

化工设备设计全书

# 除尘设备

《化工设备设计全书》编辑委员会  
金国森 等编



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

72051.8  
567

化工设备设计全书

# 除 尘 设 备

《化工设备设计全书》编辑委员会

金国森 等编

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北 京·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

除尘设备/金国森等编. —北京: 化学工业出版社,  
2002.8  
(化工设备设计全书)  
ISBN 7-5025-3824-0

I. 除… II. 金… III. 化工设备: 除尘设备  
IV. TQ051.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 066416 号

---

化工设备设计全书

**除 尘 设 备**

《化工设备设计全书》编辑委员会

金国森 等编

责任编辑: 辛 田

责任校对: 陶燕华

封面设计: 蒋艳君

\*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 26 1/4 字数 882 千字

2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3824-0/TQ·1528

定 价: 60.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

京工商广临字 2002—24 号

# 前 言

《化工设备设计全书》第一版由原化学工业部化工设备设计技术中心站组织全国高校、科研、设计、制造近百家单位参与编写。

《化工设备设计全书》以结构设计、强度计算为主，从基础理论、设计方法、结构分析、标准规范、计算实例等方面进行了系统的阐述，并对相应的化工原理做了简介。《全书》在重视结构设计、强度计算的同时，结合化工过程的要求去研究改进设备的设计，提高设备的效率，降低设备的成本，以求实现化工单元操作的最佳化，并力求反映当前国内及国际的先进技术。《全书》自20世纪80年代出版发行后，因其内容的实用性，得到化工、石化、医药、轻工等相关行业的设备专业人员欢迎。

近十余年来，我国化工装置的设计，化工设备的研究、开发、制造和标准化工作有了较大的发展，建造设备用的结构材料也有了新的进展，有必要对《全书》的内容加以更新、补充，以适应现代工程建设要求，满足广大工程技术人员，特别是年青一代工程技术人员的需要。中国石油和化工勘察设计协会、中国石化集团上海医药工业设计院、全国化工设备设计技术中心站组成了《化工设备设计全书》编辑委员会，负责《全书》的修订工作。《全书》的修订原则是“推陈出新”，以符合现代工程建设要求。

《化工设备设计全书》计划出版15种，计有：《化工设备用钢》、《化工容器》、《高压容器》、《超高压容器》、《换热器》、《塔设备》、《搅拌设备》、《球罐和大型储罐》、《废热锅炉》、《干燥设备》、《除尘设备》、《铝制化工设备》、《钛制化工设备》、《石墨制化工设备》和《钢架》等。

本书为《除尘设备》，论述了粉尘的特性及把这些粉尘从气体中分离出来的方法。对各种除尘器的原理、结构、性能、设计方法及含尘气流等做了全面的介绍。全书内容着重设计和实用。

本书基本由原编写者负责修订：第一章上海化工研究院李峻宇，第二章、第三章第二、六、七、八、九、十一、十二、十三、十四节、第四章、第七章上海医药工业设计院金国森，第三章第一、三、四、五节上海化工研究院夏兴祥，第三章第十节上海化工研究院劳家仁，第五章国家有色金属工业局长沙有色金属设计研究院甘吉勇、曾国兴，第六章上海应用技术学院周健民，第八章上海化工研究院邵国兴。本书由金国森负责统稿。

《化工设备设计全书》编辑委员会

2002年1月

# 目 录

<b>第一章 除尘器的类型与性能</b> .....	1	一、工作原理 .....	72
第一节 粉尘与气体的物理性质 .....	2	二、结构特点与尺寸 .....	72
第二节 除尘器的性能 .....	12	三、技术性能 .....	74
第三节 除尘器的分类与选择 .....	21	四、规格型号与选用 .....	75
一、除尘器的选用要点 .....	21	<b>第七节 扩散式旋风除尘器</b> .....	80
二、除尘器类型与性能 .....	22	一、工作原理 .....	80
<b>第二章 沉降室与惯性除尘器</b> .....	26	二、结构特点 .....	81
第一节 沉降室 .....	26	三、压力损失 .....	81
一、粉尘重力沉降 .....	26	四、除尘效率 .....	82
二、沉降室 .....	28	五、规格型号与选用 .....	84
三、除尘效率和压力损失 .....	29	<b>第八节 长锥体旋风除尘器</b> .....	85
四、应用实例 .....	29	一、结构特点 .....	85
第二节 惯性除尘器 .....	29	二、技术性能 .....	88
一、工作原理 .....	29	三、规格型号与选用 .....	88
二、百叶式除尘器 .....	30	<b>第九节 多管式旋风除尘器</b> .....	93
<b>第三章 旋风除尘器</b> .....	32	一、工作原理 .....	93
第一节 旋风除尘器的分离理论和 结构参数 .....	32	二、旋风体的结构与技术性能 .....	94
一、工作原理和气体流动状况 .....	32	三、CLG型多管式旋风除尘器 .....	97
二、临界粒径与分离理论 .....	35	四、应用示例 .....	97
三、压力损失和除尘效率 .....	38	<b>第十节 龙卷风除尘器</b> .....	98
四、影响性能的主要因素 .....	40	一、工作原理 .....	98
五、分类及选用 .....	45	二、结构参数及性能 .....	101
六、设计实例 .....	46	三、反射型龙卷风除尘器 .....	105
第二节 XLT型旋风除尘器 .....	47	四、应用情况 .....	105
一、技术特性与选型 .....	47	<b>第十一节 双级蜗旋除尘器</b> .....	106
二、XLT/A型旋风除尘器 .....	49	一、工作原理 .....	106
第三节 D型旋风除尘器 .....	55	二、除尘效率 .....	107
一、压力损失计算及其影响因素 .....	56	三、设计计算 .....	107
二、分级除尘效率计算及其影响因素 .....	57	四、CR205双级蜗旋除尘器系列 .....	108
三、结构尺寸 .....	60	<b>第十二节 旋风惯性除尘器</b> .....	109
第四节 B型旋风除尘器 .....	61	一、工作原理 .....	109
一、结构特点 .....	61	二、结构尺寸 .....	110
二、阻力系数与其影响因素 .....	62	三、技术特性 .....	110
三、除尘效率计算与其影响因素 .....	63	四、选型 .....	111
四、结构尺寸 .....	64	<b>第十三节 JC型除尘器组</b> .....	111
五、选用与设计 .....	68	一、工作原理 .....	111
第五节 E型旋风除尘器 .....	68	二、技术参数 .....	112
一、结构特点 .....	69	<b>第十四节 旋风除尘器的耐磨措施和     制造要求</b> .....	113
二、技术性能 .....	69	一、耐磨措施 .....	113
三、阻力、效率计算及常用结构尺寸 .....	71	二、制造安装要求 .....	122
第六节 旁路式旋风除尘器 .....	72	<b>第四章 过滤式除尘器</b> .....	124

第一节 袋式除尘器	124	二、气体分布板	205
一、分类	124	三、沉尘电极	207
二、工作原理	124	四、电晕电极	214
三、滤布	126	五、壳体	230
四、简易袋式除尘器	129	六、电除尘器排灰装置和锁气器	238
第二节 脉冲袋式除尘器	132	第六节 电除尘器供电	238
一、工作原理	132	一、电除尘器对供电系统要求	238
二、喷吹系统的结构	132	二、整流设备台数和电除尘器供电方式	238
三、技术性能	138	三、电除尘器常用供电设备	240
四、进气方式和滤袋长度选取	142	四、整流机室负荷计算	243
五、规格尺寸与选用	143	五、供电系统材料	243
第三节 机械振打袋式除尘器	162	六、整流系统防雷和接地	243
一、LD型机械振打袋式除尘器	162	七、振打机构控制	244
二、ZX型机械振打袋式除尘器	164	八、安全措施	244
第四节 气环反吹袋式除尘器	166	第七节 电除尘器的设计计算和应用实例	244
一、工作原理	166	一、主要参数计算	244
二、技术性能	168	二、电除尘器总体计算	247
三、规格尺寸与选用	168	三、零、部件设计计算	247
第五节 扁袋式除尘器	170	四、供电系统选择	261
一、ZC型回转反吹扁袋式除尘器	170	五、60m <sup>2</sup> 电除尘器	262
二、单元式扁袋式除尘器组	173	六、应用实例	262
第六节 颗粒层除尘器	174	第六章 湿式除尘器	272
一、过滤原理	174	第一节 湿式除尘的工作原理	272
二、颗粒料的选择	174	第二节 洗涤塔	274
三、除尘效率	174	一、湍球塔	274
四、过滤压力损失	175	二、泡沫除尘器	277
五、反吹清洗	175	三、旋流板塔	281
六、应用示例	176	第三节 水膜除尘器	284
七、旋风-颗粒层除尘器	177	一、立式水膜除尘器	284
八、沸腾颗粒层除尘器	179	二、卧式旋风水膜除尘器	287
第五章 电除尘器	181	第四节 水浴除尘器	292
第一节 概述	181	一、工作原理	292
一、研究情况	181	二、喷头	292
二、对某些研究的分析比较	181	三、技术性能与结构尺寸	293
三、新型电除尘器的发展方向	182	第五节 冲激式除尘器	295
第二节 电除尘器工作原理及其分类	182	一、结构和工作原理	295
一、电除尘器工作原理	183	二、CCJ型和CCJ/A型冲激式除尘器 机组系列	296
二、分类方法	192	第六节 文氏管除尘器	301
第三节 除尘性能与极间距	193	一、工作原理	301
一、除尘性能	193	二、喷水装置	303
二、极间距	194	三、压力损失	304
第四节 除尘性能的影响因素	196	四、除尘效率	304
一、气体分布	197	五、材质	306
二、含尘气体性质	197	六、应用情况	306
三、操作条件	201	第七节 复喷与复挡	307
第五节 电除尘器的结构设计	204	一、复喷	307
一、电除尘器总体	204		

二、复挡.....	309
第八节 湿式除尘的污水及污泥处理.....	311
一、污水处理.....	311
二、污泥处理.....	320
<b>第七章 除尘系统设计</b> .....	323
第一节 气体管道设计.....	323
一、除尘管道计算.....	323
二、管道中压力损失.....	329
第二节 除尘器的排灰装置.....	342
一、干式排灰装置.....	342
二、湿式排尘装置.....	350
第三节 风机和电机.....	353
一、风机.....	353
二、电机.....	381
<b>第八章 含尘气流的测定</b> .....	384
第一节 取样.....	385
一、取样位置的选择.....	385

二、取样点的确定.....	385
三、取样孔.....	387
四、取样管.....	387
五、等速取样.....	388
六、取样口方向.....	389
七、取样口直径.....	389
第二节 气体状态参数及粉尘性质测定.....	389
一、气体状态参数测定.....	390
二、固体粉尘物性测定.....	393
三、气体中湿含量测定.....	395
第三节 气流含尘浓度测定.....	396
第四节 粉尘粒径分散度测定.....	398
一、冲击式测粒仪.....	399
二、Bahco 测粒仪 .....	402
三、Coulter 测粒仪 .....	402
<b>符号说明</b> .....	405
<b>参考文献</b> .....	407

# 第一章 除尘器的类型与性能

化学工程把气体与粉尘微粒的多相混合物的分离操作称为除尘。微粒不一定局限于固体，也可以是液体微粒。多相混合物中处于分散状态的物质称为分散相或分散物质，通称尘粒或粉尘微粒，而包围分散相的另一物质则为连续相或分散介质，如气体或液体。

作为除尘对象的尘粒直径（简称粒径），一般在 $100\sim 0.01\mu\text{m}$ 之间。 $100\mu\text{m}$ 以上的尘粒，由于重力作用很快将降落殆尽，不成为除尘对象。 $10\mu\text{m}$ 以上尘粒易于分离，问题不大。成为问题的是 $10\sim 0.1\mu\text{m}$ 尘粒，特别是 $1\mu\text{m}$ 以下的微尘粒分离较为困难，也有害于人体，是目前主要研究范围。

除尘操作在化工生产中的应用主要有如下。

(1) 净化分散介质 如催化反应的原料气中如有固体微粒，会严重影响催化剂的效能，必须在原料气进入反应器之前把它除掉。

(2) 回收分散物质 如流化床反应器送出的气体中一般夹带着许多催化剂微粒，为降低成本，也为保护环境，这些催化剂必须加以回收。又如从干燥等工艺过程的气流中回收固体产品等。

(3) 净化排放气 在生产中排放废气之前，要尽量分离出其中的固体微粒，以便开展综合利用和保护环境。

(4) 消除爆炸危险 某些含碳物质及金属细粉与空气混合能形成爆炸混合物，因此在混合之前应将能爆炸的物质除掉。

除尘设备在化工生产中应用极为广泛，而在某些基本化学工业如硫酸、合成氨等，除尘器历来被作为关键设备。随着化学工业的迅速发展，特别是装置日益大型化，在能量回收、气体净化、催化时回收及防大气污染等工程中，高效除尘器则成为关键设备之一。

从环境保护的角度来看，粉尘是人体健康的大敌。尤其是粒径在 $0.5\sim 5\mu\text{m}$ 之间的飘尘（即长期甚至几年飘浮在大气中的粉尘），对人的危害最大。大于 $5\mu\text{m}$ 的尘粒，由于惯性作用可被鼻毛与呼吸道黏液排除；小于 $0.5\mu\text{m}$ 的尘粒，也可因气体扩散作用被黏附在上呼吸道表面而随痰排出。惟独 $0.5\sim 5\mu\text{m}$ 的飘尘则可通过呼吸道直接到达肺部而沉积，危害人体。据分析，有些飘尘微粒表面还附有致癌性很强的芳香族碳氢化合物，尤其是煤的粉尘是大气中各种毒物的元凶，所以世界各国都十分重视大气中粉尘的防护。

粉尘对环境和人体的危害还取决于粉尘的进入量。所以一般以空气中所含粉尘的浓度作为衡量的标准。为此我国经过实践重新制订了《GB 10328—11726—1989》（表 1-1），规定作业场所空气中的粉尘最高允许浓度；《大气环境质量标准（GB 3095—1996）》（表 1-2），规定三类区大气中的飘尘最高允许浓度；《GB 9078—1996、GB 13271—1991、GB 16297—1996》（表 1-3），规定烟囱和除尘装置排放的气体粉尘最高允许浓度。如超过标准，必须采取除尘净化措施，使粉尘浓度低于标准规定。

表 1-1 作业地点空气中粉尘的最高允许浓度（GB 10328—11726—1989 部分标准摘录）

粉尘名称	最高允许浓度 $\text{mg}/\text{m}^3$ (标)	粉尘名称	最高允许浓度 $\text{mg}/\text{m}^3$ (标)
含有 80% 以上游离二氧化硅的粉尘	1	氧化铝粉尘	6
含有 20% 以上游离二氧化硅的萤石粉尘	2	铝及铝合金粉尘	4
含有 10% 以下游离二氧化硅的蛭石粉尘	5	其他各种粉尘 <sup>①</sup>	10
含有 10% 以下游离二氧化硅的碳化硅粉	10	钒化合物粉尘	0.1
含有 10% 以下游离二氧化硅的石墨粉尘	6	钒化合物烟	0.02

① 指由游离二氧化硅含量在 10% 以下，不含有毒物质的矿物性和动植物性粉尘。

注：1. 表中最高允许浓度是工人工作地点空气中有害物质所不应超过的数值。工作地点系指有工人为观察和管理生产过程而经常或定时停留的地点，如生产操作在车间内许多不同地点进行。则整个车间均算为工作地点。

2. 工人在车间内停留的时间短时，经采取措施仍不能达到上表规定的浓度时，再与当地卫生主管部门协商解决。

表 1-2 大气中可吸入颗粒物（飘尘）最高允许浓度（摘录 GB 3095—1996）

区域	最高允许浓度， $\text{mg}/\text{m}^3$ (标)		区域	最高允许浓度， $\text{mg}/\text{m}^3$ (标)	
	年平均浓度	日平均浓度		年平均浓度	日平均浓度
自然保护区	0.04	0.05	特定工业区	0.15	0.25
居住区和一般工业区	0.10	0.15			



表 1-3 烟囱和除尘装置排放气体中  
粉尘最高允许浓度  
(部分排放国家标准增修订版摘录)

序号	排放有害物名称	最高允许浓度 mg/m <sup>3</sup> (标)
1	锅炉烟尘	250 (200) <sup>①</sup>
2	炼钢炉烟尘	150
3	水泥粉尘	150
4	硫酸(雾)火炸药厂 其他厂	430 45
5	含有 10% 以上游离二氧化硅的玻璃棉粉尘、石英粉尘和矿渣棉粉尘	60
6	含有 10% 以下游离二氧化硅的煤尘及其他粉尘	120

① 括号内数字为烟囱未达规定高度的最高允许浓度。

## 第一节 粉尘与气体的物理性质

除尘所涉及的多相混合物也称气相悬浮系或气溶胶。分散于其中的细小颗粒叫做尘粒或微粒，而尘粒的堆集状态叫做粉体。

根据成因的不同，气相悬浮系可分为两大类：分散性的和凝聚性的。

分散性的尘粒一般称为粉尘或尘灰，是将固体破碎或研磨成粉末或将液体喷成雾沫而成，或由于其他机械原因，致使固体或液体成为微粒，飞扬而悬浮于气体中。粉尘微粒大小，通常大于 1 $\mu\text{m}$ 。

凝聚性的尘粒系气体或蒸气质点的凝聚，或由两种气体或蒸气经过化学反应而得。凝聚所得微粒，固体的称为烟，液体的称为雾。如氯化氢与氨生成的氯化铵，三氧化硫与水蒸气生成的硫酸雾，各种炉烟中的粉尘也属此类。烟与雾的尘粒大小通常在 10~0.01 $\mu\text{m}$  之间。各种粒径范围的物质名称及其适用的除尘装置形式见表 1-4。

从表中可以看出，由于尘粒的粒径由大变小，其气相悬浮系将由非均一系统转变为均一系统。因为粒径小到 0.2~0.3 $\mu\text{m}$  时，布朗运动就变得显著了，而均相的气体及其大分子的粒径可以大到 0.005 $\mu\text{m}$ 。粒径在 0.2~0.001 $\mu\text{m}$  的分散体系属胶体溶液范畴。由于尘粒大小不同，将形成不同性质的物系，因此测定粒径的方法和从分散体系中除去尘粒的方法也就不同。还可以看到各种除尘设备操作范围有一定程度的交叉，这是由于选择设备不但要按照尘粒大小，而且还要依据气量、粉尘浓度及粉尘的物理化学性质等因素而定。

为了正确地设计和选择除尘设备，必须掌握粉尘的各种物理化学性质及粉尘浓度等，以便确定本工程的设计卫生标准、回收价值和防尘措施。

现就尘粒的主要物性，简述如下。

### (一) 粒径与分散度

尘粒如呈球形，可取其直径为粒径。但实际上尘粒的形状是很复杂的，多为不定形的。若要求得单一尘粒粒径需借用不同的方法测出其代表性尺寸，叫做尘粒粒径。用得比较多的有如下几种方法。

(1) 显微镜粒径 对细微尘粒是借用透过的光测得多个尘粒的投影像的一边尺寸的平均值，作为平均粒径。还有以尘粒的投影面积与同面积的圆的直径或与正方形的一边尺寸表示的当量粒径。

(2) Stokes 粒径 按尘粒在分散介质中的平均沉降速度而确定的粒径。这种方法主要适合对 38 $\mu\text{m}$  以下的尘粒粒径的测定。

(3) 筛分粒径 对 38 $\mu\text{m}$  以上的粗尘粒可通过筛网分出尘粒大小，叫做筛分粒径。

由于测试方法不同，同一粉尘的粒径，一般是不会相同的。

粉尘的各种粒级(某一粒径范围，如 5~10 $\mu\text{m}$ ，10~15 $\mu\text{m}$  等)所占质量或颗粒数的百分比(%)，称为质量分散度或颗数分散度。粉尘的粒径值是粉尘的主要特性之一，其粒径分布大部分是细尘粒还是粗尘粒，是最关键的数据。

粉尘分散度对除尘工作具有重要意义，是除尘系统设计、管径计算以及选择除尘设备的主要依据之一。

### (二) 密度与堆积密度

尘粒本身有其密度(或真密度)，而作为集合体，堆积状态的密度叫做堆积密度(或容重)。

密度对重力、惯性、离心式除尘器的除尘率关系很大，而堆积密度则与设计粉尘的储存设备和粉尘的再飞扬问题有关。当粉尘的密度与堆积密度之比为 10 以上时，需要特别注意解决粉尘的二次飞扬问题。

尘粒之间的空隙体积与包括尘粒在内的总体积之比称为空隙率，如用  $\epsilon$  表示。尘粒密度  $\rho_c$  (kg/m<sup>3</sup>) 与尘粒堆积密度  $\rho_d$  (kg/m<sup>3</sup>) 之间的关系见式(1-1)

$$\rho_d = (1 - \epsilon)\rho_c \quad (1-1)$$

各种粉尘的密度如表 1-5 所示。

### (三) 凝聚性

粉尘微粒产生时的高温，尘粒表面的电荷、布朗运动和声波的振动以及磁力作用，可使尘粒相互撞击而引起凝聚。这一特性对除尘的原理和除尘效率起着不可忽视的作用。近年来发展的新型除尘器都设法利用这一特性，超声波除尘器就是利用声波使尘粒凝聚成微粒团，然后再送入一般旋风除尘器，这样，对于微小尘粒也能获得高效率。

表 1-4 尘粒与尘粒分散相的特性及适用的除尘方法

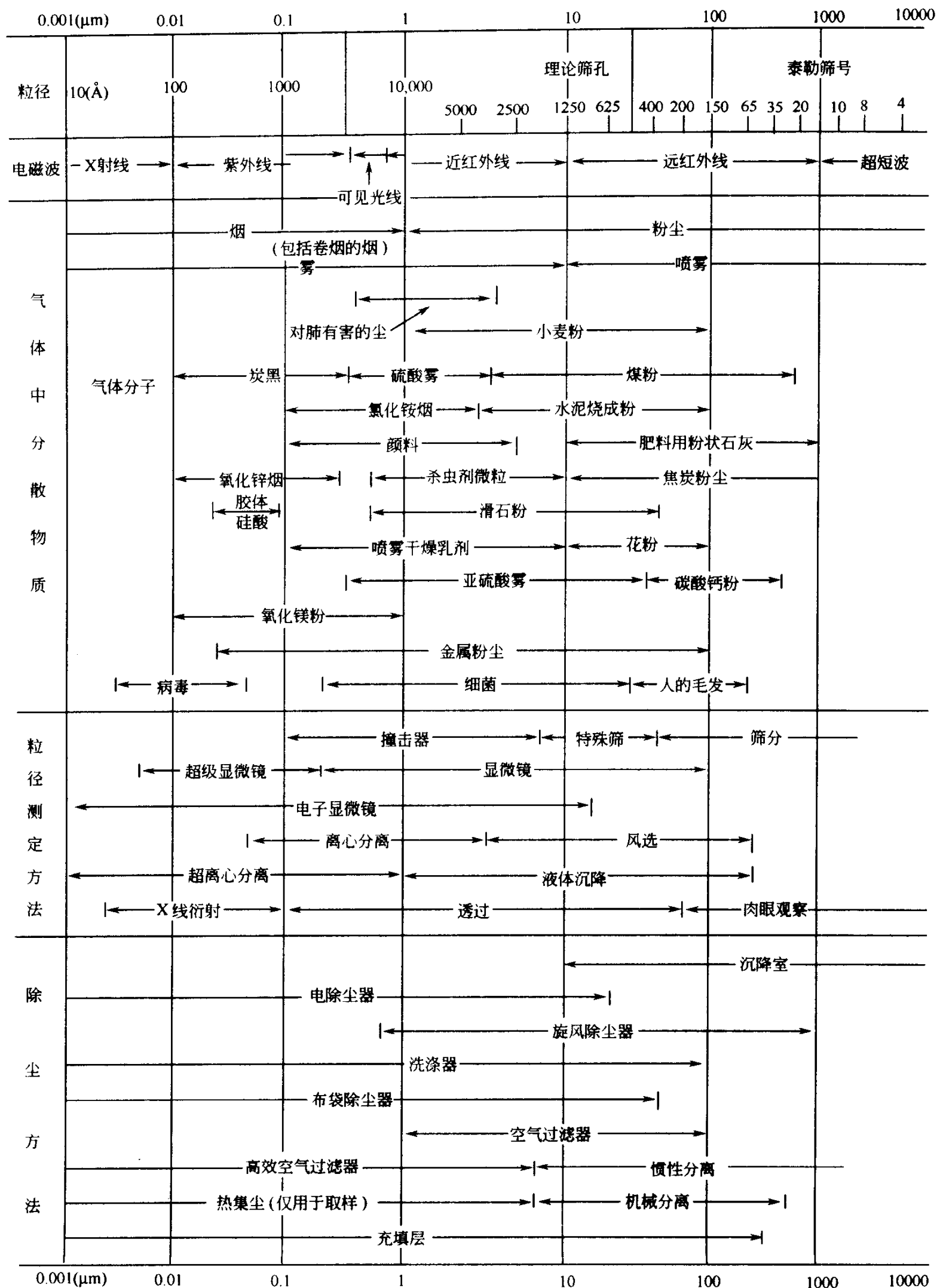


表 1-5 粉尘的密度

粉尘名称	密度, g/cm <sup>3</sup>	堆积密度, g/cm <sup>3</sup>	备注
硅砂粉 I	2.63	1.55	标准筛 105 $\mu$ m 通过
II	2.63	1.45	沉降法得 $d = 30\mu\text{m}$
III	2.63	1.15	沉降法得 $d = 8\mu\text{m}$
IV	2.62	1.26	沉降法得 0.5~72 $\mu\text{m}$
精制滑石粉	2.70	0.70	沉降法得 1.5~45 $\mu\text{m}$
滑石粉 S100	2.75	0.53~0.62	$d = 1.6\mu\text{m}$
滑石粉 N013	2.75	0.56~0.66	$d = 2.7\mu\text{m}$
滑石粉 N011	2.75	0.59~0.71	$d = 3.2\mu\text{m}$
烟灰 I	2.20	1.07	沉降法得 $d = 0.7 \sim 56\mu\text{m}$
烟灰 II	2.15	1.20	球状粒子
烟道粉尘 K-1	4.88	1.11~1.25	$d = 5.6\mu\text{m}$
烟道粉尘 M	5.07	0.29~0.33	$d = 0.24\mu\text{m}$
硅酸盐水泥 I	3.12	1.50	沉降法得 $d = 0.7 \sim 91\mu\text{m}$
硅酸盐水泥 II	3.05	1.64	
氧化铜	6.40	2.62	沉降法得 $d = 0.9 \sim 42\mu\text{m}$
炭黑烟尘	1.85	0.04	
造型用黏土	2.47	0.72~0.80	$d = 4.6\mu\text{m}$
烧结矿粉尘	3.8~4.2	1.5~2.6	
镁粉尘	2.8	0.95	电除尘器回收粉尘
石灰粉尘	2.7	1.10	旋风除尘器回收粉尘
石灰粉尘	2.9	1.0	电除尘器回收粉尘
黏土粉尘	2.1	0.9	电除尘器回收粉尘
盐湖镁砂粉尘	3.0	1.1	电除尘器回收粉尘
白云石粉尘	2.8	0.9	电除尘器回收粉尘
飘尘、烟灰	—	0.72	
食盐 (细粉)		0.74~0.8	
漂白粉		0.60~0.75	
漂粉精		0.95	
硫酸铜粉		1.41	

#### (四) 湿润性

粉尘粒子能被水 (或其他液体) 湿润的现象, 叫做湿润性。所有粉尘可根据被水湿润的程度分为疏水性粉尘和亲水性粉尘。但是湿润性还随粒径的减小和温度的升高而降低。例如悬浮于空气中小于 1.0 $\mu\text{m}$  的尘粒很难被水湿润而凝并, 因为微小尘粒和水滴在空气中均存在着环绕气膜现象, 尘粒与水滴在空气中必须冲破环绕气膜才能接触凝并。为此尘粒与水滴必须具有足够的相对速度。此外, 表面能愈小的液体愈容易湿润固体表面, 反之则不易。各种湿式除尘器, 就是主要依靠粉尘与水的湿润效果来除尘的。为减小水的表面能, 可以加入少量的皂角素、平平加等湿润剂, 以提高其湿润效果, 从而使微小尘粒甚至布朗运动很明显的微粒分散系 (属胶体溶液) 也凝并为较大的尘粒而除去。

#### (五) 荷电与导电性

粉尘在它的产生过程中, 由于物料的激烈撞击,

尘粒彼此间或尘粒与物料间的摩擦, 放射线照射以及电晕放电等作用而发生荷电, 它的物理性质将有所改变, 如凝聚性和附着性增强, 并影响尘粒在气体中的稳定性等。

粉尘的种类、温度与湿度影响尘粒的荷电性。导电性强的粉尘荷电与失电均较快, 故不稳定, 反之则较稳定; 温度升高带电能力增强, 湿度增加带电能力减小。

尘粒荷电后更容易沉附于肺泡和支气管中, 所以对人体的危害性也增强。某些粉尘的荷电性如表 1-6 所示。

表 1-6 粉尘的荷电性质

粉尘种类	带正电粒子, %	带负电粒子, %	不带电粒子, %
铁矿尘	54.3	36.4	9.3
石英岩粉尘	42.5	53.1	4.4
砂岩粉尘	54.7	40.2	5.1

粉尘的导电性在除尘工程中用比电阻（或称视电阻）来表示，单位为  $\Omega \cdot \text{cm}$ 。它是自然堆积的断面为  $1.0\text{cm}^2$ 、高为  $1.0\text{cm}$  的粉尘圆柱，沿其高度方向测得的电阻值。

粉尘的比电阻与组成粉尘的各种成分的电阻有关，而且与粉尘的粒径、分散度、湿度、温度、空隙率以及空隙气体的导电性等因素有关，它对电除尘器的除尘效率有着重要的影响。

现在已知粉尘的比电阻值在  $10^4 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  范围内能获得理想电除尘效果，而比电阻低于  $10^4$  或高于  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  都将使除尘效果恶化。具体情况及应采取的措施详见第五章第四节。

一些粉尘的比电阻如表 1-7 所示。

某些粉尘的比电阻随温度的变化关系如表 1-8 所示。

表 1-7 工业中常见粉尘的比电阻

粉尘种类	温度, $^{\circ}\text{C}$	相对湿度, %	比电阻, $\Omega \cdot \text{cm}$
水泥窑尘	120~180		$5 \times 10^9 \sim 5 \times 10^{10}$
水泥磨和烘干机尘	60	10	$10^{12}$
	95	10	$10^{13}$
铜焙烧烟尘	144	22	$2 \times 10^9$
	250		$1 \times 10^8$
铅烧结机烟尘	144	10	$1 \times 10^{12}$
	52	9	$2 \times 10^{10}$
	40	7.5	$1 \times 10^6$
铅鼓风炉烟尘	204	5	$4 \times 10^{12}$
	149	5	$2 \times 10^{13}$
含锌渣烟化炉烟尘	204	1.3	$4 \times 10^9$
	149	1.3	$2 \times 10^{10}$
回转窑氧化镍烟尘	20		$3 \times 10^{10}$
	65.5		$8 \times 10^9$
	121		$6 \times 10^9$
	177		$5 \times 10^8$
	232		$1 \times 10^8$
回转窑氧化铝微尘	20		$3 \times 10^8$
	65.5		$3 \times 10^{11}$
	121		$2 \times 10^{12}$
	177		$5 \times 10^{10}$
	232		$8 \times 10^8$
烧结机粉尘	烘干		$1.3 \times 10^{10}$
高炉粉尘	未烘干		$2.2 \times 10^8 \sim 3.40 \times 10^8$
转炉粉尘	烘干		$2.18 \times 10^{11}$
白云石粉尘	150		$4 \times 10^{12}$
石灰石粉尘	130		$5 \times 10^{12}$
菱镁矿、镁砖、镁砂粉尘	160		$3 \times 10^{13}$
氧化镁粉尘	180		$3 \times 10^{12}$
平炉粉尘	232		$9 \times 10^8$
A			$8 \times 10^5$
飞灰 B	21		$3 \times 10^8$
C			$2 \times 10^{10}$
石灰	121		$1 \times 10^{11}$
	177		$3 \times 10^{11}$

表 1-8 烟尘在各种温度下的比电阻

烟尘(粉尘)种类	在各种温度下的比电阻, $\Omega \cdot \text{cm}$				
	21℃	66℃	121℃	177℃	232℃
三氧化二铁	$3 \times 10^7$	$2 \times 10^9$	$9 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{10}$
碳酸钙	$3 \times 10^8$	$2 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{12}$	$8 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{12}$
二氧化钛	$2 \times 10^7$	$5 \times 10^7$	$1 \times 10^9$	$5 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
氧化镍	$2 \times 10^6$	$1 \times 10^6$	$4 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	$6 \times 10^4$
氧化铅	$2 \times 10^{11}$	$4 \times 10^{12}$	$2 \times 10^{12}$	$1 \times 10^{11}$	$7 \times 10^9$
三氧化二铝	$1 \times 10^3$	$3 \times 10^8$	$2 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{12}$	$2 \times 10^{12}$
硫	$1 \times 10^{14}$	—	—	—	—
飞灰 A	$8 \times 10^5$	$8 \times 10^5$	$8 \times 10^5$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^6$
B	$3 \times 10^8$	$5 \times 10^9$	$2 \times 10^{11}$	$4 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{11}$
C	$2 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{11}$	$7 \times 10^{12}$	$5 \times 10^{12}$	$7 \times 10^{11}$
水泥粉灰	$8 \times 10^7$	$7 \times 10^8$	$7 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{11}$	$9 \times 10^9$
石灰	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^{11}$	$3 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{11}$
矾土粉尘	$3 \times 10^8$	$3 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{12}$	$5 \times 10^{10}$	$8 \times 10^8$
平炉粉尘	$1 \times 10^8$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{11}$	$9 \times 10^8$
氧化铬粉尘	$2 \times 10^8$	$4 \times 10^8$	$2 \times 10^{10}$	$9 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{10}$
氧化镍窑粉尘	$3 \times 10^{10}$	$8 \times 10^9$	$6 \times 10^9$	$5 \times 10^8$	$1 \times 10^8$

表 1-9 各种粉状物料的堆积密度和自然堆积角

物料名称	堆积密度, $\text{g/cm}^3$	自然堆积角, ( $^\circ$ )	
		运 动	静 止
高炉炉灰	1.4~1.5	25	—
铜精矿	1.7~2.1	—	35~45
粉状镁砂	2.1~2.2	—	45~50
轧钢皮	2.0~2.5	35	—
烧结混合料	1.6	35~40	—
烧结返矿	1.4~1.6	35	—
铁精矿	1.6~2.5	33~35	—
铅精矿	1.9~2.4	—	40
锌精矿	1.3~1.7	—	40
铅锌精矿	1.3~2.4	—	40
铁粉(0.36mm)	2.37	—	42
铁粉(0.25mm)	2.42	—	41
铁粉(0.18mm)	2.24	—	40
铁粉(0.13mm)	2.21	—	40
粉状熟石灰	0.55	30~35	—
无烟煤粉	0.84~0.98	30	37~45
烟煤粉	0.4~0.7	—	37~45
粉状石墨	0.45	—	40~45
平炉渣	1.6~1.85	—	45~50
铁铝矾土(细粉)	1.09	—	30
水泥	0.9~1.7	35	40~45
造型砂	0.8~1.3	30	45
亚铅矿(粒状焙烧)	1.76	—	38
石灰	0.72	—	40
铅锌水碎渣	1.5~1.6	—	42
生石灰	1.7~1.8	25	45~50
泥煤	0.29~0.5	40	45
焦炭	0.36~0.53	35	50

续表

物料名称	堆积密度, g/cm <sup>3</sup>	自然堆积角, (°)	
		运 动	静 止
干煤灰	0.64~0.72	—	15~20
磁铁矿	2.5~3.5	30~35	40~45
赤铁矿	2.0~2.8	30~35	40~45
锰矿	1.7~1.9	—	35~45
铜矿	1.7~2.1	—	35~45
褐煤	0.6~0.8	35	35~50
砂糖 (微粉状)	0.75~1.61	—	30
硫	1.96~2.07	—	35

表 1-10 各种粉尘的自燃点及爆炸下限

序号	粉尘的名称	雾状粉尘 的自燃点, °C	爆炸下限 g/m <sup>3</sup>	序号	粉尘的名称	雾状粉尘 的自燃点, °C	爆炸下限 g/m <sup>3</sup>
1	葱	472	5.04	38	樟脑	466	10.00
2	萘	565	2.50	39	松香	130	12.60
3	菲	185	5.04	40	硫	232	2.27
4	甲基苯酚	559	1.10	41	酸性间苯胺黄 K	975	104.00
5	秋兰姆	890	7.80	42	酸性萘酚黄	1075	104.00
6	对甲氧基苯酸	830	5.20	43	酸性同浴棕 3K	900	52.00
7	对硝基苯酸	850	10.40	44	酸性同浴橄榄绿 M	900	156.00
8	2-羟基萘酸	850	20.80	45	酸性同浴橙 3K	925	31.20
9	对氯苯甲酸	850	10.40	46	酸性蓝 3M	1010	83.20
10	苯邻二(甲)酸酐	890	20.80	47	苏伯努艳红 B	970	208.00
11	对硝基苯(甲)酰氯	675	10.40	48	酸性蓝 BL	990	156.00
12	对硝基苯替二乙胺	975	31.20	49	酸性深棕(无填料)	725	20.80
13	4-硝基-2-氨基甲苯	650	5.20	50	酸性铬红	920	41.60
14	联苯胺	910	5.20	51	酸性铬黑 C	900	42.00
15	六亚甲基四胺	410	15.00	52	酸性纤维用枣红 C	890	41.60
16	丙烯醇树脂	500	35.00	53	西丽顿紫红 3B	750	20.80
17	香豆酮茚树脂	520	15.00	54	醋酸纤维用重氮蓝 3	890	26.00
18	木质素树脂	450	40.00	55	醋酸纤维用重氮黑 C	875	10.40
19	酚醛树脂	460	25.00	56	醋酸纤维用棕	950	52.00
20	虫胶松香树脂	390	15.00	57	西丽顿橙 R	990	104.00
21	聚乙烯醛缩丁醛树脂	390	20.00	58	西丽顿紫红 BF	825	10.20
22	石炭酸树脂	460	25.00	59	西丽太唑 AZ	860	5.20
23	聚乙烯树脂	450	25.00	60	固色黑 4K	975	31.20
24	聚苯乙烯	490	20.00	61	亚士林橙 RF	870	10.40
25	合成硬橡胶	320	30.00	62	引士林	990	15.60
26	有机玻璃	440	20.00	63	苯胺黑	990	10.40
27	赛璐珞	125	4.00	64	若丹明 M	950	5.20
28	醋酸纤维	320	25.00	65	若丹明 C	950	5.20
29	丙酸纤维	460	25.00	66	金黄素	1100	20.80
30	木纤维	775	25.00	67	颜料枣红 2C	850	5.20
31	尿素树脂模压物	450	75.00	68	颜料酞菁天蓝	970	10.40
32	邻苯二甲酸	650	15.00	69	颜料绿 B	910	15.60
33	季戊四醇	450	30.00	70	颜料橡皮红	700	20.40
34	苯二甲酸酐	650	15.00	71	颜料橙 2M	890	10.40
35	促进剂 DM	780	10.40	72	立索尔橙 R	910	7.80
36	促进剂 M	830	10.40	73	颜料葱醌蓝	950	10.40
37	乌洛托品	685	15.00	74	颜料蓝 K	1025	10.40

续表

序号	粉尘的名称	雾状粉尘 的自然点,℃	爆炸下限 g/m <sup>3</sup>	序号	粉尘的名称	雾状粉尘 的自然点,℃	爆炸下限 g/m <sup>3</sup>
75	颜料紫	830	20.80	126	成色剂 Ж-3	810	15.60
76	色淀枣红 ЖМ	1100	10.00	127	隐色体 ШЛЮ	1025	20.80
77	色淀透明红	930	5.20	128	MA-42	875	5.20
78	色淀玉红 ЖК	870	51.20	129	硝基黄-1	750	5.20
79	色淀玉红 СК	910	315.60	130	显影剂 ГСС	925	10.40
80	重氮盐深紫 К	820	10.40	131	彩色显影剂 2	945	52.00
81	重氮盐紫	875	51.00	132	乙氧基薛佛酸盐	830	20.80
82	重氮盐黑 К	170	202.00	133	1-苯基-5-巯基四唑	825	10.40
83	西丽太唑 STN	875	10.40	134	苯基氨基硫脲	890	5.20
84	直接蓝 4KM	990	72.80	135	乙烯二氨基四乙酸	850	5.20
85	水溶性硫化蓝	1010	208.00	136	对氨基苯酰肼乙酸酯	830	10.40
86	水溶性硫化黑	590	52.00	137	二甲基氨基异苯邻二酸酯	775	10.40
87	醇溶硝基清漆枣红	920	31.20	138	对硝基苯酰肼乙酸酯	675	10.40
88	醇溶枣红 С	990	31.20	139	铝	645	35.00
89	醇溶硝基清漆黄 3	975	41.60	140	铁	315	120.00
90	醇溶硝基清漆橙 2Ж	975	72.80	141	镁	520	20.00
91	醇溶玉红	890	26.00	142	锰	450	210.00
92	醇溶亮红 С	850	20.80	143	硅	775	160.00
93	油溶棕	1100	5.00	144	锡	630	190.00
94	油溶红 А	910	7.80	145	钛	480	45.00
95	油溶橙 R	890	5.20	146	钒	500	220.00
96	油溶升华橙	870	7.80	147	锌	680	500.00
97	偶氮色基红 О	860	20.80	148	铅(雾状粉尘产生静电)	静电放火 花自燃	40.00
98	茜素红 О	930	10.40	149	道氏合金(含镁 8.5% 以上)	430	20.00
99	合成蒽醌-1,2	990	10.40	150	铁钛(低碳)	370	140.00
100	升华蒽醌-9,10	885	5.20	151	铁硅(89% Si)	860	25.00
101	偶氮色基蒽醌绿 2Ж	930	10.40	152	镁-铝(50~50)	535	50.00
102	偶氮色基酸性蒽醌绿	930	10.40	153	紫花苜蓿	530	100.00
103	偶氮色基紫	930	10.40	154	棉纤维	440	50.00
104	二酰替苯胺尿红素	950	10.40	155	脱水柑皮	490	65.00
105	1,5-二羟基蒽醌	925	5.20	156	三叶草籽	470	60.00
106	氨基氯苯甲酰苯甲酸	970	10.40	157	谷物淀粉(加工的)	470	45.00
107	苯甲酰基苯甲酸	890	5.20	158	磨碎的干玉米芯	400	30.00
108	氯苯甲酰苯甲酸	885	5.20	159	桐籽	540	70.00
109	苯磺酸钠	950	10.40	160	脱水大蒜	360	100.00
110	尿红素	950	10.40	161	脱水豌豆	560	50.00
111	奎札因(升华品)	870	10.40	162	脆花生	570	85.00
112	奎札因(工业用)	890	5.20	163	米	490	45.00
113	1-氯代蒽醌	950	31.20	164	大豆	560	40.00
114	2-氯代蒽醌	870	10.40	165	麦粉	470	60.00
115	胺 Ж-3	830	10.40	166	鱼肝油蛋白	520	45.00
116	氨基吡唑酮	825	10.40	167	硬脂酸铝	400	15.00
117	硝基苯二甲酸酐	775	5.20	168	烟煤	610	35.00
118	连三氮茛	825	10.40	169	硬沥青	580	20.00
119	黄酸 2	910	5.20	170	凝汽油剂	450	20.00
120	2-氯-5-氨基苯甲酸	1010	10.40	171	噻吩	540	15.00
121	乙氧基克立夫酸	970	83.20	172	肥皂	430	45.00
122	成色剂 521	875	10.40	173	硫磺	190	35.00
123	成色剂 546	830	5.20	174	木粉	430	40.00
124	成色剂天蓝 3	840	20.80				
125	成色剂 Ж-2	875	10.40				

### (六) 自然堆积角

粉尘的自然堆积角也称安息角，即粉尘在水平面上自然堆放时，所堆成的锥体的斜面与水平面所成的夹角。粉尘从一定高度自由沉降，所堆积成的堆积角称为动堆积角；粉尘在空气中以极其缓慢的速度自由沉降，所堆积成的堆积角称为静堆积角。

堆积角的大小与粉尘的种类、粒径、形状和含水率等有关。粉尘愈细，含水率愈大则此值愈大；表面愈光滑的粉尘及愈趋近于球形的粉尘，此值愈小。各种物料的自然堆积角见表 1-9。设计除尘装置时，应使管道和储灰斗等倾斜角大于粉尘的自然堆积角，以防淤积堵塞。

### (七) 爆炸性

某些粉尘（如表 1-10 所示）在空气中达到一定浓度时，在外界的高温、明火、摩擦、振动、碰撞以及放电火花等作用下会引起爆炸，这类粉尘称为具有爆炸危险性粉尘。

有些粉尘（如镁粉、碳化钙粉）与水接触后会引引起自燃或爆炸，这类粉尘也称为具有爆炸危险性粉尘。对于这种粉尘不能采用湿式除尘器。

还有些粉尘，如溴与磷、镁、锌粉互相接触或混合便会发生爆炸。

爆炸即瞬时急剧地燃烧。爆炸时生成气体受高温急剧膨胀，产生很高的压力，引起破坏作用。粉尘的爆炸主要取决于粉尘性质，还与粉尘的粒径和湿度等有关。粒径愈小、粉尘和空气的湿度愈小，爆炸危险性愈大，反之则小。

粉尘在空气中只有在一定的浓度范围内才能引起爆炸，这个能引起爆炸的浓度，叫做爆炸浓度。能够引起爆炸的最高浓度叫爆炸上限，最低浓度叫爆炸下限。各种粉尘的爆炸下限列于表 1-10。

除尘设计必须严格按《建筑设计防火规范（GBJ 16—87）》的规定进行。相互混合后，会发生燃烧和爆炸的粉尘不能合为一个除尘系统；电动机、通风机及其开关应采用防爆型；爆炸危险的粉尘进入风机前应预先净化；管道应装有能拆卸的清扫口并用非燃烧材料制成等。

### (八) 气体物性

作为气体的物性与除尘关系最密切的是密度与黏度。众所周知，气体密度与绝对压力成正比而与绝对温度成反比；黏度则几乎与压力无关，但随着温度上升而增大。所以高温时重力除尘器、惯性除尘器和离心除尘器的除尘效率比常温时为低。在进行粉尘浓度测定时，一定要预先测定其含尘气体的温度、压力、流量和湿度。湿度在高温和减压情况下不易测定。

干空气在压力为 101.33kPa 时的密度、黏度等参数如表 1-11 所示。

空气在压力为 101325Pa 时，空气的密度、饱和水蒸气压力及其含量如表 1-12 所示。

表 1-11 干空气的物理性质 (101.33kPa)

温度 T ℃	密度 $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	比热容 $c_p$ kJ/ (kg·℃)	导热系数 $\lambda \times 10^2$ W/(m·℃)	黏度 $\mu \times$ 10 <sup>5</sup> Pa·s	普兰德 数 Pr
-180	3.685	1.047	0.765	0.65	0.900
-150	2.817	1.038	1.163	0.87	0.776
-100	1.984	1.022	1.617	1.18	0.746
-50	1.584	1.013	2.035	1.46	0.728
-40	1.515	1.013	2.117	1.52	0.728
-30	1.453	1.013	2.198	1.57	0.723
-20	1.395	1.009	2.279	1.62	0.716
-10	1.342	1.009	2.360	1.67	0.712
0	1.293	1.009	2.442	1.72	0.707
10	1.247	1.009	2.512	1.76	0.705
20	1.205	1.013	2.593	1.81	0.703
30	1.165	1.013	2.675	1.86	0.701
40	1.128	1.013	2.756	1.91	0.699
50	1.093	1.017	2.826	1.96	0.698
60	1.060	1.017	2.896	2.01	0.696
70	1.029	1.017	2.966	2.06	0.694
80	1.000	1.022	3.047	2.11	0.692
90	0.972	1.022	3.128	2.15	0.690
100	0.946	1.022	3.210	2.19	0.688
120	0.898	1.026	3.338	2.28	0.686
140	0.854	1.026	3.489	2.37	0.684
160	0.815	1.026	3.640	2.45	0.682
180	0.779	1.034	3.780	2.53	0.681
200	0.746	1.034	3.931	2.60	0.680
250	0.674	1.043	4.286	2.74	0.677
300	0.615	1.047	4.605	2.97	0.674
350	0.566	1.055	4.908	3.14	0.676
400	0.524	1.068	5.210	3.30	0.678
500	0.456	1.072	5.745	3.62	0.687
600	0.404	1.089	6.222	3.91	0.699
700	0.362	1.102	6.711	4.18	0.706
800	0.329	1.114	7.176	4.43	0.713
900	0.301	1.127	7.630	4.67	0.717
1000	0.277	1.139	8.071	4.90	0.719
1100	0.257	1.152	8.502	5.12	0.722
1200	0.239	1.164	9.153	5.35	0.724
1400	0.204	1.189	9.304	5.78	0.739
1600	0.182	1.218	10.118	6.16	0.742
1800	0.165	1.243	10.932	6.55	0.745



表 1-12 湿空气的密度、水蒸气压力、含湿量和焓 (101325Pa)

空气温度 $t, ^\circ\text{C}$	干空气密度 $\rho$ $\text{kg}/\text{m}^3$	饱和空气密度 $\rho_b$ $\text{kg}/\text{m}^3$	饱和空气的水蒸气分压力 $p_{q,b}, \text{Pa}$	饱和空气含湿量 $d_b$ $\text{g}/\text{kg}$ 干空气	饱和空气比焓 $h_b$ $\text{kJ}/\text{kg}$ 干空气	空气温度 $t, ^\circ\text{C}$	干空气密度 $\rho$ $\text{kg}/\text{m}^3$	饱和空气密度 $\rho_b$ $\text{kg}/\text{m}^3$	饱和空气的水蒸气分压力 $p_{q,b}, \text{Pa}$	饱和空气含湿量 $d_b$ $\text{g}/\text{kg}$ 干空气	饱和空气比焓 $h_b$ $\text{kJ}/\text{kg}$ 干空气
-20	1.396	1.395	102	0.63	-18.55	29	1.169	1.151	3995	25.6	94.20
-19	1.394	1.393	113	0.70	-17.39	30	1.165	1.146	4232	27.2	99.65
-18	1.385	1.384	125	0.77	-16.20	31	1.161	1.141	4482	28.8	104.67
-17	1.379	1.378	137	0.85	-14.99	32	1.157	1.136	4743	30.6	110.11
-16	1.374	1.373	150	0.93	-13.77	33	1.154	1.131	5018	32.5	115.97
-15	1.368	1.367	165	1.01	-12.60	34	1.150	1.126	5307	34.4	122.25
-14	1.363	1.362	181	1.11	-11.35	35	1.146	1.121	5610	36.6	128.95
-13	1.358	1.357	198	1.22	-10.05	36	1.142	1.116	5926	38.8	135.65
-12	1.353	1.352	217	1.34	-8.75	37	1.139	1.111	6260	41.1	142.35
-11	1.348	1.347	237	1.46	-7.45	38	1.135	1.107	6609	43.5	149.47
-10	1.342	1.341	259	1.60	-6.07	39	1.132	1.102	6975	46.0	157.42
-9	1.337	1.336	283	1.75	-4.73	40	1.128	1.097	7358	48.8	165.80
-8	1.332	1.331	309	1.91	-3.31	41	1.124	1.091	7759	51.7	174.17
-7	1.327	1.325	336	2.08	-1.88	42	1.121	1.086	8180	54.8	182.96
-6	1.322	1.320	367	2.27	-0.42	43	1.117	1.081	8618	58.0	192.17
-5	1.317	1.315	400	2.47	1.09	44	1.114	1.076	9079	61.3	202.22
-4	1.312	1.310	436	2.69	2.68	45	1.110	1.070	9560	65.0	212.69
-3	1.308	1.306	475	2.94	4.31	46	1.107	1.065	10061	68.9	223.57
-2	1.303	1.301	516	3.19	5.90	47	1.103	1.059	10587	72.8	235.30
-1	1.298	1.295	561	3.47	7.62	48	1.100	1.054	11133	77.0	247.02
0	1.293	1.290	609	3.78	9.42	49	1.096	1.048	11707	81.5	260.00
1	1.288	1.285	656	4.07	11.14	50	1.093	1.043	12304	86.2	273.40
2	1.284	1.281	704	4.37	12.89	51	1.090	1.037	12887	91.3	287.86
3	1.279	1.275	757	4.70	14.74	52	1.086	1.031	13538	96.6	302.84
4	1.275	1.271	811	5.03	16.58	53	1.083	1.025	14217	102.3	318.74
5	1.270	1.266	870	5.40	18.51	54	1.080	1.019	14925	108.2	335.34
6	1.265	1.261	932	5.79	20.51	55	1.076	1.013	15694	114	352.11
7	1.261	1.256	999	6.21	22.61	56	1.073	1.007	16431	121	371.15
8	1.256	1.251	1070	6.65	24.70	57	1.070	1.000	17232	128	390.37
9	1.252	1.247	1146	7.13	26.92	58	1.067	0.994	18066	135	410.25
10	1.248	1.242	1225	7.63	29.18	59	1.063	0.987	18934	143	431.68
11	1.243	1.237	1309	8.15	31.52	60	1.060	0.981	19870	152	456.36
12	1.239	1.232	1399	8.75	34.08	61	1.057	0.974	20777	161	480.72
13	1.235	1.228	1494	9.35	36.59	62	1.054	0.967	21754	170	507.34
14	1.230	1.223	1595	9.97	39.19	63	1.051	0.960	22770	180	533.91
15	1.226	1.218	1701	10.6	41.78	64	1.048	0.953	23827	192	565.39
16	1.222	1.214	1813	11.4	44.80	65	1.044	0.946	24938	204	598.71
17	1.217	1.208	1932	12.1	47.73	66	1.041	0.939	26064	215	628.82
18	1.213	1.204	2059	12.9	50.66	67	1.038	0.931	27248	229	667.41
19	1.209	1.200	2192	13.8	54.01	68	1.035	0.924	28477	244	708.15
20	1.205	1.195	2331	14.7	57.78	69	1.032	0.916	29753	259	748.93
21	1.201	1.190	2480	15.6	61.13	70	1.029	0.909	31082	276	795.50
22	1.197	1.185	2637	16.6	64.06	75	1.014	0.868	38450	382	1080.19
23	1.193	1.181	2802	17.7	67.83	80	1.000	0.823	47228	545	1519.81
24	1.189	1.176	2977	18.8	72.01	85	0.986	0.773	57669	828	2281.81
25	1.185	1.171	3160	20.0	75.78	90	0.973	0.718	69931	1400	3818.36
26	1.181	1.166	3353	21.4	80.39	95	0.959	0.656	84309	3120	8436.40
27	1.177	1.161	3556	22.6	84.57	100	0.947	0.589	101300	—	—
28	1.173	1.156	3771	24.0	89.18						