

蒋仲安 著

湿式除尘技术及其应用

煤炭工业出版社

湿式除尘技术及其应用

蒋仲安 著

1. ISBN 7-5021-4001-1 2. ISBN 7-5021-4002-9 3. ISBN 7-5021-4003-7 4. ISBN 7-5021-4004-5

煤炭工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

湿式除尘技术及其应用/蒋仲安著. —北京:煤炭工业出版社, 1999. 10

ISBN 7-5020-1819-0

I. 湿… II. 蒋… III. 湿式除尘 IV. X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 61620 号

湿式除尘技术及其应用

蒋仲安 著

责任编辑:廖永平 刘社育

*

煤炭工业出版社 出版发行

(北京朝阳区曙光里 8 号 邮政编码 100016)

北京地质印刷厂印刷 新华书店经销

*

开本 850×1168 1/32 印张 9

字数 227 千字 印数 1~1,000 册

1999 年 10 月第 1 版 1999 年 10 月第 1 次印刷

书号 4590 定价:15.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

内 容 提 要

本书是笔者在多年对湿式除尘技术的科学研究的基础上,吸取国内外湿式除尘领域中的新经验、新成果,结合现场实际情况而撰写的。

书中较系统地研究和分析了与湿式除尘有关的气固动力学、除尘机理、泡沫和湿润剂除尘、除尘器、除尘器的脱水装置、除尘器的相似理论以及除尘器的应用等方面的基本理论、工作经验和科研成果;同时对粉尘的性质、危害、粒度分布和湿式除尘器的附属设施等进行了较全面的介绍。其中不少理论和经验公式的推导计算、图表、实验数据都是通过大量模型实验和现场试验得到的,并通过对自行研制的新型湿式除尘器及其在现场应用过程的介绍,使读者了解新型除尘器的研制、除尘器性能的测定和计算以及评价除尘器性能指标等一整套方法。

本书可供从事除尘研究的科研人员、现场工程技术人员和有关院校师生参阅。

前 言

现代工矿企业的发展,极大地促进了社会的发展和人类生活水平的提高,但是也给人类带来许多灾难,其中之一就是空气污染。粉尘是空气中主要污染物之一,它是造成硅肺病、尘肺病等职业病的根源。因此,有必要采取有效措施,降低尘源的粉尘浓度和控制尘源的扩散,保证作业环境的卫生条件和工人的身体健康。目前,随着人们环境保护意识的增强,控制大气污染、控制粉尘的排放量,已越来越引起环保工作者的重视。

控制粉尘污染的措施和设备很多,其中湿式除尘技术就是一种行之有效的办法。由于湿式除尘具有结构简单、使用方便、造价低、除尘效率高等特点而被工矿企业广泛采用。笔者在多年对湿式除尘技术的科学研究的基础上,吸取国内外湿式除尘领域中的新经验、新成果,结合现场实际情况,撰写了这本专著,以期对除尘技术的发展与设备的研制在理论和实践方面有所贡献。

本书从实用角度出发,较系统地研究和分析了与湿式除尘有关的气固动力学、除尘机理、泡沫和湿润剂除尘、除尘器、除尘器的脱水装置、除尘器的相似理论以及除尘器的应用等方面的基本理论、工作经验和科研成果;同时对粉尘的性质、危害、粒度分布和湿式除尘器的附属设施等进行了较全面的介绍。其中不少理论和经验公式的推导计算、图表、实验数据都是通过大量模型实验和现场试验得到的,并通过对自行研制的新型湿式除尘器及其在现场应用过程的介绍,使读者了解新型除尘器的研制、除尘器性能的测定和计算以及评价除尘器性能指标等一整套方法。

书中第二、三、六、八、九章的部分成果是笔者在攻读博士学位期间受中国矿业大学(北京校区)黄元平教授的指导而取得的;第四章的部分内容是笔者在进行博士后研究期间受北京科技大学资源工程学院李怀宇教授的指导而取得的;第九章中的现场工业性试验得到了邢台矿务局东庞煤矿陈立武(总工程师)、谢宏、杜丙申、单占会等工程技术人员的支持和帮助。在此一并表示衷心的感谢。

书中的不妥之处,恳请读者批评指正。

蒋仲安

1999年9月

目 录

1 概 论	1
1.1 粉尘的产生和危害	1
1.2 粉尘的物理化学性质	4
1.3 粉尘的粒度、分散度和粒度分布函数	10
1.4 除尘器的类型及其评价指标	25
2 气体中尘粒的动力学	30
2.1 气体和尘粒的运动方程	30
2.2 尘粒的等速直线运动	32
2.3 尘粒的非等速直线运动	41
2.4 尘粒的曲线运动	44
2.5 尘粒的扩散运动	49
2.6 尘粒在风流中的分布	57
2.7 尘粒在管道中的运动特性	64
3 湿式除尘机理	67
3.1 单一液滴的捕集机理和捕集效率的计算	68
3.2 液滴群的分级效率的计算	78
3.3 水膜除尘机理	83
3.4 除尘效率与分级效率之间的关系	86
3.5 湿式除尘器的性能分析和计算	89
4 泡沫和湿润剂除尘	115
4.1 泡沫除尘	115
4.2 湿润剂除尘	131
5 湿式除尘器	139

5.1	概况	139
5.2	湿式除尘器的喷雾装置	142
5.3	低能和中能湿式除尘器	153
5.4	文丘里除尘器	174
5.5	湿式电除尘器	181
6	湿式除尘器的脱水装置	186
6.1	脱水器的研究概况	186
6.2	常用的脱水器结构形式	189
6.3	百叶窗式脱水器	194
6.4	多孔栅板和网孔脱水器	199
6.5	脱水器脱水性能的计算	202
6.6	脱水器脱水机理的定性分析	209
7	湿式除尘器的附属设施	213
7.1	通风机	213
7.2	卸尘装置和泥浆的处理	227
7.3	消音装置	229
8	湿式除尘器的相似理论	238
8.1	气固两相流动过程中的相似准则	238
8.2	离心力作用下液滴和尘粒的分离准则	242
8.3	尘粒扩散过程中的相似准则	244
8.4	水浴捕集尘粒的相似准则	245
8.5	相似准则数在模型试验中的应用	247
9	湿式除尘技术的应用	249
9.1	除尘器性能的测定方法	249
9.2	除尘器性能的测定结果和分析	253
9.3	除尘器的系列化	263
9.4	除尘器的应用	266
9.5	泡沫除尘的应用	274
参考文献		279

1 概 论

1.1 粉尘的产生和危害

1.1.1 粉尘

粉尘是一种微细固体物的总称,其粒径通常在 $100\ \mu\text{m}$ 以下。常把悬浮于空气中的粉尘称为浮尘(或飘尘),把从空气中沉降下来的粉尘称为落尘(或积尘);浮尘和落尘在不同的风流环境下是可以相互转化的。落尘在受外力作用时,能再次飞扬并悬浮于空气中,称二次飞扬。除尘技术的主要研究对象是浮尘和落尘的二次扬尘。

在自然界中,粉尘是由风力作用产生的;在人类的生产活动中,粉尘主要产生于物料的生产、加工、燃烧等过程中,如破碎、爆破、钻孔、切削、运输等生产过程,均有大量粉尘产生。粉尘具有较高的分散度。

1.1.2 粉尘的分类

目前对粉尘的分类还没有统一的方法。这里,按粉尘的性质和形态,可以将粉尘分类如下:

1) 按粉尘的粒径分类

(1) 粗尘 粒径大于 $40\ \mu\text{m}$, 相当于一般筛分的最小粒径, 在空气中极易沉降。

(2) 细尘 粒径为 $10\ \mu\text{m} \sim 40\ \mu\text{m}$, 在明亮的光线下, 肉眼可

以看到,在静止空气中作加速沉降。

(3) 微尘 粒径为 $0.25\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$,用光学显微镜可以观察到,在静止空气中呈等速沉降。

(4) 超微粉尘 粒径小于 $0.25\ \mu\text{m}$,用电子显微镜才能观察到,在空气中作布朗扩散运动。

2) 按粉尘的生产工序分类

(1) 粉尘 各种不同生产工序或生产不同的物料的过程中而生成的微细颗粒。

(2) 烟尘 由燃烧、氧化等伴随着物理化学变化过程所产生的固体微粒,粒径一般很小,多在 $0.01\ \mu\text{m} \sim 1\ \mu\text{m}$ 范围,可长时间悬浮于空气中。

3) 按测定粉尘浓度的方法分类

(1) 全尘 是指各种粒度粉尘的总和,在实际工作中,通常把矿尘浓度近似作为全尘浓度。

(2) 呼吸性粉尘 是对人体危害最大、粒径小于 $7.07\ \mu\text{m}$ 的粉尘,是粉尘控制的主要对象。

4) 其他分类

(1) 按物料种类,分为煤尘、岩尘、石棉尘、铁矿尘等。

(2) 按有无毒性物质,分为有毒、无毒、放射性粉尘等。

(3) 按爆炸性,分为易燃、易爆和非燃、非爆炸性粉尘。

1.1.3 粉尘的危害

1) 粉尘的危害

粉尘的危害性是多方面的。例如:有爆炸性的粉尘对安全生产带来的危害;有毒或放射性的粉尘对人体健康带来的危害。粉尘对眼睛或皮肤具有刺激作用;粉尘可降低能见度面对生产带来影响;粉尘可导致机器和仪表运转部件的磨损,脏污仪器设备和其他物体,导致其使用寿命缩短;大量的粉尘排放可导致大范围内空

气、土壤、水体的污染。这些都必须采取相应的预防措施。但最普遍且最严重的危害是引起尘肺病。几乎所有粉尘都能引起尘肺病,如硅肺病、石棉肺病、煤肺病和煤硅肺病等。而各种粉尘的危害严重程度又不完全相同。

2) 粉尘对人体的影响

粉尘对人体的影响是很严重的,是造成尘肺、硅肺病的根源。影响尘肺病的发生发展的因素主要有粉尘的化学成分、粒径和分散度,以及接触时间、劳动强度和身体健康状况等。

粒径不同的粉尘在呼吸道各部位的沉积情况各不相同。图1.1所示为不同粒径的粉尘在鼻部、支气管部、肺部的沉积率。

粗粉尘($>5\mu\text{m}$)在通过鼻腔、喉头、气管上呼吸道时,被这些器管的纤毛和分泌粘液所阻留,经咳嗽、喷嚏等保护性反射作用而排出。

细粉尘($<5\mu\text{m}$)则会深入和滞留在肺泡中(部分粒径在 $0.4\mu\text{m}$ 以下的粉尘可以在呼气时排出)。有人研究硅肺病死者肺中尘粒的百分比,发现粒径在 $1.6\mu\text{m}$ 以下者占86%,粒径在 $3.2\mu\text{m}$ 以下者占100%。粉尘越细,在空气中停留时间越长,被吸入的机会也就越多,通常把粒径小于 $7.07\mu\text{m}$ 、对人体健康危害最大的粉尘,称为呼吸性粉尘。

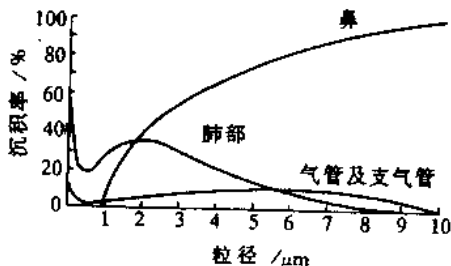


图 1.1 不同粒径粉尘在呼吸系统各部位的沉积率

1.2 粉尘的物理化学性质

1.2.1 粉尘的成分和游离二氧化硅含量

粉尘的化学成分基本上与物料的成分相同,只是在扬尘过程中由于重力、吸附、挥发等作用,使某些成分可能发生变化,所以,粉尘中各化学成分的含量与原物料又有所不同,应通过分析确定。

从工业卫生角度来看,各种粉尘对人体都是有害的。粉尘的化学成分及在空气中的浓度,直接决定对人体的危害程度。粉尘中含游离二氧化硅的含量越高,危害越严重。粉尘中游离二氧化硅含量一般较原物料中的游离二氧化硅含量稍低。常见矿岩中游离二氧化硅含量参见表 1.1。

表 1.1 矿岩中游离二氧化硅含量

矿 岩 名 称	游离二氧化硅/%	矿 岩 名 称	游离二氧化硅/%
花岗岩	25.0 ~ 65.0	砂岩	33.0 ~ 76.0
云英岩	35.0 ~ 75.0	砂质石灰岩	15.0 ~ 37.0
伟晶花岗岩	21.5 ~ 40.0	普通石灰岩	0.2 ~ 3.0
石英闪长岩	20.0 ~ 47.0	膨润土	3.0 ~ 7.0
花岗闪长岩	14.0 ~ 24.0	黄铜矿	1.0 ~ 50.0
辉绿岩	2.0 ~ 3.0	黄铁矿	10.0 ~ 20.0
石英岩	57.0 ~ 92.0	铅锌矿	5.0 ~ 15.0
片麻岩	27.0 ~ 64.0	钨钼矿	70.0 ~ 90.0
角闪岩	12.0 ~ 36.0	赤铁矿	0.5 ~ 10.0
砂卡岩	30.0 ~ 50.0	镉矿(石英脉)	80.0 ~ 90.0
云母片岩	25.0 ~ 50.0	煤	~ 10.0

1.2.2 密度和比重

单位体积粉尘的质量称粉尘的密度。这里的粉尘的体积不包

括粉尘之间的空隙,因而这里的密度称之为粉尘的真密度 ρ_p (kg/m^3)。在一般情况下,粉尘的真密度与组成此种粉尘的物质密度是不相同的,因为粉尘在形成过程中,粉尘的表面甚至其内部可能形成某些孔隙,只有表面光滑又密实的粉尘的真密度才与其物质密度相同。通常物质密度比粉尘的真密度大 20 % ~ 50 %。粉尘的真密度可表示为

$$\rho_p = \frac{\text{粉尘质量}}{\text{粉尘体积}}, \quad \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1.1)$$

粉尘的真密度在通风除尘中有广泛用途。许多除尘设备的选择不仅要考虑粉尘的粒度大小,而且要考虑粉尘的真密度。如对于粗颗粒、真密度大的粉尘可以选用沉降室或旋风除尘器;对于真密度小的粉尘,即使是粗颗粒也不宜采用这种类型的除尘器。

粉尘呈自然扩散状态时,单位容积中粉尘的质量称粉尘堆积密度或表观密度 ρ_b 。由于尘粒之间存在空隙,因此堆积密度要比粉尘的真密度小。

$$\rho_b = \frac{\text{粉尘质量}}{\text{粉尘所占容积}}, \quad \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1.2)$$

粉尘的堆积密度对通风除尘有重要意义,如灰斗容积的设计,所依据的不是粉尘的真密度或物质密度,而是粉尘的堆积密度。在粉尘的气力输送中也要考虑粉尘的堆积密度。某些粉尘的真密度与堆积密度如表 1.2 所示。

粉尘的相对密度系指粉尘的质量与同体积标准物质的质量之比,因而是无量纲。通常采用标准大气压力 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 和温度为 4°C 时的纯水作为标准物质。由于在这种状态下 1 cm^3 的水的质量为 1 g ,因而粉尘的

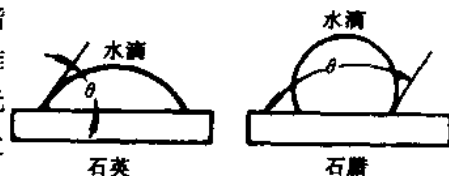


图 1.2 湿润角表示示意图

准物质。由于在这种状态下 1 cm^3 的水的质量为 1 g ,因而粉尘的

比重在数值上就等于其密度(g/cm^3)。

表 1.2 几种工业粉尘的真密度与堆积密度

粉尘名称	真密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	堆积密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	粉尘名称	真密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	堆积密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
烟 灰	2 150	1 200	烟 灰($56\ \mu\text{m}$)	2 200	1 070
炭 黑	1 850	40	硅酸盐水泥(91 μm)	3 120	1 500
硅砂粉($105\ \mu\text{m}$)	2 630	1 550	造型用粘土	2 470	720~800
硅砂粉($30\ \mu\text{m}$)	2 630	1 450	烧结矿粉	3 800~4 200	1 500~2 600
硅砂粉($8\ \mu\text{m}$)	2 630	1 150	氧化铜($42\ \mu\text{m}$)	6 400	2 620
硅砂粉($72\ \mu\text{m}$)	2 630	1 260	锅炉炭末	2 100	600
电 炉	450	600~1 500	烧结炉	3 000~4 000	1 000
化铁炉	200	800	转 炉	5 000	700
黄铜熔解炉	4 000~8 000	250~1 200	铜精炼	4 000~5 000	200
亚铅精炼	5 000	500	石 墨	2 000	~300
铅精炼	6 000	—	铸物砂	2 700	1 000
铝二次精炼	3 000	300	铅再精炼	~6 000	~1 200
水泥干燥窑	3 000	600	墨液回收	3 100	130

1.2.3 比表面积

物料被粉碎为微细粉尘,其比表面积显著增加。单位质量(或单位体积)粉尘的总表面积称为比表面积。假设尘粒为同体积的球形粒子,则比表面积 S_w 与粒径的关系为

$$S_w = \frac{\pi d_p^2}{\frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p} = \frac{6}{\rho_p d_p}, \quad \text{m}^2/\text{kg} \quad (1.3)$$

式中 ρ_p ——粉尘的密度, kg/m^3 ;

d_p ——粉尘的直径, m 。

由上式可以看出,粉尘的比表面积与粒径成反比。粒径越小,比表面积越大。

由于粉尘的比表面积增大,它的表面能也随之增大,增强了表面活性,这对研究粉尘的湿润、凝聚、附着、吸附、燃烧和爆炸等性能有重要作用。

1.2.4 凝聚与附着

细微粉尘增大了表面能,即增强了尘粒的结合力,一般把尘粒间互相结合形成一个新的大尘粒的现象叫作凝聚;尘粒和其他物体结合的现象叫附着。

粉尘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。一般尘粒间距离较大,需要有外力作用使尘粒间碰撞、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。尘粒的凝聚有利于对它捕集分离。

1.2.5 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力造成的。它可以用湿润接触角(θ)的大小来表示。如图 1.2 所示,湿润角小于 60° 的,表示湿润性好,为亲水性的;湿润角大于 90° 时,说明湿润性差,为憎水性的。几种矿物的粉尘湿润接触角如表 1.3 所示。粉尘的湿润性除决定于成分外,还与颗粒的大小、荷电状态、湿度、气压、接触时间等因素有关。

粉尘的湿润性还可以用液体对试管中粉尘的浸润速度来表征。通常取浸润时间为 20 min,测出此时的浸润高度为 L_{20} (mm),于是浸润速度 u_{20} 为

$$u_{20} = \frac{L_{20}}{20}, \quad \text{mm/min} \quad (1.4)$$

以 u_{20} 作为评定粉尘湿润性指标, 可将粉尘分为四类, 如表 1.4 所示。

表 1.3 几种矿物的粉尘湿润角

名 称	接触角/(°)	名 称	接触角/(°)
黄铜矿	72	方解石	20
辉钼矿	60	石灰石	0~10
方铅矿	57	石 英	0~4
黄铁矿	52	云 母	0

表 1.4 粉尘对水的湿润性

粉尘类型	I	II	III	IV
湿润性	绝对憎水	憎 水	中等亲水	强亲水
$u_{20}/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	<0.5	0.5~2.5	2.5~8.0	>8.0
粉尘举例	石蜡、沥青	石墨、煤、硫	玻璃微球	锅炉飞灰、钙

在除尘技术中, 粉尘的湿润性是选用除尘设备的主要依据之一。对于湿润性好的亲水性粉尘(中等亲水、强亲水), 可选用湿式除尘器。对于某些湿润性差(即湿润速度过慢)的憎水性粉尘, 在采用湿式除尘器时, 为了加速液体(水)对粉尘的湿润, 往往要加入某些湿润剂(如皂角素等)以减少固液之间的表面张力, 增加粉尘的亲水性。

1.2.6 电性质

1) 荷电性

悬浮于空气中的粉尘通常都带有电荷, 这是由于破碎时的摩擦、粒子间的撞击、天然辐射、外界离子或电子附着等原因而形成的。一般在悬浮粉尘的整体中, 所带正电荷与负电荷几乎相等, 因而近于中性。矿尘的荷电量与它的大小、质量、湿度、温度及成分

等因素有关。

2) 导电性

粉尘的导电性通常用比电阻表示。粉尘的比电阻由实验方法确定。几种粉尘的比电阻如表 1.5 所示。

表 1.5 几种粉尘的比电阻

粉尘种类	比电阻	备 注	粉尘种类	比电阻	备 注
贫氧化铁矿	3.89×10^{10}	未烘干	白云石砂	4×10^{12}	
中贫氧化铁矿	8.50×10^{10}	未烘干	石 灰	5×10^{12}	
富氧化铁矿	7.20×10^{10}	未烘干	粘 土	2×10^{12}	
镁 砂	3×10^{13}		盐湖镁砂	3×10^{12}	

1.2.7 粘性

粘性是粉尘之间或粉尘与物体表面之间的力的表现。由于粘性力的存在,粉尘的相互碰撞会导致尘粒的凝并,这种作用在各种除尘器中都有助于粉尘的捕集。在电除尘器和袋式除尘器中,粘性力的影响更为突出,因为除尘效率在很大程度上取决于从收尘极或滤料上清除粉尘(清灰)的能力。粉尘的粘性对除尘管道及除尘器的运行维护也有很大的影响。

尘粒之间的各种粘性力归根结底与电性能有关。从微观上看可将粘性力分为三种(不包括化学粘合力):分子力、毛细力和静电力。这三种力的作用形成尘粒之间或尘粒与物体表面之间的粘性力。

1.2.8 光学特性

粉尘的光学特性包括粉尘对光的反射、吸收和透明度等。由于含尘气流的光强减弱程度与粉尘的透明度、形状、粒径的大小和浓度有关,且尘粒大于光的波长和小于光的波长对光的反射的作用是不相同的,所以,在通风除尘中可以利用粉尘的光学特性来测