

化学工程手册

《化学工程手册》编辑委员会

第 21 篇

气态非均一系分离

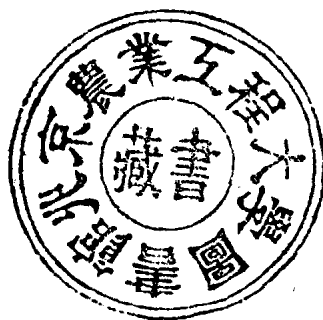
化学工业出版社

化学工程手册

第 21 篇

气态非均一系分离

《化学工程手册》编辑委员会



化学工业出版社

内 容 提 要

本书是《化学工程手册》第21篇——气态非均一系分离。

全书共有7章，首先全面介绍了气态非均一系分离的基本原理，包括气态非均一系的性质、气溶胶颗粒动力学及分离方法与设备总论；而后逐章介绍重力及惯性分离、旋风分离器、过滤器、湿法洗涤器及静电除尘器等的基本原理、性能计算、设计与应用、结构类型等；最后扼要介绍几种捕沫设备。

本书的编写者为：21.1和21.2时铭显。21.3汪云瑛，其中21.3.2(1)旋流式分离器由上海化工研究院劳家仁编写初稿。21.4刘隽人。21.5应燮堂编写初稿，时铭显定稿。21.6施从南。21.7应燮堂。全书由时铭显主编及审校。

本书可供从事气态非均一系分离工作的各有关工业部门的设计、研究人员、工厂技术人员及有关院校师生参考。

3254/43

化 学 工 程 手 册

第 21 篇

气态非均一系分离

编写人：时铭显	汪云瑛	刘隽人	石油大学
应燮堂	施从南		南京化学工业公司设计院
劳家仁			上海化工研究院
审校人 时铭显			石油大学

责任编辑：陈丽 郭乃铎

封面设计：任辉

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

豆各庄装订厂装订

新华书店北京发行所经销

开本787×1092¹/₁₆印张25¹/₂插页1字数645千字

1989年10月第1版 1989年10月北京第1次印刷

印数 1—4,460

ISBN 7-5025-0643-8/TQ·382

定 价 11.40 元

《化学工程手册》总篇目

1. 化工基础数据
2. 化工应用数学
3. 化工热力学
4. 流体流动
5. 搅拌及混合
6. 流体输送机械及驱动装置
7. 传热
8. 传热设备及工业炉
9. 蒸发及结晶
10. 传质
11. 蒸馏
12. 气体吸收
13. 气液传质设备
14. 萃取及浸取
15. 增湿与减湿
16. 干燥
17. 吸附及离子交换
18. 薄膜过程
19. 颗粒及颗粒系统
20. 流态化
21. 气态非均一系分离
22. 液固分离
23. 粉碎、分级及团聚
24. 化学反应工程
25. 化工自动控制
26. 化工系统工程

《化学工程手册》编辑委员会成员

主任

冯伯华 化学工业部

副主任

陈自新 化学工业部橡胶司

李步年 陕西省化工设计院

苏元复 华东化工学院

蔡剑秋 化学工业出版社

汪家鼎 清华大学

委员

卢焕章 中国寰球化学工程公司

林纪方 大连工学院

区灿棋 中国石油化工总公司

杨友麒 化学工业部计算中心

邓颂九 华南工学院

张洪沅 成都科技大学

朱亚杰 华东石油学院

张剑秋 北京燕山石油化工公司研究院

朱自强 浙江大学

郑 焱 上海医药设计院

余国琮 天津大学

郭慕孙 中国科学院化工冶金研究所

时 钧 南京化工学院

傅举孚 北京化工学院

沈 复 华东石油学院

萧成基 化学工业部北京化工研究院

吴锡军 南京化学工业公司化工研究院

第21篇《气态非均一系分离》编写人员

编写人

时铭显 汪云瑛 刘隽人 石油大学

应燮堂 施从南 南京化学工业公司设计院

劳家仁 上海化工研究院

审校人

时铭显 石油大学

前 言

化学工程是研究化工类型生产过程共性规律的一门技术科学，是化工类型生产重要的技术和理论基础。化学工程学科的内容主要包括：传递过程原理及化工单元操作；化学反应工程；化工热力学及化工基础数据；化工系统工程学等。研究和掌握化学工程，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平，有着十分重要的作用。因此，对化学工业来说，化学工程是涉及提高技术水平的主要环节之一。

建国以来，我国的化学工程技术工作逐步发展，已经初步具有一定的基础，并取得了一定的成果。但是，目前国内还缺少一套较为完整实用的化学工程参考资料。编辑出版一套适合国内需要的，具有一定水平的《化学工程手册》，是化工技术工作者多年来的宿愿。早在五十年代和六十年代，国内的化学工程专家就曾酝酿和筹备组织编写《化学工程手册》，一九七五年化学工程设计技术中心站又曾组织讨论过编写计划。今天，在党中央提出加快实现四个现代化宏伟目标的鼓舞下，在化工部和中国化工学会的领导下，于一九七八年正式组成《化学工程手册》编委会，经过化工界许多同志的共同努力，《化学工程手册》终于与广大读者见面了。

希望这部手册的出版，将有助于国内的化工技术人员在工作中掌握和运用化学工程的科学技术原理，更好地处理和解决设计、科研和生产中遇到的化工技术问题。

本手册是一本通用性的工作手册。内容以实用为主，兼顾理论；读者对象为具有一定化工专业基础知识的工程技术人员和教学人员；内容取材注意了结合国内的情况和需要，并反映国内工作已取得的成果；对于国外有关的技术及数据，也尽量予以吸收。

根据当前国内的实际情况，计量单位一律采用“米-公斤（力）-秒”工程制（MKfS制）。但是考虑到我国将逐步过渡到采用国际单位制（SI），除了在第一篇中列出详细的单位换算表外，并在每篇之末加列简明的MKfS制-SI换算表。

参加本手册编写工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等共二十多个单位，近二百人。此外，还有其它许多单位和人员提供资料或间接参与手册的有关工作。《化学工程手册》编辑委员会负责指导手册工作的开展，研究和确定编审工作中一些原则问题，并负责书稿的最后审定工作。手册编写的日常组织工作，由化工部化学工程设计技术中心站负责。

本手册系按篇分册陆续出版，今后还将定期修订再版并出版合订本。希望广大读者对本手册提出宝贵意见，以便再版时改进。

《化学工程手册》编辑委员会

1979年7月

绪 言

气态非均一系（气溶胶）分离是许多工业部门如化学工业、炼油工业、冶金工业、煤炭工业、电力工业、建材工业、食品工业等都通用的技术，还涉及到防止大气污染的环境保护问题，应用广泛，发展较快。但它的理论基础是正在发展中的两相流体力学，颗粒的性质又具有随机性，因此，气态非均一系分离设备的科学原理远非完臻，设计还常常凭藉试验，经验性的内容较多，尚有待深入研究与发展。

本书从基本原理出发，首先较为详细地介绍了气态非均一系的各种性质，尤其是颗粒群的性质以及在各种情况下的颗粒受力分析及运动规律。而后分章详细叙述了各类分离设备的分离机理、性能计算、设计方法、结构类型及应用等。在内容上重点放在分离机理及性能计算方面，并着重从物理概念上阐明原理及计算方法的工程应用，对公式的推导一般从简；对设备的具体结构细节一般也从简叙述；对各种分离方法与设备的国内外新发展则尽可能多地作些介绍，以开阔思路。此外，对各类设备的评价和采样测试方法也作一定的讨论，以供参考。

篇末附有一些常用气体及粉尘等的有关性质表格，还附有参考文献备查阅。

本书编写时间较为仓促，缺点在所难免，敬请读者指正。

目 录

绪言

21.1 基本原理	21-1
21.1.1 气态非均一系的定义与分类	21-1
21.1.2 气态非均一系的性质	21-1
(1) 单个颗粒的尺寸描述	21-1
(2) 颗粒群的粒径分布	21-3
(3) 颗粒粒径分布的测定方法	21-14
(4) 粉体颗粒的物理性质	21-21
(5) 气态非均一系内颗粒浓度的表示	21-26
21.1.3 气溶胶颗粒动力学	21-27
(1) 流体对颗粒的曳力	21-27
(2) 重力场内的颗粒沉降	21-32
(3) 平面旋转流场中的颗粒运动	21-37
(4) 气态非均一系中颗粒的一般运动方程	21-38
(5) 颗粒的碰撞弹跳	21-43
(6) 气溶胶内颗粒的扩散	21-45
(7) 气溶胶内颗粒的团聚	21-51
21.1.4 气态非均一系分离方法与设备总论	21-55
(1) 气态非均一系的分离目的与要求	21-55
(2) 颗粒捕集分离的一般概念	21-55
(3) 分离设备的性能指标	21-57
(4) 分离方法与设备的分类及评价	21-61
(5) 分离设备的采样测试技术	21-64
21.2 重力及惯性分离	21-69
21.2.1 重力沉降器	21-69
(1) 重力沉降器的分离效率	21-69
(2) 重力沉降器的压降	21-71
21.2.2 惯性分离器	21-72
(1) 分离机理	21-72
(2) 结构型式	21-74
21.3 旋风分离器	21-77
21.3.1 切流式旋风分离器	21-77

(1) 旋风分离的基本原理	21-77
(2) 旋风分离器的设计计算方法	21-90
(3) 常用旋风分离器的结构型式	21-105
(4) 影响旋风分离器性能的因素	21-111
21.3.2 其他型式旋风分离器	21-115
(1) 旋流式分离器	21-115
(2) 多管式旋风分离器	21-121
21.4 过滤除尘器	21-134
21.4.1 过滤除尘机理	21-134
(1) 概述	21-134
(2) 孤立捕集体的除尘机理	21-135
(3) 复合捕集物的捕集效率	21-142
(4) 过滤器的除尘效率	21-145
21.4.2 袋式过滤器	21-146
(1) 袋式过滤器的分类及性能	21-146
(2) 滤料	21-154
(3) 袋式过滤器的结构型式	21-161
(4) 袋式过滤器的选择设计	21-193
21.4.3 颗粒层过滤器	21-197
(1) 颗粒层过滤器的分类及优缺点	21-197
(2) 颗粒层过滤器的性能和主要影响因素	21-198
(3) 颗粒层过滤器的结构型式	21-200
21.4.4 空气过滤器	21-206
(1) 过滤器的性能	21-208
(2) 空气过滤器的类型和构造	21-211
(3) 国产空气过滤器	21-213
21.5 湿法捕集	21-230
21.5.1 概述	21-230
21.5.2 湿法捕集的机理	21-233
(1) 液滴捕集机理	21-233
(2) 气泡内颗粒的捕集机理	21-235
(3) 综合捕集效率	21-236
21.5.3 喷雾接触型洗涤器	21-237
(1) 液体的雾化	21-237
(2) 喷淋塔	21-239

(3) 喷射洗涤器·····	21-241	21.6.3 电除尘器的工艺设计·····	21-318
(4) 离心喷射洗涤器·····	21-242	(1) 设计原则·····	21-318
21.5.4 文氏管洗涤器·····	21-244	(2) 原始参数·····	21-318
(1) 文氏管洗涤器的类型·····	21-245	(3) 基本参数的确定·····	21-319
(2) 文氏管洗涤器的除尘效率·····	21-245	(4) 计算实例·····	21-325
(3) 文氏管洗涤器的压降·····	21-249	21.6.4 电除尘器的结构设计·····	21-329
(4) 文氏管的尺寸确定·····	21-250	(1) 收尘极系统·····	21-329
21.5.5 鼓泡接触型洗涤器·····	21-251	(2) 电晕极系统·····	21-334
(1) 泡沫洗涤器·····	21-251	(3) 振打机构·····	21-338
(2) 冲击式泡沫洗涤器·····	21-256	(4) 气流分布装置·····	21-347
21.5.6 液膜接触型洗涤器·····	21-257	(5) 壳体与灰斗·····	21-350
(1) 填料式洗涤器·····	21-258	21.6.5 电除尘器的供电装置·····	21-353
(2) 浮动填料床洗涤器·····	21-265	(1) 供电装置的基本性能与组成·····	21-353
21.5.7 其它型式洗涤器·····	21-267	(2) 供电装置的选型·····	21-355
(1) 冲击洗涤器·····	21-267	(3) 接地保护与安全要求·····	21-359
(2) 湍球塔·····	21-268	21.6.6 新型电除尘器的简介·····	21-359
(3) 强化型洗涤器·····	21-270	(1) 超高压宽极距电除尘器	
21.6 电除尘器·····	21-272	(WS型)·····	21-359
21.6.1 电除尘器的基本原理·····	21-272	(2) 电场屏蔽(PAC-ES)型电除尘	
(1) 气体的电离和导电过程·····	21-272	器·····	21-362
(2) 电流和电压的理论方程式·····	21-274	(3) 冷电极型(CE型)电除尘器·····	21-365
(3) 粉尘的影响·····	21-279	(4) 原式电除尘器·····	21-367
(4) 收尘空间尘粒的荷电·····	21-280	(5) 脉冲供电·····	21-369
(5) 荷电尘粒所受的力及其运动规		21.7 捕沫设备·····	21-372
律·····	21-284	21.7.1 惯性捕沫器·····	21-372
(6) 尘粒的驱进速度·····	21-286	(1) 概述·····	21-372
(7) 荷电尘粒的捕集与除尘效率公		(2) 丝网捕沫器·····	21-372
式·····	21-287	21.7.2 复挡捕沫器·····	21-375
(8) 粉尘的比电阻·····	21-292	(1) 概述·····	21-375
21.6.2 电除尘器的分类和应用·····	21-302	(2) 性能计算·····	21-375
(1) 电除尘器的分类·····	21-302	(3) 复挡设计·····	21-376
(2) 电除尘器的应用范围·····	21-303	21.7.3 纤维除雾器·····	21-376
(3) 电除尘器的应用实例·····	21-303	(1) 概述·····	21-376
(4) 水泥工业电除尘器应用		(2) 捕集效率·····	21-377
实例·····	21-306	21.7.4 旋流板除沫器·····	21-379
(5) 中小电站锅炉电除尘器应用		附录·····	21-380
实例·····	21-310	参考文献·····	21-396

21.1 基本原理

21.1.1 气态非均一系的定义与分类

固体或液体微粒悬浮在气体介质中形成的气态分散系统称为气溶胶 (Aerosol)。在化学工程中将从气溶胶中分离颗粒的操作称为气态非均一系分离或气溶胶分离。

按形成过程的不同, 气态非均一系可分成:

1. 机械分散系

① 固体经过机械作用的破碎、研磨等分散作用形成粉粒状, 再由气流的振荡、流动等作用而使之悬浮于气体中。这种气溶胶颗粒称为尘粒 (Grit, 一般大于 $75\mu\text{m}$)、粉尘 (dust, 一般在 $1\sim 75\mu\text{m}$ 间) 和亚微粉尘 (submicron dust, 小于 $1\mu\text{m}$)。例如化学工业中的流化床操作、水泥窑操作, 冶金工业中的金属矿冶炼操作, 煤粉锅炉等等均会产生这类气态非均一系。

② 液体经机械雾化或喷淋而形成液滴分散悬浮在气体中。前者形成的颗粒称为液雾 (mist, 一般小于 $10\mu\text{m}$), 后者形成的颗粒称为沫 (foam, 一般大于 $10\mu\text{m}$)。

2. 凝结分散系

① 固体或液体经高温燃烧转化为气态, 当温度下降或过饱和时又凝结成悬浮状的气溶胶。这种形成的颗粒称为烟 (Smoke, 常为小于 $1\mu\text{m}$ 的球粒), 如炭黑工业中的炭黑粒子 ($0.01\sim 0.3\mu\text{m}$)。

② 固体升华成气体, 后又凝结成颗粒, 常呈小于 $1\mu\text{m}$ 的球粒或结晶状, 称为皂 (fume)。

各种气态非均一系中颗粒的情况与特性见表1-1。

一般, 粒径在 $100\mu\text{m}$ 以上的颗粒的沉降速度较快, 其分离问题是很容易解决的。粒径在 $0.1\mu\text{m}$ 以下的颗粒属于布朗运动粒子, 不用特殊方法是无法分离的。所以从分离设备设计的角度来看, 往往将 $100\sim 0.1\mu\text{m}$ 作为气溶胶分离的主要粒径范围。其中 $1\mu\text{m}$ 左右的微粒的分离较为困难, 又有害于人体, 故成为目前气溶胶分离的主要研究对象。

21.1.2 气态非均一系的性质

为了选择合理的分离方法与设备, 确定最优的操作范围, 必须首先掌握气态非均一系的基本性质。其中有关气体相的特性, 如: 气体的密度、粘度、湿度、组成等, 对于含颗粒浓度很稀薄的气态非均一系来说并没有什么特殊的问题, 所以不必赘述。本节只叙述分散相 (粉尘或液滴) 的有关特性, 如: 密度、形状、尺度、粒径分布、电性质、摩擦与磨损性质、吸附性、吸湿性、爆炸性及颗粒浓度等。

(1) 单个颗粒的尺寸描述

液滴大多接近圆球状, 而固体颗粒的形状就很不规则, 大致可分为三类——匀长形 (Isometric)、扁平形 (Flat)、针形 (Needle like)。例如纤维物料接近针形, 油母页岩粉接近扁平形, 催化剂接近圆球形, 而大多数工业粉尘属于匀长形。

为了便于理论分析,可以用几种简单的几何形体来近似描述,常用的有:圆球(直径 d)、正方体(边长 d)、圆柱体(直径 d 和长 l)以及回转椭球体(极径 a 和赤道径 b)。若设比值 $\beta = a/b$,则 $\beta = 1$,就是圆球; $\beta < 1$ 称为扁球体; $\beta > 1$ 称为长球体。于是匀长形可用圆球或正方体来描述,扁平形可用 l/d 很小的圆柱体或 β 趋近于0的扁球体来描述,针形可用 l/d 很大的圆柱体或 β 趋近于无穷大的长球体来描述。

对于常见的匀长形颗粒,其尺寸表达法与测定用的方法有密切关系,所以选用的测定方法应尽可能反映所希望控制的工艺过程的主要要求。例如颜料主要希望确定颗粒的投影面积,则应选用显微镜观测法;气力输送工艺则主要要了解颗粒的自由沉降性能,就可用机械沉降测量法。单个颗粒尺寸的各种表达法可见表1-2。

表 1-2 单个颗粒尺寸的表达法^[2]

符 号	名 称	定 义	备 注
δ_v	投影面直径	在显微镜观察的平面上,与颗粒有同样大小投影面积的当量圆直径	颗粒位置不同的测量值
δ_c	周长直径	与颗粒的投影外形有相等周长的当量圆直径	同上
δ_m	Martin直径	颗粒投影外形的平均弦长	同上
δ_F	Feret直径	与颗粒投影外形相切的一对平行线之间的距离的平均值	同上
δ_A	筛分直径	颗粒可以通过的最小方筛孔的宽度	
δ_f	自由沉降直径	在某介质中,与颗粒有同样密度和相同沉降速度的圆球体直径	
δ_{ae}	空气动力直径	在空气中,与颗粒有相同沉降速度,且密度为 10^3 kg/m^3 的圆球体直径	
δ_{stk}	stokes直径	当 $Re_p < 1$ (层流区)时的自由沉降直径	
δ_v	体积直径	与颗粒具有相同体积的圆球体直径	$\delta_v = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{1/3}$
δ_s	面积直径	与颗粒具有相同表面积的圆球体直径	$\delta_s = \sqrt{S/\pi}$
δ_{sv}	面积体积直径	与颗粒具有相同的外表面积与体积的圆球体直径	$\delta_{sv} = \delta_v^3 / \delta_s^2$

只用一个当量尺寸,把颗粒都看成为圆球粒,还不足以表示颗粒的特点,所以还要补充说明其形状特点,通常可以用下列两种参数:

① 球度 ϕ_s

球度的定义为: $\phi_s = \frac{\text{与颗粒等体积的圆球的表面积}}{\text{颗粒的表面积}}$

可表示成 $\phi_s = \left(\frac{\delta_v}{\delta_s} \right)^2 = \left(\frac{\delta_{stk}}{\delta_v} \right)^4 = \frac{\delta_{sv}}{\delta_v}$ 。

例如,对于正方体, $\phi_s = 0.806$; 对于圆柱体, $\phi_s = 2.62 \left(\frac{l}{d} \right)^{2/3} / \left(1 + \frac{2l}{d} \right)$ 。

常见物料的球度可参见下表^[3];

物 料	砂	石英砂	无烟煤粉	粉 煤	铁催化剂
ϕ_s	0.6~0.68	0.551~0.628	0.625	0.696	0.578

② 比表面 Ω

比表面的定义为 $\Omega = \frac{\text{颗粒的表面积 } S}{\text{颗粒的体积 } V} = \frac{6}{\delta_{sv}}$ 。例如圆球的 $\Omega = \frac{6}{\delta_v}$ ，圆柱体的 $\Omega = \frac{2}{l} \left(1 + \frac{2l}{d} \right)$ 。

(2) 颗粒群的粒径分布

对于气态非均一系而言，更重要的参数是颗粒群的粒度分布，它往往具有随机的性质，所以可用概率统计的方法来描述。

1. 粒径分布的表示法：

粒群内任一粒径 ($d = \delta_i$) 的数量是个随机变量，而且还可近似认为是个连续随机变量。但在实际测量时，只能人为地划分成一个个小区段 $\Delta\delta$ ，测出每个小区段范围内的颗粒数目或重量 (体积)。这个小区段的划分视测量方法的不同而异，例如Coulter计数器是按粒径对数值 ($\log\delta_i$) 的算术级数来划分的，测定的粒径被分成 1.59, 2, 2.52, 3.17, 4, 5.04, 6.35, 8, 10.1……等；ISO标准筛孔大小及显微镜读数量板往往用 $(\sqrt{2})^n$ 的几何级数来划分，测定的粒径表示成 1.4, 2, 2.83, 4, 5.66, 8, 11.3……等。对于几何级数划分，分区的间隔 ($\Delta\delta = \delta_{i+1} - \delta_i$) 被该区段的平均粒径大小 $\left(\frac{\delta_{i+1} + \delta_i}{2} \right)$ 除得的商是一个定值；而对于算术级数划分，此商随粒径变小而增大。此时若测量中有固定的小于 $1\mu\text{m}$ 的误差，则用算术级数划分时，颗粒越小，此误差的影响愈大；而用几何级数划分时，此误差的影响与颗粒大小无关。

为了更好地表示粒群内各种粒径的分布规律，往往采用下列两个参数：

$$\textcircled{1} \text{ 频率 (或分率) } f'_{ni} = n_i / \sum_{i=1}^N n_i \text{ (计数)}$$

$$\text{或} \quad f'_{gi} = g_i / \sum_{i=1}^N g_i \text{ (计重)}$$

$$\textcircled{2} \text{ 累积率 } D_{nk} = \sum_{i=1}^k n_i / \sum_{i=1}^N n_i \text{ (计数)}$$

$$\text{或} \quad D_{gk} = \sum_{i=1}^k g_i / \sum_{i=1}^N g_i \text{ (计重)}。$$

式中 n_i 、 g_i 分别表示在总数为 N 个分区段内任一区段 i 的颗粒数目或重量数。频率表示任一区段的颗粒数目 (或重量) 在粒群总数目 (或总重量) 中所占的分率；累积率则指从第一区段到第 k 区段所有的颗粒数目 (或重量) 在粒群总数目 (或总重量) 中所占的分率。显然必有如下关系： $\sum_{i=1}^N f'_i = 1$ ， $D_N = 1$ 。

计重频率与计数频率可以用下式互相换算： $f'_{gi} = n_i \delta_i^3 / \sum_{i=1}^N n_i \delta_i^3$ 。

表 1-3 粒径分布实测

粒径范围 $\Delta\delta(\mu\text{m})$	平均粒径 $\delta_{av}(\mu\text{m})$	实测粒数 n_i	计数频率 f'_{ni}	计数累积率 D_{nk}	$n_i\delta_{av}^3$	计重频率 f'_{gi}	计重累积率 D_{gk}
0~1.5	0.75	80	0.092	0.092	34	5×10^{-4}	5.2×10^{-4}
1.5~2.3	1.9	140	0.161	0.253	969	0.015	0.016
2.3~3.2	2.75	180	0.207	0.460	3742	0.057	0.073
3.2~4.5	3.85	220	0.253	0.713	12555	0.192	0.265
4.5~6	5.25	190	0.218	0.930	27493	0.421	0.686
6~8	7	60	0.069	1.000	20580	0.314	1.000
		$\Sigma n_i = 570$	$\Sigma f'_n = 1$		$\Sigma n_i \delta_{av}^3 = 65364$	$\Sigma f'_g = 1$	

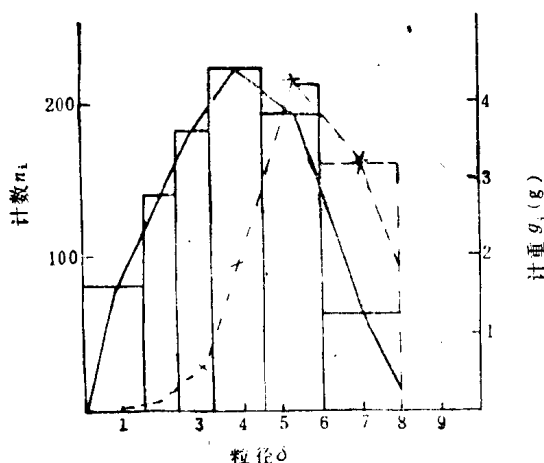


图 1-1 粒径分布实测示例

式中 $f(\delta_i)$ 就是随机变量 (粒径 d) 在点 δ_i 处的“概率分布密度”或简称“分布密度” (population density), 它是 δ_i 的连续函数, 可用某种数学模式来表达, 所以用它来代替频率 f_i 就方便多了。

分布密度在无穷区间 $(-\infty, \delta_i)$ 上的广义积分就是随机变量 d 的“分布函数”, 表为:

$$F(\delta_i) = P(-\infty < d < \delta_i) = \int_{-\infty}^{\delta_i} f(\delta_i) d\delta$$

对于粒径测定, $d < 0$ 是无意义的, 故可改写成 $F(\delta_i) = \int_0^{\delta_i} f(\delta_i) d\delta$, 它就是粒径值小于 δ_i 的所有颗粒的频率, 也就是前述的累积率, 我们通称为“筛下累积率”, 表示为:

$$D_i = \int_0^{\delta_i} f(\delta_i) d\delta \quad (1-1)$$

同样, 对于粒径值大于 δ_i 的所有颗粒的频率, 我们称为“筛上累积率”, 表示为:

$$R_i = \int_{\delta_i}^{\infty} f(\delta_i) d\delta \quad (1-2)$$

可见,

$$D_i + R_i = \int_0^{\infty} f(\delta_i) d\delta = 1$$

它们的示例见表1-3, 作成图则如图1-1所示。图上实线表示计数频率, 虚线表示计重频率。图上每一区段表示成一个长条格, 频率 f'_{ni} (或 f'_{gi}) 就是每个长条格顶部的中点。由于分段较大, 且不均一, 所以很难将这些点连成一条光滑曲线。

粒径范围分段 $\Delta\delta$ 越小, 测定结果越接近于实际情况, 但工作量很大。为解决此矛盾, 可用概率方法来改造频率的表示方法。对于大量统计的数字, 随机变量 d 的频率 f'_i 必在它的概率 $P(\delta)$ 的附近摆动, 即 $f'_i \rightarrow P(\delta)$, 于是可定义:

$$\lim_{\Delta\delta \rightarrow 0} \frac{f'_i}{\Delta\delta} = \lim_{\Delta\delta \rightarrow 0} \frac{P(\delta_i < d < \delta_i + \Delta\delta)}{\Delta\delta} = f(\delta_i)$$

而且,

$$f(\delta_i) = \frac{dD}{d\delta} = - \frac{dR}{d\delta} \quad (1-3)$$

现以表1-3的实测数据为例, 假设认为 $\Delta\delta$ 已足够小, 则可用近似式 $f(\delta_i) = \frac{f'_i}{\Delta\delta} = \frac{\Delta D}{\Delta\delta}$ 来算出各平均粒径 δ_i 处的分布密度与累积率, 见表1-4; 并作图, 如图1-2。曲线 $f(\delta_i)$ 下的面积应等于1, 这与频率 $\Sigma f'_i = 1$ 是同一意义。但表达方法不同了。计数与计重的 $f(\delta_i)$ 和 D 曲线是不同的, 这点在使用中应注意区分。

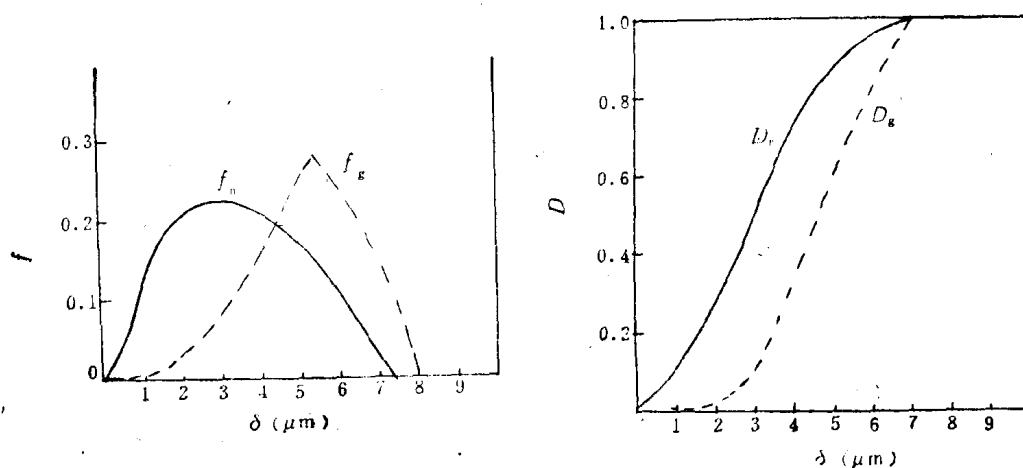


图 1-2 粒径分布曲线

表 1-4 粒径分布密度

粒 径 范 围 (μm)	平均粒径 δ_i (μm)	$\Delta\delta$ (μm)	$f'_{n,i}$	$f_n(\delta_i)$	D_n	$f'_{g,i}$	$f_g(\delta_i)$	D_g
0~1.5	0.75	1.5	0.092	0.061	0.092	0.001	—	5×10^{-4}
1.5~2.3	1.9	0.8	0.161	0.201	0.253	0.015	0.019	0.016
2.3~3.2	2.75	0.9	0.207	0.230	0.460	0.057	0.063	0.073
3.2~4.5	3.85	1.3	0.253	0.195	0.713	0.192	0.148	0.265
4.5~6	5.25	1.5	0.218	0.145	0.930	0.421	0.281	0.686
6~8	7	2	0.069	0.035	1.000	0.314	0.157	1.000
			$\Sigma f'_{n,i} = 1$				$\Sigma f'_{g,i} = 1$	

计数分布密度 $f_n(\delta_i)$ 与计重分布密度 $f_g(\delta_i)$ 的换算关系为:

$$f_g(\delta_i) = \frac{m_i}{\bar{m}} f_n(\delta_i) \quad (1-4)$$

式中 m_i —— δ_i 粒子的质量;

$\bar{m}$ ——全部颗粒的平均质量, $\bar{m} = \frac{\text{全部质量}}{\text{全部粒数}}$ 。

2. 代表粒径

在代表粒群内粒径分布规律的 $f(\delta_i)$ 及 D 曲线上, 有几个特殊点以后会常用到, 这就是:

① 众数点 (Mode) 即有最大分布密度的粒径, 用 δ_n 表示, 在该点处, $f(\delta_i)$ 曲线呈最

大极值, 即有

$$\frac{df(\delta_i)}{d\delta} \frac{d^2D}{d\delta^2} = 0$$

又是 D 或 R 曲线上的反折点。

② 中径 (Median diameter) 就是 $D=0.5$ 处的粒径, 用 δ_m 表示。

③ 平均径 (Mean diameter) 任一物系的颗粒分布的特征需用粒数、长度、表面积及体积等四个参数来表征, 为了简单, 也可用具有其中两个相同参数而颗粒大小均匀的另一物系来代表, 这另一物系的颗粒大小即为前一物系的颗粒平均径。由于所选的特征参数不同, 平均径的定义及大小也有许多种, 常用的见表1-5。

表 1-5 平均粒径的定义⁽²⁾

名 称	表 示 式
粒数, 长度平均径 (算术平均径)	$\bar{\delta}_{nl} = \frac{\sum l_i}{\sum n_i} = \frac{\sum \delta_i n_i}{\sum n_i} = \sum f'_{ni} \delta_i$
粒数, 表面平均径	$\bar{\delta}_{ns} = \sqrt{\frac{\sum S_i}{\sum n_i}} = \sqrt{\frac{\sum n_i S_i^2}{\sum n_i}} = \sqrt{\sum f'_{ni} \delta_i^2}$
粒数, 体积平均径	$\bar{\delta}_{nv} = \left(\frac{\sum V_i}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\sum n_i \delta_i^3}{\sum n_i} \right)^{\frac{1}{3}} = (\sum f'_{ni} \delta_i^3)^{\frac{1}{3}}$
长度, 表面平均径	$\bar{\delta}_{ls} = \frac{\sum S_i}{\sum l_i} = \frac{\sum n_i \delta_i^2}{\sum n_i \delta_i} = \frac{\sum f'_{ni} \delta_i^2}{\sum f'_{ni} \delta_i}$
长度, 体积平均径	$\bar{\delta}_{lv} = \sqrt{\frac{\sum V_i}{\sum l_i}} = \sqrt{\frac{\sum n_i \delta_i^3}{\sum n_i \delta_i}} = \sqrt{\frac{\sum f'_{ni} \delta_i^3}{\sum f'_{ni} \delta_i}}$
表面, 体积平均径	$\bar{\delta}_{sv} = \frac{\sum V_i}{\sum S_i} = \frac{\sum n_i \delta_i^3}{\sum n_i \delta_i^2} = \frac{\sum f'_{ni} \delta_i^3}{\sum f'_{ni} \delta_i^2} = \frac{1}{\sum \left(\frac{f'_{ni}}{\delta_i} \right)}$
体积, 矩平均径 (质量平均径)	$\bar{\delta}_{vm} = \frac{\sum M_i}{\sum V_i} = \frac{\sum n_i \delta_i^4}{\sum n_i \delta_i^3} = \frac{\sum f'_{ni} \delta_i^4}{\sum f'_{ni} \delta_i^3} = \sum (f'_{si} \delta_i)$

现用一例来说明各种平均径的意义。设有一物系, 共 10 个球状颗粒, 其直径依次为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 μm , 它们的总长度 $\sum l_i = 55 \mu\text{m}$, 总表面积 $\sum S_i = 385$, 总体积, $\sum V_i = 3025$, 总转矩 $\sum M_i = \sum V_i \delta_i = 25335$ 。于是 $\bar{\delta}_{ns}$ 是一个表示仍有十个颗粒且其总表面保持不变 (仍为 $\sum S_i = 385$) 的物系, 但它们每个颗粒均有相同的直径 $\bar{\delta}_{ns} = \sqrt{\frac{385}{10}} = 6.21 \mu\text{m}$ 。

而 $\bar{\delta}_{ls}$ 则表示具有相同的总长度及总表面的另一物系, 它们的每个颗粒直径为 $\bar{\delta}_{ls} = \frac{385}{55} =$

7.0 μm , 此时颗粒数就不能保持仍为 10 个了, 应变为 $\frac{55}{7} = 7.86$ 个才对。同理可分别算出:

$\bar{\delta}_{nl} = 5.5$, $\bar{\delta}_{nv} = 6.71$, $\bar{\delta}_{lv} = 7.43$, $\bar{\delta}_{sv} = 7.87$, $\bar{\delta}_{vm} = 8.37 \mu\text{m}$ 。由此可见, 不同的平均径是差别很大的, 究竟应取哪一种为宜取决于工艺过程的需要。例如: $\bar{\delta}_{nl}$ 近似等于计数测得的中径 δ_{mn} , 常用于研究蒸发现象及颗粒大小的比较; $\bar{\delta}_{vm}$ 近似等于计重测得的中径 δ_{mg} , 常用于研

究分离现象及颗粒大小的比较； $\bar{\delta}_{ms}$ 适用于研究颗粒的表面特性，如吸附现象及光密度等； $\bar{\delta}_{nv}$ 适用于气力输送及燃烧等研究，而 $\bar{\delta}_{sv}$ 与比表面 Ω 值有关，故适用于流化床内颗粒的传质、传热现象的研究。

3. 粒径分布的数学模式

既然 $f(\delta_i)$ 、 D 等都是连续函数，所以可以用某种数学模式来表示它。最简单的函数是包含两个常数——一个是粒群的代表粒径，另一个是以此代表粒径为准的粒径散布范围。有时还要增加一个常数以表示某个极限粒径，函数形式就要复杂些。现将常用的几种可能的函数形式表述如下：

① 正态分布函数

如图1-3所示，是一种对称分布，自然界内花粉的粒径分布很接近于它。分布密度为

$$f(\delta_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\delta_i - a)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-5)$$

式中 a ——常数，即众数点，就等于随机变量 d 的数学期望 M_d ，它表示为 $M_d = \sum_{i=1}^{\infty} \delta_i \rho(\delta_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta f(\delta) d\delta$ 。当 δ_i 的数目很多时，随机变量 d 的实测值的算术平均值将在它的数学期望 M_d 的附近摆动。对于正态分布， $a = M_d = \bar{\delta}_m$ ；
 σ ——常数，就是随机变量 d 的均方差，又称标准偏差，表示为： $\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (\delta_i - \bar{\delta})^2 f(\delta_i) d\delta$ 。可见， σ 越小，粒径分布就越密集在 $\delta = a$ 的周围，曲线就较狭。

筛下累积率为

$$D_i = \int_0^{\delta_i} f(\delta_i) d\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\delta_i} e^{-\frac{(\delta_i - \delta)^2}{2\sigma^2}} d\delta$$

置换积分变量，设 $\frac{\delta_i - \bar{\delta}}{\sqrt{2}\sigma} = t$ ，则可改写为：

$$D_i = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{-\bar{\delta}}{\sqrt{2}\sigma}}^{\frac{\delta_i - \bar{\delta}}{\sqrt{2}\sigma}} e^{-t^2} dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\int_{\frac{-\bar{\delta}}{\sqrt{2}\sigma}}^0 e^{-t^2} dt + \int_0^{\frac{\delta_i - \bar{\delta}}{\sqrt{2}\sigma}} e^{-t^2} dt \right]$$

因粒径不可能有负值，故在第一个积分项内，将 t 换成 $-t$ ，上下限也要变号并颠倒，就得到 $\int_0^{\frac{\bar{\delta}}{\sqrt{2}\sigma}} e^{-t^2} dt$ 的形式。这样，上式的两个积分项均变成了同一形式： $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt = \text{erf}(x)$ ，称为“误差函数”。当 $x > 2$ 时，此误差函数值很快就趋向于 1。而 $\frac{\bar{\delta}}{\sqrt{2}\sigma}$ 往往比 2 大得多，所以上式可近似为：

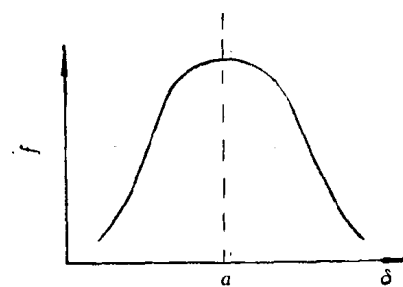


图1-3 正态分布

$$D_i = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\delta_i - \bar{\delta}}{\sqrt{\frac{2}{2}} \sigma} \right) \right] \quad (1-6)$$

若设 $\delta_i = \bar{\delta}$, 则 $D_i = 0.5$, 所以 $\bar{\delta} = \delta_m$, 就是中径。

若在概率坐标纸上作图, 其横坐标为等分的粒径值 $\delta_i (\mu\text{m})$, 纵坐标是等分的 $t = \frac{\delta_i - \bar{\delta}}{\sqrt{\frac{2}{2}} \sigma}$ 值, 但表示为与它相应的 $D_i = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(t)]$ 值; 由于 $t \propto \delta_i$, 所以 $D_i - \delta_i$ 关系在此坐标图上便呈一条直线, 如图1-4。图上有几个特殊点:

$$D_i = 0.5, \delta_i = \delta_m;$$

若令 $\delta_i - \bar{\delta} = \sigma$, 则 $t = \sqrt{\frac{1}{2}} = 0.707$, $D_i = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(0.707)] = 0.841$, 可找到 $\delta_{84.1}$ 点;

若令 $\delta_i - \bar{\delta} = -\sigma$, 则 $t = -0.707$, $D_i = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(-0.707)] = 0.159$, 又可找到 $\delta_{15.9}$ 点。

$$\text{于是可得: } \sigma = \frac{1}{2} (\delta_{84.1} - \delta_{15.9}) = \delta_{84.1} - \delta_{50} = \delta_{50} - \delta_{15.9}$$

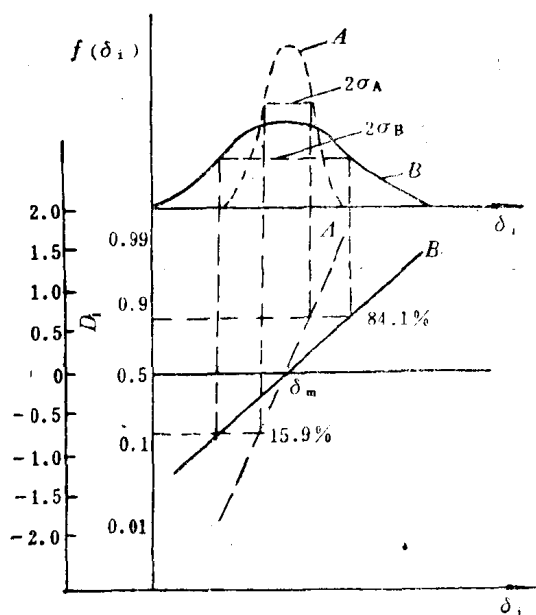


图 1-4 概率坐标上曲线

所以, 只要在概率坐标纸上作得 $D_i - \delta_i$ 直线, 再找出三个特殊点 $\delta_{84.1}$ 、 δ_{50} (即 δ_m) 和 $\delta_{15.9}$, 就可求得公式中的两个常数 $\bar{\delta}$ 、 σ 。从而求出 $f(\delta_i)$ 函数, 画出 $f(\delta_i) - \delta_i$ 曲线如图1-4上的 A、B 曲线。由图可见, 若两种粉尘的 δ_m 相同, 而 σ 不同, 则两条 $f(\delta_i)$ 曲线的对称线重合, 只是宽度不同。说明粒径分布范围不同, 它的 D_i 线斜率也不同, 这就是粉尘的均方差 σ 值的物理意义。

②. 对数概率分布函数

工业气溶胶内颗粒粒径分布较多的是接近于对数概率分布, 只是在两端 (粗粒及细尘) 有误差, 见图1-5, 在等分坐标上, $f(\delta_i)$ 呈非对称性。若模拟正态分布, 使之对称, 则必须变更坐标, 另设一个代表粒径的参数 $\xi = \lg \delta$, 则有

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\xi} \exp \left[-\frac{(\xi - \bar{\xi})^2}{2\sigma_\xi^2} \right] \quad (1-7)$$

$$D_i(\xi) = \int_0^{\xi_i} f(\xi) d\xi = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\xi_i - \bar{\xi}}{\sqrt{\frac{2}{2}} \sigma_\xi} \right) \right] \quad (1-8)$$

在对数概率坐标图上, 横坐标是对数坐标 $\lg \delta = \xi$, 但以 δ 表示; 纵坐标仍用 $t = \frac{\lg \delta - \lg \bar{\delta}}{\sqrt{\frac{2}{2}} \sigma_\xi}$ 等分, 但标以 $D_i(\xi)$ 数值; 则同样 $D_i(\xi) - \delta$ 在这种坐标图上仍为一条直线, 而且