

气溶胶手册

〔美〕 理查特·丹尼斯 编

梁鸿富 卢正永 译

程信余 校

原子能出版社

气溶胶手册

〔美〕理查特·丹尼斯 编

梁鸿富 卢正永 译

程信余 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

通县长城印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/32·印张12.5·字数270千字
1988年7月北京第一版·1988年7月北京第一次印刷

印数：1—2200

统一书号：15175·811 定价：3.20元

ISBN 7-5022-0077-0/X-2

目 录

第一章 绪论:目的、编排和应用…………… (1)

1-1 引言…………… (1)

1-2 气溶胶体系…………… (3)

1-2.1 基本术语…………… (3)

(a)气溶胶…………… (3)

(b)微粒…………… (4)

(c)灰尘、烟尘、烟、雾和雾…………… (5)

1-2.2 粒径分布参数…………… (6)

1-3 应用范围…………… (8)

1-4 资料来源…………… (11)

1-5 手册编排…………… (13)

1-5.1 绪论…………… (14)

1-5.2 气溶胶发生方法…………… (14)

1-5.3 气溶胶的动力学特性…………… (15)

1-5.4 气溶胶的光学性质…………… (15)

1-5.5 采样方法和粒径测量…………… (16)

1-5.6 图表汇编…………… (16)

1-6 参考书目…………… (17)

第二章 气溶胶发生方法…………… (24)

2-1 引言…………… (24)

2-1.1 试验气溶胶的应用…………… (24)

2-1.2 对气溶胶发生系统的要求…………… (25)

(a)影响试验气溶胶重复性的因素	(25)
(b)检测灵敏度	(28)
2-1.3 固体粒子和液滴的比较	(29)
2-1.4 生成气溶胶的基本机理	(29)
2-2 实验室气溶胶的发生	(30)
2-2.1 分散法	(30)
(a)固体粒子	(30)
(b)液体粒子(液滴)	(31)
2-2.2 固体粒子的再分散方法	(48)
(a)鼓风喷射器	(48)
(b)压缩空气喷雾器	(73)
2-2.3 凝集法	(78)
(a)固体粒子	(78)
(b)液体粒子(液滴)	(84)
2-3 气溶胶的现场发生	(91)
2-3.1 大气示踪气溶胶的发生	(91)
2-3.2 试验过滤器、手套箱、密封室(舱)等的携 带式发生器	(93)
参考文献	(94)

第三章 气溶胶的动力学特性 (125)

3-1 引言和概要	(125)
3-2 界面现象	(132)
3-2.1 蒸发、凝集和成核现象	(132)
3-2.2 粘附现象	(134)
3-2.3 粒子的带电	(136)
3-3 气溶胶动力学	(142)

3-3.1	引言	(142)
3-3.2	沉降	(143)
	(a) 斯托克斯定律和惯性作用	(143)
	(b) 滑动修正	(145)
	(c) 在物体和流动边界层上的沉降	(146)
3-3.3	撞击	(148)
	(a) 射流撞击	(149)
3-3.4	扩散	(158)
	(a) 静止气体	(159)
	(b) 层流	(161)
3-3.5	凝并	(162)
	(a) 热力凝并	(162)
	(b) 荷电粒子的凝并	(163)
	(c) 外加电场作用下的凝并	(164)
	(d) 湍流凝并	(164)
	(e) 动力凝并	(164)
3-3.6	沉降、扩散和凝并的综合作用	(165)
3-3.7	气溶胶粒子的电动力学	(167)
	(a) 静电弥散	(167)
	(b) 非球形中性粒子的动力学	(168)
	(c) 静电沉积	(169)
3-3.8	过滤	(180)
	(a) 引言	(180)
	(b) 纤维滤料的收集效率	(181)
3-3.9	颗粒床过滤器的收集效率	(187)
3-3.10	滤膜过滤	(189)
3-3.11	工业织物过滤	(189)
	参考文献	(190)

第四章	气溶胶的光学性质	(202)
4-1	引言.....	(202)
4-1.1	光散射过程的定性描述.....	(202)
4-1.2	影响光散射性质的参数.....	(203)
	(a) 粒径.....	(203)
	(b) 粒子的形状和取向.....	(204)
	(c) 粒子的表面性质(粗糙度).....	(204)
	(d) 粒子的折射率(实数部分和虚数部分).....	(204)
	(e) 粒子的均匀性.....	(205)
4-2	单个粒子和单分散气溶胶.....	(205)
4-2.1	描述光波的斯托克斯参数.....	(205)
4-2.2	均匀的球形粒子.....	(207)
	(a) 米氏理论.....	(207)
	(b) 消光.....	(210)
	(c) 角散射.....	(212)
	(d) 偏振.....	(212)
	(e) 与波长的关系.....	(214)
4-2.3	非球形和不均匀粒子的光散射.....	(215)
	(a) 非球形粒子.....	(215)
	(b) 不均匀粒子.....	(217)
4-2.4	瑞利散射和瑞利-甘斯散射.....	(219)
	(a) 瑞利散射.....	(219)
	(b) 瑞利-甘斯散射.....	(220)
4-2.5	几何光学区.....	(221)
4-3	多分散气溶胶.....	(223)
4-3.1	粒径分布和散射性质.....	(223)
	(a) 消光.....	(224)
	(b) 角散射.....	(226)

	(c) 偏振.....	(229)
4-3.2	反演问题.....	(229)
4-4	气溶胶的光学测量方法.....	(230)
4-4.1	全云层测量——多粒子系统.....	(230)
	(a) 消光系数的测量, 透光性.....	(231)
	(b) 角散射, 高级廷德尔光谱.....	(233)
	(c) 偏振.....	(238)
4-4.2	单个粒子的测量.....	(239)
4-4.3	激光全息术.....	(243)
4-5	天然气溶胶——大气的光散射.....	(247)
4-5.1	大气的本底气溶胶.....	(247)
	(a) 成分.....	(247)
	(b) 浓度.....	(248)
	(c) 粒径分布.....	(249)
	(d) 粒径和浓度的垂直分布.....	(249)
	(e) 气溶胶的折射率.....	(251)
4-5.2	大气的能见度, 天光.....	(253)
	(a) 大气的透明度.....	(253)
	(b) 天空亮度-多次散射.....	(253)
	(c) 偏振.....	(256)
参考文献	(258)
第五章	采样方法和粒径测量.....	(273)
5-1	采样方法.....	(273)
5-1.1	代表样的采集.....	(273)
	(a) 由静止介质中抽气采样.....	(273)
	(b) 由气流中分流取样.....	(275)
5-1.2	采样方法.....	(277)
	(a) 重力沉降法.....	(277)

(b)	过滤法.....	(282)
(c)	撞击法.....	(285)
(d)	冲击法.....	(286)
(e)	离心法.....	(287)
(f)	沉积法.....	(290)
(g)	凝结核计数器.....	(292)
5-2	粒径和粒子数的测定.....	(294)
5-2.1	光学方法.....	(295)
(a)	光学显微术.....	(295)
(b)	电子显微术.....	(299)
(c)	照相和全息术.....	(301)
5-2.2	金属网筛分离法.....	(302)
5-2.3	塑料滤膜分离法.....	(302)
5-2.4	沉降法.....	(303)
5-2.5	光散射法和光透射法.....	(303)
5-2.6	凝结核计数器.....	(306)
5-2.7	电学方法.....	(306)
(a)	电阻变化.....	(306)
(b)	粒子荷电.....	(307)
5-2.8	撞击法.....	(310)
5-2.9	离心分级法.....	(311)
5-2.10	扩散池法.....	(313)
5-2.11	声学方法.....	(317)
5-2.12	热力法.....	(318)
5-2.13	气体吸附法.....	(318)
5-2.14	热发射光谱法.....	(318)
5-3	粒径统计.....	(319)
5-3.1	定义.....	(319)

5-3.2	数据表示方法	(321)
5-3.3	粒径分布函数	(324)
(a)	正态分布函数	(324)
(b)	对数正态分布函数	(325)
(c)	双重和多重分布函数	(327)
参考文献		(329)

第六章 气溶胶体系的静态和动力学特性的图表汇编 (345)

6-1	粒子力学	(345)
表6.1	球形粒子的阻力系数-雷诺数关系	(346)
图6.1	在20℃和1atm的空气中单位密度球的极限沉降速度	(350)
图6.2	在20℃和1atm的空气中球形粒子的松弛时间	(351)
图6.3	在20℃和1atm下带单位电子电荷的球形粒子在空气中的迁移率	(352)
图6.4	在20℃和1atm下球形粒子在空气中的扩散系数	(353)
图6.5	在20℃和760mm Hg的空气中,坎宁安滑动系数与粒子直径的关系	(353)
图6.6	根据几种特征直径和几何平均直径的比值与几何标准偏差 σ_g 的关系(如图5.14中定义的),用图解法估算粒子的	

	各种特征直径·····	(354)
图6.7	估算粒子在水平圆管中重力沉降损失的列线图·····	(355)
图6.8	计算层流圆管中粒子扩散损失的列线图·····	(358)
6-2	大气性质·····	(359)
表6.2	海平面附近清洁干燥空气的标准成分·····	(359)
图6.9	在1 atm下空气粘度与绝对温度之间的关系·····	(360)
图6.10	空气粘度与海拔高度的关系·····	(361)
图6.11	空气运动粘度 (ν) 与海拔高度的关系·····	(361)
图6.12	空气密度与海拔高度的关系·····	(362)
图6.13	大气压力与海拔高度的关系·····	(362)
图6.14	气温 (T) 与海拔高度 (H) 的关系 (T_m = 高度低于 $Z = 90\text{km}$ 时, 或 $H = 88.743\text{km}$ 时的 T) ·····	(363)
图6.15	空气分子间碰撞频率 (ν) 与海拔高度 (Z) 的关系·····	(363)
图6.16	空气分子平均自由程 (L) 与海拔高度 (Z) 之间的关系·····	(364)
图6.17	摩尔体积 (V) 与海拔高度 (Z) 之间的关系·····	(364)
6-3	换算因数·····	(365)
表6.3	长度单位, 公制与英制的换算因数·····	(366)

表6.4	力的单位, 公制与英制的换算因数.....	(366)
表6.5	能量单位, 公制与英制的换算因数.....	(368)
表6.6	体积单位, 公制与英制的换算因数.....	(368)
表6.7	面积单位, 公制与英制的换算因数.....	(370)
表6.8	体积流量, 英制与公制的换算因数.....	(370)
表6.9	气压单位, 英制与公制的换算因数.....	(372)
表6.10	速率(或速度)单位, 公制与英制的换算因数.....	(372)
表6.11	密度单位, 公制与英制的换算因数.....	(373)
表6.12	功率单位, 公制与英制的换算因数.....	(373)
表6.13	平面角单位的换算因数.....	(374)
表6.14	时间单位的换算.....	(374)
表6.15	电流单位的换算因数.....	(375)
表6.16	电势单位的换算因数.....	(375)
表6.17	电容单位的换算因数.....	(375)
表6.18	电阻单位的换算因数.....	(375)
表6.19	电阻率单位的换算因数.....	(376)
表6.20	电荷单位的换算因数.....	(376)
参考文献	(377)
术语汇编	(379)
术语符号表	(381)

第一章 绪论：目的、编排和应用

Richard Dennis

1-1 引言

气溶胶体系在确定人的生活环境质量方面，尤其是在城市地区，起着极其重要的作用。因此，我们需要弄清楚：气溶胶的成分；生成气溶胶的各种过程；气溶胶对矿物、植物和动物发生作用时，其浓度、粒子的大小和形状以及各种物理和化学性质的影响；为保证将气溶胶的任何伤害作用减至最小所必须采用的控制方法；以及与此相反的，市售气溶胶发生器最充分发挥效益所应选择的工作方式。

我们的目的不管是想通过清除大气中污染物的办法来改善环境质量，还是想通过合理使用工业气溶胶（这里不包括喷洒香水和化妆品的压缩容器）使我们的生活丰富多采，其共同特性是对决定着气溶胶体系中微粒相的生成、物理和化学性质以及动力学行为的基本原理进行汇集并给予正确地解释。

本手册所选择讨论的那些粒子性质和决定性质的物理原理都是在解决有关粒子的问题时要直接用到的。

在气溶胶体系评价技术方面所取得的许多进展，增进了我们对粒子力学的了解，提供了解决问题的更好方法。然而，这些资料分散在各种专业文献中，以致遗漏密切相关的材料屡见不鲜。此外，技术报告中所存在的科学观点分歧和缺乏标准化，也常使处于负责地位的人难于选择最佳的技术

8810618

方案。

气溶胶手册初版是1950年出版的，本手册是继此后的首次尝试，打算系统评论气溶胶领域内的有关发展，介绍这方面的资料，使活跃在该领域的工作人员受到教益。

本手册的内容虽然是为了满足解决原子能工业中出现的粒子问题在技术上的需要，但因为所涉及的范围相当广泛，以致对许多其他方面的工作人员也会是很有帮助的。本书大体上是以前其他专业手册（例如机械工程手册、化工手册、电工手册、化学手册、物理手册、气象手册以及许多其他手册）为蓝本的。

编写本书时，主要考虑的是下面两类人员：1）科学家和工程师，他们所进行的科学研究和工程方面的工作，很需要一本论述气溶胶体系各类问题的简明手册；2）技术管理人员，他们所参与的各项气溶胶计划工作是属于外围性质的，但是行政管理上的职责要求他们对气溶胶的各种基本性质和特点，有一个实际的了解。

虽然本书没有介绍气溶胶在理论方面的广泛进展，但对许多问题都推荐了定量的解决方法，并且包括解决实际问题时的限制和边界条件。凡在文献中存在几种可能的数学解时，本手册只叙述作者和审校者认为最合适的一种解。但在每章之后都给出了丰富的参考文献，以便读者对任一主题都能以其所希望的深度作进一步的研究。

在处理气溶胶问题时，经常需要许多常数以及其他参数，为便于对它们进行粗略估算或直接得到其近似数值，本手册提供了相当多的图表。尽管本书在材料的取舍和安排上未必能满足每个读者的需要，但作者和审校者还是作了真诚的努力，力求能从尽可能广泛的观点去审定该手册的内容。本书

是针对美国原子能委员会的需要而编写的，然而，由于美国原子能委员会范畴内的许多科学技术工作种类甚多，规模不一，事实上已把本书的使用范围扩展到几乎任何气溶胶体系上。

1-2 气溶胶体系

1-2. 1 基本术语

在论述气溶胶粒子性质的文献中经常出现的许多术语已列入第六章后的术语汇编内。某些值得作进一步讨论的关键名词在这里先介绍一下，以免在阅读后面几章时发生误解。由于目前有关气溶胶的术语在符号、单位和基本含义上的差异都已超过了足够的程度，所以这里多半不再增添新的提法。

(a) **气溶胶** “气溶胶”这个词用于定义固体粒子或液滴分散在气体中所构成的悬浮体系。一个很常见的错误是把粒子和气溶胶混为一谈。从本质上说，气溶胶是水溶胶的对应物，不同之处只是在气溶胶内承载粒子的流体是气体而不是液体。作为气溶胶的特征，它应当是一种稳定的或准稳定的体系，所以典型的环境大气中存在的粒子，其粒径绝大部分都不超过 $1\mu\text{m}$ 。与此相应，一般遇到的有相当代表性的粒子的质量浓度范围为 $25-250\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。除非是处在绝对静止状态，空气中总会有扰动，正常水平的扰动，通常都能提供粒子以足够的能量，使一些大至 $10\mu\text{m}$ 的粒子都能在空气中悬浮。

对光的屏蔽能力传统上也是和气溶胶这一术语相关联的。现已确定，典型的大气气溶胶中对能见度影响最大的是

直径范围约为 $0.1-1.0\mu\text{m}$ 的粒子。

一般城市地区大气中的烟雾或美国阿巴拉契亚山脉 (Appalachian mountains) 的蓝色霾雾 (haze), 其气溶胶粒子大小的边界通常为 $\leq 1\mu\text{m}$ 。然而, 也有某些环境或大气, 它们能满足气溶胶粒子对稳定性的要求 (也能满足光衰减要求), 但是粒子的大小却超出了上述范围, 这乃属于动态稳定情况。大的粒子在管道内或在其他封闭性结构中流动所发生的就是这种情况。当由于粒子源居于高处形成稳定的微气流穿过空气下降时, 或者当粒径约为 $10-40\mu\text{m}$ 的海雾, 因对流作用而持续不断的被置换, 也有点与此相类似。

一般来说, 几乎任何准稳定的粒子悬浮体系都可以借助于延伸定义的办法对它进行描述, 而无须寻找另外的词汇去描述它。这里, 我们就是这样做的。

(b) 微粒* 固体分散相, 不管它是由具有和母体材料相同密度的单个粒子组成的, 还是由疏松地结合在一起的絮状物所组成的, 都定义为粒子 (Particle), 以便把它们与液滴 (droplet) 区分开来。在没有必要区分气溶胶的成分是粒子还是液滴时, 则使用“微粒” (Particulate) 这一集合名词统称之。这样一种总的归类方法, 自然排除了将微粒按其形状和密度的不同进行区分。

为了更详尽地叙述分散相的性质, 如在后面几节所要讨论的, 微粒物质还可以按照其形成的方法、典型的大小、自然存在的情况 (也可以是三者的某种组合), 把固体和液体

* 本书各章并没有按本节对微粒、粒子的定义使用这两个词, 下面, 我们遵照通常的习惯, 用粒子一词表示固体和液体粒子。在需区分的场合, 相应称之为固体粒子和液滴, 而保留微粒一词用以指较小的粒子。——译者注

气溶胶作进一步的细分。

(c) 灰尘 (dust)、烟尘 (fume)、烟 (smoke)、雾 (mist) 和雾 (fog) 灰尘通常都是由各种粉碎过程产生的, 这些过程典型地见于采矿和各种矿石破碎作业中。然而, 正如高速气流 (风) 的剪切作用使沉降粒子重行飞扬和悬浮那样, 任何磨损过程也都是一种潜在的灰尘发生器。灰尘的粒径范围可以从亚微粒子一直延伸到肉眼可见的宏观粒子, 悬浮粒子粒径的上限, 只取决于大气扰动水平和粒子源所处的高度。

粒子往往被看作是母体材料的缩影, 但应注意, 破碎很不规则的晶体所得的粒子在不同方向上的长度比, 大的和小的粒子会有很大的差别。例如沿垂直于长轴的方向不断的使针状晶体开裂所得的粒子, 其轴向长度和直径的比可从大于 10:1 降至 1:1。

除了工业上的中心气体净化系统 (例如铸造厂各种操作的净化系统或大多数工业生产上的真空净化系统) 收集到的是几种明显不同的灰尘之外, 还有许多情况, 灰尘虽来源于某一单一的生产过程 (例如, 开采带矿物夹层的煤层; 煤的燃烧), 也含有多种化学成分, 且每种化学物质常具有特定的粒径范围。如许多煤飘尘经过机械筛分后, 每一筛分常以一种化学物质为主, 如氧化铁、硅酸盐、煤胞结构物和碳粒子等。因而以粒子直径作为唯一变量的种种气溶胶研究中, 都不应选用上述的非同质灰尘。

烟尘通常是由各种化学反应 (如氧化) 或蒸发 (升华) - 凝集过程所产生的。这些情况下形成的初始物质大致都是分子大小的, 具有非常高的布朗扩散速度, 迅速聚合生长, 以致在如冶金这样一些工业中最常见的烟尘粒径范围为 0.01 至

$1\mu\text{m}$ 。过程温度和冷却气体体积对烟粒的大小有影响，使之可能具有某种幅度。

烟尘有两个特点：第一，电子显微镜表明，在光学显微镜视野下观察呈整体的个别粒子，通常是由许多更小的粒子构成的聚合物 (agglomerate)，其松密度常低至只有构成粒子密度的5%；第二，一旦生成后，就很难再对它进行分离和再分散。因此，金属烟尘不是发生试验用微粒的合适材料。

烟是矿物燃料、沥青以及木材等类材料的燃烧产物，它总具有屏蔽光的能力。它的另一特征是烟中存在有烟灰 (Soot)、液滴，在木柴和煤燃烧的场所，还夹杂有大量的矿物灰。烟粒的大小，大致处于金属烟尘的分布范围内，约为 $0.5\mu\text{m}$ 。

霾和雾均由液滴所组成，可由雾化或凝集过程产生。两者的主要区别在于其大小：液滴直径大于 $40\mu\text{m}$ 的称为霾，直径处于 $5-40\mu\text{m}$ 范围的称为雾。

烟雾和霾 (haze) 都是指含亚微粒的大气气溶胶，是一个内涵很宽的术语，分散相可以是固体粒子，也可以是液滴，由大气中的各种化学反应或者凝集过程所产生。霾通常是由于人造污染物的释放所造成的，也可能是由于植物中树脂物质的渗出、森林着火或火山爆发而引起的。这些物质的粒度特性与烟的类似，它们都能够使大气能见度显著降低。

1-2. 2 粒径分布参数

在手册中作了大量的努力以保证能清楚地地区分粒子的诸如投影面积或总面积，体积和质量这样一些由粒径导出的物理性质与粒子特征尺寸的关系。首先，在第二章我们叙述