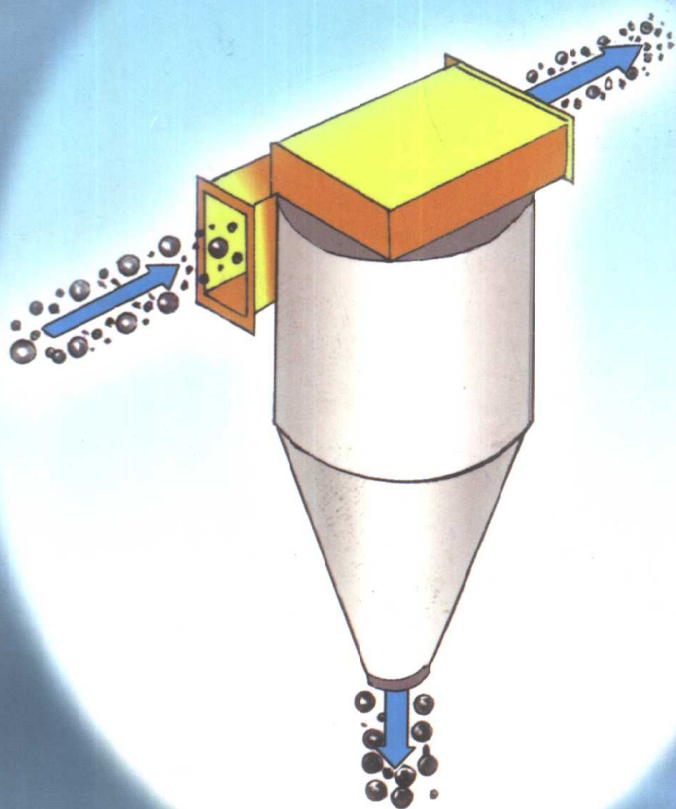


刘爱芳 编著

粉尘分离 与过滤

FENCHEN FENLI YU GUOLÜ



冶金工业出版社

粉尘分离与过滤

刘爱芳 编著

北京
冶金工业出版社
1998

内 容 提 要

全书分为四篇，第一、二篇内容为粉尘性质及粉尘危害性、粉尘颗粒分级试验、试验用标准粉尘和一般防尘技术；第三、四篇介绍粉尘净化技术。

本书可供从事环保工作人员参考，也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

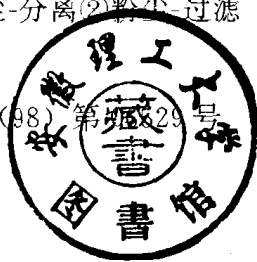
图书在版编目 (CIP) 数据

粉尘分离与过滤/刘爱芳编著. —北京: 冶金工业出版社, 1998. 9

ISBN 7-5024-2205-6

I. 粉… II. 刘… III. ①粉尘-分离②粉尘-过滤 IV. X
513

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 513 号



出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 黄淦祥 美术编辑 李心 责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波
北京新兴胶印厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1998 年 9 月第 1 版, 1998 年 9 月第 1 次印刷

850×1168mm 1/32; 9.125 印张; 243 千字; 282 页; 1-1000 册

18.00 元

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

随着科技水平的提高和经济实力的增长，人们的环保意识不断提高，国际环保组织和国家主管部门对环保的法规和要求也在日趋完善和严格。我国是世界上大气污染最严重的国家之一，特别是在工业、人口集中的城市，污染程度更为严重。尽管近年来汽车排气造成的大气污染日益严重，有些大城市已经出现石油型污染趋势。但是，由于我国是一个以煤为主要能源的国家，煤炭占商品能源总消费的 75.6%（据 1991 年统计），大气污染依然是以烟尘和二氧化硫为主的煤烟型污染。据《1994 年中国环境年鉴》统计，1993 年全国废气排放量达 11 万亿 m^3 （标准状态）（不包括乡镇企业），其中工业废气量占 85% 左右。烟尘排放量为 1416 万 t，工业粉尘排放量为 617 万 t。全国城市中总悬浮微粒的年均浓度为 $108\sim 815\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其中北方城市的平均为 $407\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；南方城市平均为 $251\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。北方的污染重于南方。按国家标准新规定（总悬浮颗粒物的年均浓度对二、三级地区分别为 200、 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）衡量，还难保证达标。在目前，工业生产的污染物排放量依旧是可观的。如一座 100 万 kW 的火力发电厂，每年耗煤 300 万 t，同时排放出 76 万 t 灰尘、6.5 万 t 二氧化硫、2kt 一氧化碳和其它污染物。又如炼铁厂每炼 1t 矿石排出 $4.2\sim 164\text{kg}$ 粉尘；精炼 1t 粗铜平均排放烟气 1340m^3 （标准状态），这些烟气中包含二氧化硫和粉尘。所以，在工业快速发展的同时，环保事业必须同时发展，以控制污染，保护环境。

防止大气污染最彻底的办法是从根本上杜绝污染物发生，选择无污染生产工艺和原材料以及无污染能源。然而，这些往往是短期内难以实现的。比如关于能源，人们认为太阳能是一种取之不尽、用之不竭的清洁能源。太阳能给地球表面的辐射量总和为 $5.45\times 10^{21}\text{J}/\text{a}$ ，相当于 70 年代全世界能源年耗量的几万倍。将太阳能转换为电能即可利用。据估计到 2010 年，全世界各种太阳能

电站的总功率将达 $128.5 \times 10^6 \text{kW}$ ，其中主要是热动力型的。有人称太阳能为未来能源之星。可是目前太阳能的直接利用还只限于烘干物料、粮食、房屋采暖和热水供应等以生活需要为主的范围，而且其分布局限性很大。在国外，发展太阳能电力的投资比其它形式发电高 5~10 倍。全世界的核电站已有 400 多座，而且正在不断发展之中。与火力发电站相比，它直接对大气污染方面大有改善，然而因其造价较高，固体废料处理和放射性泄漏的问题并未彻底解决。所以，根治工业生产中的污染是人类长期力争的目标。目前除了采取多种措施防止或减少污染发生量之外，还必须对无法避免的污染进行治理。特别是微细粉尘问题，必须引起人们的重视。

基于上述情况，笔者结合自己和同事们的工作成果和多年实践经验编写出《粉尘分离与过滤》一书，以奉献给从事环境保护事业的同仁和劳动卫生以及其他有关行业的工程技术人员。

在编写本书过程中，冶金部建筑研究总院烟气治理研究室的多位同志为本书提供资料，张迪光同志在整书编写过程中给予了大力支持，对本书主要内容进行了审校，胡荣泽、徐冰青和王庚辰等同志分别对本书不同章节进行了审查。对以上各位同志及书中所引用文献的作者一并致谢。由于编著者水平所限，谬误或欠妥之处欢迎指正。

编著者
一九九七年十月



作者简介

刘爱芳，1934年生于陕西省，高级工程师。1961年毕业于莫斯科建筑工程学院，回国后，一直从事环境保护、烟尘治理工作。60年代曾参加过除尘工作调查、现场新型除尘器试点和测试技术研究工作。70年代以来承担或主持的科研项目主要有：化纤无纺布滤材的试制和应用研究、空气过滤器系列产品的研制以及相应标准图集和试验标准的合作编制、标准试验粉尘的研制和推广等。在全国性学术会议和杂志上发表论文多篇。获国家级奖励一项，部级奖励三项，院级奖励五项。连续多年被单位评为先进工作者。

目 录

第一篇 粉尘性质、颗粒分级试验	1
第一章 粉尘的基本性质	2
第一节 概述.....	2
第二节 粉尘的物理特性.....	8
第三节 粉尘的化学组成及其危害.....	31
第二章 粉尘粒径分布的测试	38
第一节 测试方法简介.....	38
第二节 测量数据的统计整理.....	52
第三节 粒径实测的结果对比.....	55
第四节 综述.....	58
第三章 粉末材料的颗粒分级	61
第一节 分离效果的显微检验.....	62
第二节 重复分离试验.....	65
第三节 重复分离的规律性.....	70
第二篇 环境粉尘模拟与防尘技术措施	75
第四章 空气的性质	76
第一节 空气的物理性质.....	76
第二节 空气的流动特性.....	82
第五章 大气环境与试验用标准粉尘	87
第一节 试验粉尘的作用和分类.....	87
第二节 对国内环境粉尘的考察.....	91
第三节 试验粉尘标准样品(一)——黄土尘.....	98
第四节 试验粉尘标准样品(二)——模拟大气尘.....	99
第五节 试验粉尘标准样品(三)——煤飞灰.....	101
第六节 国内其他的试验粉尘.....	104
第六章 工业防尘技术措施	108
第一节 粉尘抑制措施.....	108
第二节 一般干式除尘器.....	113
第三篇 纤维过滤器	121

第七章	纤维过滤材料	124
第一节	纤维材料的过滤原理	125
第二节	纤维滤材的试验研究	133
第三节	玻璃纤维过滤材料	143
第四节	烟气净化用的纤维滤材	148
第八章	空气过滤器	156
第一节	自动卷绕式空气过滤器	158
第二节	方格单元式空气过滤器	167
第三节	新型组合式空气过滤器	174
第九章	空气过滤器试验标准	178
第一节	国外一般空气过滤器试验方法及其发展	178
第二节	国内的试验方法及标准	184
第三节	YF-1型圆盘发生器	187
第十章	袋式除尘器	190
第一节	袋式除尘器的分类	191
第二节	反吹清灰袋式除尘器	197
第三节	脉冲喷吹清灰袋式除尘器	208
第四节	袋式除尘器的选用	215
第四篇	电除尘器	223
第十一章	电气除尘的基本原理	225
第一节	气体电离与电晕放电	226
第二节	电气除尘的物理基础	231
第三节	电晕放电的伏安特性	241
第四节	电除尘器的理论效率	245
第十二章	电除尘器的本体结构和分类	248
第一节	电除尘器的主要机械部件	248
第二节	电除尘器分类	256
第三节	较晚出现的电除尘器形式	259
第十三章	电除尘器供电	264
第一节	电除尘器所需电能的提供与调节	264
第二节	脉冲电源	270
第十四章	电除尘器的应用	273

第一节	影响电除尘器性能的各种因素	273
第二节	电除尘器供电条件	279
第三节	电除尘器的运行	280
参考文献	281

第一篇 粉尘性质、颗粒分级试验

人类生存一刻也离不开空气，空气新鲜可使人生活舒畅，空气污染可使人得各种疾病。在大气污染中，粉尘为主要污染物质。

粉尘的基本特性与它们的危害程度和治理方法密切相关。在采取防尘措施，选择除尘设备时都要依据粉尘性质为基本条件来进行。同样，粉尘性质也是粉末材料制备、生产和应用的主要依据。粉尘的粒度大小或粒径分布是粉末材料（或粉尘）特性的重要指标之一。在从事除尘净化和粉末制备或处理工作中，粒径分布的测试是最常用的分析项目，是一种基本手段，也是从事粉尘研究的基础部分。

粒径分布试验，实质上就是对多分散性粉末样品进行颗粒分级；通过计算得出该样品粒级组成百分比关系的过程。研究粉尘颗粒分级的规律，对从事粉末研究和粉末材料生产都是有用的。粉尘的分离既包括不同颗粒（如尺寸、质量大小、相异等）之间的分离，又包括从气-固混合物中将固体颗粒分离出来，从而使气体得到净化的气-固分离。

第一章 粉尘的基本性质

第一节 概 述

一、空气的重要性

大气是人类生存最重要的环境要素。首先,人需要空气中的氧气以维持生命。人可以在绝食断水条件下生存多日,却一刻都不能中止呼吸空气。一个成年人平均每天要吸入 $10\sim 20\text{m}^3$ 空气,按重量计,这相当于他每天所需食物和饮水量的 $5\sim 10$ 倍。由大气构成的这个天然保护层,使地球保持着一个适合人类生存的环境。人在这个环境中要从事的多种生产与生活活动,都离不开空气。大气作为一种动力资源,人们可以利用风车发电,带动机器;可用压缩空气的力量从事钻探、钢材切割和各种流体材料的引射喷涂;空气也可以作为原料制出氧和氮;作为传热和制冷的媒体,空气被用在原材料的烘干、房屋采暖、发热物体的冷却通风、建筑物内的空气调节、有害物质含量的稀释等等。人类自从学会用火以后,社会发展进入了新的历程,现代能源更是维系人类活动的纽带。矿物燃料的燃烧是人在生活和生产活动中每天都在持续进行的过程。燃烧就是燃料的氧化分解过程,也就是消耗燃料和空气的过程。燃烧的结果使人获得一定收益,同时也向环境中排放出有害气体和颗粒物。人在利用大气资源的同时又污染了大气环境。随着现代工业技术的迅速发展和经济腾飞,大气环境受到了越来越严重的污染。人类已经面临着环境污染与生态平衡被破坏的双重挑战。

二、大气污染的危害

大气污染对人类的危害是多方面的,其方式有直接的和间接的;其作用有时急促,有时缓慢;其后果有的明显严重,有的隐蔽,一时难以直接感觉到,只有通过一定的调查分析和统计对比才能确定。

1. 近代著名的污染事例

近代著名的污染事例举例如下：

(1) 1948 年美国多诺拉镇钢铁和化工生产污染，发生 4 天大雾，造成当地半数居民生病。

(2) 1952 年 12 月，由于大西洋暖流与下面潮湿逆温寒流在伦敦上空相叠，致使惯用壁炉取暖的居民连续 4~5 天被笼罩在昏黄烟雾之中。烟雾中悬浮的是小颗粒煤渣、二氧化硫和其它污染物。这些污染物小颗粒可被吸入人体，而且相当部分可能粘附于肺脏或气管壁上，结果造成 4000 人窒息而死，慢性死亡人数达到 8000 人之多。后来分析，这烟雾中的水珠正是由于含湿含硫气体粘附在空气中飘浮的固体核上而形成的。可见，微小尘埃颗粒是这次祸害的核心。

(3) 1986 年 4 月，前苏联切尔诺贝利核电站 4 号反应堆内发生化学性爆炸，不但毁坏了反应堆机房引起火灾，造成多人伤亡，而且放射性物质泄漏还使 6 万 km² 土地受污染，其中有 300km² 严重污染区的农田荒芜，居民远走他乡。核辐射波及人口近 300 万人。仅就参加事故救险工作的 20 万人中，其中已有 6000 人死亡或残废。事过 10 年余，虽然该国政府已经花费几十亿美元进行事故治理，但问题仍未得到彻底解决，国际社会对此极为关注。

2. 呼吸系统疾病上升

统计数字表明，在工业污染地区，呼吸系统疾病明显上升。英国近 50 年肺癌发病人数增加了 40 倍。据流行病学调查^[1]，我国空气污染导致呼吸系统疾病发病率的归因百分比为 30% 以上。据 20 个统计资料较全的大中城市分析，每年因大气污染所致慢性支气管炎患者为 150 万人，呼吸系统疾病死亡人数为 2.3 万人，肺心病患者 17.7 万人，肺心病死亡人数 1.3 万人。

3. 对环境的多方影响

一切生命过程，一切动物、植物和微生物都离不开大气。有害气体形成酸雾、酸雨，会影响农作物，破坏林木和草场；由于烟雾弥漫，达到一定程度就要降低能见度，直接影响航空、航海

和陆地交通；大气污染对珍贵文物和物质财富损害所致经济损失是巨大的。如意大利政府曾花费 2 亿美元修复本国受损坏的古迹；原联邦德国为保护科隆大教堂免受污染损害，每年要花费 200 万美元；美国为修复受损的自由女神曾花费 1 亿美元。大气污染对人类和环境的影响是多方面的，务必采取防治措施。

三、大气污染的新定义

关于大气污染，曾有学者定义为：“所谓大气污染，就是指散播在大气中的有害气体及颗粒物积累到大自然自净过程中稀释、沉降等作用已经不能再降低的浓度，在持续时间内有害于生物及非生物的现象。”而现在，较为新颖、完整的提法^[2]是：某种物质或能量在大气中出现，其数量和持续时间能够引起对人、植物、动物生命的危害、或者对人造材料及构筑物的损害，或者能引起天气、气候变化，对人类活动特点如生活舒适、愉快等产生不良影响的就是“大气污染”。

按照国际标准化组织（ISO）作出的定义是：“大气污染通常系指由于人类活动和自然过程引起某种物质进入大气中，呈现出足够的浓度，达到足够的时间，并因此而危害了人体健康、舒适感或环境的现象。”

关于大气污染三种定义不完全一致，但共同点为：在大气中出现某种物质（或包括能量），其数量超过某限度，持续时间也超过某限度，并且产生了对人对环境的危害。前两种提法未指明有害物的来源，而强调了危害的方面；后者却指明了这种有害物的来源是由于人类活动和自然过程引起的。在环境保护技术和工业卫生工作范围内，通常是围绕人类活动，即人的生产活动和生活活动过程中所产生的污染物的预防和治理。

四、微细颗粒物的危害性

空气中的污染物按其存在状态可分为气态污染物与气溶胶态污染物两大类。按照 ISO 的定义，气溶胶态污染物系指“沉降速度可以忽略的固体粒子，液体粒子或固体和液体粒子在气体介质中的悬浮体”。从空气污染控制的角度，按照气溶胶的物理性质，可将

其分为粉尘(dust)、烟气(fume)、飞灰(flyash)、煤烟(smoke)、液滴(droplet)、霭(mist)、雾(fog)等。本书主要讨论固体颗粒物,重点是来自生产过程中的固体颗粒物,如在粉体物料的输送、生产、装卸等机械过程中产生的颗粒物;由于燃烧、高温熔融和化学反应等过程中所形成的颗粒物等。

上述这些粉尘、烟、飞灰等都是颗粒污染物。在大气质量监测中,对总悬浮颗粒物(TSP)的测定,就是对这些污染物作总体评价。测定结果是以单位体积空气中所含颗粒物的重量 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 表示。TSP测定中的计重不包括液珠成分,而是指通常小于 $100\mu\text{m}$ 的固体粒子总含量。大气颗粒物中大于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒物称为降尘。其测定结果以 $\text{t}/(\text{月}\cdot\text{km}^2)$ 为单位。大气颗粒物中小于 $10\mu\text{m}$ 的部分称为飘尘。这部分颗粒从质量上占成分不大,但由于主要成分均属于可吸入性粉尘,对人体健康危害性大。在大气中飘浮时间最长久的是小于 $2\mu\text{m}$ 细微颗粒,它们粒径小、相对表面积大、吸附性强、扩散面宽、容易吸附煤烟中的致癌物质,与肺癌的发病率有明显的相关性。大气污染的控制主要针对直径为 $0.01\sim 100\mu\text{m}$ 的颗粒物,其中最重要的是小于 $10\mu\text{m}$ 的细微尘粒,这部分粉尘危害性最大,而治理的难度也最大。

五、除尘器的用途和分类

在各产尘点设置吸风罩,通过管道气路将含尘气体输送至除尘装置,在其中进行气-固分离之后,将粉尘收集于该除尘装置内,而清洁气体被引入总管道或直接排入大气的整套设备,即是除尘系统,而除尘器是该系统的主要组成部分。从通风除尘的角度看,粉尘就是能够较长时间呈浮游状态存在于空气中的一切固体小颗粒,是一种分散体系,叫做气溶胶,其中空气为分散介质,固体颗粒为分散相。除尘器就是把这种固体小颗粒从气溶胶中分离出来的装置。

按作用原理,除尘器可分为如下几类:

(1) 干式机械除尘器 主要指应用粉尘惯性(包括离心力)作用、重力作用而设计的除尘设备,如沉降室、惰性除尘器、旋风

除尘器等，主要针对高浓度、粗粒径粉尘的分离或浓集而采用。

(2) 湿式除尘器 依靠水力浸润来分离、捕集粉尘颗粒的除尘装置，如喷淋塔、洗涤器、冲激式除尘器、文氏管等。在处理生产过程中发生的高浓度、大风量含尘气体场合采用较多。对较粗的，亲水性粉尘的分离效率比干式机械除尘器要高。

(3) 颗粒层除尘器 以不同粒度的颗粒材料堆积层为滤料来阻隔过滤气溶中所含粉尘的设备。多用在建材、冶金等生产过程中的排尘点，常常是为过滤浓度高、颗粒粗、温度较高的含尘烟气。

(4) 纤维过滤器 该过滤器以纤维织造物或填充层为过滤介质的除尘装置。其用途、形式、处理风量规模和作用效率各方面都有宽阔的范围。主要用在捕集微细粉尘的场所，既在排气除尘系统上采用，又在进风系统上采用。近年来，由于新型滤材的不断开发，纤维过滤技术发展随之加速，新产品不断出现，应用领域日益拓宽。

(5) 电除尘器 该除尘器是把含尘气流导入静电场，在高压电场作用下，气体发生电离，产生电子和正离子，它们分别向正、负两极移动，当粉尘颗粒在流经工作电场时负上电荷，以一定速度向与它们所负电荷符号相反的沉降极板移去，并在那里沉降下来，从而脱离开气流，被收集于除尘器之中的除尘装置。这种除尘器效率高，阻力低，维护管理方便。它在捕集细小尘粒方面与纤维滤袋除尘器有异曲同工之效果。

六、粉尘性质与除尘方法

粉尘的物理化学特性是选择除尘方法的重要依据。为了正确的选择、设计、制造、安装和应用、维护除尘设备，必须了解需处理的含尘气体，尤其是需分离的粉尘的特性。比如，粘性大的粉尘容易在除尘器及管道内壁粘附，天长日久积累会影响系统正常运转。所以，如果采用干式除尘器，尤其是采用织物袋滤器时需考虑堵塞气路、粘糊滤袋的可能性；对憎水性粉尘，不宜用湿法除尘；对温度过高的含尘气体、或是粉尘与腐蚀性气体同时并存的烟气，不适宜采用一般的织物过滤器；对比电阻过高或过低

的粉尘，采用普通电除尘器的效果欠佳。

在粉尘的物理特性中，粉尘粒径大小，或称粒径分布（即各种粒径的占成关系）是最关键的特征数据，因为粒径大小与粉尘的其它许多特性是相关连的。国外不少专业文献常提供谱图示出粉尘类别、粒径范围和应采用除尘设备的相关关系，图 1-1 是从中抽取一部分，借以阐述这里要讨论的粉尘分离与过滤方法。图中

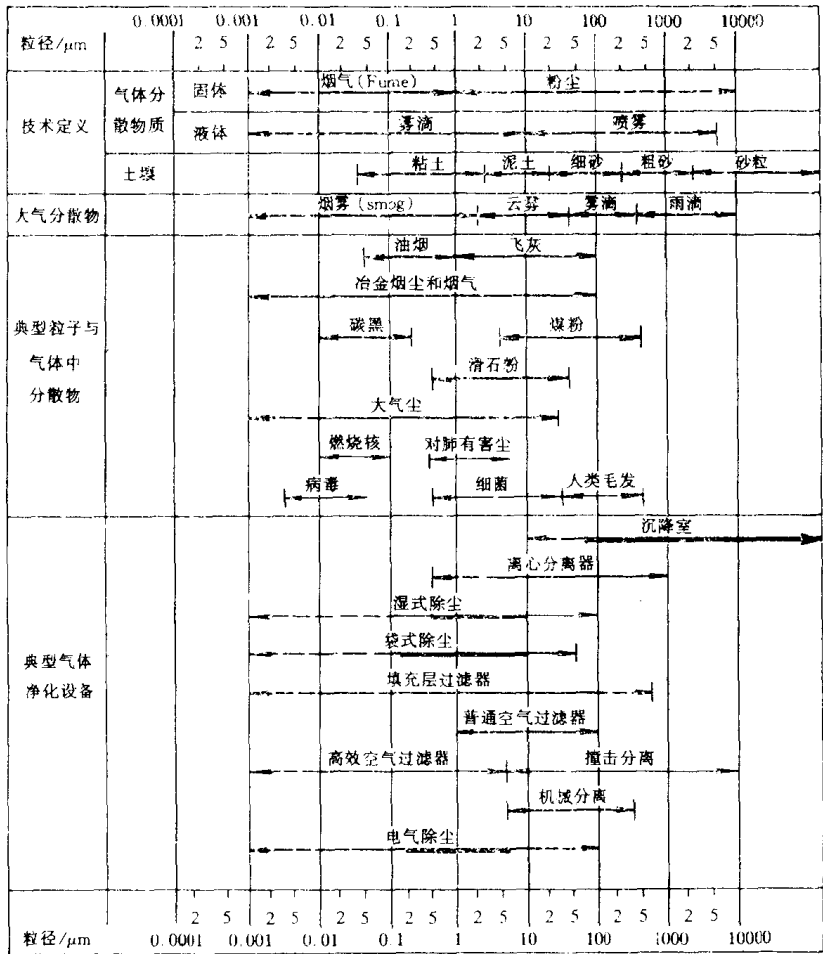


图 1-1 粉尘粒径特征和相应的除尘设备

所示线谱较为宽阔，如粒径延伸至 $10^4\mu\text{m}$ 以上。通常论及粉尘的粒径只指小于 $100\mu\text{m}$ （线谱中有时延伸至 $200\mu\text{m}$ ）的颗粒。

一般除尘器与粉尘粒径的适用关系为：

重力沉降室	大于 $50\mu\text{m}$
一般惯性除尘器	$20\sim 50\mu\text{m}$
旋风除尘器	
普通规格	$20\sim 200\mu\text{m}$
高效规格	$5\sim 30\mu\text{m}$
湿法除尘器	
水浴除尘器	$1\sim 10\mu\text{m}$
文氏管除尘器	$0.5\sim 10\mu\text{m}$
滤袋除尘器	$0.2\sim 10\mu\text{m}$
电除尘器	$0.2\sim 5\mu\text{m}$

除了粉尘自身的物理特性以外，分散介质的特性是选择除尘方法不可忽视的条件。气体的温度、湿度、成分以及流体特征等也对除尘器类别、运行参数及最终除尘效果有一定影响。

对于已经分离出来的粉尘，如从除尘器灰斗排泄出的粉尘、降落在地面或设备上的积尘、从含尘气体中抽滤出的采样粉尘等，它们的物理化学性质与粉尘的母体材料没有本质差别，它们在基本特性研究分析中所用方法应是相通的。从保护小环境中空气的清洁度着眼，劳动保护、工业卫生、建筑通风、甚至空气净化技术等专业领域，都有共同的目标。所以，粉尘的分离与过滤问题不仅与防治大气污染有关，且与材料工艺、粉体物生产、劳动保护、通风等等多种专业领域都有一定的边缘联系。

第二节 粉尘的物理特性

一、粉尘的密度

物质密度的固有定义本应是单位体积的物质质量。但粉尘或工业粉体物的单位容积中往往包括颗粒自身体积、颗粒之间的空隙体积、颗粒有些还有外开口和内闭孔以及附面膜体积等部分。所