

气溶胶 科学技术基础

FUNDAMENTALS OF AEROSOL
SCIENCE AND
TECHNOLOGY 向晓东 编著

中国环境科学出版社

气溶胶科学技术基础

向晓东 编著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

气溶胶科学技术基础/向晓东编著. —北京: 中国环境科学出版社, 2012.2

ISBN 978-7-5111-0847-0

I. ①气… II. ①向… III. ①气溶胶 IV. ①0648.18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 280750 号

责任编辑 陈雪云
责任校对 扣志红
封面设计 玄石至上

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京东海印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2012 年 2 月第 1 版
印 次 2012 年 2 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 15
字 数 340 千字
定 价 36.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载，侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

序

气溶胶科学技术是环境科学中一个非常重要、非常活跃而且有着重要应用价值的领域。例如，工业化和城市化进程中所产生的尘霾已经对人类生活环境，乃至气候变化产生了深刻影响。在这方面，应用与发展气溶胶科学技术来解决尘霾问题是其中一个重要的途径。

武汉科技大学向晓东教授 20 多年来一直从事微细粒子控制的基础理论与工程应用研究，其著作《现代除尘理论与技术》（冶金工业出版社，2002）、《烟尘纤维过滤理论、技术及应用》（冶金工业出版社，2007）已经在国内颗粒污染物控制领域产生了非常积极的影响。作者现在撰写的《气溶胶科学技术基础》，将会使气溶胶科技在更广泛的环境科学应用领域发挥重要作用。这本书系统全面地阐述了气溶胶粒子的运动、沉降、扩散、凝聚、过滤、分离和捕集的基本原理和方法。该书的突出特点是将传统气溶胶力学与现代气溶胶科技前沿相融合，理论知识与实际应用相联系。在气溶胶粒子的过滤与分离、扩散与凝聚、运动与捕集等核心内容上有了新发展，丰富了气溶胶科学与技术。目前国内关于气溶胶科学方面的教科书并不多，这本书将是国内气溶胶科技界不可多得的一部好书，相信它的出版不仅对气溶胶科学技术的进步有积极的促进作用，同时也会使广大气溶胶科技工作者从中获益。

温景嵩

2011 年 12 月 23 日

温景嵩：南开大学物理科学学院教授，博士生导师和学术带头人。著名气溶胶和胶体力学科学家。中国颗粒学会荣誉理事，北京大学优秀校友，纽约科学院院士。

自序

自 1964 年 Fuchs 所著《气溶胶力学》(英文版) 出版以来, 气溶胶科学在基础与应用方面得到快速发展。气溶胶技术的应用已广泛深入与微细颗粒物有关的各个学科及工程领域。其中, 环境科学是气溶胶科学技术最主要的应用领域之一。

在环境科学领域, 气溶胶科学技术的应用主要体现在颗粒污染物控制方面。气溶胶科学的发展史与颗粒污染物控制的发展史密切相关, 在颗粒污染物控制技术中所遇到的科学问题, 包括粒子的运动、扩散、凝聚、过滤、分离、捕集、检测等, 几乎都可以从气溶胶力学中找到答案。因此, 气溶胶科学总是引领着大气污染控制技术的进步。

气溶胶科学是研究多粒子多分散悬浮微粒子运动规律的交叉边缘学科。气溶胶科学与人类健康、职业卫生、大气环境保护、环境灾害控制、全球气候变化等重大问题密切相关, 这些也恰恰是环境科学技术所关心的问题。我国科学工作者很早就关注到世界气溶胶科学技术的发展, 并介绍和翻译了多部经典专著, 其中包括 Fuchs 的《气溶胶力学》、Hinds 的《气溶胶技术》、Friedlander 的《烟、尘和霾——气溶胶性能基本原理》。在 20 世纪 70 年代以前, 气溶胶力学主要是研究气溶胶中孤粒子的运动, 由于气溶胶是一个多粒子多分散体系, 只有当体系极端稀释时, 孤粒子假定才适用。否则, 就必须研究多粒子相互作用下对目标粒子运动的影响。1972 年, Batchelor 建立起一般稀释的单分散体系硬粒子沉降理论, 把孤粒子的气溶胶力学发展到多粒子相互作用下的气溶胶力学。随后, 在 80 年代 Batchelor 又和我国著名胶体动力学家温景嵩建立了一般稀释的多分散体系悬浮粒子沉降统计理论以及悬浮粒子对流凝聚的统计理论; 后来在 90 年代温景嵩又进一步建立了悬浮粒子对流和扩散耦合凝聚的统计理论, 这些都为多粒子气溶胶力学的发展作出了具有世界影响的突出贡献。在这些工作的推动下, 自 80 年代后, 多粒子气溶胶动力学已成为气溶胶科学发展的主流。1991 年, Williams 和 Loyalka 发表了气溶胶科学发展史上又一经典著作《Aerosol Science Theory and Practice》。其突出特点是把多粒子多分散气溶胶粒子的沉降、扩散、凝聚和生长等气溶胶力学的核心问题用外力场作用下的粒度谱演变动力学来描述, 进一步完善了气溶胶科学的理论体系。

气溶胶科学是大气污染控制工程的理论基础。小到人的呼吸系统, 大到整个大气

系统,从人类生产活动产生的烟尘,到自然环境产生的沙尘暴,都是气溶胶科学技术所研究的对象。显然,如果将气溶胶科学技术的研究成果运用于大气污染控制领域,对促进环境科学与技术进步具有非常重要的意义。1987年东北大学张国权教授敏锐地注意到气溶胶科学在烟尘净化中的重要理论指导作用和应用价值,编著了《气溶胶力学——除尘净化理论基础》,但是现在20多年过去了,气溶胶科学技术又有了许多新进展。因此,新编这方面的教科书很有必要,这正是笔者编写《气溶胶科学技术基础》的初衷。

然而,要编写一部通俗易懂的关于气溶胶力学方面的教科书是极其困难的。原因是,气溶胶是一个多粒子和多分散体系,在研究粒子的运动行为时,多粒子的相互作用无法回避。现代气溶胶动力学的做法是“一步走”:对某一物理现象(如粒子凝聚),一开始就建立具有粒度分布的悬浮粒子群在有界空间或无界空间中的相互作用及其演变动力学方程,然后讨论在给定初始边界条件或物理条件下的解。虽然推理过程严谨,但却深奥难懂。这需要读者具有很好的数学和物理基础。

为了面向更广泛的读者,更重要的是为了推动气溶胶科学技术在大气污染控制工程中的实际应用,本书在分析气溶胶这种多粒子分散体系时,分“两步走”:首先将粒径不同的悬浮粒子群按孤粒子(单个粒子)处理,得到理论结果后,再把多分散性粒子的粒度分布考虑进去。比如,在研究扩散、凝聚、分离与捕集等气溶胶科学的核心内容时,先分析单粒子或单分散性粒子随时间或空间的变化规律;然后再引入粒度分布,并在多数情况下能得到问题的分析解,从而实现了易懂实用的目的。这种做法,在本质上仍然是Fuchs的孤粒子方法,尽管不够缜密,甚至可能是重大的理论缺陷,但幸运的是,对于颗粒污染物控制领域,所遇到的粒子悬浮体系多数是稀释气溶胶(悬浮粒子的体积浓度远小于 10^{-4}),通过温景嵩的多粒子沉降理论检验表明,对于稀释气溶胶,孤粒子处理方法所导致的偏差通常是可接受的。

本书只能看做是传统气溶胶力学的传承,离现代气溶胶科学还相距甚远。但补充介绍了一些实用性较强的新内容,如:气溶胶粒子的悬浮;荷电气溶胶粒子的超高频电凝聚;非稳态纤维过滤和静电增强纤维过滤;气溶胶粒子的静电增强水雾捕集;气溶胶粒子的双极电凝聚捕集;射流破裂感应荷电水雾的发生原理与荷电量计算、等离子体和膜分离技术等。同时,在以下几方面有所创新:

(1)在粒子的空气动力分离方面:通过检验发现,用层流理论导出的粒子分离效率正是紊流分离效率的指数部分加负号。于是,对于某种分离空间的紊流流动,不需要通过复杂的数理建模,只需要推导层流分离效率,就能直接写出紊流分离效率。这一新发现对气固分离工程具有重要理论与应用意义。

(2) 在粒子的扩散方面: 用费克定律和叠加原理推导出静止和流动空间中气溶胶粒子对轴对称体内表面(或外表面)扩散的浓度分布分析解, 而传统的气溶胶力学往往给出的是级数解或数值解。气溶胶粒子扩散的浓度分布分析解将有助于气溶胶过滤分离理论的发展。

(3) 在多分散粒子的凝聚方面: 根据 Smoluchowski 单分散气溶胶计数浓度随时间变化公式和质量守恒定律得出粒子凝聚后的数量中位径, 然后根据 Friedlander 的“自保分布”概念得出多分散粒子的粒子凝聚后的数量粒度分布函数。这种方法虽然在理论上不够严谨, 但毕竟找到了一种确定凝聚后粒子群的粒度分布的简易实用方法。

(4) 在粒子的纤维过滤分离方面: 通过对纤维层内有沉积粒子的“尘滤尘”现象分析, 建立了非稳态过滤效率和压力损失计算式, 丰富了非稳态过滤理论。

(5) 在粒子的静电捕集方面: 应用高斯通量定理建立了线-板极间电场分布的精确解析解; 提出了有利于异性荷电粒子电凝聚的双放电极新结构和超高频电凝并器的凝聚机理可用类似于超高频声凝聚机理进行分析的设想; 提出了加反向电场有利于提高静电增强纤维过滤性能的创新思想。

气溶胶科学为爱因斯坦所开辟, 所涉及的胶体动力学是非常高深的学问。所以, 在编写过程中, 当遇到一些理论基础要求很高的关键难点问题, 作了简化, 甚至回避。因此, 本书难免有不少缺点和错误, 敬请广大读者批评指正。

本书的完成, 首先要感谢我的恩师张国权教授多年的辛勤教诲, 我的气溶胶知识启蒙源于他所撰写和讲授的《气溶胶力学》。借此机会, 我还要特别感谢英国 Essex 大学生物化学系气溶胶科学研究所所长英国气溶胶学会主席 Ian Colbeck 教授。在英国学习期间, 关于气溶胶电凝聚的选题及研究都是在他的指导下完成的。另外, 我还要感谢澳大利亚 New South Wales 大学材料科学系颗粒技术与模拟研究中心主任澳大利亚科学院院士和工程院院士 Aibing Yu 教授。在澳大利亚学习期间, 感谢他在纤维过滤分离方面给予我优良的工作条件和悉心的学术指导。在本书撰写中, 还得到我的博士生郭尹亮、硕士生张肖、袁文博、贺艳婷、胡秋玮的帮助, 减轻了我的校对工作。最后, 感谢国家自然科学基金项目(50778139)和国家 863 计划(2012AA062501)的资助。

向晓东

2011 年 10 月 16 日

目 录

1	气溶胶基本理论	1
1.1	气溶胶的单位和常用术语	1
1.2	气体的性质	2
1.3	气体的运动	6
2	气溶胶粒子的分布	20
2.1	粒度的定义	20
2.2	粒度分布	21
2.3	大气气溶胶粒度分布	27
2.4	室内气溶胶	30
2.5	工业气溶胶	31
3	气溶胶粒子的凝结与蒸发、吸附与吸收	32
3.1	凝结与蒸发原理	32
3.2	凝结	34
3.3	蒸发	37
3.4	吸附	40
3.5	吸收	43
4	气溶胶粒子的运动	44
4.1	描述运动的几个重要动力相似参数	44
4.2	气体对球形粒子的阻力	47
4.3	非连续性作用	49
4.4	外力作用下气溶胶粒子的运动	50
4.5	平流中气溶胶粒子的悬浮	60
4.6	多粒子分散体系中粒子的沉降	66
5	气溶胶粒子的扩散	70
5.1	扩散的基本定律	70
5.2	静止流体中气溶胶的扩散	72
5.3	定常流中气溶胶的扩散	79
5.4	扩散捕集效率	84

6	气溶胶粒子的凝聚	90
6.1	单分散热凝聚和多分散热凝聚	90
6.2	动力学凝聚	94
6.3	交变电场中荷电粒子的电凝聚	97
6.4	凝聚过程中的粒度分布	99
7	气溶胶粒子的空气动力分离	103
7.1	重力沉降	103
7.2	惯性沉降	107
7.3	旋流离心沉降	112
8	气溶胶粒子的纤维过滤	120
8.1	概述	120
8.2	纤维滤料的结构	120
8.3	纤维的基本物理参数	128
8.4	单根纤维过滤机理	130
8.5	周围有圆柱状纤维存在的过滤机理	133
8.6	纤维层过滤效率	136
8.7	纤维层非稳态压力损失	139
8.8	纤维过滤器	140
9	气溶胶粒子的静电捕集	149
9.1	静电除尘技术	149
9.2	静电增强纤维过滤技术	162
9.3	静电增强水雾除尘技术	170
10	气溶胶粒子的发生	176
10.1	液体雾化机理	176
10.2	常用喷嘴	178
10.3	气液两相旋切式喷嘴	182
10.4	荷电水雾喷嘴	185
10.5	固态气溶胶发生器	191
11	气溶胶科学与技术的应用	195
11.1	工业烟尘净化	195
11.2	室内空气净化	203
	参考文献	215
	习 题	222

1 气溶胶基本理论

气溶胶是指能长时间悬浮在气体环境中、可观察或测量到的固体或液体粒子的集合体。气溶胶科学是研究气体中粒子的运动、扩散、凝聚、发生、分离、测定的理论与方法的一门科学。气溶胶科学是空气污染防治技术的理论基础和方法论。气溶胶科学的发展史与颗粒污染物控制的发展史密切相关，气溶胶科学研究总是引领着空气污染控制技术的进步，几乎所有空气污染控制技术都源于气溶胶力学的基本原理、测试手段和工艺方法，如过滤分离技术、表面吸附机理、粒子凝聚、扩散效应等。气溶胶力学是空气污染控制领域科研工作者的创新源，有了气溶胶力学的知识储备，将有助于在颗粒制备、分离、检测方面取得突破性的科研成果。自第二次世界大战以来，气溶胶研究已成为基础科学和应用科学中的一项特殊主题。

气溶胶科学是一门新兴的交叉边缘学科。由于它和现代化工业的发展、人类卫生保健、大气环境保护、全球气候变化等重大问题有密切关系^[1]，因而是近年来充满活力的一个新兴领域。物理学家、化学家和气象学家等推动了气溶胶科学的发展。

1.1 气溶胶的单位和常用术语

1.1.1 气溶胶的单位

本书所有公式和计算都采用国家标准单位（SI）。由于气溶胶粒子的粒径范围为 $10^{-9} \sim 10^{-4} \text{m}$ ，所以在表示粒子直径时常用微米（ $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$ ）。研究者通过蒸发和凝结方法制备的气溶胶粒子的直径在 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ，甚至更小，因此，人们有时也用纳米（ $1 \text{nm} = 10^{-9} \text{m}$ ）表示粒度。

表示气溶胶浓度的单位有质量浓度和数量浓度。气溶胶的质量浓度是指单位气体体积中某物质的质量，用国际标准单位表示为 kg/m^3 。由于气溶胶的浓度都很低，所以其质量浓度常用 g/m^3 、 mg/m^3 ，甚至用 ng/m^3 表示。气溶胶的数量浓度用个/ m^3 表示，有时也写成 m^{-3} 。

粒子的速度用 m/s 表示，也可用 cm/s 表示。

体积常用 m^3 ，有时用 L 表示。

压力的法定单位用帕斯卡（ $1 \text{Pa} = 1 \text{N/m}^2$ ）表示，大气压（ $1 \text{atm} = 101 \text{kPa}$ ）和毫米水柱（ $1 \text{mmH}_2\text{O} = 9.81 \text{Pa}$ ）是常用的非法定单位。

气体和粒子的性质通常指的是常温常压下（NTP），即温度 293K 和 101kPa 。有些手册中用 273K 和 101kPa ，但在气溶胶力学中用温度 273K 作为标准状态的较少，因为大多数环境气溶胶测量都在 293K （ 20°C ）左右进行。

1.1.2 气溶胶常用术语

空气中的颗粒物有多种不同的名称，粒子（particle）指单个物质，一般来说其密度接近于同样成分的大块物质的密度，单个粒子可能是一种化学成分或多种化学成分，可能由液体或固体组成，也可能兼而有之。粒子的形成可能很简单，如液滴；也可能很复杂，如纤维素或聚团。下列术语通常描述粒子的外观或来源。

气溶胶（aerosol）：长时间悬浮在气体中能被观察或测量的固体或液体粒子。一般来说，气溶胶粒径为 $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

生物气溶胶（bioaerosol）：来自于生物源的气溶胶，包括悬浮于空气中的病毒、花粉粒子、细菌和菌类孢子及其碎片。

云（cloud）：悬浮在空气中的高密度粒子，通常有明显的边界。

粉尘（dust）：母体物质通过破碎、筛分、运输，加工等机械或动力作用形成的固体颗粒物。粒子较粗，形状通常不规则，粒径的大小范围在 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

雾（fog 或 mist）：液态气溶胶粒子。通常由过饱和蒸汽凝结而成，或通过液体的物理剪切作用如喷雾、喷射或沸腾而形成。

烟尘（fume）：通常由加热、燃烧、金属冶炼、焊接、熔融、蒸发、升华、冷凝、凝聚而成，或者是木柴、纸张、布、油、煤、塑料、香烟等燃烧而成的固体产物，固体烟尘粒子通常是由一系列相似尺寸的亚微米量级（通常 $< 0.5 \mu\text{m}$ ）的微粒构成，重力沉降作用很小。工业烟气温度一般较高，且含有害蒸汽成分。

烟（smoke）：固体或液体气溶胶，不完全燃烧所致或过饱和蒸汽凝结而成。大多数烟粒子为亚微米级，常常是由非常小的粒子组成的复杂的链状凝聚粒子团，粒径范围在 $0.001 \sim 1 \mu\text{m}$ 。

1.2 气体的性质

气溶胶包括两部分：气体或气体混合物（常为空气）和气体中的悬浮颗粒。气溶胶粒子的运动在很大程度上取决于气体的运动和气体本身的性质。小于 $1 \mu\text{m}$ 的亚微米粒子，尤其是小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的粒子运动将受到气体分子运动的影响。因此，空气动力学理论有助于理解粒子的运动。对于较大的粒子（ $> 1 \mu\text{m}$ ）在气体中的运动，称为连续区问题，用传统的牛顿力学解决；对于 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 的粒子运动，这一粒子范围称为过渡区和滑移区，人们常通过调整连续区的公式来处理；对于 $< 0.01 \mu\text{m}$ 的粒子，称为自由分子区，需要用空气动力学和分子运动学相结合来描述。在多数情况下，气溶胶力学讨论的是 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 的粒子。无论在哪个区域的粒子，气体的运动在很大程度上都决定了悬浮粒子的运动，所以，空气动力学理论是气溶胶科学中的重要组成部分。

1.2.1 气体状态方程

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：

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0 V_0}{T_0} = Rm \quad (1.1)$$

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

m ——气体质量, kg 。

根据式 (1.1) 知道气体常数、压力和温度, 即可算出密度:

$$\rho_a = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT} \quad (1.2)$$

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。标准状态下, 1mol 的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:

$$n = \frac{m}{m_0} \quad (1.3)$$

所以, 该气体在标准状态下的体积为:

$$V_0 = 22.41 \times 10^{-3} \frac{m}{m_0} \quad (1.4)$$

气体的密度为:

$$\rho_a = \frac{m_0}{22.41} \times 10^3 \quad (1.5)$$

于是, 如果知道气体的摩尔质量, 就可由式 (1.5) 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 (1.2) 计算, 其中:

$$R = 8.314 / m_0 \quad (1.6)$$

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 可按式 (1.7) 确定:

$$R_T = \frac{m_1 R_1 + m_2 R_2 + \cdots}{m} = \omega_1 R_1 + \omega_2 R_2 + \cdots \quad (1.7)$$

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, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

$\omega_1, \omega_2, \cdots$ ——各组分气体的质量分数, %;

m ——混合气体的总质量, kg 。

表 1.1 几种常见气体的气体常数

气体名称	化学分子式	分子量	气体常数 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
氧气	O_2	32	259.8
氮气	N_2	28	296.9
氩气	Ar	40	207.9
二氧化碳	CO_2	44	189.0
水蒸气	H_2O	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 1.1 求常温下干空气的密度。已知干空气由 75.5% 的 N_2 、23.1% 的 O_2 、1.3% 的 Ar 、0.05% 的 CO_2 组成。

解：由式 (1.7)，干空气的气体常数为：

$$R_T = 0.755 \times 296.9 + 0.231 \times 259.8 + 0.013 \times 207.9 + 0.0005 \times 189 = 1287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

由式 (1.2)，气体密度为：

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R_T T_0} = \frac{101 \times 10^3}{287 \times 293} \approx 1.20 \text{ kg/m}^3$$

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：

$$P_T = P_1 + P_2 + \cdots + P_n \quad (1.8)$$

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 $\psi_a, \psi_b, \psi_c \cdots$ 和各组分气体的摩尔质量 $m_a, m_b, m_c, \cdots$ ，则在标准状态下混合气体的密度为：

$$\rho_T = \frac{1}{22.41} (\psi_a m_a + \psi_b m_b + \psi_c m_c + \cdots) \quad (1.9)$$

1.2.2 气体的连续性和压缩性

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、压力等就可以了。在连续介质中，可以把这些物理量看做是空间坐标和时间的连续函数。

当研究微粒在空气中的运动行为时，如果微粒直径远大于气体平均分子自由程，气体连续性的假设是适用的。

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的。如果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。

当气体速度 U 以接近声速 U_s 运动时，气体为压缩态，压缩程度取决于马赫数 Ma ：

$$Ma = \frac{U}{U_s} \quad (1.10)$$

当马赫数 $Ma \ll 1$ 时，气体可看作是**不可压缩的**，这符合多数气溶胶条件，在环境温度下，声音在空气中的速度约为 340m/s。理论计算结果表明，对于气体速度和其声速之比小于 0.3 的绝热流动，就可以当做不可压流动来处理。

1.2.3 气体的黏度

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 可用式 (1.11) 表示：

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.11)$$

式中, τ ——内摩擦力, Pa;

μ ——动力黏性系数, Pa·s。

有时, 动力黏度还可利用运动黏性系数 ν 来代替, 两者的关系为:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.12)$$

动力黏性系数与气体的温度有关, 随气体的温度升高而增大。在常压下可以不考虑气体的压力对动力黏性系数的影响。

在常压下, 气体动力黏性系数 μ 与温度 T 的关系可由下列经验式表示:

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.5} \quad (1.13)$$

式中, μ_0 ——0℃时气体的动力黏性系数, Pa·s;

C ——与气体性质有关的常数。

一些气体的动力黏性系数 μ_0 与常数 C 见表 1.2。

表 1.2 常见气体 0℃时的动力黏性系数及常数

气体名称	动力黏性系数 μ_0 / Pa·s	常数 C	气体名称	动力黏性系数 μ_0 / Pa·s	常数 C
空气	17.16×10^{-6}	122	氢气	8.36×10^{-6}	83
水蒸气	8.24×10^{-6}	961	一氧化碳	16.57×10^{-6}	100
氧气	19.42×10^{-6}	110	二氧化碳	14.02×10^{-6}	260
氮气	16.64×10^{-6}	102	二氧化硫	12.06×10^{-6}	—

对于混合气体的动力黏性系数 μ_T 可由下式计算:

$$\frac{M_T}{\mu_T} = \frac{M_a \psi_a}{\mu_a} + \frac{M_b \psi_b}{\mu_b} + \dots \quad (1.14)$$

式中, $\psi_a, \psi_b, \dots$ ——各组分气体的体积分数, %;

$M_a, M_b, \dots$ ——各组分气体的摩尔质量, kg/mol;

$\mu_a, \mu_b, \dots$ ——各气体组分的动力黏性系数, Pa·s。

而混合气体的摩尔质量 M_T 由式 (1.15) 计算:

$$M_T = M_a \psi_a + M_b \psi_b + \dots \quad (1.15)$$

1.2.4 气体的湿度

气体中含有少量的水蒸气, 气体的湿度是表示气体中含有水蒸气的多少, 一般有两种表示方法: 绝对湿度和相对湿度。

绝对湿度 x 是指单位体积或单位质量气体中所含水蒸气的质量 (kg/m^3 或 kg/kg)。当湿气体中水蒸气含量达到在该温度下所能容纳的最大值时的气体状态, 称为饱和状态。

相对湿度 ϕ 是指单位体积气体中所含水蒸气的质量 ρ_x 与同温同压下饱和状态时气体所含水蒸气的质量 ρ_s 之比。这一比值也等于湿气体中水蒸气分压 p_x 与同温度下的饱和蒸汽压

p_s 之比。相对湿度一般用百分数表示:

$$\phi = \frac{\rho_x}{\rho_s} \times 100\% = \frac{p_x}{p_s} \times 100\% \quad (1.16)$$

1.3 气体的运动

1.3.1 流体一维流动的基本方程

气溶胶所研究的气体是多相的、可压缩的黏性流体。但是,很多工程上的问题,气体是按单相的不可压缩低速流体来处理的,只要适当地加以修正,几乎都可以得到满意的结果。

在真实流体中,一维流动是不存在的。一维流动是一种近似处理,是指在“很大”的流体中取一细流管,垂直于流动方向的各截面上的流动参数(如速度、压力、温度、密度等)都均匀一致而且只是空间坐标(线坐标,有书称绝对坐标)的函数^[2]。若流动情况随时间变化,称为非定常流动;反之,则称为定常流动。

(1) 连续性方程

气体动力学所要回答的问题之一是流动过程中,各项流动参数(速度、压力、温度、密度等)是怎样变化的。联系这些参数变化的物理学中的3条基本规律为:质量守恒、动量的变量等于作用力的冲量、能量守恒。这些规律在气体动力学中有两种表达形式:微分形式和积分形式。

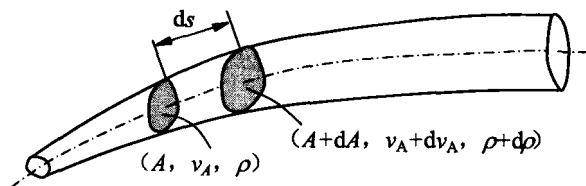


图 1.1 流体一维流动示意图

一维定常流动的质量守恒方程,又称连续方程,由图 1.1 所示,根据质量守恒,流入微元 ds 的质量应等于流出微元 ds 的质量,于是有:

$$\rho v_A A - (A + dA)(v_A + dv_A)(\rho + d\rho) = 0$$

由上式得一维定常流动的连续方程其微分形式为:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dv_A}{v_A} = 0 \quad (1.17)$$

式中, ρ ——气体密度, kg/m^3 ;

A ——流管截面积, m^2 ;

v_A ——垂直于截面 A 处的流速, m/s 。

对于不可压缩流体, $\rho = \text{常数}$, 式 (1.17) 简化为:

$$\frac{dA}{A} + \frac{dv_A}{v_A} = 0 \quad (1.18)$$

对于上述方程积分, 可得到连续方程的积分形式:

$$M = \rho v A = \text{常数} \quad (1.19)$$

$$Q = v A = \text{常数} \quad (1.20)$$

式中, M ——质量流量, kg/s;

Q ——体积流量, m³/s。

连续方程式 (1.20) 是空气净化中最基本的、最常用的方程式之一。

(2) 欧拉运动方程与伯努利公式

忽略黏性力, 微分形式的流体能量方程称为欧拉运动方程, 其表达式为:

$$dp + \rho v dv + \rho g dz = 0 \quad (1.21)$$

式中, dp ——压力增量, Pa;

g ——重力加速度, m/s²;

dz ——流管微段在重力方向上的投影距离, m。

将式 (1.21) 积分, 对于不可压缩流体, $\rho = \text{常数}$, 得:

$$p + \frac{\rho}{2} v^2 + \rho g z = \text{常数} \quad (1.22)$$

这个式子称伯努利公式。在空气净化计算中, 考虑到气体密度很小, 常忽略高度 z 的影响。在实际管道系统中, 有沿程阻力损失 Δp , 因此扩大的伯努利方程为:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \Delta p \quad (1.23)$$

(3) 动量定理

动量方程是把牛顿第二运动定律应用于运动流体所得到的关系式:

$$\Sigma F = M(v_2 - v_1) \quad (1.24)$$

式中, ΣF ——作用于运动流体的合外力, N;

M ——流体的质量流量, kg/s;

v_2, v_1 ——流管截面 1 和截面 2 的流速, m/s。

动量方程可用于计算在气溶胶管道输送过程中的管壁受力。

例 1.2 设密度为 1.2kg/m³ 的气体在弯曲 90° 的收缩管道中流动, 气体流量为 5m³/s。弯道进口截面 1 的压力为 1.2×10²Pa, 截面 2 的压力为 1.0×10²Pa。截面 1 的直径为 0.4m, 截面 2 的直径为 0.3m。试计算气体对弯管内部的作用力。

解: 取一段气体 (控制体) 如图 1.2 所示, 其侧表面为气体在弯管内的流动边界, 它的两个截面与气流方向垂直。

设 F_x 和 F_y 分别表示弯管内壁对气流的作用力在 x 和 y 方向的投影, 应用动量方程, 有:

$$F_x + p_1 A_1 = M(0 - v_1)$$

$$F_y + p_2 A_2 = M(-v_2 - 0)$$

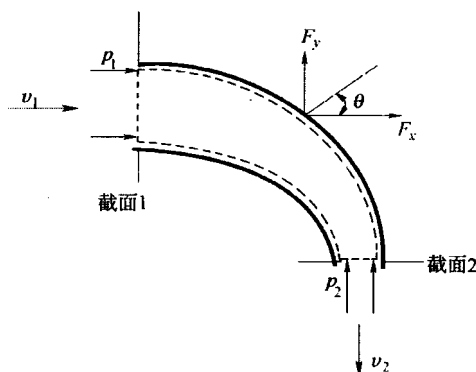


图 1.2 气体对管壁的作用力

上式中的 v_1 及 v_2 可由连续性方程求得：

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{5}{\frac{\pi}{4} \times 0.4^2} = 39.79 \text{ m/s}$$

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{5}{\frac{\pi}{4} \times 0.3^2} = 70.74 \text{ m/s}$$

$$F_x = -120 \times \frac{\pi}{4} \times 0.4^2 - 1.2 \times 5 \times 39.79 = -253.8 \text{ N}$$

$$F_y = -100 \times \frac{\pi}{4} \times 0.3^2 - 1.2 \times 5 \times 70.74 = -431.5 \text{ N}$$

负号表明 F_x 和 F_y 的方向与原假设方向相反。由牛顿第三定律，气体对弯管的合外力为：

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{253.8^2 + 431.5^2} = 500.6 \text{ N}$$

1.3.2 流体多维流动的基本方程

多维流动包括二维流动和三维流动。二维流动是指只有两个空间坐标的流动，平面流动和轴对称流属之。气溶胶力学的许多问题常可以化为二维流动。但在个别场合（如绕球体的流动），又必须用三维流动来描述。

(1) 连续性方程

在直角坐标系下的连续方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (1.25)$$