

# 气溶胶力学及应用

QIRONGJIAO LIXUE JI YINGYONG

■ 蒋仲安 陈举师 温昊峰 编著



冶金工业出版社  
[www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn)

# 气溶胶力学及应用

蒋仲安 陈举师 温昊峰 编著

北 京

冶金工业出版社

2018

## 内 容 简 介

本书理论与实际相结合,系统地阐述了气溶胶粒子的形成、运动、沉降和凝并过程,并在矿山粉尘分布的数值模拟中进行了应用。本书着重介绍了气溶胶的物理性质、粒度分布,气溶胶粒子的等速和非等速直线运动,在离心力作用下气溶胶粒子的运动和沉降,气溶胶粒子的空气动力学捕获、扩散运动和沉降,气溶胶粒子的凝并、静电沉降以及其他的沉降方法和机理,最后将气溶胶力学理论应用于矿山粉尘分布数值模拟中,得出煤矿和非煤矿山开采各主要工艺环节粉尘时空分布特征。

本书为高等院校有关专业的研究生教材或教学参考书,也可供从事相关专业的工程技术人员和管理人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

气溶胶力学及应用/蒋仲安,陈举师,温昊峰编著. —北京:  
冶金工业出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-5024-7791-2

I. ①气… II. ①蒋… ②陈… ③温… III. ①气溶胶—  
研究 IV. ①O648. 18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 110506 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 [www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn) 电子信箱 [yjchs@cnmp.com.cn](mailto:yjchs@cnmp.com.cn)

责任编辑 俞跃春 贾怡雯 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7791-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2018 年 7 月第 1 版, 2018 年 7 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17 印张; 414 千字; 262 页

78.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 [tougao@cnmp.com.cn](mailto:tougao@cnmp.com.cn)

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 [yjgycbs.tmall.com](http://yjgycbs.tmall.com)

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

## 前 言

气体介质中加入固态或液态粒子而形成的分散体系称为气溶胶(aerosol)。简单地说,气溶胶就是悬浮于空气中的微粒子,在地球大气层中可谓无时不在,无处不有。人类在生产活动中,对岩石、矿物的钻探、开采和对矿物的加工过程都会向空气中散发大量粉尘(或烟尘),对人体健康危害很大,生产过程中粉尘(或烟雾)的散发,还会使设备磨损,使各种产品的质量降低,影响照明条件,降低劳动生产效率。因此,气溶胶力学是一门描述空气中悬浮颗粒物运动规律的科学,是实现气溶胶科学技术与悬浮颗粒物控制工程实践对接的桥梁,“气溶胶力学及应用”是安全科学与工程类、矿业工程及环境工程等相关专业必不可少的一门专业课程。

本书是根据高等学校安全科学与工程类、矿业工程及环境工程等相关专业研究生课程“气溶胶力学及应用”教学大纲编写的,内容涵盖了煤矿和非煤矿,适用面广。主要内容包括绪论、气溶胶的粒径和粒径分布、气溶胶粒子的等速直线运动、气溶胶粒子的非等速直线运动、气溶胶粒子的曲线运动、气溶胶粒子的纤维过滤理论、气溶胶粒子的水滴捕集理论、气溶胶粒子的扩散与沉降、气溶胶粒子的凝并、气溶胶粒子的静电沉降、气溶胶力学理论在矿山粉尘分布数值模拟中的应用等。

本书由蒋仲安、陈举师、温昊峰撰写。具体的编写分工为:第1~6章由蒋仲安编写,第7章由温昊峰编写,第8~11章由陈举师编写。本书的编写框架和目录拟定、编写体例设计及全书内容统稿均由蒋仲安完成。在编写过程中,本书力求阐明气溶胶力学及应用的基本概念、基本原理、应用技术及模拟方法,理论联系实际,加强对研究生应用能力的培养。书中编入大量实例和实物照片,内容翔实,图文并茂,充分体现了本门

课程教学内容的先进性和实用性。

本书的编写和出版得到了北京科技大学研究生教材专项基金的资助，在此表示感谢。

本书在编写过程中，参阅了由张国权编著的《气溶胶力学——除尘净化理论基础》一书以及其他相关文献资料，在此向其作者表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2018年1月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1 绪论 .....             | 1  |
| 1.1 基本概念 .....         | 1  |
| 1.2 气溶胶的形成与分类 .....    | 2  |
| 1.2.1 粉尘 .....         | 2  |
| 1.2.2 烟 .....          | 2  |
| 1.2.3 烟尘 .....         | 2  |
| 1.2.4 雾 .....          | 3  |
| 1.2.5 霾 .....          | 3  |
| 1.2.6 烟雾 .....         | 3  |
| 1.2.7 雾霾 .....         | 3  |
| 1.3 气溶胶粒子的物化特性 .....   | 4  |
| 1.3.1 粒子的密度 .....      | 4  |
| 1.3.2 粉尘的安置角 .....     | 5  |
| 1.3.3 粒子的表面积 .....     | 5  |
| 1.3.4 凝聚与附着 .....      | 6  |
| 1.3.5 湿润性 .....        | 6  |
| 1.3.6 粉尘的磨损性 .....     | 7  |
| 1.3.7 粒子的光学性质 .....    | 8  |
| 1.3.8 粒子的电学性质 .....    | 8  |
| 1.3.9 粒子的自燃性和爆炸性 ..... | 9  |
| 1.4 气溶胶的表征量 .....      | 10 |
| 1.4.1 气溶胶的浓度 .....     | 10 |
| 1.4.2 气溶胶的粒度 .....     | 11 |
| 1.5 气溶胶研究的意义 .....     | 11 |
| 复习思考题 .....            | 13 |
| 2 气溶胶的粒径和粒径分布 .....    | 14 |
| 2.1 气溶胶的粒径 .....       | 14 |
| 2.1.1 粒子的形状 .....      | 14 |
| 2.1.2 单一气溶胶粒径的定义 ..... | 15 |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| 2.2 气溶胶的粒径分布 .....           | 17        |
| 2.2.1 气溶胶粒子的统计直径 .....       | 17        |
| 2.2.2 气溶胶的粒度分布(分散度) .....    | 19        |
| 2.2.3 粒径的频谱分布 .....          | 20        |
| 复习思考题 .....                  | 27        |
| <b>3 气溶胶粒子的等速直线运动 .....</b>  | <b>28</b> |
| 3.1 气溶胶粒子的作用力和运动方程 .....     | 28        |
| 3.1.1 气溶胶粒子的作用力 .....        | 28        |
| 3.1.2 气溶胶粒子的运动方程 .....       | 30        |
| 3.2 球体的缓慢运动——斯托克斯定律 .....    | 31        |
| 3.3 气溶胶粒子的阻力系数 .....         | 36        |
| 3.3.1 球形粒子的阻力系数 .....        | 36        |
| 3.3.2 肯宁汉修正 .....            | 38        |
| 3.3.3 非球形粒子的阻力特征 .....       | 41        |
| 3.4 气溶胶粒子的最终沉降速度 .....       | 42        |
| 3.5 气溶胶粒子的壁效应和均一电场中的运动 ..... | 45        |
| 3.5.1 气溶胶粒子的壁效应 .....        | 45        |
| 3.5.2 气溶胶粒子在均一电场中的运动 .....   | 46        |
| 3.6 气溶胶粒子等速直线运动的数值模拟 .....   | 47        |
| 复习思考题 .....                  | 48        |
| <b>4 气溶胶粒子的非等速直线运动 .....</b> | <b>50</b> |
| 4.1 运动的基本方程 .....            | 50        |
| 4.2 没有外力作用时气溶胶粒子的运动 .....    | 51        |
| 4.2.1 运行时间 .....             | 51        |
| 4.2.2 运行距离 .....             | 51        |
| 4.2.3 张弛时间和停止距离 .....        | 52        |
| 4.3 在重力作用下气溶胶粒子的运动 .....     | 54        |
| 4.3.1 到达最终沉降速度前的运动 .....     | 54        |
| 4.3.2 最终沉降速度 .....           | 55        |
| 4.3.3 斯托克斯区在重力作用下粒子的运动 ..... | 57        |
| 4.4 在周期性外力作用下气溶胶粒子的振动 .....  | 59        |
| 4.5 气溶胶粒子非等速直线运动的数值模拟 .....  | 61        |
| 复习思考题 .....                  | 63        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 5 气溶胶粒子的曲线运动 .....           | 64  |
| 5.1 气溶胶粒子曲线运动时的一般理论 .....    | 64  |
| 5.2 在重力作用下气溶胶粒子的曲线运动 .....   | 65  |
| 5.2.1 层流中气溶胶粒子的运动 .....      | 65  |
| 5.2.2 紊流中气溶胶粒子的运动 .....      | 66  |
| 5.3 层流情况下气溶胶粒子在静电场中的运动 ..... | 67  |
| 5.4 在离心力场中气溶胶粒子的运动 .....     | 68  |
| 5.4.1 理想旋风除尘器的分离原理 .....     | 68  |
| 5.4.2 斯托克斯区旋风除尘器的收集效率 .....  | 72  |
| 5.4.3 艾伦区旋风除尘器的收集效率 .....    | 74  |
| 5.5 在热力作用下气溶胶粒子的运动 .....     | 77  |
| 5.6 气溶胶粒子曲线运动的数值模拟 .....     | 79  |
| 复习思考题 .....                  | 80  |
| 6 气溶胶粒子的纤维过滤理论 .....         | 82  |
| 6.1 气溶胶粒子在圆柱体上的沉降机理 .....    | 83  |
| 6.2 绕圆柱体的速度场 .....           | 84  |
| 6.2.1 理想流体绕无限长圆柱体的流动 .....   | 84  |
| 6.2.2 拉姆场 (Lamb) .....       | 85  |
| 6.2.3 桑原-黑派尔场 .....          | 86  |
| 6.2.4 皮切对桑原-黑派尔场的扩展 .....    | 88  |
| 6.3 纤维过滤的阻力 .....            | 89  |
| 6.3.1 理想流体对圆柱体的绕流 .....      | 89  |
| 6.3.2 黏性流体绕圆柱体流动时的阻力 .....   | 91  |
| 6.3.3 纤维过滤器的理论阻力 .....       | 91  |
| 6.3.4 半经验阻力公式 .....          | 92  |
| 6.4 纤维过滤器的收集效率 .....         | 93  |
| 6.4.1 收集效率 .....             | 93  |
| 6.4.2 截留效率 .....             | 94  |
| 6.4.3 惯性沉降效率 .....           | 96  |
| 6.4.4 粒子的截留和惯性沉降 .....       | 98  |
| 6.5 纤维间的干扰和综合收集机理 .....      | 101 |
| 6.5.1 纤维间的干扰影响 .....         | 101 |
| 6.5.2 收集机理的综合 .....          | 101 |
| 6.6 纤维过滤器的特征和非稳定过滤 .....     | 102 |
| 6.6.1 纤维过滤器的特征 .....         | 102 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 6.6.2 非稳定过滤 .....                  | 103        |
| 复习思考题 .....                        | 104        |
| <b>7 气溶胶粒子的水滴捕集理论 .....</b>        | <b>106</b> |
| 7.1 气溶胶粒子在球体上的截留及惯性沉降 .....        | 106        |
| 7.2 水滴群的收集效率 .....                 | 113        |
| 7.2.1 水滴群的收集效率计算方法一 .....          | 113        |
| 7.2.2 水滴群的收集效率计算方法二 .....          | 114        |
| 复习思考题 .....                        | 116        |
| <b>8 气溶胶粒子的扩散与沉降 .....</b>         | <b>117</b> |
| 8.1 扩散的基本定律 .....                  | 118        |
| 8.1.1 菲克扩散定律 .....                 | 118        |
| 8.1.2 扩散系数 .....                   | 120        |
| 8.2 在静止介质中气溶胶粒子的扩散沉降 .....         | 121        |
| 8.2.1 平面源 .....                    | 122        |
| 8.2.2 对垂直墙的扩散 .....                | 123        |
| 8.2.3 半无限原始分布时的扩散 .....            | 124        |
| 8.2.4 重力场中的扩散 .....                | 125        |
| 8.3 层流中气溶胶粒子的扩散 .....              | 126        |
| 8.3.1 管中气溶胶粒子向筒壁的沉降 .....          | 126        |
| 8.3.2 均一速度场中气溶胶粒子的扩散 .....         | 127        |
| 8.4 气溶胶粒子向圆柱体和球体的扩散 .....          | 128        |
| 8.4.1 气溶胶粒子向圆柱体的扩散 .....           | 128        |
| 8.4.2 气溶胶粒子向球体的扩散 .....            | 131        |
| 8.5 气溶胶粒子在大气中的紊流扩散与沉降 .....        | 134        |
| 8.5.1 有界条件下的气溶胶粒子在大气中的扩散数学模型 ..... | 134        |
| 8.5.2 有效源高 $H$ 的计算 .....           | 139        |
| 8.5.3 扩散参数的确定 .....                | 142        |
| 8.5.4 粒子在地面上的沉降 .....              | 144        |
| 复习思考题 .....                        | 145        |
| <b>9 气溶胶粒子的凝并 .....</b>            | <b>146</b> |
| 9.1 热凝并 .....                      | 146        |
| 9.2 在内力场影响下气溶胶粒子的凝并 .....          | 149        |
| 9.2.1 范德华力(分子力) .....              | 150        |

|                                        |            |
|----------------------------------------|------------|
| 9.2.2 荷电粒子 .....                       | 151        |
| 9.3 在外力场影响下气溶胶粒子的凝并 .....              | 151        |
| 9.3.1 电场和磁场凝并 .....                    | 152        |
| 9.3.2 声场凝并 .....                       | 153        |
| 9.3.3 流场中的梯度凝并 .....                   | 154        |
| 复习思考题 .....                            | 157        |
| <b>10 气溶胶粒子的静电沉降 .....</b>             | <b>158</b> |
| 10.1 电场强度与电晕电流 .....                   | 159        |
| 10.2 气溶胶粒子的荷电 .....                    | 161        |
| 10.2.1 场荷电 .....                       | 161        |
| 10.2.2 扩散荷电 .....                      | 165        |
| 10.3 荷电气溶胶粒子在静电场中的运动与沉降 .....          | 167        |
| 10.3.1 荷电气溶胶粒子在静电场中的运动 .....           | 167        |
| 10.3.2 荷电粒子在静电场中的沉降 .....              | 170        |
| 10.3.3 在收集极板不同位置处气溶胶粒子的沉降量 .....       | 179        |
| 10.3.4 在电荷影响下气溶胶粒子在圆柱上的沉降 .....        | 180        |
| 10.4 影响静电除尘器性能的其他因素 .....              | 182        |
| 10.4.1 粒子比电阻的影响 .....                  | 182        |
| 10.4.2 非均一气流分布的影响 .....                | 183        |
| 10.4.3 漏风和粒子再飞扬的影响 .....               | 184        |
| 复习思考题 .....                            | 186        |
| <b>11 气溶胶力学理论在矿山粉尘分布数值模拟中的应用 .....</b> | <b>187</b> |
| 11.1 数值模拟软件及控制方程的建立 .....              | 187        |
| 11.1.1 数学模型的选定 .....                   | 187        |
| 11.1.2 数值模拟软件的选择 .....                 | 187        |
| 11.1.3 数值模拟控制方程的建立 .....               | 189        |
| 11.2 地下矿山粉尘分布中的应用 .....                | 190        |
| 11.2.1 综放工作面粉尘分布的数值模拟 .....            | 190        |
| 11.2.2 综掘工作面粉尘分布的数值模拟 .....            | 197        |
| 11.2.3 采场爆破粉尘分布的数值模拟 .....             | 204        |
| 11.3 露天矿山粉尘分布中的应用 .....                | 210        |
| 11.3.1 露天矿穿孔设备作业粉尘分布的数值模拟 .....        | 210        |
| 11.3.2 露天矿爆破粉尘时空分布的数值模拟 .....          | 216        |
| 11.3.3 露天矿运输路面粉尘分布的数值模拟 .....          | 224        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 11.4 金属矿山井下破碎站粉尘分布中的应用 ..... | 232 |
| 11.4.1 破碎硐室粉尘分布的数值模拟 .....   | 232 |
| 11.4.2 胶带输送巷道粉尘分布的数值模拟 ..... | 236 |
| 11.4.3 卸矿站粉尘分布的数值模拟 .....    | 241 |
| 11.5 钻爆法施工隧道粉尘分布中的应用 .....   | 247 |
| 11.5.1 爆破后粉尘分布的数值模拟 .....    | 249 |
| 11.5.2 钻孔粉尘分布的数值模拟 .....     | 250 |
| 11.5.3 喷射混凝土粉尘分布的数值模拟 .....  | 252 |
| 11.5.4 出渣运输粉尘分布的数值模拟 .....   | 254 |
| 复习思考题 .....                  | 257 |
| 附录 .....                     | 258 |
| 附录1 标准大气压下干空气的物理参数 .....     | 258 |
| 附录2 水的物理参数 .....             | 258 |
| 附录3 误差函数表 .....              | 259 |
| 参考文献 .....                   | 262 |

# 1 绪 论

## 【学习要点】

本章主要介绍了气溶胶的基本定义、常见的几种气溶胶、气溶胶粒子的物化特性、气溶胶的表征量及研究气溶胶的意义。气溶胶粒子的物化特性尤为重要，它们是研究气溶胶粒子运动特性和捕集气溶胶粒子的基础，在后续的章节会多次用到。气溶胶的表征量（主要是浓度和粒径）是了解气溶胶粒子的重要途径，不同浓度和粒径的粒子需要选用不同的除尘方法。

研究气溶胶粒子的形成、运动、沉降和凝并的学科称为气溶胶力学。气溶胶技术的大量应用是在 20 世纪五六十年代以后才开始的，但气溶胶科学在 20 世纪初甚至在 19 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。气溶胶力学这一术语是富克斯（Fuchs）于 1955 年第一次提出来的，与流体力学、固体力学等技术基础理论相比，它是一门比较年轻的学科。其研究内容对人类的生活与生产活动有着重大影响，如自然界中云的形成对气候的影响、水蒸发凝结而降雨、风所造成的固体粒子的迁移与沉积、风对植物花粉的传播以及空气中微生物的散布等，都是气溶胶力学的研究内容。

## 1.1 基本概念

气体介质中加入固态或液态粒子而形成的分散体系称为气溶胶（aerosol）。简单说，气溶胶就是悬浮于空气中的微粒子。这些悬浮微粒子可以是固态的，也可以是液态的，更多的则是固态和液态两者的混合物。1955 年，富克斯提出气溶胶的概念时，气溶胶的含义是指空气中的微米级和亚微米级的粒子云，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，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：一是被悬浮的微粒物，称为分散相；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（微粒物）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，更谈不上气溶胶。

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，微粒物被液体介质水悬浮而形成的分散体系，则称为水溶胶（hydrosol）。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黏滞力的作用，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。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，以分散相处于悬浮状态的粒子，称为气溶胶粒子。至于气溶胶的分散介质，如不作特殊说明，则都是指空气。

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。气溶胶粒子在空气中的稳定性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（也称粒子数密度）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  $2.67 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ，质量浓度为  $1.293 \times 10^{-3} \text{g} / \text{cm}^3$ ，即  $1.29 \text{kg} / \text{m}^3$ 。

## 1.2 气溶胶的形成与分类

气溶胶的形成原因有天然和人工两类。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。

### 1.2.1 粉尘

粉尘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，通常由矿物加工、破碎、钻孔、碾磨、运输、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微细的放射性粉尘，都是粉尘存在的典型例子。

### 1.2.2 烟

烟是由于燃烧和凝结生成的细小粒子，也是一种有机性的可燃物质，例如煤、石油、木材等燃烧而形成的固体粒子，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，因而笼统地称之为烟。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，是环保部门最为关注的难题之一。

### 1.2.3 烟尘

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，这种烟尘在城市中尤其突出。

#### 1.2.4 雾

雾是指在接近地球表面、大气中悬浮的由小水滴或冰晶组成的水汽凝结物，是一种常见的天气现象。当气温达到露点温度时（或接近露点），空气里的水蒸气凝结生成雾。根据凝结的成因不同，雾有数种不同类型。当气温高于冰点时，水汽凝结成液滴。当气温低于冰点时，水汽直接凝结为固态的冰晶，比如冰雾。因为露点只受气温和湿度影响，所以雾的形成主要有两个原因：一是空气中的水汽大量增加，使得露点升高至气温，从而形成雾，比如蒸汽雾和锋面雾；二是气温下降至低于露点而生成雾，比如平流雾和辐射雾。

雾和云的不同在于，云生成于大气的高层，而雾接近地表。

由于雾的形成，空气中的能见度将大大降低，严重时有可能白天也“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，也就是“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。

#### 1.2.5 霾

霾也称灰霾（烟霞），是指原因不明的因大量烟、尘等微粒悬浮而形成的浑浊现象。霾的核心物质是空气中悬浮的灰尘颗粒，气象学上称为气溶胶颗粒。

空气中的灰尘、硫酸、硝酸、有机碳氢化合物等粒子也能使大气混浊，视野模糊并导致能见度恶化，如果水平能见度小于 10000m 时，将这种非水成物组成的气溶胶系统造成的视程障碍称为霾或灰霾。一般相对湿度小于 80% 时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾造成的，相对湿度大于 90% 时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是雾造成的，相对湿度介于 80%~90% 之间时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾和雾的混合物共同造成的，但其主要成分是霾。霾的厚度值比较高，可达 1000~3000m 左右。由于灰尘、硫酸、硝酸等粒子组成的霾，其散射波长较长的光比较多，因而霾看起来呈黄色或橙灰色。

#### 1.2.6 烟雾

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，特别是城市大气环境空气质量的主要障碍。

#### 1.2.7 雾霾

雾霾是雾和霾的混合物，早晚湿度大时，雾的成分多。白天湿度小时，霾占据主力，相对湿度在 80%~90% 之间。其中雾是自然天气现象，空气中水汽氤氲。虽然以灰尘作为凝结核，但总体无毒无害；霾的核心物质是悬浮在空气中的烟、灰尘等物质，空气相对湿

度低于 80%，颜色发黄。气体能直接进入并黏附在人体下呼吸道和肺叶中，对人体健康有伤害。雾霾天气的形成是主要是因为人为的环境污染，再加上气温低、风小等自然条件导致污染物不易扩散。

雾霾天气是一种大气污染状态，雾霾是对大气中各种悬浮颗粒物含量超标的笼统表述，尤其是 PM<sub>2.5</sub>（空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物）被认为是造成雾霾天气的“元凶”。

上述属于气溶胶范畴的分类和专用术语，很难给予严格界定，在国内外文献中常常有不一致的叫法。一般大气粒子的粒径范围是 0.001~500 μm，小于 0.1 μm 的粒子具有和气体分子一样的行为，在气体分子的撞击下具有较大的随机运动，在 1~20 μm 之间的粒子随气体运动而运动，往往被气体所携。大于 20 μm 的粒子具有明显的沉降运动，通常它们在大气中停留的时间很短。

实际上研究气溶胶粒子的沉降比研究气溶胶的形成更为重要。如燃料燃烧时产生的烟，各种化工企业及冶炼企业在生产过程中生成的烟雾，粉碎、焙烧和处理各种固体物质时产生的粉尘等，有的需要加以回收利用，或者为了防止空气污染需要加以控制和净化。控制粉尘的方法和手段是多种多样的，概括起来有重力式、惯性式、离心式、纤维过滤式、织物过滤式、颗粒层式、静电式以及各种湿式除尘设备等。

### 1.3 气溶胶粒子的物化特性

气溶胶粒子具有特定的物化特性，如密度、黏滞特性、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，现将除尘净化中需要应用到的一些性质简述如下。

#### 1.3.1 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 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。气溶胶粒子的密度是影响粒子运动的重要因素，重力作为粒子所受的一种外力，与粒子的密度成正比，粒子的密度越大，则运动中的惯性力也越大。

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。

粒子的密度可分为真密度和堆积密度。设法将吸附在粒子表面内部的空气排出后测得的粒子自身的密度称为颗粒的真密度  $\rho_p (\text{kg}/\text{m}^3)$ 。呈堆积状态存在的粒子，将包括颗粒之间气体空间在内的粉体密度称为堆积密度  $\rho_b (\text{kg}/\text{m}^3)$ ，若孔隙率为  $\varepsilon$ ，则真密度和堆积密度存在如下关系：

$$\rho_b = (1 - \varepsilon)\rho_p \quad (1-1)$$

气溶胶粒子的真密度用于研究粒子的运动行为等方面，堆积密度用于存仓或灰斗的容积确定等方面。常见工业颗粒物的真密度和堆积密度见表 1-1。

表 1-1 常见工业颗粒物的真密度和堆积密度 (kg/m<sup>3</sup>)

| 名 称            | 真密度       | 堆积密度      | 名 称   | 真密度       | 堆积密度     |
|----------------|-----------|-----------|-------|-----------|----------|
| 滑石粉            | 2750      | 590~710   | 电 炉   | 4500      | 600~1500 |
| 烟 尘            | 2150      | 1200      | 化铁炉   | 2000      | 800      |
| 炭 黑            | 1850      | 40        | 黄铜溶解炉 | 4000~8000 | 250~1200 |
| 硅砂粉 (0.5~72μm) | 2630      | 260       | 铅冶炼   | 6000      | 约 500    |
| 烟灰 (0.7~56μm)  | 2200      | 70        | 烧结炉   | 3000~4000 | 1000     |
| 水泥 (0.7~91μm)  | 3120      | 1500      | 转 炉   | 5000      | 700      |
| 氧化铜 (0.9~42μm) | 6400      | 640       | 铜精炼   | 4000~5000 | 200      |
| 水泥干燥窑          | 3000      | 600       | 石 墨   | 2000      | 约 300    |
| 白云石粉尘          | 2800      | 900       | 铸造沙   | 2700      | 1000     |
| 造型用黏土          | 2470      | 720~800   | 黑墨回收  | 3100      | 130      |
| 烧结矿粉           | 3800~4200 | 1500~2600 | 石灰粉尘  | 2700      | 1100     |
| 锅炉炭末           | 2100      | 600       |       |           |          |

1.3.2 粉尘的安置角

将粉尘自然地堆放在水平面上，堆积成圆锥体的锥体角叫做静安置角或自然堆积角，一般为 35°~50°。将粉尘置于光滑的平板上，使该板倾斜到粉尘开始滑动时的倾斜角称为动安置角或滑动角，一般为 30°~40°。

粉尘的安置角是评价粉尘流动特性的一个重要指标，它与粉尘的粒径、含水率、尘粒形状、尘粒表面光滑程度、粉尘的粘附性等因素有关，是设计除尘器灰斗或料仓锥度、除尘管道或输灰管道倾斜度的主要依据。

1.3.3 粒子的表面积

一般来说粗尘表面积小，同质量的细粒子的表面积大。边长为 1cm 的立方体，表面积为 1<sup>2</sup>×6cm<sup>2</sup>，1/ncm 边长的小立方体，表面积为 6×(1/n)<sup>2</sup>cm<sup>2</sup>，在 1cm 边长的立方体中有 n<sup>3</sup> 个小立方体，总表面积为 6n<sup>3</sup>/n<sup>2</sup>=6ncm，即表面积增加了 n 倍。

单位质量（或单位体积）粉尘的总表面积称为比表面积。假设粒子为与其同体积的球形粒子，则比表面积 S<sub>w</sub> (m<sup>2</sup>/kg) 与粒径的关系为

$$S_w = \frac{\pi d_p^2}{\frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p} = \frac{6}{\rho_p d_p}$$

(1-2)

式中，ρ<sub>p</sub>为粒子的密度，kg/m<sup>3</sup>；d<sub>p</sub>为粒子的直径，m。

由式（1-2）可以看出，粒子的比表面积与粒径成反比，粒径越小，比表面积越大。由于粒子的比表面积增大，它的表面能也随之增大，增强了表面活性，这对研究气溶胶粒子的湿润、凝聚、附着、吸附、燃烧和爆炸等性能有重要作用。

比表面积是气溶胶粒子的重要特征。粒子的比表面积分布在很宽的数值范围内，50

(粉尘)  $\sim 1000000\text{cm}^2/\text{g}$  (炭黑), 由实测得到的表面积通常比计算的值大, 因为计算中没有考虑到表面粗糙这一因素, 佛斯特等人得出的比表面积与粒子大小之间的关系如图 1-1 所示, 各种工业粉尘分散相的比表面积见表 1-2。

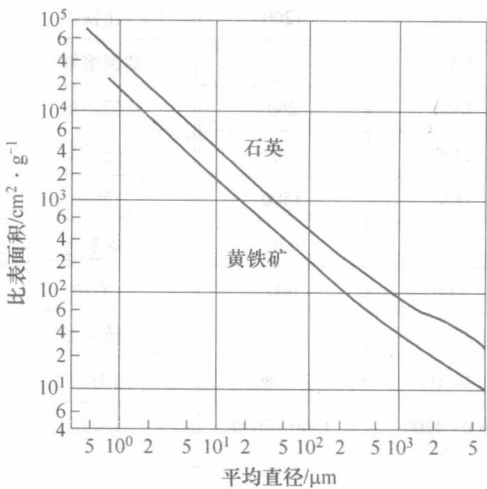


图 1-1 比表面积与粒子大小之间的关系

表 1-2 工业粉尘分散相的比表面积

| 分散相名称   | 质量中位径/ $\mu\text{m}$ | 比表面积/ $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ | 分散相名称 | 质量中位径/ $\mu\text{m}$ | 比表面积/ $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ |
|---------|----------------------|-----------------------------------------|-------|----------------------|-----------------------------------------|
| 新生成的烟草烟 | 0.6                  | 100000                                  | 高炉烟尘  | 8                    | 4000                                    |
| 细飞灰     | 5                    | 6000                                    | 细炭黑   | 0.03                 | 1100000                                 |
| 粗飞灰     | 25                   | 1700                                    | 活性炭   |                      | 8000000                                 |
| 水泥窑粉尘   | 13                   | 2400                                    | 细砂    | 500                  | 50                                      |

1.3.4 凝聚与附着

细微气溶胶粒子增大了表面能, 即增强了粒子的结合力, 一般把粒子间互相结合形成一个新的大粒子的现象称为凝聚; 粒子和其他物体结合的现象称为附着。

气溶胶粒子的凝聚与附着是在粒子间距离非常近时, 由于分子间引力的作用而产生的。一般粒子间距离较大时, 需要有外力作用使粒子间碰撞、接触, 促进其凝聚和附着。这些外力有粒子热运动 (布朗运动)、静电力、超声波、紊流脉动速度等。粒子的凝聚有利于对它捕集分离。

1.3.5 湿润性

湿润现象是分子力作用的一种表现, 是液体 (水) 分子与固体分子间的互相吸引造成的。它可以用湿润接触角 ( $\theta$ ) 的大小来表示, 如图 1-2 所示。

湿润角小于  $60^\circ$  的, 表示湿润性好, 为亲水性的; 湿润角大于  $90^\circ$  时, 说明湿润性差, 属憎水性的。几种矿物的气溶胶粒子湿润接触角见表 1-3。粒子的湿润性除决定于粒子成分外, 还与粒子的大小、荷电状态、湿度、气压、接触时间等因素有关。