

袋式除尘

技术与应用

Daishi Chuchen Jishu Yu Yingyong

孙熙 编著



袋式除尘技术与应用

孙 熙 编著



机械工业出版社

袋式除尘(收尘)技术正在得到越来越广泛的应用。本书详细介绍了袋式除尘的机理;袋式除尘器的分类及选型;袋式除尘器滤料的制造、选用及检测;袋式除尘器清灰系统;袋式除尘器配件;除尘排风罩;除尘系统及除尘风机的选择与设计;最后还介绍了袋式除尘应用的若干实例,使读者对袋式除尘技术及其最新发展有一个较完整的认识。

本书可供从事环境保护、物料收集及设备保护等工作人员使用,亦可供环境保护及相关专业的大专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

袋式除尘技术与应用/孙熙编著. —北京:机械工业出版社, 2004. 2
ISBN 7-111-13742-6

I. 袋... II. 孙... III. 滤袋除尘器 IV. TM925.31

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第122530号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:杨少彤 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:张静 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年2月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·23.5印张·577千字

0 001—4 000册

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

我国从1957年自行研制出袋式收尘器以来，袋式收尘器在大气环境保护、物料收集、机械设备保护、工作环境保护等方面得到了广泛应用。在我国各行各业，几乎都能见到袋式除尘器的身影。

改革开放以来，由于各项事业飞速发展的需要，我国又先后引进了一批不同类型的袋式除尘器，这些除尘器有的在我国已得到广泛应用，有的则刚刚试用。

袋式除尘技术是一项系统工程，它不仅涉及除尘器本身，也涉及到构成除尘器的滤料、滤袋、清灰系统、配件及输灰系统，还涉及到整个除尘系统的设计及使用管理等多方面问题。为了和广大技术人员共同研究探讨袋式除尘技术及应用的问题，在收集了各方面的资料的基础上，将多年研究的一些成果一并写成此书，供各界朋友参考。

书中大量内容是我国除尘工作者多年积累的经验，由于本人能力及时间所限，整理得不甚完全，有一些也显得过于粗糙，只想抛砖引玉，希望今后有更多好书出现。

本书得到国内众多除尘老专家的支持，他们将多年积累的资料坦诚地送给我，使我由衷地钦佩，并在此向他们表示感谢。

目前，袋式除尘技术在我国正面临着一个大推广的前夜，如若此书对袋式除尘技术的普及和推广能有所裨益，乃作者之心愿。

写书之前，信心十足；成稿之后，诚惶诚恐。诚请各位读者、专家和朋友指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 过滤除尘机理 1

- 1.1 概述 1
- 1.2 纤维过滤器 1
- 1.3 膜过滤 20
- 1.4 颗粒过滤 21

第 2 章 袋式除尘器分类及形式特点 ... 30

- 2.1 袋式除尘器分类 30
- 2.2 袋式除尘器的命名 33
- 2.3 袋式除尘器形式 35

第 3 章 袋式除尘器选型 55

- 3.1 脉冲喷吹袋式除尘器 55
- 3.2 长袋低压脉冲除尘器 61
- 3.3 分室引射脉冲喷吹袋式除尘器 68
- 3.4 滤筒脉冲喷吹除尘器 70
- 3.5 环隙喷吹脉冲袋式除尘器 75
- 3.6 扁袋脉冲喷吹除尘器 81
- 3.7 顺喷脉冲袋式除尘器 83
- 3.8 气环反吹袋式除尘器 83
- 3.9 回转反吹袋式除尘器 86
- 3.10 反吹风袋式除尘器 89
- 3.11 机械振打袋式除尘器 93
- 3.12 气箱脉冲袋式除尘器 97

第 4 章 滤料类型及其特性 106

- 4.1 概述 106
- 4.2 织造滤料 107
- 4.3 非织造滤料 112
- 4.4 复合滤料 122
- 4.5 滤料的性能 124
- 4.6 过滤筒 132

第 5 章 玻璃纤维过滤材料 134

- 5.1 概述 134

- 5.2 玻璃纤维滤料的材质 134

- 5.3 玻璃纤维滤料的种类 135

- 5.4 玻璃纤维滤料的表面处理 137

- 5.5 玻璃纤维滤料的检验 138

- 5.6 玻璃纤维缝纫线 140

- 5.7 玻璃纤维过滤袋的加工及其标准 140

- 5.8 玻璃纤维过滤材料的选用 140

- 5.9 典型玻璃纤维滤料性能 142

第 6 章 滤料的选用 145

- 6.1 根据含尘气体的特性选用滤料 145
- 6.2 根据粉尘的性状选用滤料 148
- 6.3 根据除尘器的清灰方式选用滤料 152
- 6.4 根据其他特殊要求选用滤料 153
- 6.5 工艺除尘系统选用的滤料及其过滤速度 155

第 7 章 滤料性能检测 168

- 7.1 概述 168
- 7.2 滤料断裂强度和断裂伸长率检测 169
- 7.3 滤料经向定负荷伸长率的检测 171
- 7.4 滤料胀破强度的检测 171
- 7.5 滤料透气性及阻力的检测 172
- 7.6 滤料滤尘特性的检测 175
- 7.7 滤料静电特性检测 177
- 7.8 滤料阻燃性及燃烧性能的检测 179
- 7.9 滤料疏水性能的检测 183
- 7.10 滤料疏油性的测定 184
- 7.11 滤料耐温性能检测 185
- 7.12 滤料耐蚀性能检测 185

第 8 章 除尘器清灰设计 187

- 8.1 反吹风除尘器清灰设计 187
- 8.2 脉冲清灰系统 193
- 8.3 脉冲控制仪 213

第 9 章 袋式除尘器滤袋及配件 220

- 9.1 概述 220

9.2 滤袋结构	221	13.3 袋式除尘器净化高炉煤气	322
9.3 滤袋的规格	225	13.4 转炉二次烟尘的治理	329
9.4 滤袋的加工	227	13.5 负压反吹风袋式除尘器在焦炉焦侧 除尘上的应用	333
9.5 滤袋配件	228	13.6 首钢炼铁厂高炉原料袋式除尘系统 改造	335
第 10 章 局部排风罩设计	234	13.7 炼钢厂铁水倒罐和铁水脱磷除尘 设计	339
10.1 概述	234	13.8 宝钢集团五钢公司 100t 电炉烟气 净化	341
10.2 密闭罩及通风柜	235	13.9 安钢 100t 竖式电炉除尘	344
10.3 外部排风罩	251	13.10 菱形袋式除尘器在自焙槽电解铝 烟气净化系统中的应用	346
10.4 接受式排风罩	260	13.11 首钢铁合金厂 6 000kVA 硅锰 电炉烟气治理	348
10.5 吹吸式排风罩	262	13.12 宁夏××铁合金厂硅粉尘的污染 控制及回收	350
第 11 章 除尘系统设计计算	271	13.13 长袋脉冲除尘器在钢坯修磨和 抛丸机上的应用	353
11.1 风管阻力	271	13.14 袋式收尘器在电石炉烟尘治理 上的应用	355
11.2 通风除尘管道系统的设计计算	285	13.15 10t/h 冲天炉烟气治理	357
11.3 通风管道布置	290	13.16 分室低压脉冲袋式除尘器净化 沥青混凝土烟尘	359
11.4 高温烟气系统设计	295	13.17 JSS 型塑烧板除尘器在饱和气体 除尘中的应用	363
第 12 章 风机	304	13.18 滤料失效分析	365
12.1 风机分类	304	参考文献	367
12.2 离心风机的性能参数	305		
12.3 风机的选型	308		
第 13 章 袋式除尘器应用实例	313		
13.1 旋转式低压脉冲袋式除尘器在 燃煤电厂的应用	313		
13.2 用袋式除尘器处理垃圾焚烧炉 尾气	319		

第 1 章 过滤除尘机理

1.1 概述

袋式除尘是采用过滤技术将空气中的固体颗粒物进行分离的过程。袋式除尘器（袋式收尘器）是采用过滤技术进行气固分离的设备。

空气过滤技术目前主要有纤维过滤、膜过滤和颗粒过滤。尽管这三种方式都能达到将气溶胶中固体颗粒分离出来的目的，但它们的分离机理是不一样的。袋式除尘为纤维过滤，或膜过滤与颗粒过滤的组合。

空气过滤技术用在两个方面：一是纯化含有颗粒物的空气；二是把空气中的粒子作为样品“收集”下来。第一种情况下要用的是空气，第二种情况下要用的是粒子。“纯化”常用于处理大量空气，用于工业过程的防护、环境保护，也可处理小量空气，如用于防毒面具佩戴者的个人防护。“收集”处理的空气量一般较“纯化”处理的空气量要小，多用于工业生产，特别是化工、医药生产。

1.2 纤维过滤器

纤维过滤器的滤料是由大量纤维疏松地充填在一起组成的过滤介质，纤维的取向与气流方向垂直为主，粒子大多数沉积在介质内部。纤维过滤器属于所谓“障碍物形式”捕集方式的过滤器。

1.2.1 障碍物形式捕集理论

在气流中插入圆柱、圆球类障碍物，障碍物与气体及其中粒子之间存在较大的相对运动，粒子在障碍物上被捕集。集尘装置中多数都属于这种形式。只是在障碍物的形状、相对运动的方式上各有不同。

如图 1-1 所示，在气流流通断面面积一定，长度为 L 的集尘装置内，任意形状的障碍物以 α 的比例被充填。考虑微元长度 dx 范围内的物质的进入和排放，可以得出微元长度 dx 内的集尘效率

$$uc - u(c + dc) = \eta n A u_0 c dx \quad (1-1)$$

式中， η 为单一捕集效率； u 、 u_0 为气流的空塔速度和气流与障碍物的接近速度； A 、 n 为对障碍物气流流动方向的投影断面面积和单位体积障碍物的数目； c 为粒子浓度。其中，接近速度与障碍物数，用式（1-2）、式（1-3）表示， v_c 为障碍物的充填率。

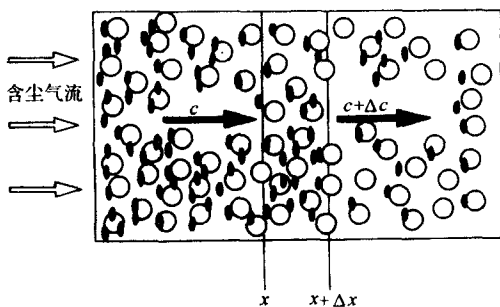


图 1-1 障碍物形式粒子分离图

$$u_0 = \frac{u}{1 - \alpha} \quad (1-2)$$

$$\alpha = nv_c \quad (1-3)$$

将式 (1-2)、式 (1-3) 代入式 (1-1) 中得到

$$-\frac{dc}{c} = \eta \frac{A}{v_c} \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) dx \quad (1-4)$$

考虑到进出口浓度, 求解上式, 得到下式:

$$E = 1 - \frac{c_0}{c} = 1 - \exp \left(- \frac{A}{v_c} \frac{\alpha}{1 - \alpha} \eta L \right) \quad (1-5)$$

$\frac{A}{v_c}$ 由障碍物的形状与配置而决定, 在圆柱和球形障碍物的场合用下式计算:

$$\frac{A}{v_c} = \begin{cases} \frac{4}{\pi D_c} & \text{圆柱} \\ \frac{3}{2 D_c} & \text{球} \end{cases} \quad (1-6)$$

1.2.2 单一捕集体对粒子的分离

所谓单一捕集体效率 η , 是粒子的最小捕集单位——障碍物是 1 个时的粒子捕集效率。模式如图 1-2 所示。单一捕集效率定义为同一时间内被障碍物捕集的粒子量与认为障碍物不存在时这个流域流入的粒子量之比。

$$\eta = \frac{cAu}{c_c u} \quad (1-7)$$

式中, c 为粒子浓度; A , A_c 为捕集断面面积, 障碍物投影面积; D_c 为直径。

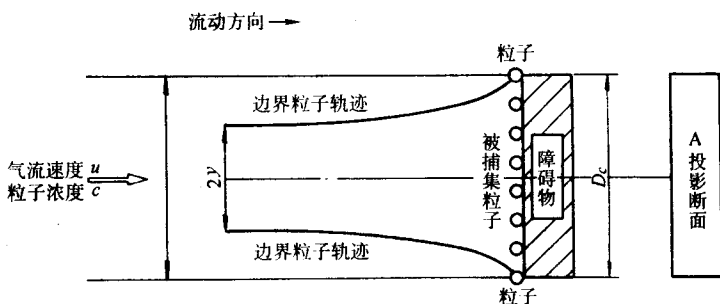


图 1-2 单一捕集体捕集效率

粒子的轨迹为图 1-2 中的实线, 在距障碍物无限远处, 距中轴高度 y 以下流线内的粒子被捕获, 比其略高的位置流入的粒子就不被捕获, 把这个粒子的轨迹称为边界粒子轨迹。

$$\eta = \begin{cases} \left(\frac{2y}{D_c} \right)^2 & \text{球, 圆盘等} \\ \frac{2y}{D_c} & \text{圆柱, 丝条等} \end{cases} \quad (1-8)$$

式中, $2y$ 为边界粒子轨迹的流入幅度。

1.2.2.1 粒子的运动

在气流中的球形粒子的运动, 是气流和作用于粒子的各种力相互作用的结果。所以, 障

碍物对粒子的捕集效率与粒子的运动密切相关, 其关系如图 1-3 所示。

当粒子较大, 受到较大的惯性力和外力作用时, 用式 (1-9) 表示; 在粒子较小时主要受布朗扩散支配的场合用式 (1-10) 表示。

$$S_{ik} \frac{dv}{dt} + v - u = BFe \quad (1-9)$$

$$\left(u + \frac{BFe}{u_0} \right) \text{grad} n = \frac{2}{Pe} v^2 n \quad (1-10)$$

$$S_{ik} = \frac{c_c \rho_p x^2 u_0}{9\mu D_c}, B = \frac{C_c}{3\pi\mu x},$$

$$Pe = \frac{D_c u_0}{D_{BM}}, D_{BM} = \frac{C_c KT}{3\pi\mu x} \quad (1-11)$$

式中, $u = \frac{u'}{u_0}$, $v = \frac{v'}{u_0}$ 分别为流体和粒子的无量纲速度; u_0 为气流的代表速度; Fe 为作用于粒子的外力; S_{ik} , Pe 和 BFe 分别为表示粒子的惯性力、粒子扩散大小的无量纲参数, 其中 S_{ik} 为斯托克斯数, Pe 为皮克莱特数, BFe 与作用外力相对应, 叫作重力参数或库仑力参数等, B 为粒子移动速度。

气流速度由以障碍物直径作基准的雷诺数 Re ($D_c u_0 \rho_f / \mu$) 与障碍物的充填状态 (充填率 α) 确定, 若给出初始条件和 S_{ik} 、 Pe 、 BFe/u_0 等无量纲数, 粒

子的运动和在障碍物附近的粒子的浓度分布, 由式 (1-9)、式 (1-10) 可求出。从而单一体捕集效率 η 根据这些无量纲量的组合影响其大小, 进而还受粒子的大小与其障碍物尺寸的比即拦截参数 R (X/D_c) 的影响。在粒子的捕集机理中, 由于这些因子给予效率极大的影响, 所以称为惯性、扩散拦截、重力、静电机理。下面就各捕集机理的特征概谈一下, 对效率添加 I 、 D 、 R 、 G 、 E 等字, 表示与其机理有关。

1.2.2.2 不同机理的单一捕集效率

1. 拦截机理 (R) $S_{ik}=0$, $BFe/u_0=0$, 在无惯性力与外力作用时, 相当于式 (1-9) 中 $S_{ik}=0$, 或式 (1-10) 中 $BFe/u_0=0$ 的场合, 也就是说粒子完全随气流一同运动。粒子的捕集是由于粒子的一部分与障碍物表面接触。如图 1-4 中的 a 那样的粒子, 粒子的中心轨迹, 即使离开障碍物, 与障碍物之间的距离若等于粒子的半径, 那个粒子就能被障碍物捕集。从而在上图中连通 b 轨迹成为边界粒子轨迹。在这种机理中, 粒子轨迹也是气流的流线。所谓边界粒子轨迹, 就是距离与粒子半径相等的最接近障碍物的流线。

围绕障碍物的气流, 由物体的形状、雷诺数 Re 、充填率 α 决定。因为边界粒子轨迹, 也

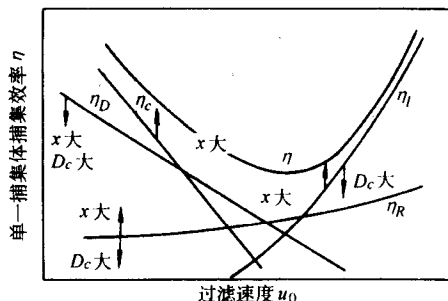


图 1-3 各捕集机理与过滤速度的关系

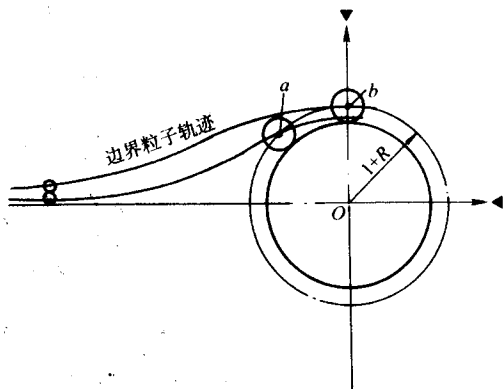


图 1-4 拦截效应对粒子的捕集

就是必须考虑最接近点的坐标, 所以, 单一捕集效率决定于 Re 、 α 、 R 。表 1-1 为对圆柱和球的解析解。

表 1-1 球和圆柱的拦截效率

	$Re < 1$	$Re = \infty$
圆柱	$\eta_R = \frac{1}{2h} \left[2(1+R)\ln(1+R) + \frac{1}{1+R} - (1+R) \right]$	$\eta_R = (1+R) - \frac{1}{1+R}$
球	$\eta_R = \left[\frac{1}{4(1+R)} - \frac{3}{4}(1+R) + \frac{(1+R)^2}{2} \right]$	$\eta_R = \frac{1}{4(1+R)} - \frac{(1+R)^2}{2}$

注: h 为流体因子; 孤立圆柱 $h_L = 2 - \ln Re$ (Lamb 因子); 圆柱群 $h_k = -1/2 \ln \alpha + \alpha - \alpha^2/4 - 3/4$ (桑原因子)。

2. 惯性和惯性捕集机理 (I, IR) $S_{ik} \neq 0, BFe/u_0 = 0$ 。因为无外力作用, 粒子的运动由 S_{ik} 和气流决定。气流的解析解, 在特殊的场合很渺茫。此外, 因为求运动方程的解析解几乎不可能, 效率均由数值解解出。

图 1-5 是决定于各种不同形状的障碍物的质点粒子 ($R=0$) 的捕集效率计算值; 图 1-6 是对于圆柱 $R=0.1$ 的粒子的捕集效率计算值。

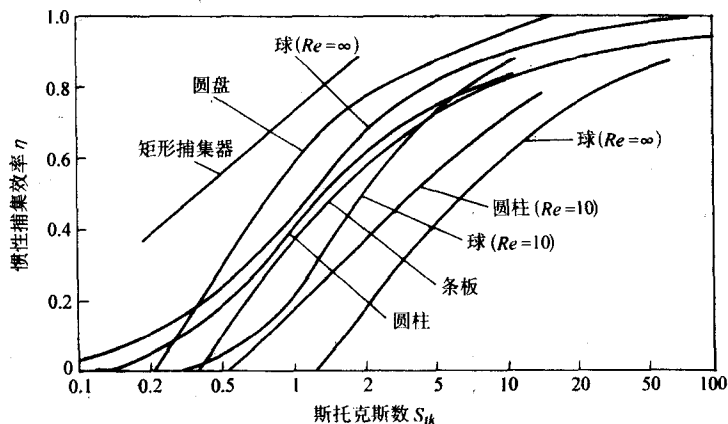


图 1-5 各种不同形状障碍物的惯性捕集效率

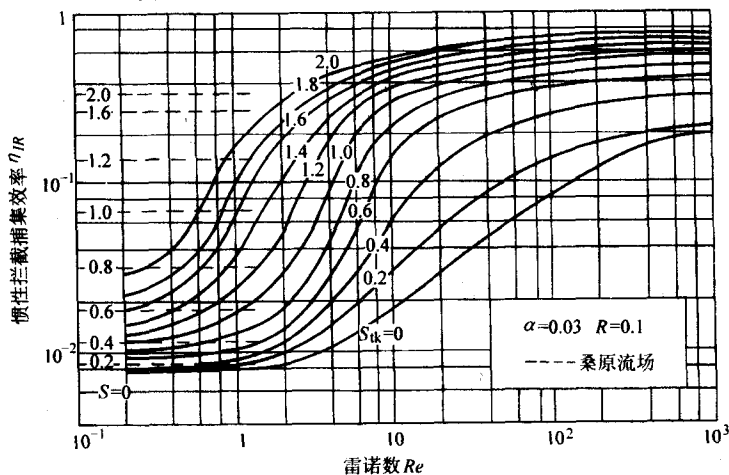


图 1-6 全 Re 数领域单一圆柱惯性拦截效率曲线

在图 1-5 中 η_i 不仅决定于障碍物形状, 而且决定于 S_{ik} 、 Re 。在 S_{ik} 很小时, $\eta=0$ 。即质点粒子若不受到某种程度以上的惯性力, 就不能到达障碍物表面。

与此相对, 具有一定大小的粒子, 在图 1-7 中, 在 S_{ik} 的全部范围, η_{ik} 持有的数值, 随 S_{ik} 、 Re 、 R 增大而增大。但是, 在这三个参数之间, 有如式 (1-12) 的关系, 从而由于由参数对效率的影响的方式不同, 效率变化非常复杂。

如图 1-7 所示, 在低 Re 和高 Re 区域, 拦截参数 R 越大, 效率越高; 对中间的 Re , R 越小, 效率越高。这是因为对中间 Re 区域, R 越小, Re 的相关率越大。

$$S_{ik} = \frac{C_{cpp}}{9\rho_f} \cdot \frac{D_c u_0 \rho_f}{u} \cdot \left(\frac{x}{D_c}\right)^2 = \frac{C_{cpp}}{9\rho_f} Re R^2 \quad (1-12)$$

3. 外力机理 (e, eR) $S_{ik}=0, BFe/u_0 \neq 0$, 这是由外力和气流决定粒子轨迹的情况。重力、静电力、热泳动力、扩散泳动力等对捕集的作用相当。

(1) 重力 (G, GK)。对大粒径、低流速是主要的捕集机理, 因为 $Fe=mg$, 无量纲参数变为 $G=C_{cpp}x^2g/18\mu u$ 。在这种状况下, 气流与重力作用方向相同还是垂直, 效率不同。表 1-2 为对圆柱和球的解析解。

(2) 静电力 (E, ER)。在有粒子和障碍物一方或双方带有电荷, 当有外部电场时便有力的作用。特别是当由惯性和扩散作用对粒子捕集作用小的时候, 效果更为显著。

表 1-2 单一圆柱和球的重力捕集效率 η_{GR}

流 态		表 达 式
粘性流 $Re \approx 0$	水平流	$\frac{1+R}{\sqrt{1+G^2} \sqrt{1+(R^2/hG)^2}} \left\{ \frac{R^2[1/(1+R)^2 - 1 + \ln(1+R)^2]}{2h^2G} + G \right\}$
	上下流	$\frac{1+R}{1+G} \left\{ \frac{1}{2h} \left[\frac{1}{(1+R)^2} - 1 + \ln(1+R)^2 \right] + G \right\}$
势流 $Re \approx \infty$	水平流	$\frac{\sqrt{(1+R)^4 G^2 + [(1+R)^2 - 1]^2}}{(1+R) \sqrt{1+G^2}}$
	上下流	$\frac{1}{1+G} \left[G(1+R) - \frac{1}{1+R} + (1+R) \right]$

作用于粒子和障碍物间的静电力, 根据障碍物的荷电状态、外部电场的有无而异。表 1-3、表 1-4 中, 集中了对球和圆柱有代表性的理论效率表达式。

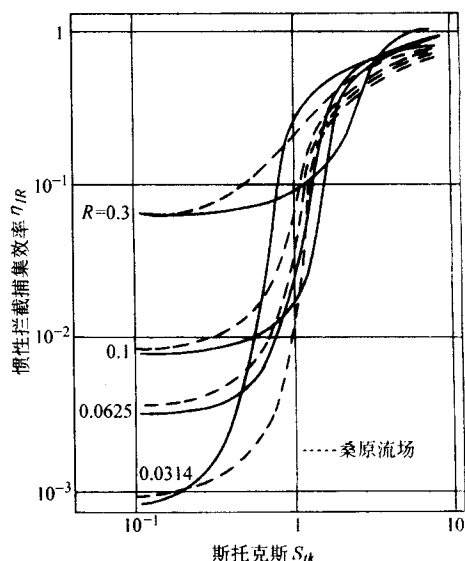


图 1-7 不同 Re 数时单一圆柱

η_{ik} 、 S_{ik} 的关系 ($\alpha=0.03, \frac{C_{cpp}}{9\rho_f}$)

表 1-3 粒子受静电作用时单一圆柱捕集效率

电荷条件		力的名称	表达式	无量纲参数	单一圆柱捕集效率
无外部电场	荷电纤维	库仑力	$F_r = -\frac{qQ}{\pi\epsilon_0 d_f r}$	$K_C = \frac{C_c q Q}{3\pi^2 \epsilon_0 \mu x d_f u_0}$	$\eta_{EC} = \pi K_C, x < d_f$; 势流, 粘性流, 理论解
	荷电粒子	镜像力	$F_r = -\left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1}\right) \times \frac{q^2}{4\epsilon_0 d_f^2 (r^2 - 1)^2}$	$K_M = \left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1}\right) \frac{C_c q^2}{12\pi^2 \epsilon_0 \mu d_f^2 u_0}$	$\eta_{EM} = \left(\frac{3}{2} \pi K_M\right)^{1/3}$; 势流, 理论解 $\eta_{EM} = 2.3 K_M^{1/2}$; 粘性流, 实验式 $\eta_{EM} = 1.5 K_M^{1/2}$; 实验式 $\eta_{EMR} =$ $\begin{cases} 2 (K_M/h_L)^{1/2}; R \leq (h_L K_M)^{1/4} \\ R^2/h_L + K_M/R^2; R \geq (h_L K_M)^{1/4} \end{cases}$ 粘性流, 理论解
	荷电纤维	感应力	$F_r = -\left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 2}\right) \frac{Q^2 x^3}{\pi\epsilon_0 d_f^3 r^3}$	$K_f = -\left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 2}\right) \frac{C_c Q^2 x^2}{3\pi^2 \epsilon_0 \mu d_f^3 u_0}$	$\eta_{EF} = \left(\frac{3}{2} \pi K_f\right)^{1/3} x < d_f$; 势流, 理论解 $\eta_{EF} = \pi K_f, x < d_f$; 势流, 理论解 $\eta_{EL} = 2 \left(\frac{K_f}{h}\right)^{1/2} x < d_f$; 粘性流, 理论解
有外部电场	无荷电粒子	感应分极力	$F = \frac{\pi\epsilon_0 x^3}{4} \left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 2}\right) \nabla E ^2$	$K_e = \frac{2}{3} \left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 2}\right) \left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1}\right) \times \frac{C_c \epsilon_0 x^2 E^2}{\mu d_f u_0}$	$\eta_{EG} = K_G/2$; 势流, 粘性流, 理论解 $\eta_{EGR} = f\left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1}, \alpha, K_G\right)$ 线图, 理论解 $\eta_{EG} = K_G^{2/3}$; 三角, 四角配列模型过滤器, 实验式 $\eta_{EG} = 0.8 K_G^{2/3}$; 扇型模型, 实验式
	荷电粒子	库仑力	$F = qE$	$K_{EC} = \frac{C_c q E}{3\pi \mu x u_0}$	$\eta_{EC} = \frac{K_{EC}}{1 + K_{EC}} \left[1 + \frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1}\right]$; 势流, 粘性流, 理论解 $\eta_{EC} = \frac{1}{1 + K_{EC}} \left\{ \eta R + K_{EC} \left[\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \left(\frac{1}{1 + R} + \frac{6}{P^6} (1 + R)^5 \right) + (1 + R) \right] \right\}$ $P = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{3} a}\right)^{1/2}$; 粘性流, 理论解

注: E 过滤器内平均电场强度与无纤维时的电场强度 E_0 之间有如下关系: $E = E_0 \left(1 - \frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} a\right)^{-1}$; C_c : 坎宁汉修正系数;

d_f, x . 纤维直径和粒子直径; h_L, L_{amb} 的流体力学因子 ($h_L = 2 - \ln Re$); Q , 纤维带电量 (C/m); q , 粒子带电量 (C); R , 拦截参数 ($= Rx/d_f$); α , 纤维充填率; ϵ_f, ϵ_p , 纤维和粒子的相对介电常数; ϵ_0 , 真空介电常数; E , 静电力; I , 感应力; G , 感应分极力; M , 镜像力。

表 1-4 无外部电场时的单一球捕集效率

荷电条件	静电力	无量纲参数	单一球捕集效率	流场
粒子, 捕集球均荷电	库仑力 $\frac{qQ}{\pi\epsilon_0 d_w^2 r^2}$	$K_C = \frac{C_c q Q}{3\pi\epsilon_0 \mu x_w^2 u_0}$	$-4K_C$	势流
仅捕集球荷电	感应力 $\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \frac{8\pi x^3 Q}{d_w r^3}$	$K_I = \frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \cdot \frac{8C_c x^3 Q}{3\mu d_w u_0}$	$\left(\frac{15\pi}{8} K_I\right)^{1/3}$	势流

此外, 对于由于正负电荷半永久性分极的驻极体纤维荷电状态的不同, 捕集粒子的时候, 捕集效率的实验结果如图 1-8 所示。

(3) 扩散及扩散捕集机理 (D, DR)。在上面是对粒径比较大的场合所讲的, 当粒径小, 流速变低时, 布朗扩散变为支配作用。将每个粒子的运动作为粒子群考查, 粒子的捕集现象就可以准确地表达。这个时候, 粒子群的举动, 可以由下面的对流扩散方程表达:

$$\left(u + \frac{BFe}{u_0}\right) \text{grad } n = \frac{2}{Pe} \nabla^2 n \quad (1-13)$$

式中, Pe 数是表示扩散强度的尺度, $Pe = \frac{u_0 D_c}{D_{(BM)}}$ 。

这种情况, 单一捕集效率 η 定义为: 对应于单位时间向障碍物表面的沉着量与在障碍物投影面积内流入的粒子量之比。

$$\eta_{(DR)} = \frac{\int D_{(BM)} (\partial n / \partial r) ds}{n_0 u_0 A_e} \quad (1-14)$$

式中, $(\partial n / \partial r)$ 为从障碍物表面到离开这个面距离为 R 的浓度梯度。

因为一般情况下, 式 (1-13) 无解析解, 效率须由数值计算得出。

粒子浓度 η 如式 (1-13) 和式 (1-14) 所示, 是随 u_0 、 BFe/u_0 、 Pe 而变化, 同时, 它还受 R 的影响, 所以, η_{DR} 成为 4 个无量纲参数的函数。

图 1-9 所示为质点粒子对圆柱的扩散捕集效率 η_D 。 η_D 在粘性流中 ($Re=0$), 取 $Pe^{-2/3}$; 在 $Re=\infty$ 取 $Pe^{-1/2}$; 对中间的 Re , 对 Pe 的依存的方式是随 Re 而变化的, 在 $R \neq 0$, 为如图 1-9 所示那样的变化。

(5) 所有机理同时作用。在实际捕尘操作中, 虽然各种机理作用的程度强弱不同, 但全部机理同时与捕集相关。如图 1-10 所示是仅没有静电力作用时的单一圆柱捕集效率的计算结果。如图 1-12 所示是伴随着蒸发的雨滴的捕集效率的计算结果。

在图 1-11 中, 各主要的作用机理被一并画出, 因为各捕集机理的粒径相对流速的依存方式不一样, 等高线在右下方为谷, 效率对粒径及流速出现极小值。这在图 1-12 中也同样出现。总之, 在主要捕集机理发生转移的区域, 也就是说, 在哪一种机理也不太有效时, 就存在极

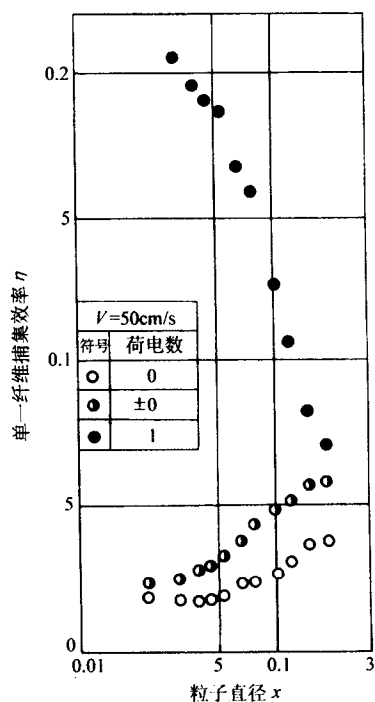


图 1-8 驻极体过滤器的单一纤维捕集效率

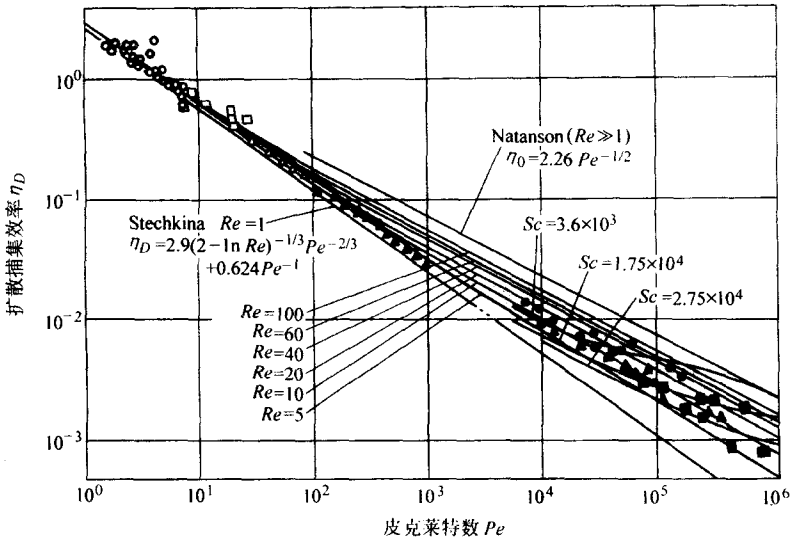


图 1-9 质粒子的单一圆柱扩散捕集效率

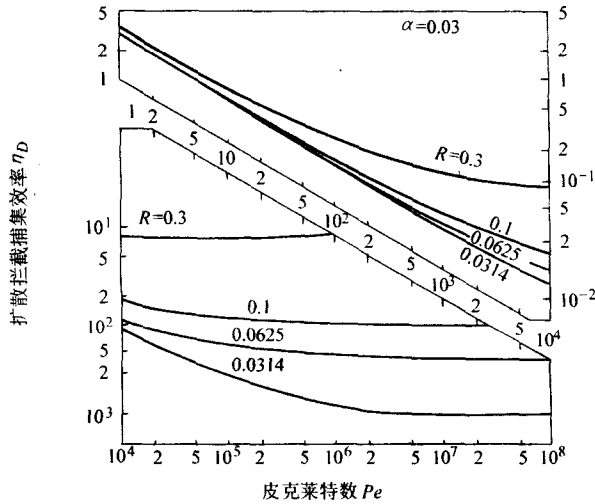


图 1-10 单一圆柱扩散捕集效率

小值。

1.2.3 压力损失

这种障碍形式装置的压力损失，可根据将障碍物的集合体内的空间作为流体通过的流路模型，或者作用于每个障碍物的流体阻力这样的阻力模型中的任一个求得。但对于粒子充填层（颗粒层），滤料的流路模型多用达西（Darcy）公式（式（1-15））和尔岗（Ergun）公式（式（1-16））。

$$\Delta P = 5 \frac{S_B^2 \mu u}{\epsilon^3} = 5 \frac{S_v^2 (1 - \epsilon)^2 \mu u}{\epsilon^3} \quad (1-15)$$

$$\Delta P = 150 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\mu u}{D_c^2} L + 1.75 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^2} \frac{P_f u^2}{D_c} L \quad (1-16)$$

另一方面，对于纤维充填层滤料多由式（1-17）的阻力模型推算。

1.2.4 非稳态时粒子捕集

1.2.4.1 非稳态捕集机理

障碍物一旦将粒子捕集,障碍物上的粒子就将对后续粒子的捕集及压力损失产生影响,这就成为非稳态过程。

在图 1-13、图 1-14 中显示了金属纤维上液体的 DOP 粒子与固体的铅粒子在长时间内被捕集时的状态。在图中,液体的 DOP 粒子,如在纤维上被捕集,因为不能再保持作为粒子时的形状,在纤维表面全体扩大,经过一个时间间隔,形成一个大液滴,并随时间延长而增大。随后,液滴随着纤维一起振动,与邻接的液滴相撞而变大,进而随着液滴的进一步变大,与邻近的纤维相跨,并由于纤维振动使液滴飞散。

与此相对应,先被捕集的固体粒子遮蔽后续粒子的进路(见图 1-15)。由于在纤维表面被捕集,在以前被捕集的粒子上,被捕集的概率变化,形成了堆积物,经过一段时间,这种倾向被助长,并急剧成长变大。而且纤维上的粒子的堆积构造,随捕集条件、粒子、纤维特性等发生变化。图 1-16、图 1-17 是在堆积的粒子量几乎相同情况下,捕集机理分别为扩散和惯性时的粒子堆积状态的电子显微镜照片。这些图均为四个角度的照片。在两图中,可看到粒子的堆积状态随角度而变化的情况。

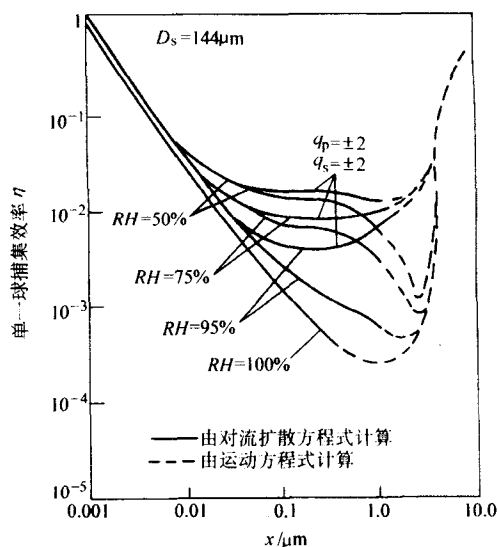


图 1-12 伴随着蒸发的雨滴的捕集效率

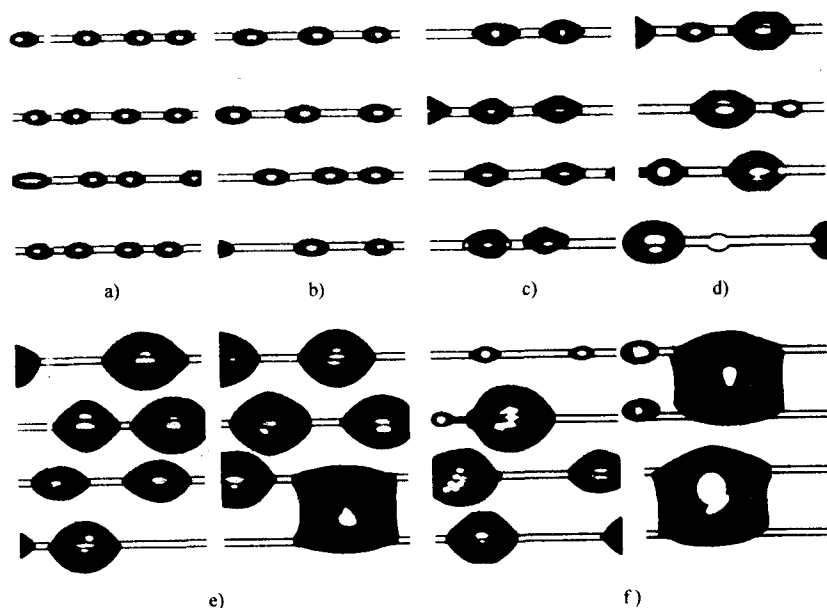


图 1-13 不锈钢丝捕集的 DOP 粒子的堆积形状和随时间的变化

a) $Cut = 0.58 \text{ kg/m}^2$ b) $Cut = 0.0117 \text{ kg/m}^2$ c) $Cut = 0.249 \text{ kg/m}^2$
d) $Cut = 0.593 \text{ kg/m}^2$ e) $Cut = 1.11 \text{ kg/m}^2$ f) $Cut = 1.62 \text{ kg/m}^2$

(纤维直径 $60 \mu\text{m}$; 纤维间隔 $525 \mu\text{m}$; 过滤速度 4 m/s)

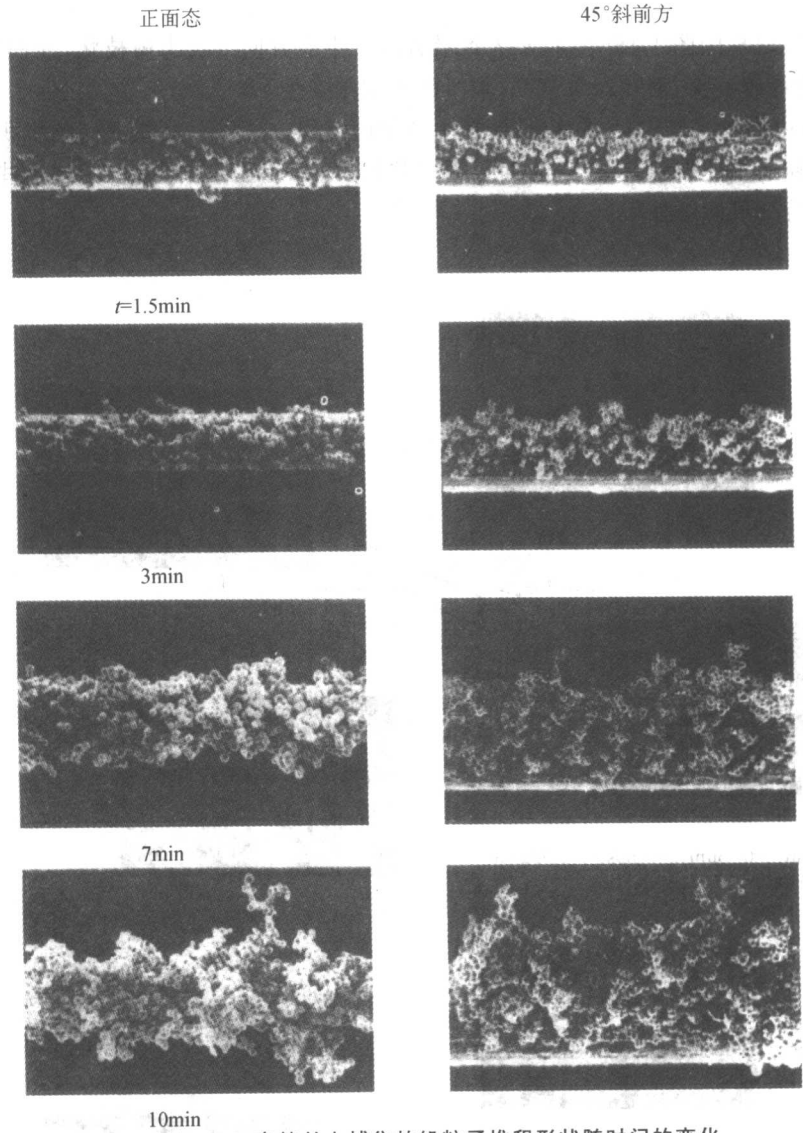


图 1-14 在钨丝上捕集的铅粒子堆积形状随时间的变化
($d_f=10\mu\text{m}, d_p=1\mu\text{m}, u=50\text{cm/s}, \rho_p=11.34\text{g/cm}^3, S_{tk}=3.5, R=0.1$)

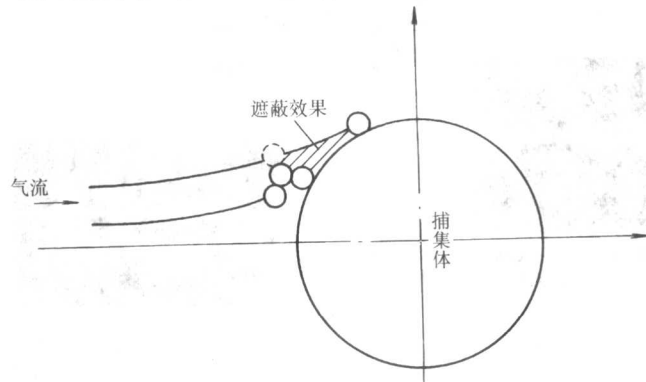


图 1-15 堆积粒子产生遮蔽效果