

气溶胶科学引论

卢正永 编著

QI RONG JIAO
KE XUE YIN LUN

原子能出版社

气溶胶科学引论

卢正永 编著

原子能出版社
北京

(京)新登字 007 号

图书在版编目(CIP)数据

气溶胶科学引论/卢正永编著. -北京:原子能出版社

1999. ISBN 7-5022-1933-1

I. 气... I. 卢... III. 气溶胶 N.0648.18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 37306 号

内 容 简 介

本书是气溶胶科学的入门书。前五章主要介绍气溶胶的基础知识和基本理论。第六至十章主要介绍气溶胶的实用技术——采样技术与测量技术。在采样技术中,不仅介绍了气溶胶总浓度采样与粒度分布采样的各种方法和技术,更介绍了应用这些方法的注意事项;在测量技术中,在介绍普通气溶胶测量的基础上,用两章的篇幅重点论述了人类生活环境中的天然氡氡子体气溶胶及核工业中的人工放射性气溶胶的有关特性及各种测量方法,这对于从事放射性气溶胶测量和关心氡氡问题的读者无疑是重要的参考资料。最后一章介绍了目前国际上通行的各种气溶胶采样标准,其中重点介绍了气溶胶的粒度分类采样标准。书中每一章都针对性的给出了相应的参考文献,有助于读者对所关心的内容作更深入的了解和研究。本书在内容安排与深浅程度上适合从事工业卫生、环境保护与辐射防护的科技工作者、特别是在这些领域中从事气溶胶监测和测量的科技工作者阅读,也适合从事气溶胶科学研究和教学的人员参考。

©

原子能出版社出版发行

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 14.4 字数 358.8 千字

2000 年 10 月北京第 1 版 2000 年 10 月北京第 1 次印刷

印数 1—600

定价:45.00 元

前 言

由中国人自己编写、内容相对比较全面的气溶胶科学专著迄今似乎还没有。据作者不很全面的了解,只在某些大气科学或环保科学的译著中可见到有关气溶胶方面的很有限的论述。气溶胶科学在工业卫生、环境保护以及核工业的辐射防护等领域有着举足轻重的作用。职业卫生中的粉尘危害与治理、环境保护中的空气质量监测与评价以及辐射防护中的辐射安全与剂量估算等等,首当其冲遇到的就是气溶胶问题。编写一本适合有关科技工作者阅读与参考、能为初涉气溶胶领域者起到导向作用、为涉及此领域较深者起到扩大视野作用的气溶胶科学专著,是作者多年来的愿望。尽管实现此种愿望对于作者来说却也有些力不从心,但他还是这么做了。好在作者多年来几乎一直从事气溶胶科学方面的研究与实践工作,把自己和同事们在学习与工作中积累起来的资料和经验加以总结,从而编写这样一本在气溶胶科学中属于抛砖引玉的书,想来不是天方夜谭。

本书内容主要立足于实用。从内容目录可以看到,前五章主要介绍气溶胶的基础理论,这些基础理论是从事气溶胶科学研究和实际工作的人们必须具备的最起码的基本知识,同时也是为介绍以后各章的实用技术打基础。接着用三章的篇幅介绍气溶胶科学方面的实用技术(当然也包括一些相关的基本理论),其中重点是气溶胶的各种采样技术和测量技术。通过这些实用技术的介绍,对于促进气溶胶科技工作者正确理解和应用这些技术(其中特别是气溶胶粒度分布采样技术),相信不无益处。紧接着的两章(第九、十章)涉及到的是放射性气溶胶的内容。其中第九章专门介绍天然存在的氡、氡子体气溶胶,这是职业卫生与环境保护中一种极为重要,因而倍受重视的气溶胶现象,而且与第十章有着紧密的联系,因此不得不专辟一章加以阐述。第十章专门介绍核工业中人工产生的放射性气溶胶。由于放射性气溶胶的采样方法与普通气溶胶没有本质的差别,因而在本章重点介绍放射性气溶胶的各种测量方法,而其中又重点介绍消除氡、氡子体气溶胶干扰的方法。最后一章介绍了目前国际上通行的各种气溶胶采样标准,其中重点介绍了气溶胶的粒度分类采样标准。通过这些标准的介绍,对于澄清气溶胶(粉尘)采样和测量中某些基本概念的混乱、配合有关部门逐步规范我国的气溶胶采样方法将是有益的。为使读者对所介绍的内容能有较透彻的了解并能“更上一层楼”,每一章都尽可能多地给出相关的参考文献。限于篇幅,对气溶胶的防治技术(如防尘、空气净化等)未有专门的篇章给予论述,这是略感遗憾的。不过,气溶胶的防治技术是一个广阔的领域,必须要有专著才能说得清楚,作者相信会有这样的专著出现。

全书经郑仁圻先生审校。审校中他发现了书稿中的若干纰缪并提了许多宝贵的修改意见,使作者受益良多,从而也使书稿增色不少。对于郑仁圻先生为此书付出的劳动,作者在此表示衷心的感谢。

最后要特别说明的是,本书实际上是作者和同事们集体劳动的成果。在成书过程中,从文字加工、图表绘制直至出版经费的筹措等等都得到同事们的鼎力相助。本书能得以出版,除要感谢为此书付出辛劳的编辑和出版者外,更要特别感谢我的同事李爱武、张志龙、傅翠明、李静等同志。

作者力图消除书中的一切错误。但是,由于作者学识水平的限制,要彻底消除书中的错误恐怕只是主观愿望而已。因此,还望读者在阅读时提高鉴别力,更望读者对所发现的错误或质疑不吝指正。

卢正永

2000年7月 于太原

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 基本概念	(1)
1.2 气溶胶的形成与分类	(2)
1.3 气溶胶的表征量	(3)
1.4 气溶胶研究的意义	(4)
第二章 气溶胶的粒度分布	(7)
2.1 粒子大小的定义	(7)
2.2 气溶胶粒度分布的简单表示	(10)
2.3 气溶胶的粒度分布函数	(12)
2.4 粒度分布参数的变换	(17)
第三章 气溶胶的动力学特性	(20)
3.1 空气的性质	(20)
3.2 空气动力学理论——雷诺数	(23)
3.3 气溶胶粒子的沉降运动	(25)
3.4 气溶胶粒子的扩散	(33)
3.5 气溶胶粒子的凝并	(42)
3.6 气溶胶粒子的冷凝与蒸发	(47)
第四章 气溶胶的电学特性	(55)
4.1 气溶胶的静电学基础	(55)
4.2 粒子的带电机理	(58)
4.3 电晕放电	(61)
4.4 电荷平衡	(62)
第五章 气溶胶的光学特性	(65)
5.1 概述	(65)
5.2 消光特性	(66)
5.3 角散射特性	(69)
5.4 多分散度气溶胶的光学特性	(72)
5.5 对比度(能见度)	(73)
第六章 气溶胶的采样方法(一)	(75)
6.1 总浓度采样的方法	(76)
6.2 采样流量的正确测定	(76)
6.3 抽气泵的正确选用	(82)
6.4 收集介质的正确选用	(85)
6.5 气溶胶采样的代表性——气流入口设计	(86)
6.6 采样管的管壁损失	(92)

第七章 气溶胶的采样方法(二)	(94)
7.1 撞击式粒度分布采样	(94)
7.2 向心式粒度分布采样	(102)
7.3 旋风分离采样	(104)
7.4 效率曲线的实验刻度	(106)
7.5 累积效率曲线	(110)
第八章 气溶胶的测量	(116)
8.1 气溶胶样品的质量测量	(116)
8.2 游离二氧化硅的测量	(118)
8.3 气溶胶的直接测量	(120)
8.4 专用方法	(121)
第九章 天然放射性氡、氡子体气溶胶	(123)
9.1 基本概念	(123)
9.2 表征量	(126)
9.3 子体气溶胶的动理学特性	(135)
9.4 氡的测量方法	(142)
9.5 氡子体气溶胶的测量方法	(151)
9.6 氡子体气溶胶的测量方法	(161)
第十章 核工业中的人工放射性气溶胶	(165)
10.1 放射性气溶胶测量的特殊问题	(166)
10.2 消除天然本底的最简单方法	(168)
10.3 消除天然本底的特殊方法	(169)
10.4 放射性气溶胶测量的误差来源	(177)
10.5 监测灵敏度的估算	(179)
10.6 放射性气溶胶的连续监测	(185)
10.7 放射性气溶胶监测装置的检测	(188)
第十一章 气溶胶的采样标准	(195)
11.1 气溶胶的粒度分类采样标准	(195)
11.2 放射性气溶胶采样标准	(206)
11.3 大气环境的气溶胶采样标准	(215)
 附录 1. 阻力系数与雷诺数的关系	 (219)
附录 2. 误差函数表	(221)
附录 3. 部分采样滤纸的有关特性	(222)

第一章 绪 论

气溶胶科学是一门不算年轻的边缘科学。说它不算年轻,是因为尽管气溶胶技术的大量应用是在 20 世纪五六十年代以后才有的事,但气溶胶科学在 20 世纪初甚至更上一个世纪随着流体力学、空气动力学的发展就有了比较成熟的基础理论;因为研究气溶胶科学与技术需要涉及到多种学科,特别在对气溶胶的形成、运动、危害、监测、防护及运用等诸多方面的研究中,几乎要涉及到物理、化学、数学、生物、医学甚至天文学和气象学等等,因此,说气溶胶科学是一门边缘科学确不为过。

但本书不准备、也不可能涉猎过于艰深、偏僻的基础理论。本书力图以实用性为宗旨,着重介绍气溶胶科学中人们最为关心、最有实用意义的一些内容。这些内容是从事工业卫生、环境保护和辐射防护的人们,特别是在这些领域中不得不与气溶胶打交道的人们必须要了解的内容。书中还用专门的章节论述了天然的放射性氡、氡子体气溶胶和核工业中的人工放射性气溶胶,这不仅对核工业系统从事辐射防护的科技工作者有用,对以上提到的那些人们也肯定有用。另外,气溶胶是人们赖以生存的空间中空气质量好坏的关键因素,许多发达国家和有关国际学术组织对气溶胶的控制、监测和治理从不同的角度制订或建议了许多技术和管理标准,正确地理解这些标准的基本内容及来龙去脉,对于制定或修订我国环境保护中有关悬浮颗粒物的大气污染控制标准和工业卫生中的职业性粉尘卫生标准是十分必要的,因此在本书的最后一章,专门介绍了这些标准的现状与历史,在力所能及的情况下尽量拣最新的资料加以介绍。

1.1 基本概念

简单说,气溶胶(aerosol)就是悬浮于空气中的颗粒物。这些悬浮颗粒物可以是固态的,也可以是液态的,更多的则是固态和液态两者的混合物。气溶胶这个术语据说是第一次世界大战期间由 F. G. Donnan 这个人提出来的,当时的含义是指空气中的微米级和亚微米级的粒子云,比如军事上所用的化学烟雾就是典型的例子。后来气溶胶的概念有所扩展,对气溶胶有了更确切、更严格的定义^[1~3],即气溶胶是指任何物质的固体微粒或(和)液体微粒悬浮于气体介质(通常指空气)中所形成的、具有特定运动规律的整个分散体系。这个分散体系(即气溶胶)必须由两部分组成:其一,是被悬浮的颗粒物,称为分散相;其二,是承载微粒物的气体,称为分散介质。所以,气溶胶是包含分散相(颗粒物)和分散介质(气体)二者在内的统一的整体。因为气溶胶有其特定的运动规律,不同时具备这两者,就谈不上什么运动规律,也就无所谓气溶胶。

微粒物被气体介质悬浮,成为一种分散体系,称为气溶胶;与此类似,如果微粒物被液体介质——具体说水——悬浮而形成的分散体系,则称为水溶胶(hydrosol)^[4]。微粒物悬浮于气体或液体分散介质中时,将受到气体或液体介质粘滞力的作用,具有一定的稳定性,此时的粒子似为“溶胶”状,这也许就是气溶胶或水溶胶名称的来历吧。不过,人们在谈到气溶胶时,通常都是指分散体系中的分散相即悬浮粒子而言的,以分散相处于悬浮状态的粒子,称为气溶胶粒子。至于分散介质,不作特殊说明,气溶胶的气体介质都是指空气。

气溶胶粒子具有特定的空气动力学特性。它们在空气中受重力作用发生沉降时不像大的

块状物体遵从自由落体运动规律,而是遵从特有的沉降运动规律,因而气溶胶粒子在空气中能保持相对的稳定性,这是定义气溶胶的首要条件。这主要由粒子大小来限定的,气溶胶粒子的粒径范围约为 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 。这种大小范围的粒子在空气中的运动规律可直接用流体力学来描述,其最显著的特征是沉降运动、扩散运动和热运动。气溶胶粒子在空气中的密度也要大大小于空气分子密度,才不至于发生过度的碰撞、凝并而保持相对稳定的气溶胶状态。气溶胶粒子在空气中的粒子数浓度(也叫粒子数密度)约为 $10^2 \sim 10^6 (\text{cm}^{-3})$,质量浓度的上限约为 $10^{-4} (\text{g}/\text{cm}^3)$ 即 $100 (\text{g}/\text{m}^3)$ 。而空气的分子数密度为 $2.67 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$,质量密度为 $1.293 \times 10^{-3} (\text{g}/\text{cm}^3)$ 即 $1.293 (\text{kg}/\text{m}^3)$ 。

气溶胶粒子还具有特定的理化特性。气溶胶粒子的理化特性包括密度、粘滞特性、表面能、吸热性、导热性、带电性、化学反应特性、光学特性、放射性、动量、能量、溶解度等等。气溶胶粒子总是来自于一定的母体物质,但它们的物理和化学特性与其母体物质可能有很大的不同。比如颗粒状(或块状)的母体物质的面积/体积比通常小于 10^2cm^{-1} ,而微粒状的气溶胶粒子的面积/体积比则往往大于 10^3cm^{-1} 。这说明气溶胶粒子内部可能有空隙,形状极不规则,这就可能使得气溶胶粒子的质量密度与母体物质的质量密度会有不同,运动特性将变得更为复杂。

1.2 气溶胶的形成与分类

气溶胶由天然和人工两大原因形成。天然气溶胶由客观的自然现象诸如火山爆发、大气化学或光化学反应等形成,宇宙空间中的宇宙尘也是天然气溶胶的一个来源。但是,在我们生活的空间中,气溶胶主要来自人类的生活与生产活动,人类的生活空间和环境大气中的气溶胶主要是人工气溶胶。针对不同的形成方式和来源,气溶胶还可分成如下不同的类别,或者说还有如下一些专门名称或术语^[5,6]。

1.2.1 粉尘(dust)

这是最为通常的一种气溶胶。粉尘是悬浮于空气中的固体微粒,通常由粉碎、碾磨、爆破等各种机械作用形成。粉末状物质(例如土壤微粒)受空气作用飞扬、弥散于空气中,也许是大气粉尘的主要来源。粉尘是固体微粒,因其形成机制的原因,一般来说粒径都较大,约在 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ 的范围。在静态空气条件下,一般没有再悬浮,粉尘在空气中的停留时间不长。通常情况下,除非受到静电力的作用,粉尘不会发生凝聚;因其粒径较大,通常也不会发生扩散运动。粉尘主要存在于各种作业场所中,例如煤矿中的煤尘、岩尘,核工业某些工作场所中的放射性粉尘,都是粉尘存在的典型例子。

1.2.2 烟(smoke)

烟是有机性的可燃物质,例如煤、石油、木材等燃烧而形成的固体粒子云,粒径一般较小,约在 $1 \mu\text{m}$ 以下。因其粒径小,在空气中沉降很慢或基本不沉降,故而在空气中停留时间长。加之粒子浓度高,若与空气中的蒸气分子凝结,则形成“炊烟缭绕”的景观。有机物燃烧的残留物中的细微颗粒形成的气溶胶,通常称为飞灰(fly ash),粒径一般在 $10 \mu\text{m}$ 以下,它们总是随烟一起弥散于大气中,很难将二者加以区别,因此笼统地称之为烟也不为错。与飞灰混合的“烟”的粒径范围一般为 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 。城市污染的主要来源可以说就是烟,常常见到的“烟雾弥漫”的景象,不仅使人叫苦不迭,也是环保部门最为操心的难题之一。

1.2.3 烟尘(fume)

非有机物的固体或液体物质在燃烧过程中,特别是在金属冶炼、焊接以及液体的蒸发、升华、溶解等过程中所形成的固体气溶胶,常常称为烟尘。实际上也是一种“烟”,只是母体物质不同而已。烟尘的粒径与烟大致相同。这种烟尘在都市地区尤其突出。

1.2.4 雾(fog)

由液体(主要指水)喷射、蒸发、雾化、蒸汽冷凝等过程而形成的高浓度的液体气溶胶称为雾。由于这种雾的形成,空气中的能见度将大大降低,严重时有可能大白天也“对面不见人”。雾是一种液滴,其形状为球形,粒径小,通常在 $1\mu\text{m}$ 以下。低浓度的、其水平能见度大于 1000m 的雾,称为薄雾(mist),也就是所谓的“霭”。浓度更低时,这些微小的雾滴均匀分布在空气中,对太阳光发生散射时会出现特有的光学现象,这就是所谓的“霾”(haze)。

1.2.5 烟雾(smog)

烟雾是烟(包括烟尘)与雾的混合物,是液体气溶胶和固体气溶胶的混合物。这种由烟和雾混合而形成的大气悬浮微粒物,是大气污染的主要来源,是提高大气环境质量,特别是城市地区大气环境空气质量的主要障碍。

上述这些属于气溶胶范畴的分类和专用术语,很难给予严格界定,在国内外文献中也常常有不一致的叫法,因此在这里把英文的原文一并列出,以供读者参考。

1.3 气溶胶的表征量

严格来说,表征气溶胶的量或者说表征气溶胶的参数可以有无穷多。因为气溶胶的物理特性、化学特性、环境效应以及生物学效应等等随着它的母体物质、产生方式、悬浮介质、粒径大小、环境条件等的不同而千差万别,所以依研究角度和目的的不同,可以用不同的方法加以表征。不过,从气溶胶的整体角度看,其“浓度”特征和“粒度”特征是人们最为关心的。

1.3.1 气溶胶浓度

气溶胶浓度是指单位空气体积中气溶胶的某一物理量的量值的大小。在不同情况下,不同类型的气溶胶所包含的物理量(例如粒子数、质量、放射性活度、化学成分等)有极大的差异,针对不同的研究角度,人们关心的物理量就会各有不同,因此,相对于不同的物理量则有不同的“浓度”。若关心单位空气体积中气溶胶粒子数的多少,则用粒子数浓度($1/\text{m}^3$)表征;若关心单位空气体积中气溶胶粒子的质量的多少,则用质量浓度(kg/m^3)表征;若关心放射性活度的多少,则用活度浓度(Bq/m^3)表征;等等。另外,气溶胶的成分是十分复杂的,纯粹由单一物质形成的所谓“均质”气溶胶,在实际生活中绝难见到,所以人们往往还关心气溶胶粒子中的某些特定物质(例如各种化学有毒物质)和微量元素(例如砷、硅等)的含量。为此,可以用这些相应的物质或微量元素的含量表征浓度值。这就是说,关心气溶胶粒子的什么量即可用什么量的浓度值表征。可见,泛泛地说气溶胶浓度没有意义,必须指出是什么浓度。

1.3.2 气溶胶的粒度

实际生活中的气溶胶粒子不仅成分复杂,粒子大小也不均匀。纯粹由一种大小的粒子组成

的气溶胶,称为单分散度气溶胶。这种单分散度气溶胶,除非用专门的方法或设备产生以用于专门的研究工作,在实际的空气环境中都是不存在的。人们遇到的气溶胶都是具有不同粒径大小,而且具有一定分布规律的多分散度气溶胶。以后将会看到,研究气溶胶的粒度有时甚至比研究它的浓度更有意义。

气溶胶的粒度分布是指气溶胶的某一物理量相对于粒子大小的分布关系,因此,所谓气溶胶的粒度分布同样要指明是什么量与粒子大小的关系,或者说是什么量的粒度分布。例如,研究气溶胶的粒子数与粒子大小的关系,就是粒数-粒度分布;研究质量与粒子大小的关系,就是质量-粒度分布;研究放射性活度与粒子大小的关系,就是活度-粒度分布,等等。当然,还可以研究气溶胶中其它各种有害物质与粒子大小的关系。

气溶胶浓度和粒度这两个基本的表征量是研究气溶胶科学的基础。无论研究气溶胶的形成和产生,还是研究气溶胶的各种运动规律,无论是研究气溶胶的各种基本技术(例如采样技术、测量技术、净化技术、通风防尘技术等等),还是研究气溶胶的各种效应(例如生物效应、大气环境影响效应等等),几乎都离不开这两个表征量。

1. 4 气溶胶研究的意义

气溶胶是一种客观存在,在地球大气层中可谓无时不在,无处不有。人类有生活与生产活动就会有气溶胶,即使无生产活动也会有火山爆发、星外粒子云及各种生物自然现象产生的“天然”气溶胶。比如自然界中存在的氦子体和氢子体形成的氦氢子体气溶胶就是典型的天然气溶胶,这将在第九章专门介绍。气溶胶的存在有利有害。如果大气层中没有气溶胶粒子,大气中的水蒸气没有凝聚核,一般就形不成雨滴,下雨也许就成为不可能。高空大气层中如果没有微粒子,太阳光的折射、散射等光学现象就将是另一个样子,我们见到的蔚蓝的天空也许就将是另一副景观。人类的生产和生活活动在许多地方都要用到气溶胶现象。

但是,气溶胶也许更是有害的^[7,8]。特别是人类无节制的生产活动产生的气溶胶,已经使人类的生活空间受到严重的污染,人类已经呼吸不到清新干净的空气了。由于“人工”气溶胶的肆虐,使得制造了“人工”气溶胶的人类自食其果。据研究,人类的健康状况与气溶胶直接相关,各类呼吸系统疾病、心血管疾病以及哮喘、肺功能衰竭、肺癌等等造成了成年人的过早死亡。污染空气对儿童的影响和危害则更大。在各种生产场所,特别是从事各种有毒、有害物质生产的工作场所,各种职业病的发生与职业性气溶胶的浓度和粒度直接相关。

正因为气溶胶与人类的生产和生活有密切关系,所以对气溶胶的研究早在 19 世纪末即已开始,在 20 世纪 60~70 年代达到高峰。目前气溶胶的基础理论已相当完善,有关气溶胶的实用技术随着科技的进步也日益成熟,这些技术主要包括采样、测量、净化及防护等等。气溶胶危害的生理学和病理学的研究,对气溶胶的监测技术和控制技术提出了更高的要求,也为空气污染的微粒子控制标准的制定提供了依据^[7~9]。对作业场所气溶胶的防护与防治,对大气气溶胶的控制与治理,都需要坚实新颖的监测技术、防治技术和其它应用技术,而要使这些技术得到合理应用和发展,必须通晓气溶胶科学,至少应该通晓与所从事的工作有关的那部分气溶胶科学。为了对气溶胶科学的概貌先有一个大致了解,表 1.1 给出了气溶胶科学中可能涉及的一些基本内容的大致情况。

表1. 1 气溶胶科学概要一览表 ^[3]

		粒子直径(μm)									
		10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	
电磁波波长		X射线		紫外线	可见光		红外线			微波	
气溶胶类型	固体气溶胶			烟(Smoke)		粉尘(Dust)					
	液体气溶胶			雾(Mist)		雾化物(Spray)					
	大气悬浮微粒物			烟雾(Smog)		云(Cloud)		雾(雨)(Mist) (Drizzle)	雨(Rain)		
沉降速度(cm/s)			$<10^{-5}$	10^{-5} 10^{-4}	10^{-4} 10^{-3}	10^{-3} 10^{-1}	10^{-1} 10^1	10^1 10^2	10^2 $>10^2$		
动力学特性			布朗扩散			直线、曲线运动					
			成核现象			蒸发、冷凝、生长					
			热凝并			动力凝并					
电学特性						直线电离					
						静电带电					
						场致带电					
光学特性						离子扩散带电					
						散射、吸收					
						折射、透射					
各类气溶胶的粒径范围						烟(燃烧形成)	飞灰				
	气体分子					金属冶炼粉尘及烟雾尘		化肥石灰			
						炭黑	煤尘				
						硫化物	破碎性煤尘				
						杀虫剂	水泥尘				
						滑石粉	喷射雾滴				
						高空大气尘					
						病毒	细菌	人发			
粒度分析方法						撞击(冲击)法					
						显微镜					
						电子显微镜					
						离心法	淘洗法				
						超级离心法	沉降法				
						X光衍射	光透射	目测			
						光吸收	光扫描				
						光散射					
						核计数器					
净化技术						超声波分离		沉降			
							离心分离				
							冲击(撞击)分离				
							旋风分离				
						高效过滤	普通过滤				
						热沉积					
						静电沉积					
							液体洗涤				
						综合过滤床					

参考文献

- 1 ISO. *General principle for sampling airborne radioactive materials*. ISO2889-1975(E), 1975
- 2 辉群. 放射性气溶胶测量方法专辑. 核防护, 1973(1-2):1
- 3 Hidy G M. *Aerosols-an Industrial and environmental science*. New York: Academic Press Inc. ,1984. 4
- 4 Beckord P, et al. Test determination of the particle size of aerosols and hydrosols by measuring the attenuation of sonic waves. *J Aerosol Sci*, 1992, 23(special issue):s317
- 5 卢正永. 气溶胶科学入门. 能源与环境, 1992, (1):33
- 6 理查特·丹尼斯等编, 气溶胶手册. 梁鸿富、卢正永译. 北京: 原子能出版社, 1988. 5
- 7 US EPA. EPA announces proposed new air quality standards for smog(ozone) and particulate matter. US EPA, Press Release, 1997
- 8 WHO. *Air quality guidelines for European*. WHO Technical report series, No23, 1987
- 9 高增林、卢正永. 空气中细微颗粒物(IP)的健康危害及防治与监测技术研究. 1998
- 10 S H Vincent. International occupational exposure standards: a review and commentary. *Am Ind Hyg Assoc J*, 1998, 59(10):729

第二章 气溶胶的粒度分布

在一个气溶胶体系中,气溶胶粒子的大小并不是一致的,形状也不规则。纯粹由一种大小或形状均一规则的粒子组成的气溶胶实际上是不存在的,也就是说,现实生活中并不存在由相同大小粒子组成的单分散度(单分散相)气溶胶。实际的气溶胶都是由不同大小且形状也不规则的粒子组成,具有一定的分散性,即粒子大小是多分散度的,这就是所谓的多分散度或多分散相气溶胶。虽然如此,对于一个特定的气溶胶体系,这种分散性往往都具有一定的统计分布规律,即粒子大小呈一定的统计分布状态,这就是我们在本章要讨论的气溶胶的粒度分布特性及其表示方法。

2.1 粒子大小的定义

正如我们将会看到的,由于粒子形状的不规则,形成粒子的母体物质千差万别,粒子大小的定义将是相当复杂的,要切实衡量粒子的大小至少要涉及到粒子的形状、密度和以一定的方法确定的几何直径。

2.1.1 粒子的形状

气溶胶粒子的形状与形成气溶胶粒子的母体物质的性质及形成方式有很大关系。一般来说,人工方法产生的,特别是通过破碎、碾磨等机械物理过程产生的气溶胶粒子往往比较粗大,形状极不规则,只有类似于蒸气分子凝聚而形成的气溶胶粒子,或由液态转化为固态的气溶胶粒子才可能是球形的,粒径也比较小。真正球形的气溶胶粒子是罕见的。

不规则形状的粒子大致可分为三类:

等向型粒子 在三维方向上长度大致相同的粒子,例如球形粒子,多面体粒子等属于这一类。

薄层型粒子 在二维方向长度大致相同且比较长,而在第三维方向长度很短的粒子,例如片状、盘状粒子属于这一类。

纤维型粒子 在一维方向长度很长而另二维方向长度很短的粒子,纺织工业中棉毛形成的气溶胶粒子是典型的纤维型粒子。

2.1.2 粒子的密度

气溶胶粒子的密度是指粒子本身的单位体积的质量(g/cm^3)。气溶胶粒子的密度不一定是形成它的母体物质的密度,如果粒子内部已存在空隙,它的密度显然就会与母体物质的密度有所不同。一般说来,液滴以及由破碎、碾磨等方法形成的固体颗粒与其母体物质的密度是相同的,但类似于烟这一类的凝聚性气溶胶粒子,因其本身往往含有空隙,粒子的密度就要比母体物质(化合物)的密度小得多。

2.1.3 粒子的几何直径

研究气溶胶的粒度分布时,首先要解决单个气溶胶粒子的大小如何量度、如何表示的问题。粒子如果是球形的,用球体直径表示其大小最为理想。遗憾的是,实际的气溶胶粒子都是不规则形状的,其大小的量度和表示就是一个问题。尽管如此,我们仍然可以把不规则形状的粒子想象成为球形的或近似于球形的,而用直径(或半径)这样的量来描述其大小。这种表示粒子表观大小的粒子直径,我们称之为几何直径。

不规则形状粒子的几何直径如何确定呢?通常的办法是把气溶胶粒子收集在某种介质表面,经过适当处理(例如透明处理),制成能用显微镜观测的样品。在显微镜上量度它们时,如图 2.1 所示,粒子大小(几何直径)通常有三种量度方法^[1,2]。

(1) 马丁(Martin)直径法

马丁直径(d_M)量度的方法是把粒子在同一方向上分成面积相等的两部分,其分界线的最大长度就是马丁直径。用马丁直径量度某个粒子的大小,按理必须对该粒子在各个方向(至少应当在多个方向)进行量度然后求平均,才能真实反应该粒子的大小。但是,考虑到粒子沉积在收集面时其方位的随机性,因此对任何一个粒子都只在一个方向(垂直于轴向的水平方向)测一次马丁直径,在测了多个粒子后,就相当于对任何一个粒子都在不同方向测了马丁直径,只要测的粒子数足够多,其实际效果与对一个粒子在多个方位求平均是等效的。

(2) 费来特(Feret)直径法

费来特直径(d_F)的量度方法是测定粒子在同一方向上的两个边缘切线之间的最大距离。同马丁直径一样,费来特直径的量度方法也应对每个粒子在不同方向求平均。但在实际测量时同样考虑到粒子在收集介质上沉积方向的随机性,也是在同一个方向测多个粒子。费来特直径只量度粒子在同一方向的两个边缘之间的最大距离,在备有测微尺的显微镜上用费来特直径法求粒子直径最方便,也最常用。

由于这两种量度方法都与粒子的方位有关,因此只有粒子在介质上的沉积方位被认为是随机的,在量度时必须保证所取的量度方位彼此平行,而且还必须以大量粒子(不少于 300 个)的测量结果求平均,马丁直径和费来特直径的测量结果才有较好的代表性。

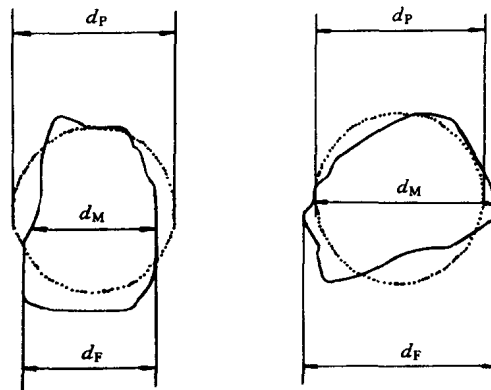


图 2.1 不规则形状粒子的量度方法

(3) 投影面积直径(Projected area diameter)法

投影面积直径(d_p)定义为与所量度的粒子具有相同面积的一个等效圆的直径。这种量度

方法是用已知大小的圆去框定粒子大小,所以不用考虑方位,也可以说一次即可把一个粒子的粒径“量准”。实际上,要把一个不规则形状的面积归整为一个等效的圆面积,再用已知的圆去框定,其实是很困难的。因此,投影面积直径法在取与粒子投影面积相等的等效圆上则要凭经验并有一定的人为误差。

测定粒子的几何直径时,上述三种方法都可以用。在测定一组粒子大小时,用三种方法测定的结果一般来说不完全一致,通常会有 $d_F > d_P > d_M$,就一般测量目的而言,这种误差通常可以忽略。

2.1.4 粒子的空气动力学直径

气溶胶粒子,特别是固体气溶胶粒子,由于形状不规则,其大小可以用如上所述的几何直径来描述,也可用表征其运动特性的动力学直径来描述^[3]。不过,粒子几何直径只是一种表现直径,严格来说它反映不了粒子大小的本来意义,特别在研究气溶胶的运动规律及相关的动力学特征时,更说明不了与其运动规律相关的问题。因为,即使粒子的表现大小即几何直径一样,如果形成它们的母体物质和形成方法不同,其密度、形状等特征并不一定相同。而粒子的形状和密度是影响其运动特征的重要参数,在研究气溶胶的运动规律时,几何直径相同的粒子其运动规律并不一样甚至很不一样。于是,人们想到了用与有关特性等效的等效粒子直径表示其大小特征也许更为方便。为了对具有不同密度和不同形状的粒子的运动特征能够作等效比较,国际放射防护委员会(ICRP)于1966年提出了一个等效直径的概念^[1,4,5],这就是空气动力学等效直径,亦称空气动力学直径,通常用 d_{ae} 表示。

空气动力学直径的定义是:一个任意密度和形状的气溶胶粒子,若与一个单位密度(lg/cm^3)的球形粒子具有相同的空气动力学特征时(具体说就是在静止空气中具有相同的沉降速度时),这个球形粒子的直径就是该气溶胶粒子所具有的空气动力学(等效)直径。

其实,空气动力学(等效)直径的概念应该说在气溶胶粒度分布采样方法(见第七章)发明以来就逐渐形成了。具体说,它是在斯托克斯直径^[5,6](d_{st})的基础上发展而来的。斯托克斯直径 d_{st} 定义为:一个形状不规则的气溶胶粒子若与一个密度与之相同的球形粒子具有相同的沉降速度时,这个球形粒子的直径就是该气溶胶粒子的斯托克斯直径。可见,斯托克斯直径 d_{st} 表示的是与一个密度和所研究的粒子相同的球形粒子等效,它只强调了形状等效,都等效为球形粒子。而空气动力学直径 d_{ae} 表示与一个密度为单位密度的球形粒子等效,它不仅强调了形状等效,还强调了密度等效。这样,若要将两种粒子的运动特性进行比较,二者的大小都等效为单位密度的、球形粒子的大小,等效的衡量方法是沉降速度相等。可见,用空气动力学(等效)直径把粒子自身的密度和形状两种因素都排除了,因而用 d_{ae} 更方便,也更确切。

知道了气溶胶粒子的几何直径 d_g (用前面介绍的三种方法的任意一种测得),又知道了气溶胶粒子的密度和表示不规则形状特性的形状因子,就可以换算出气溶胶粒子的空气动力学直径 d_{ae} :

$$d_{ae} = (\rho/\rho_0)^{1/2} k_s d_g \quad (2.1)$$

式中, ρ 为气溶胶粒子的密度,除非另有说明,一般可认为与其母体物质的密度相同; ρ_0 为单位密度,即 $\rho_0 = 1\text{g}/\text{cm}^3$; k_s 为空气动力学形状因子(详见第三章 3.3.1 节),由下式定义:

$$k_s = d_{st}/d_g \quad (2.2)$$

k_s 通常可以由实验测出。表 2.1 给出了一些物质所形成的气溶胶粒子的动力学形状因子的一些典型数值。

由(2.1)式可知,知道了粒子的几何直径,通过粒子的密度及其形状因子即可换算出相应的空气动力学直径。空气动力学直径 d_{ae} 是气溶胶科学用得最多的表征量之一,必须透彻了解其真正的物理意义。

表 2.1 不规则形状粒子的动理学形状因子

母体物质	煤	玻 璃	石 英	陶瓷粘土	岩 石	UO ₂
$d_g (\mu m)$	0.6~4.3	2~10	0.7~1.9	2~8	3.5~12	0.2~0.6
	5~15		>4			0.6~1.7
k_s	0.70	0.68	0.68	0.62	0.63	0.87
	0.74		0.66			0.72

需要说明的是,粒子大小可用几何直径表示,也可用空气动力学直径表示,严格来说,最终都要用空气动力学直径表示。因此,不是在特别指明其直径的确定意义的情况下,本书所指的气溶胶粒子大小都指的是空气动力学直径大小。但为叙述方便,对粒子大小一般都笼统称之为“粒子直径”或“粒径”。

2.2 气溶胶粒度分布的简单表示

讨论了单个粒子直径的表示方法,就可以讨论气溶胶的粒度分布的表示方法了。粒度分布正如在第一章中简要介绍的,是表示气溶胶的某一物理量随粒子大小的变化关系,更具体地说,对于一个特定的气溶胶体系,其粒度分布就是指它的某一物理量(例如粒子数、质量、放射性活度,甚至粒子体积、粒子表面积等)在不同粒径间隔内相对于所有粒子大小(或相对于某一粒径范围)所占的百分比或百分概率。粒度分布有时也称为粒度谱或粒谱。因为实际存在的气溶胶都是多分散度的,即使对一个特定的气溶胶体系(例如就以一个特定房间的空气中的粉尘粒子来说),其气溶胶粒子也具有各种不同的大小。虽然气溶胶粒子具有不同大小,但就一个特定的气溶胶体系来说,其粒子大小的分布状态一般都是有一定规律的,研究气溶胶的粒度分布正是要研究这种分布规律。

假如我们采得一个气溶胶样品,测出了它的粒子数与粒子直径之间的关系如表 2.2 所列。下面即以粒子数随粒子大小的变化规律为例,来讨论这种气溶胶粒度分布的一些简单表示方法。表中,“粒径范围”是为测粒子数方便而划分的粒径段; Δd_i 是第 i 个“粒径范围”所对应的粒径间隔大小;居间粒径 d_i 是第 i 个“粒径范围”的中间值,也相当于该粒径范围内的代表值; n_i 是第 i 个“粒径范围”内所测得的粒子数。对于表 2.2 中的一组数据,可以用下列一些统计量(或统计参数)来简单描述这组气溶胶粒子的粒度分布特征^[7,8]。

2.2.1 气溶胶粒子的统计学直径

(1) 算术平均直径

一组具有不同大小的气溶胶粒子,表示这组粒子统计直径的最简单方法,就是把具有不同粒子数的各种粒子直径加起来,除以粒子总数,而求其平均直径。这种平均直径称为算术平均直径,在数学上表示为:

$$\bar{d} = \sum n_i d_i / \sum n_i \tag{2.3}$$

式中, n_i 表示粒径为 d_i 的粒子数。因为我们是根据粒子数求得的算术平均直径,所以,确切说应当是粒子数的算术平均直径,简称为粒数平均直径。相应的有质量平均直径,活度平均直径,

等等。

衡量一个具有一定分散度的量,单说平均值而说不相应的标准偏差并不能真正反应其离散程度。所以,平均值总是要伴随相应的标准偏差才具有更确切的意义。相应于粒子数的算术平均直径的标准偏差定义为:

$$\sigma = \left[\sum n_i (\bar{d} - d_i)^2 / \sum n_i \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

由表2.2列出的数据,可算得 $\bar{d} = 7.0\mu\text{m}$, $\sigma = 3.1\mu\text{m}$ 。

(2) 几何平均直径

几何平均直径定义为:

$$d_g = (d_1^{n_1} d_2^{n_2} d_3^{n_3} \cdots)^{1/N} = \exp(\sum n_i \ln d_i / N) \quad (2.5)$$

式中, $n_1, n_2, \cdots$ 是与粒径 $d_1, d_2, \cdots$ 相对应的粒子数, $N = \sum n_i$, 即总的粒子数。由于是相对于粒子数求得的几何平均直径,所以这种几何平均直径称为粒数几何平均直径。同理有质量几何平均直径,活度几何平均直径,等等。几何平均直径 d_g 的单位与 d_i 一致, (2.5) 式给出的只是其具体数值。

同理,几何平均直径要伴随相应的几何标准偏差才能确切表示一个统计量的离散特征。相对于粒数几何平均直径的几何标准偏差定义为:

$$\sigma_g = \exp \left[\sum n_i (\ln d_g - \ln d_i)^2 / \sum n_i \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

式中, σ_g 即为几何标准偏差,这是一个没有量纲的量。后面将会看到,它代表的是两种不同概率的粒子直径的比值。由表2.2中的数据可算得 $d_g = 6.2\mu\text{m}$, $\sigma_g = 1.6$ 。

(3) 中位直径

中位直径表示一组气溶胶粒子中大于该直径的粒子数和小于该直径的粒子数各占一半,通常表示为 d_M 。因为我们是根据粒子数各占一半求得的中位直径,所以确切地说应该称为粒数中位直径,也常表示为 d_{CM} 。相应的有质量中位直径 d_{MM} , 活度中位直径 d_{AM} , 等等。由表2.2中的数据,可估计出粒数中位直径 d_{CM} 约为 $7.0\mu\text{m}$ (可参见后面的图2.6(b))。中位直径是一个很有意思的量,后面将会看到,对于正态分布的气溶胶,中位直径等于算术平均直径 (由表2.2看出, $d_{CM} = \bar{d} = 7.0\mu\text{m}$ 。由此也可看出,表2.2所测的是一种正态分布的气溶胶)。而对于对数正态分布的气溶胶,中位直径等于几何平均直径,这可参见后面的表2.3和图2.7(b)。

表2.2 气溶胶粒度分布测量数据举例*

序号 i	粒径 范围 (μm)	粒径间隔 Δd_i (μm)	居间粒径 d_i (μm)	相应粒径范 围的粒径上 限 $d_{i,\max}$ (μm)	Δd_i 间隔内的 粒子数 n_i	Δd_i 内的粒 子数百分比 $n_i / \sum n_i$ (%)	$\leq d_{i,\max}$ 的 累积百分比 (%)
1	0~2	2	1.0	2	24	4.3	4.3
2	2~4	2	3.0	4	60	10.8	15.1
3	4~6	2	5.0	6	84	15.1	30.2
4	6~8	2	7.0	8	132	23.7	53.9
5	8~10	2	9.0	10	115	20.7	74.6
6	10~12	2	11.0	12	88	15.8	90.5
7	12~15	3	13.5	15	53	9.5	100
8	>15	—	—	—	21	—	—

* $\sum n_i = 554$, $d_{m0} = 7.0\mu\text{m}$, $d_{CM} = 7.0\mu\text{m}$, $\bar{d} = 7.0\mu\text{m}$, $\sigma = 3.1\mu\text{m}$, $d_g = 6.2\mu\text{m}$, $\sigma_g = 1.6$

(4) 众数直径

在一组气溶胶粒子中,出现粒子数最多(出现频率最大)的粒子直径(当然是指单峰分布的