,它等于 $22.41 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 。

当已知某气体的摩尔质量为 M_0 , 质量为 m , 则摩尔数 n 为

$$n = \frac{m}{M_0} \quad (1.6)$$

所以该气体在标准状态下的体积为

$$V_0 = 22.41 \times 10^{-3} \frac{m}{M_0} \quad (1.7)$$

密度为

$$\rho_0 = \frac{M_0}{22.41} \times 10^3 \quad (1.8)$$

于是,如果知道气体常数或气体的摩尔质量,便可由式(1.5)
或式(1.8)求标准状态下气体的密度。若求非标准状态下气体的

密度,可由式(1.4)计算,其中

$$R = 8.314/M_0 \quad (1.9)$$

几种常见气体的气体常数列入表 1.1 中。混合气体的气体常数 R_T 可按下式确定

$$R_T = \frac{m_1 R_1 + m_2 R_2 + \cdots}{M} = w_1 R_1 + w_2 R_2 + \cdots \quad (1.10)$$

式中 $m_1, m_2, \cdots$ ——各组分气体的质量, kg;

$R_1, R_2, \cdots$ ——各组分气体的气体常数, J/(kg·K);

$w_1, w_2, \cdots$ ——各组分气体的质量分数, %;

M ——混合气体的总质量, kg。

表 1.1 几种常用气体的气体常数

气体名称	化学分子式	分子量	气体常数/J·(kg·K) ⁻¹
氧气	O ₂	32	259.8
氮气	N ₂	28	196.9
氩	Ar	40	207.9
二氧化碳	CO ₂	44	189.0
水蒸气	H ₂ O	18	261.9
二氧化硫	SO ₂	64	129.9
一氧化碳	CO	28	296.9
氢气	H ₂	2	4257.2
甲烷	CH ₄	16	519.6
干空气	混合气体	29	286.7

例如,常温下干空气的密度是我们经常用到的一个基本数据。干空气由 75.5% 的 N₂、23.1% 的 O₂、1.3% 的 Ar、0.05% 的 CO₂ 组成,其气体常数和气体密度分别为

$$R_T = 0.755 \times 296.9 + 0.231 \times 259.8 + 0.013 \times 207.9 + 0.0005 \times 189 = 287$$

$$\rho_0 = \frac{372}{R_T} = \frac{372}{287} = 1.296$$

对于混合气体,当没有化学反应和处于平稳过程时,混合气体的总压力等于各气体的分压之和,即

$$p_T = p_1 + p_2 + \cdots + p_n \quad (1.11)$$

式中 p_T ——混合气体的总压力, Pa;
 $p_1, p_2, \cdots, p_n$ ——各气体的分压, Pa。

若已知各组分气体的体积分数 $\phi_a, \phi_b, \phi_c, \cdots$ 和各组分气体的摩尔质量 $M_a, M_b, M_c, \cdots$ 时,则在标准状态下混合气体的密度为

$$\rho_T = \frac{1}{22.41} (\phi_a M_a + \phi_b M_b + \phi_c M_c + \cdots) \quad (1.12)$$

1.1.3 气体的连续性和压缩性

1.1.3.1 连续性

气体的连续性假设是指我们不必研究大量分子的瞬间状态,而只要研究描述流体宏观状态下的物理量,如密度、速度、温度、压力等就行了。在连续介质中,可以把这些物理量看作是空间坐标和时间的连续函数。

在空气净化中,连续性的假设是适用的,它是一个最基本的假设。

1.1.3.2 压缩性

实际上,任何气体都是可以压缩的,也就是说气体的密度是随着压力与温度的改变而发生变化。但是,在空气净化中,如果在管道内或净化设备内气体的温度和压力在整个流动过程中变化不大,那么,引起密度的变化也就很小。理论计算结果表明,对于气体速度和其音速之比小于 0.3 的绝热流动,就可以当作不可压流动来处理。空气净化所讨论的气体流速远小于音速,通常都可看作不可压缩流体,这对工程计算是十分便利的。

1.1.4 气体的黏性

气体在流动过程中,在两相邻流层之间,由于存在相对运动,而在接触面上产生切向作用力,这种力称为内摩擦力。根据牛顿内摩擦定律,单位面积上的内摩擦力 τ 可用下式表示