

工业除尘 设备设计手册

GONGYE CHUCHEN
SHEBEI SHEJI SHOUCHE

张殿印 申 丽 主编
张学义 王海涛 副主编



化学工业出版社

工业除尘 设备设计手册

GONGYE CHUCHEN
SHEBEI SHEJI SHOUCHE

张殿印 申丽 主编
张学义 王海涛 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本手册以工业除尘设计为主线，全面、系统地介绍了工业除尘设备设计的内容和方法。全书共分十章，内容主要包括：工业除尘设备分类和性能，工业除尘设备设计总则，除尘工艺设计、结构设计，气流组织设计、自然控制设计，辅助设备选型，设备制作设计，涂装、保温、拌热设计和设备安装施工等。在兼顾基本内容和方法的同时，突出实用性，使读者通过本书可以对工业除尘设备设计有全面了解和掌握。

本书内容全面，便于查阅，侧重实用，可作为环境工程等领域的工程技术人员、科研人员和工矿企业广大环保工作者的工具书，也可作高等学校相关专业师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业除尘设备设计手册/张殿印, 申丽主编. —北京:
化学工业出版社, 2012.2
ISBN 978-7-122-13055-6

I. 工… II. ①张…②申… III. 工业尘-除尘设备-
设计-手册 IV. TU834.6-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 265388 号

责任编辑: 刘兴春
责任校对: 宋 夏

文字编辑: 汲永臻
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 45¼ 字数 1193 千字 2012 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 180.00 元

版权所有 违者必究

《工业除尘设备设计手册》编委会

主 编：张殿印 申 丽

副主编：张学义 王海涛 王 冠 任 旭 白洪娟

主 审：杨景玲 戴京宪

编 委（按姓氏笔画排序）：

王 冠 王海涛 邓元红 申 丽 申桂秋 田 炜

白洪娟 任 旭 冯馨瑶 安登飞 刘 怡 刘书平

朱法强 庄剑恒 陈 媛 陈盈盈 李本欣 李洪全

李倩婧 李素珍 朱晓华 肖 春 沈建忠 杨建勋

张殿印 张学义 赵松林 徐 飞 徐天平 徐顺环

顾生臣 顾晓光 黄 河 魏淑娟



工业除尘设备是防治大气污染应用最多的设备，也是除尘工程中最重要减排设备之一。工业除尘设备设计是否优良，制作是否精细，应用维护是否得当，直接影响工程投资费用、除尘效果、运行作业率。

除尘设备的特点是产品特异性大、专业性强，不同类型的除尘器从工作原理到构造、应用有很大差别，即使是同一种类型除尘设备也还有许多规格品种，难以进行标准化设计和生产，再加上应用条件的千变万化以及技术进步和新产品开发使得非标准设备设计和生产是大势所趋。即便是标准设备也不断改进和提高，一成不变的除尘设备是不存在的。因此，掌握工业除尘设备设计成为对除尘工程师的基本技术要求。

编写本书的目的在于给环境工程工作者和除尘设备设计人员提供一本具有理论和实际相结合、新颖与实用相结合的除尘设备设计工具书。本书特点是：（1）内容新颖，如除尘器气流相似理论、数值模拟方法和设计技术要点等；（2）内容全面，如对各种除尘器的工艺设计包括近年开发的新型除尘设备工艺设计等均有较全面分析；（3）联系实际，如对重要计算公式和方法举出设计计算实例和工程应用实例等。内容编写重点突出、概念清楚、层次分明、深入浅出、图文并茂、资料翔实、释义准确，以体现新内容、新术语、新规范，并充分注意了手册的系统性和完整性。读者通过本书可以对工业除尘设备设计有全面的了解和掌握。

全书共分十章，分别介绍了工业除尘设备分类和性能，除尘设备设计总则，除尘工艺设计，结构设计，气流组织设计，自动控制设计，辅助设备选型与设计，设备制作设计，涂装、保温、伴热设计和设备安装施工等内容。

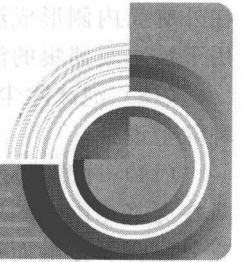
杨景玲教授、戴京宪教授对全书进行了审阅，书中参考和引用了一些科研、设计、教学和生产工作同行撰写的著作、论文、手册、教材和学术会议论文集等，在此对所有作者表示衷心感谢。本书在编写、审阅和出版过程中得到清华大学许宏庆教授和中冶集团钱雷教授等多位环保专家的鼎力相助，在此一并深致谢忱。

由于作者学识和水平有限，书中疏漏和不当之处在所难免，殷切希望读者朋友不吝指正。

编者

2012年3月于北京

第一章 工业除尘设备分类和性能



了解和掌握工业除尘设备的基本分类方法和主要性能，可助更好进行除尘设备设计，使设计工作更有针对性。

第一节 工业除尘设备分类

工业除尘设备分类有多种方法，本节按其作用力、除尘效率和工作状态进行分类，同时介绍除尘器概念和对各种因素适应性。

一、除尘器概念

在国家采暖通风与空气调节术语标准（GN 50155—92）中，明确了若干除尘器的具体含意，简介如下。

- (1) 除尘器 用于捕集、分离悬浮于空气或气体中粉尘粒子的设备，也称收尘器。
- (2) 沉降室 由于含尘气流进入较大空间速度突然降低，使尘粒在自身重力作用下与气体分离的一种重力除尘装置。本书称重力除尘器。
- (3) 干式除尘器 不用水或其他液体捕集和分离空气或气体中粉尘粒子的除尘器。
- (4) 惯性除尘器 借助各种形式的挡板，迫使气流方向改变，利用尘粒的惯性使其和挡板发生碰撞而将尘粒分离和捕集的除尘器。
- (5) 旋风除尘器 含尘气流沿切线方向进入筒体作螺旋形旋转运动，在离心力作用下将尘粒分离和捕集的除尘器。
- (6) 多管（旋风）除尘器 由若干较小直径的旋风分离器并联组装成一体的，具有共同的进出口和集尘斗的除尘器。
- (7) 袋式除尘器 用纤维性滤袋捕集粉尘的除尘器，也称布袋过滤器。
- (8) 颗粒层除尘器 以石英砂、砾石等颗粒状材料作过滤层的除尘器。
- (9) 电除尘器 由电晕极和集尘极及其他构件组成，在高压电场作用下，使含尘气流中的粒子荷电并被吸引、捕集到集尘极上的除尘器。
- (10) 湿式除尘器 借含尘气体与液滴或液膜的接触、撞击等作用，使尘粒从气流中分离出来的设备。



(11) 水膜除尘器 含尘气体从筒体下部进风口沿切线方向进入后旋转上升,使尘粒受到离心力作用被抛向筒体内壁,同时被沿筒体内壁向下流动的水膜所黏附捕集,并从下部锥体排出的除尘器。

(12) 卧式旋风水膜除尘器 一种由卧式内外旋筒组成的,利用旋转含尘气流冲击水面在外旋筒内侧形成流动的水膜并产生大量水雾,使尘粒与水雾液滴碰撞、凝集,在离心力作用下被水膜捕集的湿式除尘器。

(13) 泡沫除尘器 含尘气流以一定流速自下而上通过筛板上的泡沫层而获得净化的一种除尘设备。

(14) 冲激式除尘器 含尘气流进入筒体后转弯向下冲击液面,部分组大的尘粒直接沉降在泥浆斗内,随后含尘气流高速通过S形通道,激起大量水花和液滴,使微细粉尘与水雾充分混合、接触而被捕集的一种湿式除尘设备。

(15) 文丘里除尘器 一种由文丘里管和液滴分离器组成的除尘器。含尘气体高速通过喉管时使喷嘴喷出的液滴进一步雾化,与尘粒不断撞击,进而冲破尘粒周围的气膜,使细小粒子凝聚成粒径较大的含尘液滴,进入分离器后被分离捕集,含尘气体得到净化,也称文丘里洗涤器。

(16) 筛板塔 筒体内设有几层筛板,气体自下而上穿过筛板上的液层,通过气体的鼓泡使有害物质被吸收的净化设备。

(17) 填料塔 筒体内装有环形、波纹形或其他形状的填料,吸收剂自塔顶向下喷淋于填料上,气体沿填料间隙上升,通过气液接触使有害物质被吸收的净化设备。

(18) 空气过滤器 借助滤料过滤来净化含尘空气的设备。

(19) 自动卷绕式过滤器 使用滚筒状滤料并能自动卷绕清灰的空气过滤器。

(20) 真空吸尘装置 一种借助高真空度的吸尘嘴清扫积尘表面并进行净化处理的装置。

(21) 除尘 捕集、分离含气流中的粉尘等固体粒子的技术。

(22) 机械除尘 借助通风机和除尘器等进行除尘的方式。

(23) 湿法除尘 水力除尘、蒸汽除尘和喷雾降尘等除尘方式的统称。

(24) 水力除尘 利用喷水雾加湿物料,减少扬尘量并促进粉尘凝聚、沉降的除尘方式。

(25) 联合除尘 机械除尘与水力除尘联合作用的除尘方式。

(26) 除尘系统 一般情况下指由局部排风罩、风管、通风机和除尘器等组成的,用以捕集、输送和净化含尘空气的机械排风系统。

二、除尘器分类

(一) 除尘器的分类

除尘器的不同分类方法可以分成许多类型,用于不同粉尘和不同条件。

(1) 按除尘作用力原理情况分类 详见表 1-1。

(2) 按捕集烟尘的干湿情况分类 详见表 1-2。

(3) 按除尘效率分类 详见表 1-3。

(4) 按工作状态分类 按除尘器在除尘系统的工作状态,除尘器还可以分为正压除尘器和负压除尘器两类。按工作温度的高低分为常温除尘器和高温除尘器两类。按除尘器大小还可以分为小型除尘器、中型除尘器、大型除尘器和超大型除尘器等。

(5) 按除尘设备除尘机理与功能的不同,根据《HJ/T 11—1996 环境保护设备分类与命名》的方法分,除尘器分为以下 7 种类型。



表 1-1 常用除尘器的类型与性能

型式	除尘作用力	除尘设备种类		适用范围				不同粒径效率/%		
				粉尘粒径/ μm	粉尘浓度/ (g/m^3)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	阻力/Pa	50 μm	5 μm	1 μm
干式	重力	重力除尘器		>15	>10	<400	200~1000	96	16	3
	惯性力	惯性除尘器		>20	<100	<400	400~1200	95	20	5
	离心力	旋风除尘器		>5	<100	<400	400~2000	94	27	8
	静电力	电除尘器		>0.05	<30	<300	200~300	>99	99	86
	惯性力、扩散力与筛分	袋式除尘器	振打清灰 脉冲清灰 反吹清灰	>0.1	3~10	<260	800~2000 800~1500 800~2000	>99 100 100	>99 >99 >99	99 99 99
湿式	惯性力、扩散力与凝集力	自激式除尘器		100~0.05	<100	<400	800~1000 5000~10000	100	93	40
		喷雾除尘器			<10	<400		100	96	75
		文氏管除尘器			<100	<800		100	>99	93
	静电力	湿式电除尘器		>0.05	100	<400	300~400	>98	98	98

表 1-2 除尘器的干湿类型

除尘类别	烟尘状态	收尘设备
干式除尘	干尘	重力除尘器、惯性除尘器、干式电除尘器、袋式除尘器、旋风除尘器、泡沫除尘器、冲击式除尘器、文丘里除尘器、湿式电除尘器、水膜除尘器
湿式除尘	泥浆状	

表 1-3 除尘器除尘效率类型

除尘类别	除尘效率/%	除尘器名称
低效除尘	约 60	惯性除尘器、重力除尘器、水浴除尘器
中效除尘	60~95	旋风除尘器、水膜除尘器、自激除尘器、喷淋除尘器
高效除尘	>95	电除尘器、袋式除尘器、文丘里除尘器、空气过滤器、滤筒式除尘器、塑烧板除尘器

- ① 重力与惯性除尘装置，它包括重力沉降室、挡板式除尘器。
- ② 旋风除尘装置，它包括单筒旋风除尘器、多筒旋风除尘器。
- ③ 湿式除尘装置，它包括喷淋式除尘器、冲激式除尘器、水膜除尘器、泡沫除尘器、斜栅式除尘器、文丘里除尘器。
- ④ 过滤层除尘器，它包括颗粒层除尘器、多孔材料除尘器、纸质过滤器、纤维填充过滤器。
- ⑤ 袋式除尘装置，它包括机械振动式除尘器、电振动式除尘器、分室反吹式除尘器、喷嘴反吹式除尘器、振动式除尘器、脉冲喷吹式除尘器。
- ⑥ 静电除尘装置，它包括板式静电除尘器、管式静电除尘器、湿式静电除尘器。
- ⑦ 组合式除尘器，它包括为提高除尘效率，往往“在前级设粗颗粒除尘装置，后级设细颗粒除尘装置”的各类串联组合式除尘装置。

此外，随着大气污染控制法规的日趋严格，在烟气除尘装置中有时增加烟气脱硫功能，派生为烟气除尘脱硫装置。

(二) 除尘器的适应因素

- (1) 各种除尘设备对各类因素的适应性 见表 1-4。

表 1-4 各种除尘器对各类因数的适应性

因素 除尘器名称	粗粉 尘 ^①	细粉 尘 ^②	超细 粉尘 ^③	气体 相对 湿度高	气体 温度高	腐蚀 性气 体	可燃 性气 体	风量 波动 大	除尘 效率 >99%	维修 量大	占空 间小	投资 小	运行 费用 小	管理 困难
重力沉降室	★	⊗	⊗	☑	★	★	★	⊗	⊗	★	⊗	★	★	★
惯性除尘器	★	⊗	⊗	☑	★	★	★	⊗	⊗	★	★	★	★	★
旋风除尘器	★	☑	⊗	☑	★	★	★	⊗	⊗	★	★	★	⊗	☑
冲击除尘器	★	★	☑	★	☑	☑	★	☑	⊗	☑	★	☑	☑	☑
泡沫除尘器	★	★	⊗	★	☑	☑	★	⊗	⊗	★	★	★	☑	☑
水膜除尘器	★	★	⊗	★	☑	☑	★	⊗	⊗	★	★	★	☑	☑
文氏管除尘器	★	★	★	★	☑	★	★	☑	☑	☑	☑	☑	⊗	☑
袋式除尘器	★	★	★	☑	☑	☑	⊗	★	★	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
颗粒层除尘器	★	★	★	☑	☑	★	☑	☑	★	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
电除尘器(干)	★	★	★	☑	☑	☑	⊗	⊗	★	☑	⊗	⊗	★	⊗

① 指 50% (质量) 的粉尘粒径大于 $75\mu\text{m}$ 。

② 指 90% (质量) 的粉尘粒径小于 $75\mu\text{m}$ 。

③ 指 90% (质量) 的粉尘粒径小于 $10\mu\text{m}$ 。

注: ★——适应; ☑——采取措施后可适应; ⊗——不适应。

(2) 除尘设备评价 主要包括以下内容。

① 除尘器主要技术性能达到设计指标。包括处理风量、设备阻力、漏风率、除尘效率、排放浓度及其专项技术指标。

② 除尘器达到性能稳定、长期可靠连续运行。除尘率达到设计要求, 设备完好率、同步运转率较高。

③ 各项除尘设备运行费用指标清晰, 运行费用成本指标, 纳入生产成本管理。

④ 建立正规的除尘设备运行管理制度。当除尘器运行中存在问题时, 容易采取必要的完善措施。

(三) 粉尘粒径与除尘器选择关系

在粉尘的物理特性中, 粉尘粒径大小是关键的特征数据, 因为粒径大小与粉尘的其他许多特性是相关连的。图 1-1 示出粉尘类别、粒径范围和应采取除尘设备的相关关系。

三、粒子分离机理

粉尘粒子从气体中分离出来有多种方法, 这些方法都是以作用力为理论基础。由于力的性质不同, 使得气体中粒子分离有不同的机理和方法。

(一) 含气气体的流动特性

1. 空气的压力和压力场

空气的流动是由压力差而引起的。在室内或管道内空气, 无论它是否在运动, 都对周围墙壁或管壁产生一定压力。这种对器壁产生的垂直压力叫静压力。流动着的空气沿其运动方向所产生的压力叫动压力。静压力与动压力的代数和称为全压力, 均以“Pa”为单位而计量。空气流动空间的压力分布叫压力场。压力是时间与空间的函数, 如果在一定的空间内, 压力不随时间而变化, 称为稳定的压力场; 相反的则是不稳定的压力场。气流在管道中的流动主要由于通风机所造成的压力差而形成。由于局部泄漏或热源造成的空气密度差别, 也可

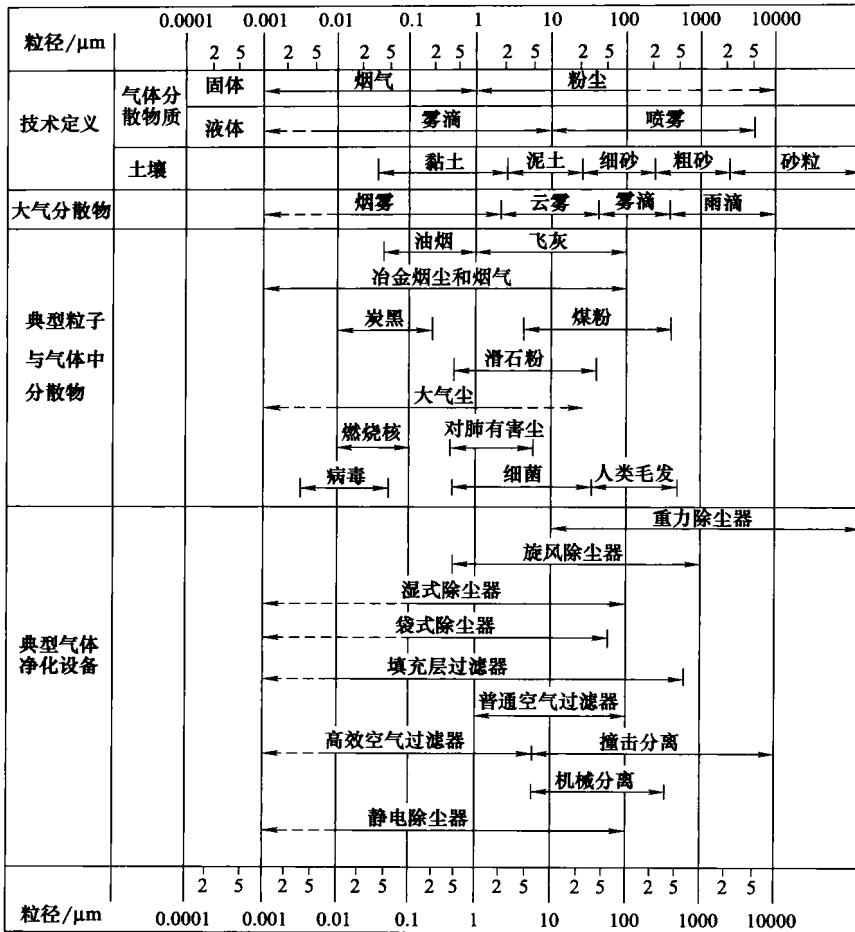


图 1-1 粉尘颗粒物特性及粒径范围与应采取除尘设备相关关系

能形成室内或通风管道系统内的气体流动。在管道系统内任一点的能量（压力）关系可用下式表示：

$$p_T = p_d + p_{st} \quad (1-1)$$

式中， p_T 为全压，Pa； p_d 为动压，Pa； p_{st} 为静压，Pa。

动压是以空气流速形式表现的，又称速度压。在一个封闭空间内，如果没有空气流动时，则动压为零。动压与流速的关系为：

$$p_d = \frac{v^2 \rho_a}{2} \quad (1-2)$$

式中， v 为管道内气流速度，m/s； ρ_a 为空气密度， kg/m^3 。

所以，在管道中，如果测知某断面平均动压并知道空气的压力和温度，便可以计算出气流速度 v 以及相应的气体流量 Q 。

$$v = \sqrt{2p_d / \rho_a} \quad (1-3)$$

$$Q = Fv \quad (1-4)$$

式中， Q 为管道中的气流量， m^3/s ； F 为测动压的管道断面积， m^2 。

气流在断面大小或形状变化的系统中流动时，其质量不变，即通过各个断面的空气重量是相等的，即



$$\rho_1 F_1 v_1 = \rho_2 F_2 v_2 = \dots = G = \text{const} \quad (1-5)$$

式中, F_1 、 F_2 为断面 1、2 处的管道面积, m^2 ; v_1 、 v_2 为断面 1、2 处的流速, m/s ; ρ_1 、 ρ_2 为断面 1、2 处的空气密度, kg/m^3 ; G 为气体流量, 以质量或重量计, kg/s 。

由于气体被看作不可压缩的, $\rho_1 = \rho_2$ 。于是上式可简化为:

$$F_1 v_1 = F_2 v_2 = Q = \text{const} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 说明, 在管道任一断面上的体积流量均相同。

2. 管道内气体的流动性质

气体在管道内低速流动时, 各层之间相互滑动而不混合, 这种流动称为层流。在层流状态下, 断面流速分布为抛物线形, 中心最大流速 v_c 为平均流速 v_p 的 2 倍, 即

$$v_c = 2v_p \quad (1-7)$$

流速继续增加, 达到一定速度时, 气体质点在径向也得到附加速度, 层间发生混合, 流动状态发展为紊流, 这时断面的流速分布也发生改变。表征管道内流动性质的是无量纲数值 Re , 叫雷诺数。

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (1-8)$$

式中, v 为气流速度, m/s ; D 为管道直径, m ; ρ 为气体密度, kg/m^3 ; μ 为气体动力黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ [或 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]。

表征管道内气流状态的 Re 值有如下界线: $Re < 1160$ 时, 气体流动为层流; $1160 < Re < 3000$ 时, 两种流动状态均可能; $Re \geq 3000$ 时, 对一般通风管道常有的条件来说, 气体流动都呈紊流状态。

3. 气流对球形尘粒的阻力

粉尘颗粒在气体中流动, 只要颗粒与气流两者之间有相对速度, 气体对粉尘颗粒就有阻力, 该气体阻力为

$$P_D = C_D A_p \frac{\rho_a v_p^2}{2} \quad (1-9)$$

式中, v_p 为尘粒相对于气流的运动速度, m/s ; ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; A_p 为尘粒垂直于气流方向的截面面积, m^2 ; C_D 为阻力系数。

阻力系数 C_D 的大小与粉尘颗粒在气流中运动的雷诺数 Re_p 有关, Re_p 表示为

$$Re_p = \frac{v_p d_p}{\nu} = \frac{v_p \rho_a d_p}{\mu} \quad (1-10)$$

式中, d_p 为粉尘的直径, μm ; 其他符号意义同前。

球形尘粒阻力系数 C_D 与雷诺数 Re_p 的关系曲线如图 1-2 所示。

由图 1-2 可以看出, 在不同的 Re_p 范围, C_D 值的变化按不同规律发生, 通常分成 4 个区段, 各有不同的表达式:

(1) $Re_p < 1$ (层流区) 时

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (1-11)$$

这时, 气流对尘粒的阻力为

$$R_D = \frac{3\pi}{\mu d_p v_p} \quad (1-12)$$

本区内按雷诺数的大小实际上又可区分为几种情况, 相应有若干不同的计算阻力系数公式, 但以斯托克斯式用得比较广泛。这个公式适合大多数过滤器的低速工况。

(2) $1 < Re_p < 500$ (过渡区) 通常采用柯利亚奇克公式, 认为它在 $3 < Re_p < 400$ 的情

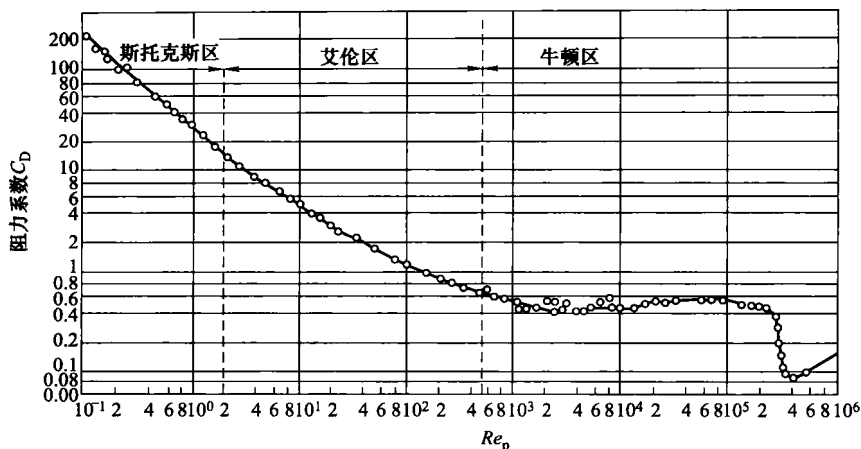


图 1-2 球形尘粒阻力系数与雷诺数的关系

况下比较接近实际, 该式为:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re_p}} \quad (1-13)$$

(3) $500 < Re_p < 2 \times 10^5$ (紊流区) 这时 C_D 近似为一常数, $C_D \approx 0.44$, 这时气流阻力和相对流速的平方成正比

$$P_D = 0.55 \pi \rho_n d_p^2 v_p^2 \quad (1-14)$$

(4) $Re_p > 2 \times 10^5$ (高速区) 阻力系数反而降低, 由 0.44 降到 0.1~0.22。

以上几种情况均适用于 d_p , 远远大于空气分子运动平均自由程 λ 的粗粒分散系。对于除尘过滤技术是适用的 (在温度为 20°C , 压力为 101325Pa 条件下, $\lambda = 0.065\mu\text{m}$)。

当尘粒直接接近 λ 时, 尘粒运动带有分子运动的性质, 另有修正关系。

在各种过滤为主的除尘器的工作过程中, 气流必须通过滤料的多孔通道, 而且流速经常限制在较低的区段内, 若以雷诺值判别, 含尘气流都处在层流状态下, 所以斯托克斯定律是适用的。在过滤过程中, 气流要绕穿相对稳定的滤料, 它们或者是球形颗粒 (对颗粒层堆积滤料来说), 或者是圆柱形纤维滤材, 这其中, 相对运动的阻力也应大体参照上述关系。图 1-3 是对圆球、圆柱体的阻力系数试验数据。

(二) 粉尘从气体中分离的条件

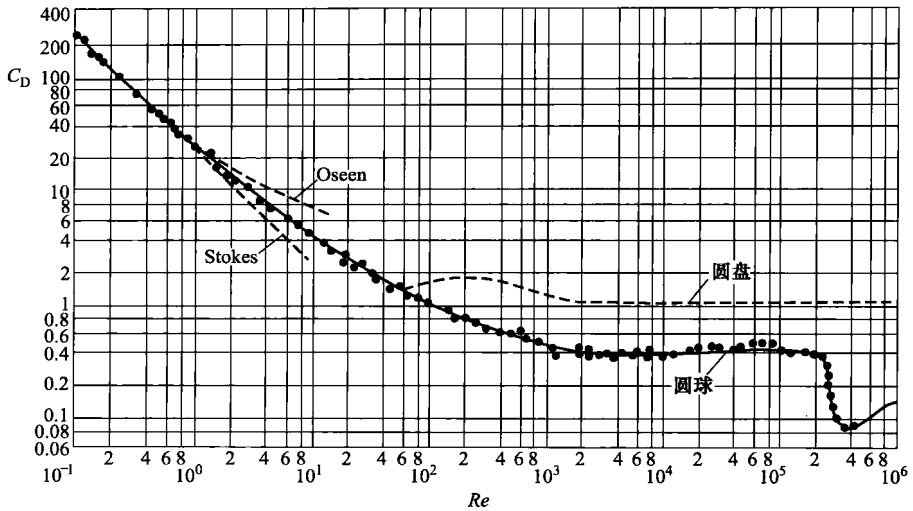
颗粒捕集机理如图 1-4 所示。含尘气体进入分离区, 在某一种或几种力的作用下, 粉尘颗粒偏离气流, 经过足够的时间, 移到分离界面上, 就附着在上面, 并不断除去, 以便为新的颗粒继续附着在上面创造条件。

由此可见, 要从气体中将粉尘颗粒分离出来, 必须具备的条件如下。

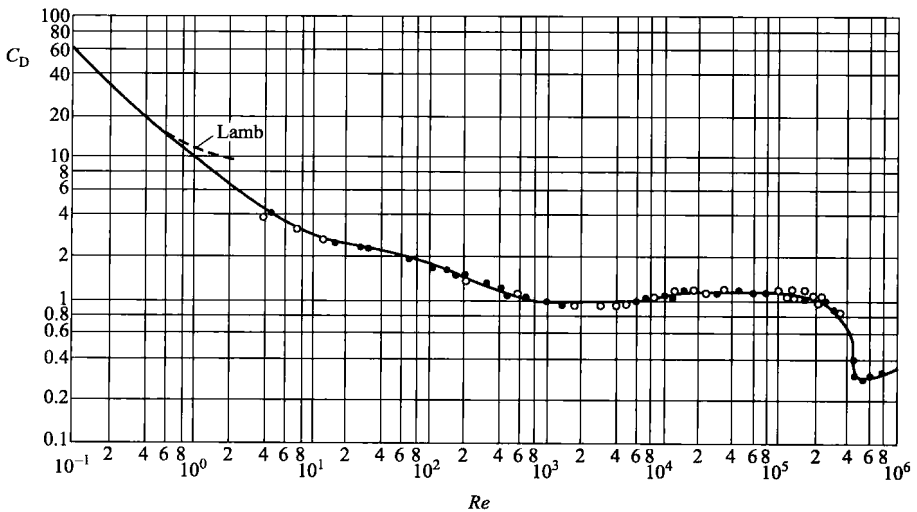
① 有分离界面可以让颗粒附着在上面, 如器壁、某固体表面、粉尘大颗粒表面、织物与纤维表面、液膜或液滴等。

② 有使粉尘颗粒运动轨迹和气体流线不同的作用力, 常见的有重力 (A)、离心力 (A)、惯性力 (B)、扩散 (C)、静电力 (A)、直接拦截 (D) 等, 此外还有热聚力、声波和光压等。

③ 有足够的时间使颗粒移到分离界面上, 这就要求分离设备有一定的空间, 并要控制气体流速等。



(a) 圆球和圆盘



(b) 圆柱体

图 1-3 圆球、圆板和圆柱体阻力系数与雷诺数的关系

④ 能使已附在界面上的颗粒不断被除去，而不会重新返混入气体内，这就是清灰和排灰过程，清灰有在线式和离线式两种。

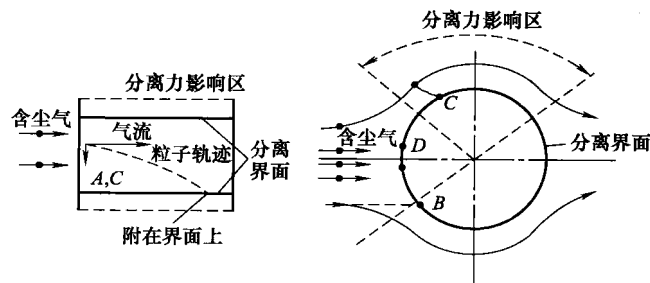


图 1-4 颗粒捕集机理示意



(三) 气体中粉尘分离主要机理

图 1-5 所示为从气体介质中分离悬浮粒子的物理学机理示意。其中，部分示意表示粉尘分离的主要机理；而另一部分则表示次要机理。次要机理只能提高主要机理作用效果。但是，这样划分机理是有条件的，因为在某些除尘装置中，粉尘分离的次要机理可能起着主要机理的作用。

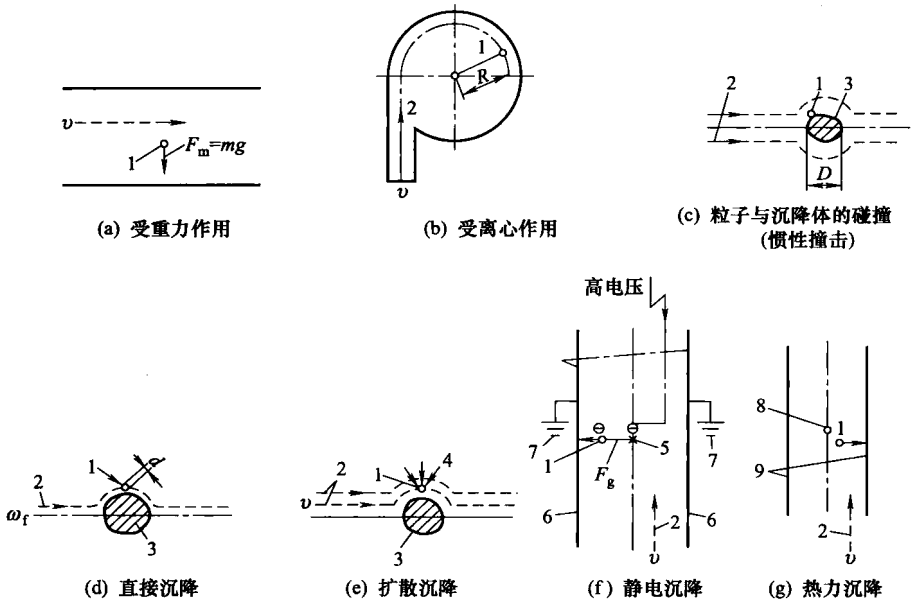


图 1-5 从气流中分离粉尘粒子的物理学机理示意

1—粉尘粒子；2—气流方向；3—沉降体；4—扩散力；5—负极性电晕电极；
6—积尘电极；7—大地；8—受热体；9—冷表面

1. 粉尘的重力分离机理

以粉尘从缓慢运动的气流中自然沉降为基础的，从气流中分离粒子是一种最简单，也是效果最差的机理。因为在重力除尘器中，气体介质处于湍流状态，故而粒子即使在除尘器中逗留时间很长，也不能期求有效地分离含尘气体介质中的细微粒度粉尘。

对较粗粒度粉尘的捕集效果要好得多，但这些粒子也不完全服从静止介质中粒子沉降速度为基础的简单设计计算。

粉尘的重力分离机理主要适用于直径大于 $100\sim 500\mu\text{m}$ 的粉尘粒子。

2. 粉尘离心分离机理

由于气体介质快速旋转，气体中悬浮粒子达到极大的径向迁移速度，从而使粒子有效地得到分离。离心除尘方法是在旋风除尘器内实现的，但除尘器构造必须使粒子在除尘器内的逗留时间短。相应地，这种除尘器的直径一般要小，否则很多粒子在旋风除尘器中短暂的逗留时间内不能到达器壁。正直径约 $1\sim 2\text{m}$ 的旋风除尘器内，可以十分有效地捕集 $10\mu\text{m}$ 以上大小的粉尘粒子。但工艺气体流量很大，要求使用大尺寸的旋风除尘器，而这种旋风除尘器效率较低，只能成功地捕集粒径大于 $70\sim 80\mu\text{m}$ 的粒子。对某些需要分离微细粒子的场合通常用更小直径的旋风除尘器。

增加气流在旋风除尘器壳体内的旋转圈数，可以达到增加粒子逗留时间之目的。但这样往往会增大被净化气体的压力损失，而在除尘器内达到极高的压力。当旋风除尘器内气体圆



周速度增大到超过 $18\sim 20\text{m/s}$ 时,其效率一般不会有明显改善。其原因是,气体湍流强度增大,以及往往不予考虑的因受科里奥利力的作用而产生对粒子的阻滞作用。此外,由于压力损失增大以及可能造成旋风除尘器装置磨损加剧,无限增大气流速度是不相宜的。在气体流量足够大的情况下可能保证旋风除尘器装置实现高效率的一种途径——并联配置很多小型旋风除尘器,如多管旋风除尘器。但是,此时则难以保证按旋风除尘器均匀分配含尘气流。

旋风除尘器的突出优点是,它能够处理高温气体,造价比较便宜,但在规格较大而压力损失适中的条件下,对气体高精度净化的除尘效率不高。

3. 粉尘惯性分离机理

粉尘惯性分离机理在于当气流绕过某种形式的障碍物时,可以使粉尘粒子从气流中分离出来。障碍物的横断面尺寸愈大,气流绕过障碍物时流动线路严重偏离直线方向就开始得愈早。相应地,悬浮在气流中的粉尘粒子开始偏离直线方向也就愈早。反之,如果障碍物尺寸小,则粒子运动方向在靠近障碍物处开始偏移(由于其承载气流的流线发生曲折而引起)。在气体流速相等的条件下,就可发现第二种情况的惯性力相应地较大。所以,障碍物的横断面尺寸愈小,顺障碍物方向运动的粒子达到其表面的概率就愈大,而不与绕行气流一道绕过障碍物。由此可见,利用气流横断面方向上的小尺寸沉降体,就能有效地实现粉尘的惯性分离。将水滴(在洗涤器、文丘里管中)或纤维(在织物过滤器中)应用于粉尘的惯性分离,其原因就在于此。但是在利用此类沉降体时必须使粒子具有较大的惯性行程,这只有在气体介质被赋予较大局部速度时才可能实现。因此,利用惯性机理分离粉尘,势必给气流带来巨大的压力损失。然而,它能达到很高的捕集效率,从而使这一缺点得以补偿。借助上述机理可高效捕集几微米大小的粒子,从而接近袋式除尘器、文氏管除尘器等高效率的除尘器。

利用惯性机理捕集粗粒度粉尘时,粉尘的特征是惯性行程较大,可降低对气体急拐弯构件的要求。在这种情况下可以用角钢或带钢制成百叶窗式除尘器以及各种烟道弯管作为这种构件,也可以在含尘气流运动路径中设置挡板,提高除尘效果。这种装置的效率较低,通常与重力沉降装置配合使用。

4. 粉尘静电力分离机理

静电力分离粉尘的原理在于利用电场与荷电粒子之间的相互作用。虽然在一些生产中产生的粉尘带有电荷,其电量和符号可能从一个粒子变向另一个粒子,因此,这种电荷在借助电场从气流中分离粒子时无法加以利用。由于这一原因,电力分离粉尘的机理要求使粉尘粒子荷电。还可以通过把含尘气流纳入同性荷电离子流的方法达到使粒子荷电。

为了产生使荷电粒子从气流中分离的力,必须有电场。电场是在顺沿含尘气流运动路径设置的异性电极上形成电位差的结果。在直接靠近积尘电极的区域,这些力的作用显示最为充分。因为在其余气流体积内存在强烈湍流脉动。

荷电粒子受到的电力相当小,所以,利用静电力机理实现粉尘分离时,只有使粒子在电场内长时间逗留才能达到高效率。这就决定了电力净化装置——电除尘器的一个主要缺点,即由于保证含尘气流在电除尘器内长时间逗留的需要,电除尘器尺寸一般十分庞大,因而相应地提高了设备造价。

但是,与外形尺寸同样庞大的高效袋式除尘器相比,其独特优点是电力净化装置不会造成很高的压力损失,因而能耗较低。电力净化的另一个重要优点是,可以用来处理工作温度达 400°C 的气体,在某些情况下可处理温度更高的气体。

至于用电力方法可捕集的粒子最小尺寸,至今还没有一个规定的粉尘细度极限。借助某些型式的电除尘器还可以有效地捕集工业气体中的微细酸雾。



(四) 气流中粉尘分离的辅助机理

1. 粉尘分离的扩散过程

绝大多数悬浮粒子在触及固体表面后就留在表面上，以此种方式从该表面附近的粒子总数中分离出来。所以，靠近沉积表面产生粒子浓度梯度。

因为粉尘微粒在某种程度上参加其周围分子的布朗运动，故而粒子不断地向沉积表面运动，使浓度差趋向平衡。粒子浓度梯度愈大，这一运动就愈加剧烈。

悬浮在气体中的粒子尺寸愈小，则参加分子布朗运动的程度就愈强，粒子向沉积表面的运动也相应地显得更加剧烈。

上面描述的过程称为粒子的扩散沉降。这一过程在用织物过滤器捕集细微粉尘时起着特别明显的作用。

2. 热力沉淀作用

管道壁和气流中悬浮粒子的温度差影响这些粒子的运动。如果在热管壁附近有一不大的粒子，则由于该粒子受到迅速而不均匀加热的结果，其最靠近管壁的一侧就显得比较热，而另一侧则比较冷。靠近较热侧的分子在与粒子碰撞后，以大于靠近冷侧分子的速度飞离粒子，结果是作用于粒子的脉冲产生强弱差别，促使粒子朝着背离受热管壁的方向运动。在粒子受热而管壁处于冷态的情况下，也将发生类似现象，但此时，悬浮在气体中的粒子将不是背离管壁运动，而是向着管壁运动，从而引起粒子沉降效应，即所谓热力沉淀。

热力沉淀的效应不仅显现在粒子十分微细的情况下，且显现在粒子较粗的场合。但在第二种情况下热力沉淀的物理过程更为复杂，虽然这一过程的原理依然是在温度梯度条件下粒子周围的分子运动速度不同。

当除尘器内的积尘表面用人工方法冷却时，热力沉淀的效应特别明显。

3. 凝聚作用

凝聚是气体介质中的悬浮粒子在互相接触过程中发生黏结的现象。之所以会发生这种现象，也许是粒子在布朗运动中发生碰撞的结果，也可能是由于这些粒子的运动速度存在差异所致。粒子周围介质的速度发生局部变化，以及粒子受到外力的作用，均可能导致粒子运动速度产生差异。

当介质速度局部变化时，所发生的凝聚作用在湍流脉动中显得特别明显，因为粒子被介质吹散后，由于本身的惯性，跟不上气体单元体积运动轨迹的迅速变化，结果粒子互相碰撞。

引起凝聚作用的外力可以是使粒子以不同悬浮速度运动的重力，或者是在存在外部电场条件下荷电粒子所受的电力。

粒子的相互运动也可能是气体中悬浮粒子荷电的结果；在同性电荷的作用下粒子互相排斥，而在异性电荷的作用下互相吸引。

如果是多分散性粉尘，细微粒子与粗大粒子凝聚，而且细微粒子愈多，其尺寸与粗大粒子的尺寸差别愈大，凝聚作用进行愈快。粒子的凝聚作用为一切除尘设备提供良好的捕尘条件，但在工业条件下很难控制凝聚作用。

第二节 工业除尘设备性能

除尘器性能包括处理气体流量、除尘效率、排放浓度、压力损失（或称阻力）、漏风率

等(见表 1-5)。若对除尘装置进行全面评价,还应包括经济指标除尘器的安装、操作、检修的难易等因素。对每种除尘器还有些特殊的指标(见表 1-6)。

表 1-5 技术性能检测方法

序号	技术性能	检测方法	序号	技术性能	检测方法
1	处理风量/(m ³ /h)	皮托管法	4	除尘效率/%	重量平衡法
2	漏风率/%	风量(碳)平衡法	5	排放浓度/(mg/m ³)	滤筒计重法
3	设备阻力/Pa	全压差法			

表 1-6 特种专业指标

序号	特种指标	袋式除尘器	湿式除尘器	静电除尘器
1	过滤风量/(m ³ /min)	0		
2	水气比/(kg/m ³)		0	0 ^①
3	喉口速度水气比/(m/s)		0	
4	电场风速/(m/s)			0
5	比集尘面积/[m ² /(m ³ ·s)]			0
6	驱进速度/(cm/s)			0
7	排放量/(kg/h)	0	0	0

① 适用湿式静电除尘器。

一、处理气体流量

处理气体流量是表示除尘器在单位时间内所能处理的含尘气体的流量,一般用体积流量 Q (单位: m³/s 或 m³/h) 表示。实际运行的除尘器由于不严密而漏风,使得进出口的气体流量往往并不一致。通常用两者的平均值作为该除尘器的处理气体流量,即

$$Q = \frac{1}{2}(Q_1 + Q_2) \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1-15)$$

式中, Q 为处理气体流量, m³/h; Q_1 为除尘器进口气体流量, m³/h; Q_2 为除尘器出口气体流量, m³/h。

净化器漏风率 σ 可按下式表示:

$$\sigma = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \quad (1-16)$$

在设计除尘器时,其处理气体流量是指除尘器进口的气体流量,在选择风机时,其处理气体流量对正压系统(风机在除尘器之前)是指除尘器进口气体流量,对负压系统(风机在除尘器之后)是指除尘器出口气体流量。

处理风量计算式如下:

$$V_0 = 3600Fv \frac{B+p}{101325} \times \frac{273}{273+t} \times \frac{0.804}{0.804+f} \quad (1-17)$$

式中, V_0 为实测风量, m³/h; F 为实测断面积, m²; v 为实测风速, m/s; B 为实测大气压力, Pa; p 为设备内部静压, Pa; t 为设备内部气体温度, °C; f 为设备内气体饱和含湿量, kg/m³。

在非饱和气体状态时, $\frac{0.804}{0.804+f} \approx 1$ 。

在计算处理气体量时有时要换算成气体的工况状态或标准状态,计算式如下:

$$Q_n = Q_g(1 - X_w) \frac{273}{273+t_g} \times \frac{B_a + P_g}{101325} \quad (1-18)$$

式中, Q_n 为标准状态下的气体量, m³/h; Q_g 为工况状态下的气体量, m³/h; X_w 为