



气溶胶测量 原理、技术及应用

Aerosol Measurement

Principles, Techniques, and Applications

(原著第二版)

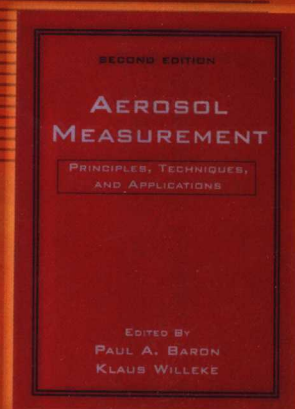
Second Edition

[美] 保罗 A. 巴伦 克劳斯·维勒克 著
Paul A. Baron Klaus Willeke

白志鹏 张 灿 等译



化学工业出版社



气溶胶测量 原理、技术及应用

**Aerosol Measurement
Principles, Techniques, and Applications**

(原著第二版)

Second Edition

[美] 保罗 A. 巴伦 克劳斯·维勒克 著

Paul A. Baron Klaus Willeke

白志鹏 张 灿 等译



化学工业出版社

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

气溶胶测量: 原理、技术及应用—2 版/[美] 巴伦, [美] 维勒克编著; 白志鹏等译. —北京: 化学工业出版社, 2006. 12

书名原文: Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications
ISBN 978-7-5025-9476-3

I. 气… II. ①巴…②维…③白… III. 气溶胶监测 IV. TL941

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 161329 号

Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications, Second Edition/by Paul A. Baron, Klaus Willeke

ISBN 0-471-78492-3

Copyright©2001, 2005 by John Wiley & Sons. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

本书中文简体字版由 John Wiley & Sons 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2006-3400

责任编辑: 满悦芝

责任校对: 周梦华

文字编辑: 刘莉珺

封面设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 47½ 字数 1253 千字 2007 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 128.00 元

版权所有 违者必究

译者序

在全面落实科学发展观、加快构建社会主义和谐社会、实现全面建设小康社会的奋斗目标中，国家已经把环境保护摆在了重要的战略位置上。大气环境质量作为环境保护的重要部分之一，也受到高度重视。2005年末和2006年初国家相继出台了“国民经济和社会发展第十一个五年规划的建议”、“落实科学发展观加强环境保护的决定”（简称“决定”）和“国家中长期科学和技术发展规划纲要”等纲领性文件，这些都体现了国家治理环境污染的需要以及决心。国务院关于“落实科学发展观加强环境保护的决定”中规定了环境目标，该目标要求到2010年，重点城市空气质量要有所好转。“决定”中的第四部分——切实解决突出的环境问题——中提出，到2010年，着力解决颗粒物污染问题。我国城市大气颗粒物污染严重，所以，为了达到这些目标，亟需提高气溶胶方面的研究和监测水平。

除了环保部门外，当前，大气气溶胶的研究也受到气象部门、医药卫生部门、工业生产部门以及航空部门等的普遍重视。近几十年，气溶胶科学得到了飞速发展，成为大气科学的一个重要的分支学科，成为环境科学、大气物理、大气化学、气象学等许多专业必不可少的基础课程。

国内在气溶胶研究方面还处于发展阶段，有关大气气溶胶的著作不少，但有的侧重于气溶胶的基本性质，有的与气象学联系比较密切，而且版本较早。真正与环境科学联系起来的、比较全面介绍气溶胶测量技术及其实际应用的教材几乎没有。为了便于读者深入了解国际上气溶胶领域的研究情况以及成果，为我国相关专业的学生和研究人员提供一本全面的参考教材，我们翻译了这本书。本书由 John Wiley & Sons 有限公司出版，原著者是美国国家职业安全与健康研究所疾病预防与控制中心的物理学家 Paul A. Baron 博士以及辛辛那提大学环境健康学院的 Klaus Willeke 博士。该书的引进是对环境学科的有力支持，可以弥补国内空白，为气溶胶研究人员提供一本较好的参考教材。

本书改进了环境科学领域中气溶胶教材的不足，可作为本科生和研究生的教材，主要分为三部分：气溶胶基础知识、测量技术以及实际应用。本书既适用于环境专业的初学者，也适用于从事该专业多年的研究人员。这是一本内容丰富、适应性强、与实际紧密结合的书，可作为教学、科研、环保和相关专业从业科技人员的重要参考书，就我国的环境保护领域来说，这是一本极具现实意义的书。

在翻译原著的过程中，外国地名翻译参考了中国地名委员会编的《外国地名译名手册》以及外文出版社出版的《最新世界地名录》。物理量的名称及其相应符号参照了中华人民共和国标准 GB 3100~3102-93《量和单位》以及中国标准出版社出版的《量和单位标准手册》。译者在查阅众多专业词典、国家标准〔如《空气质量词汇》（GB 6919-86）〕和专业中英文文献的基础上，对专业词语进行斟酌比较而做出了较为确切的翻译。

本书的具体翻译工作由国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室的部分老师和同学完成，具体名单和承担工作如下表所示。白志鹏教授总体负责全书的翻译工作、整体校正及最后整理。

章节	译 者	校 正	章节	译 者	校 正
1	游燕	张灿	21	陈魁	张灿
2	张鹏飞	张灿	22	徐准	张灿
3	何为	张灿	23	苗娟	李媛媛
4	张建芳	张灿	24	张灿	李伟芳
5	张灿	张灿	25	蔡斌彬	李伟芳
6	吴林	张灿	26	张灿	李伟芳
7	吴林	张灿	27	张灿	李伟芳
8	李媛媛	张灿	28	韩肠	张灿
9	韩斌	张灿	29	徐准	张灿
10	崔莉、胡焱弟、毕晓辉	张灿	30	陈魁	胡焱弟
11	杨晓虹、韩毓、毕晓辉	张灿	31	王芳	李伟芳
12	董海燕	张灿	32	张灿	李伟芳
13	韩斌	王丽华	33	王丽华	李伟芳
14	董海燕	张灿	34	董海燕、蔡斌彬	董海燕
15	蔡斌彬	蔡斌彬	35	马翠梅	李伟芳
16	蔡斌彬	蔡斌彬	36	李媛媛	张灿
17	王丽华	张灿	37	游燕	张灿
18	王丽华、董海燕、张灿	董海燕	附录	马翠梅、李媛媛	张灿
19	王芳	张灿	索引	徐准	张灿
20	高翔	张灿			

环境气溶胶研究领域王文兴和魏复盛两位院士对原著做出了极高评价，并对翻译工作提出了宝贵的意见。他们认为，该书的出版将为从事气溶胶监测等相关专业的研究人员提供一本极好的参考书。

由于本书涉及的内容较多、专业较广，加上译者水平有限，时间紧迫，不妥之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

白志鹏
2007 年 1 月

前 言

谨将《气溶胶测量》一书献给 Divad Swift 教授和 Kvetoslav Spurny 教授, 这两位专家都参与了上一版本的编写。Swift 教授在 1997 年辞世, 他对呼吸系统内的气溶胶输送有着深刻的见解 (第 36 章) (在《气溶胶科学和技术》, 1998, 28 [4] 中发有讣告)。Spurny 教授在 1999 年辞世, 即在他完成了气溶胶测量历史一篇 (第 1 章) 后不久 (在《气溶胶科学和技术》2000, 32 [3] 中发有讣告)。这两位科学家在气溶胶领域做出的杰出贡献, 我们将永远铭记。

气溶胶测量技术已经有近几十年的发展历史, 直到 20 世纪 80 年代, 由于需要评价气溶胶粒子污染控制设备, 以及需要更好的监测方法以检测室内、外气溶胶, 所以促进了新测量技术的发展。在过去几十年中, 人们对工业中的气溶胶测量方法产生了浓厚兴趣, 不仅是因为法律上要求保护工人健康, 而且还为了提高生产率进而占据竞争优势。例如, 生产半导体电路板时, 如果亚微米级粒子附着在电路板上, 那么就可能污染整个电路板。目前选修气溶胶科学和测量课程的大学生和研究生越来越多, 许多气溶胶研究协会 (如美国气溶胶研究协会和其他一些国家机构) 的发展和成立也说明人们对这个领域的重视程度与日俱增。

本书第一部分, 我们利用近 20 年的教学经验, 以大学气溶胶科学和测量课程的教授方式, 为初学者介绍气溶胶领域的基础相关知识。考虑到大多数读者是空气污染治理工作者、工业卫生学者以及环境学家或工程师, 所以应用教授短期学员的经验: 在第一部分的各个章节中, 我着重阐述物理学内容并给出了有用的公式, 但避免了冗长的推导过程。

本书中几乎所有的公式都编成了电子表格程序 (在网上是公开的), 这些在第 2 章中介绍, 这样, 读者很容易就可以进行计算并绘制结果图。这些将有助于读者理解气溶胶机制以及预测实验系统中的气溶胶行为特征。

熟悉气溶胶测量基本原理的读者, 要详细了解设备技术, 可以阅读第二部分。第一、二部分的很多章节都给出了样品的计算结果, 因此本书适合作为教科书。有些读者关心自己的研究领域, 比如工业卫生或工业气溶胶处理, 则可以阅读第三部分, 即气溶胶测量的应用。专家们把气溶胶在多个领域的应用都集中在这里, 使读者能了解相关领域的实际情况。

1993 年, 首次发行《气溶胶测量》。其后, John Wiley & Sons 收购了最早的出版社 Van Nostrand Reinhold。新版《气溶胶测量》增加了一些反映最近科技进展的新章节。

一些作者已经不再从事气溶胶研究而转向其他领域, 因此没有参与本版的编写。在此衷心地祝福他们, 也希望本书中的新章节可以和上一版本一样, 实现同样好的效果。

我们要感谢所有的参加编写人员, 他们慷慨地付出自己的时间和精力, 所以, 我们才能在本书中了解这些专家们的见解。同时还要感谢我们的夫人 Diane (P. A. B.) 和 Audrone (K. W.), 谢谢她们在本书编写期间的支持。

Paul A. Baron 博士
俄亥俄州, 辛辛那提
Klaus Willeke 博士
俄亥俄州, 辛辛那提

主要符号一览表

英文符号

<i>a</i> 粒子半径	<i>M</i> 分子质量浓度(g/cm ³)
<i>amu</i> 原子质量单位	<i>N</i> 数量浓度(个/m ³)
<i>A</i> 面积	<i>N_p</i> 粒子浓度(个/m ³)
原子质量	<i>n</i> 分子浓度(个/m ³)
<i>B</i> 粒子迁移率[m/(N·s)];式(4-14)	单位电荷数(也用 <i>i</i> 表示)
<i>c_m</i> 质量浓度(g/m ³ , mg/m ³ , μg/m ³)	粒子个数
<i>c_n</i> 数量浓度(个/m ³)	测量次数
<i>c_q</i> 粒子电荷浓度(C/m ³)	<i>p</i> 分压(N/m ² , Pa, atm)
<i>C</i> 溶剂中的溶液浓度(m ³ /m ³)	粒子极性
<i>C_c</i> 滑流修正系数;式(4-8)、式(4-9)	<i>p_s</i> 饱和蒸气压(N/m ² , Pa, atm)
<i>C_d</i> 阻力系数;式(4-19)、式(4-23)、式(4-24)	<i>P</i> 压力(N/m ² , Pa, atm)
<i>d</i> 物体的直径,例如粒径(m, μm)	渗透分数
物体的特征尺寸(characteristic dimension)(m)	散射光通量
空间尺寸	<i>Pe</i> 贝克来数(Peclet Number);式(4-16)
<i>d_a</i> 空气动力学直径(m, μm);式(3-2)、式(3-3)、式(4-30)	<i>q</i> 粒子带电量(C)
<i>d_p</i> 粒子直径(m, μm)	光散射矢量
<i>d_e</i> 包络当量直径(envelope equivalent diameter)(m, μm)	<i>Q</i> 流速(m ³ /s)
<i>d_m</i> 质量当量直径(m, μm);式(4-21)	<i>Q_c</i> 粒子消光效率
$\overline{d_p}$ 粒子平均直径(m, μm)	<i>r</i> 两个粒子间的距离(m)
<i>d_s</i> 斯托克斯直径(m, μm)	径向距离(m)
<i>d₅₀</i> 粒子中值直径(m, μm)	粒子半径(m, μm)
<i>D</i> 粒子的扩散系数(m ² /s);式(3-13)	<i>R</i> 空气特征常数[N·m/(K·kg)];式(4-3)
<i>D_i</i> 管道直径	比率
<i>D_v</i> 物体的分形维数	分形粒子的周长半径
<i>e</i> 蒸汽分子的扩散系数(m ² /s);式(4-4)	分辨率
<i>f</i> 电子电荷(1.6×10 ⁻¹⁹ C)	<i>R_g</i> 回转半径;式(23-12)
<i>E</i> 频率(Hz, s ⁻¹)	<i>R_u</i> 通用气体常数[8.31×10 ⁷ dyn·cm/(K·mol)];式(4-3)
电场(V/m)	<i>Re_i</i> 流动雷诺数;式(4-1)、式(4-2)
滤膜的总效率;式(9-1)	<i>Re_p</i> 粒子雷诺数;式(4-1)、式(4-2)
<i>F</i> 能量	<i>Re₀</i> 临界条件下的粒子雷诺数;式(4-37)
<i>g</i> 作用在粒子上的力(N)	<i>s</i> 信号
<i>G</i> 重力(万有引力)常数(m/s ²)	<i>S</i> 制动距离(m, μm);式(4-36)、式(4-37)
<i>h</i> 灰度级	Sutherland 常数(K),式(4-10)
<i>H</i> 高度(m)	粒子发射速率;式(33-8)
室或管的高度(m)	信号
<i>I</i> 电荷数(也用 <i>n</i> 表示)	<i>Sc</i> 施密特数(Schmidt number);式(4-17)
光强度或放射强度[J/(s·m ²)]	<i>Sh</i> 舍伍德数(Sherwood number);式(8-57)
电流(A)	<i>S_R</i> 饱和率;式(5-2)
<i>J</i> 气体分子或原子的通量[个数/(s·m ²)]	<i>Stk</i> 斯托克斯数;式(4-39)
<i>k</i> 玻耳兹曼(Boltzman)常数(1.38×10 ⁻²³ J/K)	<i>t_{1/2}</i> 半衰期;式(5-12)
热传导率[W/(m·K)]	<i>T</i> 温度(K, °C)
<i>k₀</i> 回转半径的比例常数;式(23-9)	能见度
<i>K</i> 凝聚系数(m ³ /s);式(5-9)	<i>U</i> 气体速度(m/s)
<i>K_r</i> 墙壁损失率;式(33-8)	采样速度(m/s)
<i>L</i> 长度,光路长度(m, μm)	光度计的输出信号(V)
<i>m</i> 折射率	<i>U₀</i> 周围气体速度(m/s)
<i>m_p</i> 粒子质量(g, mg, μg, ng)	<i>v_a</i> 采集的气体体积(m ³)

v_p 粒子体积(m^3)	V_0 最终沉降速度(m/s);式(4-28)
V 粒子相对于气体的速度(m/s)	V_{ts} 在 x 方向上的距离(m)
电压(V)	x x 方向上布朗运动的均方根(m);式(4-15)
$\bar{V}$ 分子平均速度(m/s);式(4-5)	x_{rms} 电迁移率[$m^2/(V \cdot s)$];式(4-45)
粒子速度(m/s)	Z 原子数
V_p 粒子的初始速度(m/s)	

希文符号

α 滑流修正公式中的系数;式(4-8)	λ 平均自由程($m, \mu m$)
热扩散率(m^2/s)	波长($m, \mu m$)
附着系数	μ 质量吸收系数
β 滑流修正公式中的系数;式(4-8)	ν 动力黏度率(m^2/s)
长宽比,纵横比	ρ_e 包括空间在内的有效密度(kg/m^3)
离子附着的频率;式(18-10)	ρ_f 流体密度(kg/m^3)
流速比;式(18-31)	ρ_g 气体密度(kg/m^3)
γ 滑流修正公式中的系数;式(4-8)	ρ_p 粒子密度(kg/m^3)
表面张力(N/m)	σ 标准偏差;式(22-2)
比热容比	σ_g 几何标准偏差
d 离子传输的极限球体半径;式(18-9)	t 粒子的弛豫时间(relaxation time);式(4-34)
ϵ 介电常数/电容率	ϕ 角($rad, ^\circ$)
η [动力]黏度($Pa \cdot s$)	χ 动力学形状因数
效率	ω 角速度(rad/s)
θ 角($rad, ^\circ$)	Ω 转移函数
κ 相对介电常数/电容率	

下标

a 空气或气体	气体
可吸入性的	grav 在重力场中
ac 交流电	i 初始
B 迁移率	个体
c 圆柱体	j 喷射
d 液滴,液滴表面	n 个数
拖曳	m 质量
dc 直流电	mob 迁移率
dep 沉积	p 粒子
diff 在扩散传导场中	r 参考标准温度和压力
e 有效的	s 饱和状态/条件
elec 在电场中	sonic 声速
ev 当量体积	th 在热梯度场中
f 流量	ts 在重力场影响下的最终沉降
流体	trans 传输(transmission)
纤维	0 初始状态/条件
分形	∞ 远离粒子表面
g 几何的	

目 录

第一部分 基本理论

1 气溶胶测量的历史回顾	1	4.4 气体与粒子扩散	44
1.1 绪论	1	4.5 空气动力学阻力	46
1.2 早期	1	4.6 粒子在重力作用下的运动	47
1.3 经典期之前的气溶胶测量	1	4.7 粒子参数	49
1.4 经典发展时期的气溶胶测量	3	4.8 粒子在静电场中的运动	51
1.5 纤维气溶胶的测定	13	4.9 粒子在其他力场中的运动	53
1.6 总结	13	参考文献	55
参考文献	14	5 粒子的物理化学变化	56
2 桥联科学及其在气溶胶测量中的应用:		5.1 简介	56
工具使用入门	20	5.2 凝结	58
2.1 绪论	20	5.3 核化现象	59
2.2 相关领域	21	5.4 蒸发	60
2.3 计算机技术	21	5.5 凝聚	61
2.4 计算机语言	21	5.6 反应	64
2.5 气溶胶计算器	22	参考文献	65
参考文献	25	6 气溶胶的粒度分布特征	66
3 气溶胶基本理论	30	6.1 粒度的基本概念与粒度分布	66
3.1 绪论	30	6.2 气溶胶	68
3.2 可利用的和不可利用的气溶胶	30	6.3 室内气溶胶	75
3.3 气溶胶的单位及相关公式的应用	31	6.4 工业气溶胶	76
3.4 描述空气粒子的常见术语	32	参考文献	77
3.5 粒子形状及粒度	33	7 气溶胶测量方法	80
3.6 可悬浮粒子	35	7.1 绪论	80
3.7 仪器选择	36	7.2 质量保证:设计一种测量方法	80
3.8 检测粒子形状	37	7.3 测量方法的准确性	81
3.9 粒子作用力	38	7.4 粒度范围	81
参考文献	39	7.5 采样与分析方法	83
4 气体与粒子运动	40	7.6 直读方法测量气溶胶	83
4.1 绪论	40	7.7 气溶胶的测量误差	85
4.2 气体运动	40	参考文献	95
4.3 传输与气体分子流	42		

第二部分 技 术

8 气溶胶的采样与输送	97	8.2 采样	100
8.1 绪论	97	8.3 样品输送	115

8.4 其他采样问题	126	13.5 数据控制和说明	260
8.5 结论	128	13.6 综合考虑-选择仪器	260
参考文献	129	参考文献	263
9 过滤收集	133	14 动力学质量和表面积测量	265
9.1 绪论	133	14.1 绪论	265
9.2 过滤样品的基本原则	133	14.2 质量测定	265
9.3 测量滤膜	135	14.3 压电晶体测量法 (piezoelectric crystal measurement method)	265
9.4 过滤理论	139	14.4 β 测量仪测量法	266
9.5 选择滤膜	149	14.5 锥形元件振荡微天平测量法	270
参考文献	152	14.6 电低压冲击式采样器	273
10 惯性、重力、离心和热收集技术	155	14.7 表面积测量理论背景介绍	276
10.1 绪论	155	14.8 EPIPHANIOMETER	278
10.2 惯性分级器	155	14.9 扩散充电器	280
10.3 沉降装置和离心机	172	14.10 光电气溶胶感应器	282
10.4 热力沉降	173	参考文献	284
参考文献	174	15 光学直读技术: 光强度系统	288
11 大气气溶胶组分的化学分析方法	178	15.1 绪论	288
11.1 绪论	178	15.2 单球体的光散射和消光	288
11.2 范围和目的	180	15.3 粒子集合的光散射和消光	293
11.3 质量测量	182	15.4 单粒子光学计数器	297
11.4 可萃取的阴阳离子的分析方法	183	15.5 多粒子光学技术	306
11.5 粒子中的碳	186	15.6 不规则粒子的光散射	308
11.6 元素分析的非破坏性技术	190	参考文献	310
11.7 元素分析的破坏性技术	193	16 光学直读技术: 原位传感	313
11.8 连续测量方法	194	16.1 绪论	313
11.9 总结	197	16.2 概述	313
参考文献	197	16.3 光散射	317
12 单粒子分析	205	16.4 基于光强的单粒子计数器	320
12.1 绪论	205	16.5 基于 LDV 可见度的单粒子计数器	323
12.2 光学显微镜	207	16.6 基于相位的单粒子计数器	323
12.3 用电子束分析粒子	211	16.7 单粒子计数器; 成像	326
12.4 激光微探针质谱分析	229	16.8 整体技术: 粒子场成像	327
12.5 二次离子质谱分析	233	16.9 整体技术: 弗朗荷费衍射	328
12.6 拉曼微探针	236	16.10 整体技术: 动力学光散射	331
12.7 红外显微镜法	238	16.11 性能校验	332
12.8 扫描探针显微镜法	239	16.12 总结	335
12.9 对微量分析仪器性能的补充说明	241	致谢	336
致谢	242	参考文献	336
参考文献	242	17 利用粒子运动和光学检测的 直读技术	342
13 实时单粒子分析	250	17.1 绪论	342
13.1 绪论	250	17.2 电-单粒子空气动力学弛豫时间分析器 (E-SPART)	342
13.2 粒子检测	254		
13.3 粒子分级	255		
13.4 粒子蒸发和电离	255		

17.3 空气动力学粒度分级器 (APS)	350	20.4 测量粒子的作用力	420
17.4 气溶胶粒度分级器	358	20.5 测量质量和电荷	420
17.5 纤维气溶胶监控器	362	20.6 蒸发/浓缩	422
参考文献	366	20.7 化学反应	423
18 电技术	369	20.8 结语	425
18.1 绪论	369	参考文献	425
18.2 带电粒子的行为特征	369	21 仪器校准	428
18.3 迁移与扩散之间的关系	371	21.1 绪论	428
18.4 气溶胶带电	371	21.2 测量方法和校准标准	428
18.5 粒子采样	377	21.3 总体考虑	429
18.6 测量粒子的粒度分布	378	21.4 校准设备和程序	431
参考文献	388	21.5 试验气溶胶的发生	433
19 凝结检测和扩散粒度分离技术	391	21.6 校准流量、压力和流速	443
19.1 绪论	391	参考文献	449
19.2 凝结理论	391	22 粒度分布的数据分析和表达方法	454
19.3 凝结核计数器	393	22.1 绪论	454
19.4 扩散测量技术理论	397	22.2 粒度分布	454
19.5 扩散溶蚀器	400	22.3 浓度分布	458
19.6 浸提器组	403	22.4 用参数统计数据	459
19.7 结论	408	22.5 粒度分布的图形表示方法	462
致谢	408	22.6 粒度分布验证假设	466
参考文献	408	22.7 重合误差	469
20 粒子的电动悬浮	413	22.8 粒度区间划分的选择	470
20.1 绪论	413	22.9 数据转置	470
20.2 悬浮原理	415	参考文献	475
20.3 粒度分级	416		

第三部分 应 用

23 非球形粒子的测量方法：形状因子、分形分析以及纤维	479	24.8 校准	525
23.1 绪论	479	24.9 污染	525
23.2 形状因子	479	24.10 样品分析	526
23.3 分形粒子	480	参考文献	527
23.4 纤维	491	25 工作场所气溶胶检测	531
参考文献	504	25.1 绪论	531
24 生物粒子采样	511	25.2 工作场所气溶胶的暴露测量	532
24.1 绪论	511	25.3 不符合暴露协议的采样	535
24.2 生物气溶胶类型	512	25.4 测定粒度分布	540
24.3 生物气溶胶的来源	515	25.5 使用直读仪器	541
24.4 一般采样注意事项	515	25.6 未来发展趋势	542
24.5 生物气溶胶的采样原则	517	参考文献	543
24.6 采样时间	520	26 矿井气溶胶检测	547
24.7 选择采样器	523	26.1 绪论	547
		26.2 矿井气溶胶来源	547

26.3	矿井气溶胶的物理性质	548	参考文献	631
26.4	检测技术	549	32 通过气溶胶过程生产材料	635
	参考文献	556	32.1 材料	635
27 环境空气采样	560	32.2 气溶胶过程	637	
27.1 绪论	560	32.3 测量技术	642	
27.2 采样系统组件	560	参考文献	650	
27.3 采样系统	568	33 无尘室中气溶胶的测量	656	
27.4 选择采样系统	572	33.1 绪论	656	
27.5 结论	572	33.2 无尘室分级、验证和监测的国际标准： ISO 14644-1 和 ISO 14644-2	658	
致谢	573	33.3 市场上出售的用以无尘室分级和监测的 气溶胶粒子计数器	664	
参考文献	573	33.4 测量无尘室内的设备释放的微粒	666	
28 短时粉尘的排放	578	33.5 结论	668	
28.1 绪论	578	参考文献	669	
28.2 影响粉尘排放的因素	578	34 放射性气溶胶	670	
28.3 计算排放量的步骤	580	34.1 绪论	670	
28.4 排放量的定量测量技术	581	34.2 放射和放射性衰减	670	
28.5 排放模型	584	34.3 放射性检测	672	
28.6 选择控制排放的方法	585	34.4 放射性气溶胶的安全处置	674	
参考文献	586	34.5 放射性气溶胶的检测目的	675	
29 室内气溶胶和暴露评价	587	34.6 标准测量技术的应用	677	
29.1 绪论	587	34.7 放射性气溶胶的特殊分析技术	680	
29.2 浓度和暴露	588	34.8 数据传输和联网	686	
29.3 测量策略	589	34.9 当前气溶胶科学基础	686	
29.4 采样与分析方法	591	34.10 结论	686	
29.5 室内空气评价	596	致谢	686	
29.6 暴露研究	599	参考文献	687	
29.7 建立模型	601	35 氡及其短期衰变产物气溶胶	691	
参考文献	602	35.1 绪论	691	
30 利用飞行器测量气溶胶	606	35.2 环境中的氡	691	
30.1 绪论	606	35.3 氡及其衰变产物的放射性	693	
30.2 从飞行器上测量气溶胶	606	35.4 氡及其衰变产物的气溶胶性质	695	
30.3 气溶胶采样和测量目的	606	35.5 人体暴露参数	696	
30.4 空运气溶胶测量技术	607	35.6 氡及其短期衰变产物的空气采样	697	
30.5 飞行器气溶胶采样的复杂性	608	35.7 校准	702	
30.6 采样口小结	611	35.8 室内测量草案	703	
30.7 结论	613	35.9 结语	703	
参考文献	613	参考文献	703	
31 高浓度、高温下的气溶胶测量	616	36 药用气溶胶和诊断用气溶胶的测量	705	
31.1 绪论	616	36.1 绪论	705	
31.2 稀释系统	616	36.2 药用气溶胶的给药路线	706	
31.3 EPA 烟道采样方法	621	36.3 诊断用气溶胶	710	
31.4 高温的不良影响	622	36.4 药用和诊断用气溶胶的特征	711	
31.5 原位测量	623			
31.6 定性检测燃烧产生的气溶胶	630			

36.5 目前在药用气溶胶和诊断用气溶胶 测量中存在的问题	717	37.1 绪论	721
36.6 结论	718	37.2 大气暴露的基本控制系统	721
参考文献	718	37.3 暴露系统的属性	723
37 呼吸毒理学：控制大气暴露的采样 策略	721	37.4 基础采样技术和策略	724
		37.5 结语	727
		参考文献	727

附录

附录 A 术语表	729	附录 E 重要的无量纲数	738
附录 B 单位换算	737	附录 F 粒子性质	739
附录 C 常用常数	738	附录 G 几何公式	739
附录 D 空气和水的一些性质	738	附录 H 常见气溶胶物质的体积密度	740

索引

英文字母索引	741
--------------	-----

第一部分 基本理论

1 气溶胶测量的历史回顾

KVETOSLAV R. SPURNY^①

德国, 施马伦贝格 (Schmallenberg), 格拉夫沙夫特 (Grafschaft)

1.1 绪论

自第二次世界大战以来, 气溶胶研究就已成为基础和应用科学中的一项特殊主题。作为一门学科, 气溶胶科学有其发展历史, 物理学家、化学家和气象学家等推动了气溶胶科学的发展, 政治、经济事件和科技发展也同样影响着这一学科的发展。气溶胶测量方法是气溶胶科学历史的重要部分。有关气溶胶科学发展的杂志有很多, 主要是美国气溶胶研究协会的定期刊物《气溶胶科学与技术》, 出版此类刊物对于气溶胶科学在第三个千年的长远发展具有重要意义 (Davis, 1997; Kerker, 1997; Walton 和 Vincent, 1998; Spurny, 1998a, 2000b; Knutson, 1999; McMurry, 2000)。气溶胶科学研讨会的会议录已经出版 (Preining 和 Davis, 2000)。

1.2 早期

气溶胶科学的历史与空气污染历史紧密相连。很早期的文献中就提到室内和室外空气中存在“令人不愉快的”和有害的粒子。比如, 古罗马时期的罗马人抱怨恶臭的空气。1273年, 由于严重的大气粒子污染, 伦敦禁止燃煤, 1306年, 爱德华一世颁布了皇家禁令。1661年, John Evelyn 向查理斯二世提交了第一本关于大气粒子污染的重要手册, 他写的《防烟》(*Fumifugium*) 生动地描述了伦敦城中的大气粒子污染 (Lodge, 1969)。然而, 直到 19 世纪后半叶中期才产生气溶胶科学和气溶胶测量方法。

1.3 经典期之前的气溶胶测量

人们将 20 世纪之前对气溶胶测量方法的研究和发展称为经典期前。早期气溶胶研究与胶体化学的初始发展紧密相联 (Spurny, 1998a)。在这段时期里, 人们第一次观察了分散在空气中的细微粒子, 并在实验室里完成了一些早期实验。根据 McMurry 的回顾 (2000), 早在 1841 年, J. P. Espy 造出了“测云器 (nepheloscope)”, 利用此仪器能在实验室条件下观察到水汽的形成, 但他没有意识到凝结发生在粒子上。根据 Podzimek 的回顾 (1985, 1989), 1847 年, H. Becquerel 提出空气中存在细微粒子, 即现在所称的凝结核。20 世纪 30 年代后, Coulier (1875) 通过实验证实了这些凝结核的存在, 并第一个发表论文, 说明空气在绝热膨胀时, 未经过滤的空气比经过过滤的空气更容易发生凝结。Coulier 发明了第一

^① Deceased, November 3, 1999.

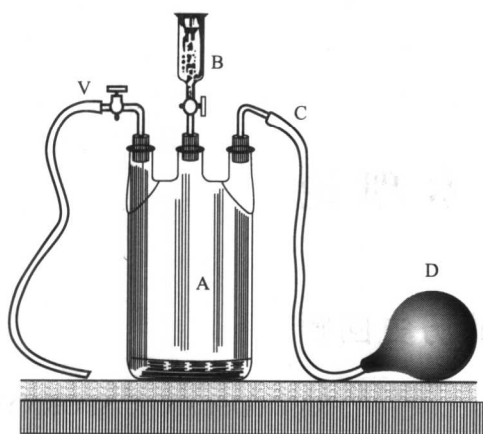


图 1-1 P.J Coulier 检测粉尘
粒子凝结时所用的仪器

A—透明细颈瓶；B—滴定管；C—连接管；
D—橡皮球；V—阀门

作用下膨胀，产生一阵小雨，这样就得到降落在计数区的液滴数。19 世纪 90 年代末，C. T. R Wilson 发明了一种改进的云雾膨胀舱用于研究均匀成核现象 (Wilson, 1897)。

Lennardo da Vinci (1452~1519) 第一个记载了实验室制备的气溶胶的使用情况 (Kerker, 1997)。直到几个世纪之后，John Tyndall 重复了 Lennardo da Vinci 的实验。John Tyndall 1820 年出生于爱尔兰，1893 年在英格兰逝世。他曾经与 W. Bunsen 合作在德国的 Marbury 进行研究，之后又与 Michael Faraday 合作。Michael Faraday 最终成为 John Tyndall 研究工作的后继者。Tyndall 发现，当有一束阳光照射进入房间时，在汇聚光的照射下能够很容易发现房间里的粉尘和烟雾。1856 年，Fanaday 借助这个发现证明了液体中存在胶体粒子。十年之后，Tyndall 扩展了这个方法来检测气溶胶，并第一次应用该方法检测了室内空气粒子污染 (Tyndall, 1871; Gentry, 1997)。19 世纪 60 年代末，Tyndall 使用暗场照明灯研究了空气中的细小粒子 (Tyndall, 1869a)，并通过照射空气和各种蒸气以及气体（如 HCl、HBr、HI 和硝酸戊酯）的混合物，产生了含有微小粒子的云雾。Tyndall 不仅发明了丁达尔仪、测云器和超倍显微镜，还为热沉降器的发明奠定了基础。1870 年，Tyndall 发现在充满粉尘的环境中，加热物体的上方会出

个凝结核检测器 (图 1-1)。该仪器由一个透明细颈瓶 (A) 和能够将空气压进细颈瓶的橡皮球 (D) 组成。打开阀门 (V) 空气膨胀，并在气溶胶粒子上发生凝结。

John Aitken 在 1875 年开始研究凝结，并在 1880 和随后发表了他的研究成果 (Aitken, 1880a, b, 1888~1889)。他的仪器和试验与 Coulier 十分相似。他认为 Coulier 第一个说明了凝结核在水蒸气冷凝过程中的重要作用 (Surnpy, 2000b)。Aitken, 1839 年出生于苏格兰的 Falkirk, 1919 年去世。他发明并使用了第一台计量粒子数目的便携式设备 (Aitken, 1888~1889, 1890~1891, 1920)。图 1-2 即为该计数器的原始结构，待测气体从管 A 进入储气瓶 R 中，并与一定量的洁净空气混合，然后用水饱和，随后 R 中的空气在泵的作用

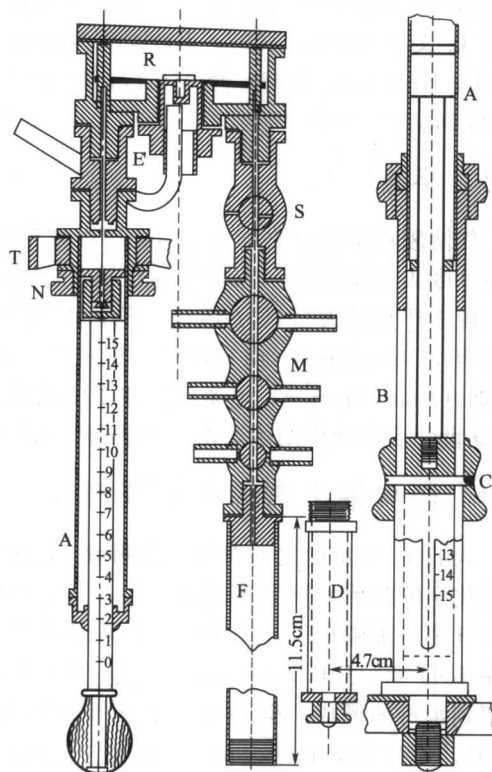


图 1-2 便携式“粉尘计数器”的最初示意图

A—空气泵；R—接收器；S—活塞；M—测量
气体的设备；F—过滤器；T—三脚架的“头”；
N—螺帽；B—金属支架；D—管的尾部；E—E 部分

现狭窄的黑暗区域。很多年后，Lord Rayleigh (1882)、Lodge (1883, 1884)、Lodge 和 Clark (1885) 都观察到加热物体几乎完全被这样的黑色区域包围。这便是热迁移效应的发现 (Fuchs, 1971)。

早在 19 世纪 80 年代，许多研究者 (Hohlfeld, 1824; Lodge 和 Clark, 1883, 1885; Lodge, 1886) 都报道了这样一个现象：电荷进入充满烟雾的环境后，会把粒子迅速凝结成凝聚体而驱散烟雾。该效应使得人们在随后发明了静电沉降器 (electrostatic precipitators)。其实在 18 世纪 70 年代，Giovanni Battista Beccaria 就发现了这个效应，并发表了有关文章 (Beccaria, 1772)。

20 世纪之前已有了玻璃采尘器 (glass impingers) 的前身。19 世纪 80 年代，德国柏林健康研究所的 Robert Koch 实验室使用玻璃采尘器采集了细菌气溶胶。Koch 的助手 Michaelis 在其试验装置中也使用这种采尘器 (L) 测试了粉尘呼吸器 (dust respirators) (见图 1-3) (Michaelis, 1890)。Michaelis 的实验中，玻璃导管的尾部并没有插入液面以下，但是却能从溶液表面采集水溶液中的细菌气溶胶。20 世纪前，已报道了室内空气细菌气溶胶的早期测量装置 (Singerson, 1870~1874)。

在 1881 年，德国的 Bidaszeusky (1881) 用超倍显微镜观察并描述了烟雾粒子运动和沉降。随后，英格兰的 Townsend (1900) 制造出第一个浸提器组 (diffusion battery)。

1.4 经典发展时期的气溶胶测量

经典气溶胶物理学时期 (Spurny, 1993) 的标志是该时期气溶胶测量技术的使用和开发及试验技术的普及。气溶胶科学研究的经典时期一直延续到 20 世纪中期，并以《气溶胶力学》(Mechanics of Aerosol) 的出版为结束标志 (Fuchs, 1955, 1964)。在这个时期，还没有应用激光、计算机、光谱分析仪等。

这个时期首次使用“气溶胶”一词，是物理化学学家 E. G. Donnan 约在 1918 年提出的。1920 年，德国 Munich 气象中心主任 A. Schmanss 将“气溶胶”一词引入气象杂志。A. Schmanss 使用这个新概念将胶体化学过程与烟雾环境下的化学过程相比较，并发现了它们的重要相似之处。与“水溶胶”相对应，使用“气溶胶”描述分散在空气中的固体粒子和液滴形成的云雾。

大概 1920 年后，气溶胶测量方法得到更为深入的发展。在这个时期，人们已经认识到工业气溶胶和粉尘对人体健康的危害 (Sinclair, 1950; Davies, 1954; Drinker 和 Hatch, 1954)。通常，粒子被空气携带或通过物理、化学方法被富集在某一表面，可以测量气溶胶尤其是工业粉尘。从 20 世纪 20 年代早期到 20 世纪 60 年代之前的整个时期里，化学收集方法被广泛用于工业卫生领域。

1.4.1 测量的基本原理和方法

早在 20 世纪初，人们就尝试测量空气粉尘。最简易的方法就是使一定体积的充满粉尘的空气通过一个滤膜 (filter) 然后称量。最早使用的是棉羊毛滤膜，到 1906 年左右其被“糖管 (sugar tube)”代替，在“糖管”中，粉尘被捕捉在糖粒子上，糖可以在水中溶化，

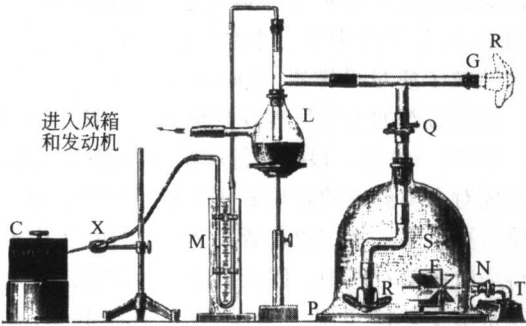


图 1-3 Michaelis 测试呼吸器时所用的设备

L—当时在柏林的 Robert Koch 实验室内所用的玻璃采尘器；M—压力计；L—采尘器；Q—弹簧夹

收集到的粉尘沉积到滤膜上后被称量 (Walton, 1982)。这种粉尘重量分析法有很多缺点, 最显著的缺点是: 数量相对较少的粗糙粒子占了待测质量的大部分。人们对硅沉着病 (矽肺) 病人的肺组织进行显微镜分析时发现, 肺中留存的粉尘全部都是相对较小的粒子。沉积在肺部的粒子中, 70% 的粒子粒径小于 $1\mu\text{m}$ (McCrae, 1913)。这个发现促使了第二代粉尘采样器的发展, 这种采样器能够采集到可供显微镜分析的细粒子 (粒径小于 $5\mu\text{m}$)。人们可以测量 1mL 空气中这种小粒子的数量。该方法一直使用到 20 世纪 50 年代, 这时出现了可吸入性粒子质量采样器 (Davies, 1952)。

依据最新的大气气溶胶测量方法, 粒子数量浓度的测量原则再次受到人们的关注 (Spurny 等, 1969)。最近, 根据流行病学和毒理学的研究, 人们发现粒径小于 $1\mu\text{m}$ 粒子的浓度及其化学组成对人类健康的影响要比大粒子更为显著。对小于 $1\mu\text{m}$ 粒度范围内的粒子来说, 其浓度比质量更重要。本书原著者在 20 世纪 40 年代末开始从事气溶胶测量工作, 现在仍能很清楚地记得当时的测量原则。因工矿业中存在硅沉着病 (矽肺) 高发病率, 所以在工场中进行粉尘测量非常重要。16 世纪, Agricola (Georg Baner 的拉丁名字, “De Re Metallica” 的作者) 第一次观察到硬岩矿工高死亡率 (Drinker 和 Hatch, 1954)。20 世纪 20 年代末, 人们确认硅土 (石英尘) 是导致致命性疾病硅沉着病 (矽肺病) 的罪魁祸首 (Collis, 1926)。

第二次世界大战之前, 人们已认识到在工作场所测量工业粉尘的必要性; 之后, 这种意识更为强烈。总的来说, 当时已有许多采集粉尘的物理方法, 如利用惯性将粒子分离、过滤、热迁移和静电沉降等, 然而, 尽管光学显微镜分析法已用于计数粒子和测量粒径, 但几乎没有样品分析方法。因此, 需做以下选择: 把样品采集到平整光滑且透明的表面还是采集到液体中, 是否使用光学显微镜分析法对粒子进行计数和测量。

1.4.2 气溶胶采样方法

在适当的时间里, 重力并不足以将可吸入性粒子和其他的气溶胶粒子从空气样品中分离出来。应该运用惯性、热力和静电引力加速粒子的沉积, 或使用有效的过滤系统。这些方法都适用于气溶胶测量, 以便估计粒子的数量或浓度 (Spurny 等, 1961)。



图 1-4 19 世纪 20 年代在英格兰使用的 Owens 喷射式尘粒计数器

计尘器 (konimeter)

计尘器是单级冲击式采样器 (one-stage impactor)。1919 年, 南非联盟的 Robert Kotze (Innes, 1919) 制造了计尘器, 粉尘粒子通过碰撞被收集在涂有石油或甘油的玻璃板上, 石油膜或甘油膜能够阻拦并留住粉尘。在英国长期使用的是 Owens 喷射式尘粒计数器^① (jet dust counter) (Owens, 1922) (见图 1-4)。该计尘器与 Kotze 计尘器十分相似, 在长方体喷嘴 (nozzle) 前端有一个进口舱, 玻璃碰撞表面没有使用任何黏性物质, 并在进口舱里放有湿润的吸墨水纸以确保采样的湿度。随后, 在 20 世纪 30 年代, Behounek 使用真空储气盒连接手动泵改进了 Owens 计数器 (见图 1-5) (Behounek, 1939; Behounek 等, 1942), 这样就可以防止气流通过喷嘴时的速度发生波动。20 世纪 30 年代, 英国开始商业生产计尘器, 并开始在德国应用。

^① Owens 喷射式尘粒计数器: 与计尘器相似, 不同的是在把采样空气送入喷嘴前, 需要将其加湿。冲击速度大约是 200~300m/s, 长方形喷嘴代替了圆形喷嘴。由于喷嘴处存在压力降, 产生超饱和, 所以, 预先加湿可使湿气凝结在粉尘粒子上。