

# 除尘技术

胡满银 赵毅 刘忠 编著



化学工业出版社  
环境·能源出版中心

# 除 尘 技 术

胡满银 赵 毅 刘 忠 编著



化学工业出版社  
环境·能源出版中心

· 北 京 ·

**图书在版编目(CIP)数据**

除尘技术/胡满银, 赵毅, 刘忠编著. —北京: 化学工业出版社,  
2006.3

ISBN 7-5025-8411-0

I. 除… II. ①胡…②赵…③刘… III. 除尘-技术 IV. X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 022938 号

---

**除 尘 技 术**

胡满银 赵毅 刘忠 编著

责任编辑: 管德存 邹宁

责任校对: 宋 玮

封面设计: 胡艳玮

\*

化 学 工 业 出 版 社  
环境·能源出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

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

\*

新华书店北京发行所经销  
北京永鑫印刷有限责任公司印刷  
三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 400 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8411-0

定 价: 38.00 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

# 前 言

我国大气污染属煤烟型污染，除尘在大气污染的治理中仍占重要位置，随着大气污染排放标准的日益严格，除尘技术的发展也日新月异。作者根据多年来掌握的除尘技术知识和实际工作中积累的经验，编写了《除尘技术》一书，希望对提高除尘器的运行维护管理水平，保障除尘器长期安全、稳定、高效运行和保护大气环境能起到积极的推动作用。本书对除尘技术的基本知识、基本理论、除尘器的结构、性能特点、影响除尘性能的因素、除尘器的运行维护管理和除尘过程的数值模拟等内容进行了论述。本书在编写上力求内容丰富翔实，突出先进性和实用性，可供除尘器运行、维护和管理人员作为技术参考，亦可作为从事除尘技术工作的教学、科研、设计生产等专业人员的参考书。

本书共分 6 章，第三章（电除尘技术）和第五章（湿式除尘技术）由华北电力大学胡满银教授编著；第二章（机械除尘技术）和第四章（过滤除尘技术）由华北电力大学赵毅教授编著；第一章（除尘技术概述）和第六章（除尘过程的数值模拟）由华北电力大学刘忠副教授编著。

由于作者水平有限，书中难免出现漏误之处，恳请读者给予批评指正。

作者

2006 年 2 月

# 目 录

|                    |    |                    |     |
|--------------------|----|--------------------|-----|
| 第一章 除尘技术概述         | 1  | 第三节 影响电除尘器性能的主要因素  | 63  |
| 第一节 除尘器的分类         | 1  | 一、粉尘特性的影响          | 63  |
| 第二节 评定除尘器性能的指标     | 2  | 二、烟气性质的影响          | 68  |
| 一、除尘效率             | 2  | 三、结构因素的影响          | 71  |
| 二、透过率              | 4  | 四、操作因素的影响          | 73  |
| 三、除尘器阻力            | 4  | 五、电气与控制特性的影响       | 75  |
| 四、除尘器的经济性          | 5  | 第四节 电除尘器的本体结构      | 79  |
| 第三节 烟尘排放标准         | 6  | 一、收尘极系统            | 79  |
| 一、我国火电厂烟尘排放标准      | 6  | 二、电晕极系统            | 87  |
| 二、锅炉烟尘排放标准         | 8  | 三、烟箱及气流分布装置        | 94  |
| 第二章 机械除尘技术         | 11 | 四、槽形板              | 97  |
| 第一节 重力沉降室          | 11 | 五、壳体               | 98  |
| 一、重力沉降室的计算         | 12 | 六、排灰装置             | 100 |
| 二、沉降室设计注意事项        | 13 | 七、支座               | 100 |
| 第二节 惯性除尘器          | 14 | 八、辅助系统             | 103 |
| 一、惯性除尘器的工作机理       | 14 | 第五节 电除尘器的总体设计      | 103 |
| 二、惯性除尘器的类型和结构      | 15 | 一、主要技术参数的确定        | 103 |
| 第三节 旋风除尘器          | 18 | 二、电除尘器的总体设计与计算     | 105 |
| 一、旋风除尘器的工作原理       | 19 | 三、电除尘器总体设计举例       | 110 |
| 二、影响旋风除尘器性能的主要因素   | 22 | 第六节 电除尘器的安装、调试、运行、 |     |
| 三、旋风除尘器的结构型式       | 26 | 维护及管理              | 114 |
| 四、旋风除尘器的设计选型       | 30 | 一、电除尘器的安装          | 114 |
| 第四节 机械式除尘器的运行维护    | 31 | 二、电除尘器的调试          | 118 |
| 第三章 电除尘技术          | 34 | 三、电除尘器的正常运行监督及常见   |     |
| 第一节 电除尘器的基本原理和结构概述 | 34 | 故障                 | 120 |
| 一、电除尘器的基本原理        | 34 | 四、电除尘器的维护          | 126 |
| 二、电除尘器的结构概述        | 35 | 五、电除尘器的管理          | 127 |
| 三、电除尘器常用术语         | 37 | 第四章 过滤除尘技术         | 132 |
| 四、电除尘器的特点          | 41 | 第一节 袋式除尘器的过滤机理     | 132 |
| 五、电除尘器的分类          | 41 | 一、过滤机理             | 132 |
| 第二节 电除尘机理及基本理论     | 43 | 二、袋式除尘器的主要优点       | 133 |
| 一、气体的电离            | 43 | 三、袋式除尘器的主要缺点       | 134 |
| 二、电晕放电             | 45 | 第二节 袋式除尘器的性能       | 134 |
| 三、电场               | 49 | 一、除尘效率             | 134 |
| 四、尘粒荷电             | 53 | 二、阻力               | 136 |
| 五、尘粒的运动和捕集         | 55 | 第三节 袋式除尘器的分类       | 137 |
| 六、静电除尘器的数学模型       | 60 | 第四节 滤料的特性和种类       | 139 |
|                    |    | 一、滤料的特性            | 139 |

|                        |     |                        |     |
|------------------------|-----|------------------------|-----|
| 二、滤料的结构                | 141 | 七、捕滴器的设计计算             | 204 |
| 三、滤料的种类                | 142 | 八、文丘里除尘器存在的主要问题        | 207 |
| 第五节 袋式除尘器的结构           | 145 | 第五节 斜棒栅水膜除尘器           | 208 |
| 一、机械振打袋式除尘器            | 145 | 一、斜棒栅除尘器的基本工作原理        | 208 |
| 二、反吹风袋式除尘器             | 146 | 二、斜棒栅水膜除尘器结构           | 209 |
| 三、脉冲喷吹清灰袋式除尘器          | 146 | 第六节 湿式除尘器的烟气带水         | 211 |
| 第六节 袋式除尘器的选择、设计和应用     | 152 | 一、湿式除尘器烟气带水概述          | 211 |
| 一、选择与设计                | 152 | 二、烟气带水的主要原因            | 212 |
| 二、国外燃煤电站的应用            | 158 | 三、消除烟气带水的措施            | 213 |
| 三、国内燃煤电站的应用情况及存在问题     | 161 | 四、烟气带水的计算              | 215 |
| 四、应用实例                 | 162 | 第七节 湿式除尘器的运行维护         | 218 |
| 第七节 袋式除尘器的运行与维护管理      | 166 | 一、启动                   | 218 |
| 一、运行与维护管理注意事项          | 166 | 二、维护管理                 | 218 |
| 二、袋式除尘器的运行             | 168 | 三、停止与检修                | 218 |
| 三、停止运行后的维护             | 169 | 第六章 除尘过程的数值模拟          | 220 |
| 四、袋式除尘器的维护管理           | 170 | 第一节 三维流动数值模拟理论基础       | 220 |
| 第八节 颗粒层除尘技术            | 173 | 一、湍流数值模拟理论             | 220 |
| 一、颗粒层除尘器的分类            | 174 | 二、湍流流动的雷诺方程组           | 221 |
| 二、颗粒层除尘器的结构            | 175 | 三、湍流模型                 | 221 |
| 三、影响颗粒层除尘器性能的因素        | 180 | 第二节 流动微分方程的离散化         | 224 |
| 第五章 湿式除尘技术             | 182 | 一、积分区域的网格化             | 224 |
| 第一节 湿式除尘机理             | 182 | 二、控制微分方程的离散化           | 225 |
| 第二节 洗涤式除尘器             | 183 | 三、差分方程的建立              | 226 |
| 一、喷淋塔                  | 183 | 四、边界条件离散化              | 228 |
| 二、泡沫除尘器                | 185 | 五、源项的线性化               | 228 |
| 三、冲击水浴除尘器              | 189 | 六、有限差分方程的一般形式          | 228 |
| 四、管式水膜除尘器              | 191 | 七、Fluent 中的离散处理        | 229 |
| 五、湍球塔                  | 192 | 第三节 离散化方程求解            | 230 |
| 六、旋流板塔                 | 193 | 一、单个变量代数方程求解           | 230 |
| 第三节 旋风水膜除尘器            | 194 | 二、多个变量的联立求解            | 231 |
| 一、立式旋风水膜除尘器            | 194 | 三、增强计算稳定性和收敛性的措施       | 232 |
| 二、卧式旋风水膜除尘器            | 197 | 第四节 数值模拟实例             | 233 |
| 第四节 文丘里除尘器             | 198 | 一、电除尘器进气管箱气流分布的数值模拟    | 233 |
| 一、结构和工作原理              | 198 | 二、电除尘器斜气流的数值模拟         | 236 |
| 二、文丘里管的设计计算            | 198 | 三、带防风板电晕线的流场           | 238 |
| 三、文丘里管的凝聚效率            | 200 | 四、横向极板电除尘器中粒子轨迹的数值模拟   | 239 |
| 四、文丘里管的压力损失            | 201 | 五、湍球塔 (TCA) 内温度分布的数值模拟 | 243 |
| 五、供水方式                 | 201 | 六、湍球塔内三维流场的数值模拟        | 245 |
| 六、调径文氏管与 A. P. S 静电洗涤器 | 203 | 参考文献                   | 249 |

## 第一章 除尘技术概述

悬浮在大气中的粉尘颗粒超过一定浓度就会毒化环境，危害人体健康，因此，对从污染源排放出来的粉尘进行有效的控制与防治，是大气环境保护的重要内容之一。

一般说，任意形状与任何密度的固体粉尘或液珠，大小在  $10^{-3} \sim 10^3 \mu\text{m}$  之间，且悬浮在气体介质中，这种混合气体称为气溶胶（俗称含尘气体）。把气溶胶中固相粉尘或液相雾珠从气体介质中分离出来的过程称为除尘过程。除尘的概念发展到今天已脱离纯字面的解释了。从捕集分离的物质看，不管是无用甚至有害的物质，还是有使用价值可回收的物料（如水泥、可可粉、奶粉、颜料、面粉、或催化剂等）；也不管是从净化气体角度出发或与气体净化无关，都包括在广义的除尘范围内。在除尘过程中，起除尘作用的器具或装置系统称为除尘器。

要采取一些技术措施把粉尘颗粒从气溶胶中的运载介质中分离开来，就必须了解是什么作用或作用力使粉尘颗粒能悬浮在气体介质中。使粉尘颗粒产生弥散、扩散、碰撞、凝聚、沉降、分离等现象的作用或作用力如下。

(1) 来自运载介质气体的 分子扩散；紊流扩散；流体流动作用。

(2) 来自粉尘颗粒的 布朗扩散；颗粒间的吸引力，即范德华力；电力，电荷间的吸引与排斥，即库仑力。

(3) 外力 磁力；电力；机械力，如重力、惯性力（包括离心力）；声波力。

上述作用或作用力都不是孤立存在的，而是相互依存、相互制约的。在除尘技术中，一般以扩散（分子扩散、布朗扩散、紊流扩散及流体流动引起的扩散）与沉降（重力沉降、惯性力沉降、离心力沉降及电力沉降）构成主要矛盾。例如在某些除尘器内，当扩散为主要矛盾时，则气溶胶中的粉尘颗粒将继续保持着悬浮状态。如果把含尘气体引入除尘器内，由于不同形式的除尘器有不同的外力起主导作用，沉降将由原来非主要矛盾方面转化为主要矛盾方面，粉尘颗粒悬浮于运载介质的状态就将转化为从运载介质中分离的状态。于是就形成了除尘过程。

### 第一节 除尘器的分类

除尘器是从气流中将粉尘予以分离的设备，它的工作状况直接影响排往大气中的粉尘浓度，从而影响周围环境。在负压操作系统（风机置于除尘器后，除尘器内为负压）中，如果除尘器的效率不高，会影响风机叶轮，使其迅速被磨损。除了直接的经济损失外，还会影响生产的正常运行，甚至被迫停产检修。

由于生产的需要，实践中采用了多种多样的除尘器。根据所利用的除尘机理不同，除尘器可分为机械除尘器（机械力）和电除尘器（电力）两大类。机械力中有重力、惯性力、冲击、粉尘与水滴的碰撞等，过滤也是机械力作用的一种形式。根据在除尘过程中是否采用液体进行除尘或清灰，又可分为干式除尘器和湿式除尘器。

除上述分类方法外，习惯上将除尘器分为四类。

(1) 机械式除尘器 包括重力沉降室，惯性除尘器和旋风除尘器。这类除尘器的特点是

结构简单、造价低、维护方便，但除尘效率不很高，往往用作多级除尘系统中的前级预除尘。

(2) 过滤式除尘器 包括袋式除尘器和颗粒层除尘器等。其特点是以过滤机理作为除尘的主要机理。根据选用的滤料和设计参数不同，袋式除尘器的效率可达很高（99.9%以上）。

(3) 湿式除尘器 包括低能湿式除尘器和高能文氏管除尘器。这类除尘器的特点主要是用水作为除尘的介质。一般来说，湿式除尘器的除尘效率高。当采用文氏管除尘器时，对微细粉尘的去除效率仍可达95%以上，但所消耗的能量较高。湿式除尘器的主要缺点是会产生污水，需要进行处理，以消除二次污染。

(4) 电除尘器 以电力为捕尘机理。分为干式电除尘器（干法清灰）和湿式电除尘器（湿法清灰）。这类除尘器的特点是除尘效率高（特别是湿式电除尘器），消耗动力少，主要缺点是钢材消耗多，投资高。

实际中的除尘器往往综合几种除尘机理的共同作用，例如卧式旋风除尘器中有离心力作用，同时还兼有冲击和洗涤作用。特别是近年来为了提高除尘器的效率，研制了多种多机理的除尘器，因此以上的分类是有条件的，是指其中起主导作用的除尘机理。

## 第二节 评定除尘器性能的指标

评定除尘器工作的性能有各种指标，如除尘效率、阻力、耗钢量、一次投资、运行费用等。在选择除尘器时，必须综合加以考虑。

### 一、除尘效率

除尘器的除尘效率  $\eta(\%)$  系指含尘气流在通过除尘器时所捕集下来的粉尘量占进入除尘器的粉尘量的百分数。考虑到进入除尘器的总尘量  $G_i(\text{g/h})$  应为由除尘器排出的粉尘量  $G_o(\text{g/h})$  与捕集的粉尘量  $G_c(\text{g/h})$  之和（图 1-1）。

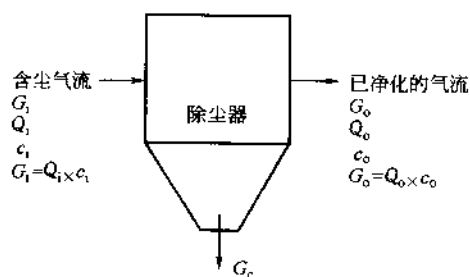


图 1-1 除尘效率计算示意图

$$G_i = G_o + G_c \quad (1-1)$$

于是除尘器的效率  $\eta$  可表示为，

$$\eta = \frac{G_c}{G_i} \times 100\% \quad (1-2)$$

或

$$\eta = \frac{G_c}{G_o + G_c} \times 100\% \quad (1-3)$$

或

$$\eta = \frac{G_i - G_o}{G_i} \times 100\% \quad (1-4)$$

因此，在实际上可根据具体条件，只要测出两个量，就可按相应的公式算出除尘效率，在有些情况下，测定气流中的含尘浓度更为方便，这样，

$$G_i = c_i Q_i \quad (1-5)$$

$$G_o = c_o Q_o \quad (1-6)$$

式中， $c_i$ 、 $c_o$  分别为除尘器进、出口气流中的含尘浓度， $\text{g/m}^3$ （标）； $Q_i$ 、 $Q_o$  分别为除尘器进、出口气体流量， $\text{m}^3/\text{h}$ （标）。

当除尘器很严密没有漏风时， $Q_i = Q_o$ ，但是实际上除尘器经常有漏风，这时的除尘效率表示为：

$$\eta = \frac{G_i - G_o}{G_i} \times 100\% = \frac{c_i Q_i - c_o Q_o}{c_i Q_i} \times 100\% = \left(1 - \frac{c_o Q_o}{c_i Q_i}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{c_o}{c_i} K\right) \times 100\% \quad (1-7)$$

式中,  $K$  为漏风系数。

当进入除尘器的含尘浓度很高, 要求将几级除尘器串连使用时 (例如第一级采用旋风除尘器, 第二级采用电除尘器), 设每一级的除尘效率为  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 、... 则总效率可按式 (1-8) 计算

$$\eta_T = [1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)(1 - \eta_3)\dots] \times 100\% \quad (1-8)$$

根据除尘效率的定义, 除尘器对某一粒径  $d$  (或在  $\Delta d$  范围内) 的除尘效率称为分级除尘效率  $\eta_d$

$$\eta_d = \frac{G_{cd}}{G_{id}} \times 100\% \quad (1-9)$$

或

$$\eta_d = \frac{G_{id} - G_{od}}{G_{id}} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中,  $G_{id}$ ,  $G_{od}$ ,  $G_{cd}$  分别为粒径  $d$  (或在  $\Delta d$  范围内) 的尘粒在除尘器进、出口粉尘量及捕集的粉尘量。

通常在测定粒度的分布时都是用原始粉尘量的百分数表示, 即

$$G_{id} = G_i \varphi_{id} \quad (1-11)$$

$$G_{cd} = G_c \varphi_{cd} \quad (1-12)$$

$$G_{od} = G_o \varphi_{od} \quad (1-13)$$

式中,  $\varphi_{id}$ ,  $\varphi_{od}$ ,  $\varphi_{cd}$  分别为粒径  $d$  (或在  $\Delta d$  范围内) 的尘粒在除尘器进、出口捕集的粉尘质量分数 (%)。则

$$\eta_d = \frac{G_c \times \varphi_{cd}}{G_i \times \varphi_{id}} = \eta_T \frac{\varphi_{cd}}{\varphi_{id}} \times 100\% \quad (1-14)$$

$$\eta_d = \frac{G_i \varphi_{id} - G_o \varphi_{od}}{G_i \varphi_{id}} = \frac{G_i \varphi_{id} - (G_i - G_c) \varphi_{od}}{G_i \varphi_{id}} = \frac{\varphi_{id} - (1 - \eta_T) \varphi_{od}}{\varphi_{id}} \times 100\% \quad (1-15)$$

同样, 当已知各分级效率, 可按式 (1-16) 求出总效率。

$$\eta = \sum_d^n \eta_d \varphi_{id} \quad (1-16)$$

除尘效率是衡量除尘器清除气流中粉尘能力的一项指标。根据总除尘效率, 除尘器可分为低效除尘器 (50%~80%)、中效除尘器 (80%~95%) 和高效除尘器 (95%)。

显然, 除尘效率除了与除尘器结构有关外, 还取决于粉尘的性质、气体的性质、运行条件等因素。例如旋风除尘器一般情况下为低效的, 但当粉尘颗粒粗时, 可以达到中效甚至高效的水平。然而习惯上一般把重力沉降室、惯性除尘器列为低效除尘器; 中效除尘器通常指低能湿式除尘器、颗粒层除尘器等; 电除尘器、袋式除尘器及文氏管除尘器则属于高效除尘器的范畴。

为了进一步表明除尘器的分离性能, 经常采用分级效率的概念。表 1-1 为各种除尘器对不同粒径粉尘的除尘效率。由表中可以看出, 虽然各种除尘器对粗颗粒粉尘 (如  $50\mu\text{m}$ ) 都有较高的效率 (94% 以上), 但是对细微粉尘 ( $1\mu\text{m}$ ), 效率就有明显的差别, 例如惯性除尘器效率仅 3%。

表 1-1 各种除尘器对不同粒径粉尘的除尘效率

| 除尘器名称    | 除尘效率/%           |                 |                 | 除尘器名称    | 除尘效率/%           |                 |                 |
|----------|------------------|-----------------|-----------------|----------|------------------|-----------------|-----------------|
|          | 50 $\mu\text{m}$ | 5 $\mu\text{m}$ | 1 $\mu\text{m}$ |          | 50 $\mu\text{m}$ | 5 $\mu\text{m}$ | 1 $\mu\text{m}$ |
| 惯性除尘器    | 95               | 26              | 3               | 下式电除尘器   | >99              | 99              | 86              |
| 中效旋风除尘器  | 94               | 27              | 8               | 湿式电除尘器   | >99              | 98              | 92              |
| 高效旋风除尘器  | 96               | 72              | 27              | 中能文氏管除尘器 | 100              | >99             | 97              |
| 冲击式洗涤器   | 98               | 85              | 38              | 高能文氏管除尘器 | 100              | >99             | 93              |
| 自激式湿式除尘器 | 100              | 93              | 40              | 振打袋式除尘器  | >99              | >99             | 99              |
| 空口喷淋塔    | 99               | 94              | 55              | 逆喷袋式除尘器  | 100              | >99             | 99              |

将各种粒度下的效率连成曲线可得分级效率曲线（图 1-2）。通过分级除尘效率曲线可以直观地看出不同粒径下的除尘效率，因而是评定除尘性能的主要指标。

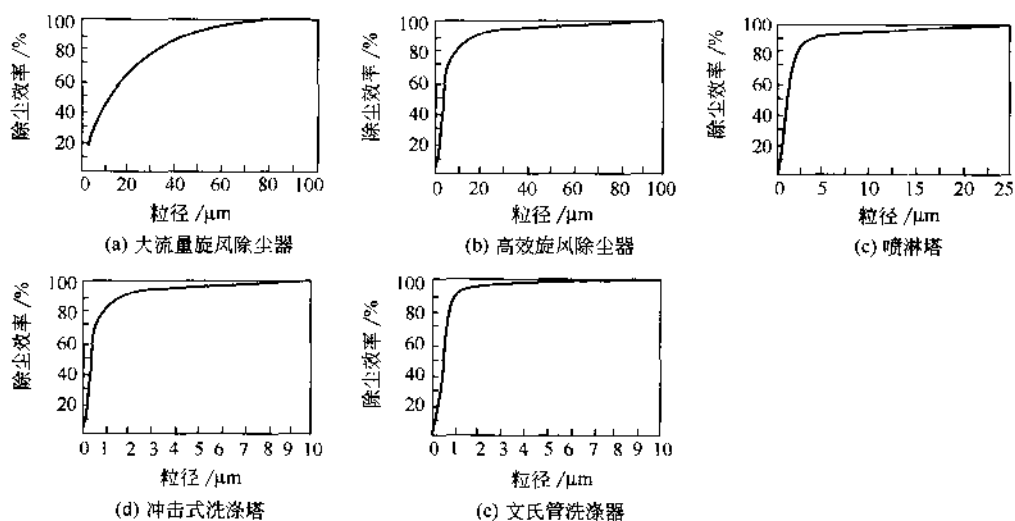


图 1-2 各种除尘器的分级效率曲线

## 二、透过率

除尘效率是从除尘器所捕集的粉尘量的角度来评定除尘器性能的，也可以用未被捕集的粉尘量（排除的粉尘）来评定除尘器性能。未被捕集的粉尘量占进入除尘器粉尘量的百分数称为透过率  $P(\%)$ ，显然

$$P = 100\% - \eta \quad (1-17)$$

除尘效率与透过率是从不同的角度说明同一个问题。但是在有些情况下，特别是对高效除尘器，采用透过率可以得到更为明确的概念。例如，将除尘器的效率由 99.0% 提高到 99.5%，看来只提高了 0.5%，但透过率则由 1.0% 降到 0.5%，即降低了 50%。

透过率反映排入大气的粉尘量的概念，根据透过率可以很容易计算出排入大气的总尘量。

## 三、除尘器阻力

阻力是评定除尘器性能的另一重要技术指标。它表示气流通过除尘器时的压力损失。阻力大，用于风机的电能也大。因而除尘器阻力也是衡量除尘设备的耗能和运转费用的一个指标。除尘器根据其阻力，可分为：

- (1) 低阻除尘器 ( $\Delta P < 500 \text{ Pa}$ ), 一般指重力沉降室、电除尘器等;
- (2) 中阻除尘器 ( $\Delta P = 500 \sim 2000 \text{ Pa}$ ), 如旋风除尘器、袋式除尘器、低能湿式除尘器;
- (3) 高阻除尘器 ( $\Delta P = 2000 \sim 20000 \text{ Pa}$ ), 主要有高能文氏管除尘器。

除尘器的阻力  $\Delta P (\text{Pa})$  是以除尘器前后管道中气流的全压来表示的。

$$\Delta P = \bar{P}_{ii} - \bar{P}_{io} + P_H \quad (1-18)$$

$$P_H = (\rho_a - \rho_g) g H \quad (1-19)$$

式中,  $\bar{P}_{ii}$ 、 $\bar{P}_{io}$  分别为除尘器前后管道内的平均全压,  $\text{Pa}$ ;  $P_H$  为高温气体在大气中的浮力校正值,  $\text{Pa}$ ;  $\rho_g$  为管道内气体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_a$  为大气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $H$  为除尘器前后管测点的高差,  $\text{m}$ 。

当除尘器前后管的测点在同一高度或相差不大时, 可忽略高度的影响。式 (1-18) 可写成为:

$$\Delta P = \bar{P}_{ii} - \bar{P}_{io} \quad (1-20)$$

除尘器前后的平均全压差也可采用静压差加一修正值来表示。这项修正这是由于前后管道的断面不同造成的动压差所引起的。

$$\Delta P = \bar{P}_{ii} - \bar{P}_{io} = \bar{P}_i - \bar{P}_o + \frac{\bar{\rho}_g}{2} v_i^2 \left[ 1 - \left( \frac{A_i}{A_o} \right)^2 \right] \quad (1-21)$$

式中,  $\bar{P}_i$ 、 $\bar{P}_o$  分别为除尘器前后的平均静压,  $\text{Pa}$ ;  $A_i$ 、 $A_o$  分别为除尘器前后测点处的管道面积,  $\text{m}^2$ ;  $\bar{\rho}_g$  为除尘器前后管道内气体的平均密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

当除尘器出入口管道的直径相同时, 阻力可直接用静压差表示。

$$\Delta P = \bar{P}_i - \bar{P}_o \quad (1-22)$$

在除尘技术中经常采用阻力系数来评定除尘器的性能, 所谓阻力系数  $\xi$ , 就是指压力损失  $\Delta P$  与动压值  $\frac{1}{2} \rho_g v^2$  的比值, 即

$$\xi = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_g v^2} \quad (1-23)$$

或

$$\Delta P = \xi \left( \frac{1}{2} \rho_g v^2 \right) \quad (1-24)$$

式中,  $v$  为除尘器进口气流速度,  $\text{m/s}$ 。

从式 (1-23) 可以看出, 阻力是与速度的平方成正比的。因此用阻力系数  $\xi$  来比较各种除尘器的性能是比较方便的。

#### 四、除尘器的经济性

经济性是评定除尘器的重要指标之一, 它包括除尘器的设备和运行维护费两部分。设备主要是材料的消耗 (如耗钢量), 此外还包括设备加工和安装的费用以及各种辅助设备 (如空气压缩机、反吹风机等) 的费用。在各种除尘器中, 以电除尘器和袋式除尘器的设备费最高, 文氏管除尘器、旋风除尘器最低。

除尘设备在整个除尘系统的初投资中占的比例很大, 除尘系统的运行维护费主要指能源消耗, 对于除尘设备有两种不同性质的能源消耗: 使含尘气流通过除尘设备所做的功; 除尘或清灰的附加能量。

第一种能量消耗量是各种除尘器都具有的, 表现在风机的功率  $W (\text{kW})$  上, 根据除尘器阻力  $\Delta P (\text{Pa})$  及处理风量  $Q (\text{m}^3/\text{h})$  的不同而不同。

$$W = \frac{\Delta PQ}{1000 \eta_i 3600} = 0.277 \times 10^5 \frac{\Delta PQ}{\eta_i} \quad (1-25)$$

式中,  $\eta_i$  为风机效率, %。

显然, 除尘器阻力愈高, 所消耗的能量也愈高。由此可以看出, 文氏管除尘器的能耗最高。而电除尘器的能耗比较低, 因而运行维护费也低。

第二种能耗与各类除尘器的特点有关。例如电除尘器的电晕功率及振打清灰所消耗的电能、湿式除尘器消耗的水、脉冲袋式除尘器消耗的压缩空气等, 都与能量消耗有关。

运行维护费还应包括运行维修, 大、中修所需的各种材料、备品备件等, 易损件的调换与补充所需的费用。维修费用可按初投资的 2%~10% 计算, 对于一般除尘系统取低值, 高温易腐蚀系统取高值, 袋式除尘器滤袋的更换会增加维修费用。根据滤料寿命选取适当的百分比。

除尘器的经济比较是较复杂的问题。首先应在考虑除尘性能的基础上进行比较。在综合考虑除尘器的费用比较时, 要注意到设备费是一次投资, 而运行费是每年的经常费用。因此若一次投资高 (例如电除尘器), 而运行费用低, 则在运行若干年后就可以得到补偿。运行时间愈长, 愈显出其经济性。另外, 在进行比较时还要考虑处理风量的大小。

### 第三节 烟尘排放标准

燃煤电厂对除尘器类型的选择与本国的烟尘排放标准密切相关。随着烟尘排放标准的日趋严格, 对除尘器类型的选择逐步由机械除尘器、文丘里水膜除尘器到高效的静电除尘器, 再到袋式除尘器。表 1-2 列出了一些国家和地区的火电厂烟尘排放标准。

表 1-2 火电厂烟尘排放标准/(mg/m<sup>3</sup>, 标准状况)

| 国家或地区 | 标准值     | 国家或地区 | 标准值     |
|-------|---------|-------|---------|
| 澳大利亚  | 80      | 爱尔兰   | 50~100  |
| 日本    | 50~150  | 意大利   | 50      |
| 印度尼西亚 | 125     | 荷兰    | 50      |
| 朝鲜    | 50      | 新西兰   | 125     |
| 菲律宾   | 160~220 | 葡萄牙   | 115~300 |
| 美国    | 40      | 西班牙   | 200     |
| 奥地利   | 50      | 瑞士    | 50      |
| 比利时   | 50      | 土耳其   | 150     |
| 丹麦    | 50      | 英国    | 50~100  |
| 芬兰    | 30~50   | 中国香港  | 50      |
| 法国    | 68      | 中国台北  | 29      |
| 德国    | 50      | 中国    | 50~100  |
| 希腊    | 50~100  |       |         |

#### 一、我国火电厂烟尘排放标准

我国《燃煤电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—1991) 是 1991 年颁布, 1992 年开始实施的。1996 年修订了该标准, 代之以《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—1996), 对 1997 年 1 月 1 日以后的新扩改建电厂, 烟尘排放标准值为 200~600mg/m<sup>3</sup>。国家环境保护总局和国家质量监督检验检疫总局于 2003 年 12 月 23 日发布了《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2003), 并于 2004 年 1 月 1 日开始实施。该标准中烟尘排放控制要求简介如下。

### 1. 主要内容与适用范围

该标准按时间段规定了火电厂大气污染物最高允许排放限值,适用于现有火电厂的排放管理以及火电厂建设项目的环境影响评价、设计、竣工验收和建成运行后的排放管理。

该标准适用于使用单台出力 65t/h 以上除层燃炉、抛煤机炉外的燃煤发电锅炉;各种容量的煤粉发电锅炉;单台出力 65t/h 以上燃油发电锅炉;各种容量的燃气轮机组的火电厂。单台出力 65t/h 以上采用甘蔗渣、锯末、树皮等生物质燃料的发电锅炉,参照本标准中以煤矸石等为主要燃料的资源综合利用火力发电锅炉的污染物排放控制要求执行。

该标准不适用于各种容量的以生活垃圾、危险废物为燃料的火电厂。

### 2. 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新的版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

|            |                                |
|------------|--------------------------------|
| GB/T 16157 | 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法        |
| HJ/T 42    | 固定污染源排气中氮氧化物的测定 紫外分光光度法        |
| HJ/T 43    | 固定污染源排气中氮氧化物的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法    |
| HJ/T 56    | 固定污染源排气中二氧化硫的测定 碘量法            |
| HJ/T 57    | 固定污染源排气中二氧化硫的测定 定电位电解法         |
| HJ/T 75    | 火电厂烟气排放连续监测技术规范<br>空气与废气监测分析方法 |

### 3. 术语和定义

该标准采用下列术语和定义。

- (1) 火电厂 (thermal power plant) 燃烧固体、液体、气体燃料的发电厂。
- (2) 坑口电厂 (coal mine mouth power plant) 位于煤矿附近,以皮带运输机、汽车或煤矿铁路专用线运输燃煤的发电厂。
- (3) 标准状态 (standard condition) 烟气在温度为 273K,压力为 101325Pa 时的状态,简称“标态”。标准中所规定的大气污染物排放浓度均指标准状态下干烟气的数值。
- (4) 烟气排放连续监测 (continuous emissions monitoring) 烟气排放连续监测是指对火电厂排放的烟气进行连续、实时跟踪监测。
- (5) 过量空气系数 (excess air coefficient) 燃料燃烧时,实际空气供给量与理论空气需要量之比值,用“ $\alpha$ ”表示。
- (6) 干燥无灰基挥发分 [volatile matter (dry ash-free basis)] 以假想无水、无灰状态的煤为基准,将煤样在规定条件下隔绝空气加热,并进行水分和灰分校正后的质量损失,称之为干燥无灰基挥发分,用“ $V_{daf}$ ”表示。
- (7) 西部地区 (western region) 西部地区是指重庆市、四川省、贵州省、云南省、西藏自治区、陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、广西壮族自治区、内蒙古自治区。

### 4. 烟尘排放控制要求

- (1) 时段的划分 该标准分三个时段,对不同时期的火电厂建设项目分别规定了排放控

制要求。

① 1996 年 12 月 31 日前建成投产或通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目，执行第 1 时段排放控制要求。

② 1997 年 1 月 1 日起至本标准实施前通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目，执行第 2 时段排放控制要求。

③ 自 2004 年 1 月 1 日起，通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目（含在第 2 时段中通过环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目，自批准之日起满 5 年，在本标准实施前尚未开工建设的火电厂建设项目），执行第 3 时段排放控制要求。

(2) 烟尘最高允许排放浓度和烟气黑度限值 各时段火力发电锅炉烟尘最高允许排放浓度和烟气黑度限值执行表 1-3 规定的限值。

表 1-3 火力发电锅炉烟尘最高允许排放浓度和烟气黑度限值

| 项 目  | 烟尘最高允许排放浓度 / (mg/m <sup>3</sup> )      |                |                                        |                                              |                                              | 烟气黑度 (林格曼黑度) / 级 |
|------|----------------------------------------|----------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------|
|      | 第 1 时段                                 |                | 第 2 时段                                 |                                              | 第 3 时段                                       |                  |
| 实施时间 | 2005 年 1 月 1 日                         | 2010 年 1 月 1 日 | 2005 年 1 月 1 日                         | 2010 年 1 月 1 日                               | 2004 年 1 月 1 日                               | 2004 年 1 月 1 日   |
| 燃煤锅炉 | 300 <sup>1)</sup><br>600 <sup>2)</sup> | 200            | 200 <sup>1)</sup><br>500 <sup>2)</sup> | 50<br>100 <sup>3)</sup><br>200 <sup>4)</sup> | 50<br>100 <sup>3)</sup><br>200 <sup>4)</sup> | 1.0              |
| 燃油锅炉 | 200                                    | 100            | 100                                    | 50                                           | 50                                           |                  |

注：1. 县级及县级以上城市建成区及规划区内的火力发电锅炉执行该限值。

2. 县级及县级以上城市建成区及规划区以外的火力发电锅炉执行该限值。

3. 在本标准实施前，环境影响报告书已批复的脱硫机组，以及位于西部非两控区的燃用特低硫煤（入炉燃煤收到基硫分小于 0.5%）的坑口电厂锅炉执行该限值。

4. 以煤矸石等为主要燃料（入炉燃料收到基低位发热量小于等于 12550 kJ/kg）的资源综合利用火力发电锅炉执行该限值。

(3) 烟尘的过量空气系数折算值 实测的火电厂烟尘必须按公式 (1-26) 进行折算。燃煤锅炉按过量空气系数折算值  $\alpha=1.4$  进行折算；燃油锅炉按过量空气系数折算值  $\alpha=1.2$  进行折算；燃气轮机组按过量空气系数折算值  $\alpha=3.5$  进行折算。

$$c=c' \times (\alpha' / \alpha) \quad (1-26)$$

式中， $c$  为折算后的火电机组烟尘、二氧化硫和氮氧化物排放浓度，mg/m<sup>3</sup>； $c'$  为实测的火电机组烟尘、二氧化硫和氮氧化物排放浓度，mg/m<sup>3</sup>； $\alpha'$  为实测的过量空气系数； $\alpha$  为规定的过量空气折算系数。

## 二、锅炉烟尘排放标准

根据锅炉大气污染物排放标准 (GB 13271-2001) 中的规定，烟尘排放标准简介如下。

### 1. 适用范围

本标准适用于除煤粉发电锅炉和单台出力大于 45.5 MW (65 t/h) 发电锅炉以外的各种容量和用途的燃煤、燃油和燃气锅炉排放大气污染物的管理以及建设项目环境影响评价、设计、竣工验收和建成后的排污管理。

使用甘蔗渣、锯末、稻壳、树皮等燃料的锅炉，参照本标准中燃煤锅炉大气污染物最高允许排放浓度执行。

## 2. 引用标准

下列标准所包含的条文，通过在本标准中引用而构成本标准的条文。

GB 3095 1996 环境空气质量标准

GB 5468—91 锅炉烟尘测试方法

GB/T 16157—1996 固定源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法

## 3. 定义

(1) 标准状态 锅炉烟气在温度为 273K，压力为 101325Pa 时的状态，简称“标态”，本标准规定的排放浓度均指标准状态下干烟气中的数值。

(2) 烟尘初始排放浓度 指锅炉烟气出口处或进入净化装置前的烟尘排放浓度。

(3) 烟尘排放浓度 指锅炉烟气经净化装置后的烟尘排放浓度。未安装净化装置的锅炉，烟尘初始排放浓度即是锅炉烟尘排放浓度。

(4) 自然通风锅炉 自然通风锅炉是利用烟囱内、外温度不同所产生的压力差，将空气吸入炉膛参与燃烧，把燃烧产物排向大气的一种通风方式，不用鼓、引风机机械通风的锅炉，称之为自然通风锅炉。

## 4. 技术内容

(1) 本标准中一类区和二、三类区相应指 GB 3059—1996《环境空气质量标准》中所规定的环境空气质量功能区的分类区域。

本标准中的“两控区”是指《国务院关于酸雨控制区和二氧化硫污染控制区有关问题的批复》中所划定的酸雨控制区和二氧化硫污染控制区的范围。

### (2) 年限划分

本标准按锅炉建成使用年限分为两个阶段，执行不同的大气污染物排放标准。

I 时段：2000 年 12 月 31 日前建成使用的锅炉；

II 时段：2001 年 1 月 1 日起建成使用的锅炉（含在 I 时段立项未建成或未运行的锅炉和建成使用锅炉中需要扩建、改建的锅炉）。

(3) 锅炉烟尘最高允许排放浓度和烟气黑度限值按表 1-4 的时段规定执行。

表 1-4 锅炉烟尘最高允许排放浓度和烟气黑度限值

| 锅 炉 类 型 |                          | 适 用 区 域 | 烟 尘 允 许 排 放 浓 度 / (mg/m <sup>3</sup> ) |        | 烟 尘 黑 度 (林 格 曼 黑 度) / 级 |
|---------|--------------------------|---------|----------------------------------------|--------|-------------------------|
|         |                          |         | I 时 段                                  | II 时 段 |                         |
| 燃 煤 锅 炉 | 自然通风锅炉<br>[<0.7MW(1t/h)] | 一类区     | 100                                    | 80     | 1                       |
|         |                          | 二、三类区   | 150                                    | 120    |                         |
|         | 其他锅炉                     | 一类区     | 100                                    | 80     | 1                       |
|         |                          | 二类区     | 250                                    | 200    |                         |
|         |                          | 三类区     | 350                                    | 250    |                         |
| 燃 油 锅 炉 | 轻柴油、煤油                   | 一类区     | 80                                     | 80     | 1                       |
|         |                          | 二、三类区域  | 100                                    | 100    |                         |
|         | 其他燃料油                    | 一类区     | 100                                    | 80 *   | 1                       |
|         |                          | 二、三类区域  | 200                                    | 150    |                         |
| 燃 气 锅 炉 |                          | 全部区域    | 50                                     | 50     | 1                       |

注：一类区禁止新建以重油、渣油为燃料的锅炉。

(4) 燃煤锅炉烟尘初始排放浓度和烟气黑度限值，根据锅炉销售出厂时间，按表 1-5 的时段规定执行。

表 1-5 燃煤锅炉烟尘初始排放浓度和烟气黑度限值

| 锅 炉 类 别 |                          | 燃煤收到基灰分            | 烟尘初始排放浓度/(mg/m <sup>3</sup> ) |       | 烟尘黑度(林格曼黑度)/级 |
|---------|--------------------------|--------------------|-------------------------------|-------|---------------|
|         |                          |                    | I 时段                          | II 时段 |               |
| 层燃锅炉    | 自然通风锅炉<br>[<0.7MW(1t/h)] |                    | 150                           | 120   | 1             |
|         | 其他锅炉<br>[≤2.8MW(4t/h)]   | $A_{ar} \leq 25\%$ | 1800                          | 1600  | 1             |
|         |                          | $A_{ar} > 25\%$    | 2000                          | 1800  |               |
|         | 其他锅炉<br>[>2.8MW(4t/h)]   | $A_{ar} \leq 25\%$ | 2000                          | 1800  | 1             |
|         |                          | $A_{ar} > 25\%$    | 2200                          | 2000  |               |
| 沸腾锅炉    | 循环流化床锅炉                  | —                  | 15000                         | 15000 | 1             |
|         | 其他沸腾锅炉                   | —                  | 20000                         | 18000 |               |
| 抛煤机锅炉   |                          | —                  | 5000                          | 5000  | 1             |

(5) 实测的锅炉烟尘应按表 1-6 种规定的过量空气系数  $\alpha$  进行折算。

表 1-6 各种锅炉过量空气系数折算值

| 锅 炉 类 型 | 折 算 项 目  | 过 量 空 气 系 数  |
|---------|----------|--------------|
| 燃煤锅炉    | 烟尘初始排放浓度 | $\alpha=1.7$ |
|         | 烟尘排放浓度   | $\alpha=1.8$ |
| 燃油、燃气锅炉 | 烟尘排放浓度   | $\alpha=1.2$ |

5. 其他规定

(1) 每个新建锅炉房只能设一根烟囱。烟囱高度应根据锅炉房装机总容量，按表 1-7 规定执行。

表 1-7 燃煤、燃油（燃轻柴油、煤油除外）锅炉房烟囱最低允许高度

| 锅炉房装机总容量 | MW  | <0.7 | 0.7~<1.4 | 1.4~<2.8 | 2.8~<7 | 7~<14  | 14~<28 |
|----------|-----|------|----------|----------|--------|--------|--------|
|          | t/h | <1   | 1~<2     | 2~<4     | 4~<10  | 10~<20 | 20~<40 |
| 烟囱最低允许高度 | m   | 20   | 25       | 30       | 35     | 40     | 45     |

(2) 锅炉房装机总容量大于 28MW(40t/h) 时，其烟囱高度应按环境影响评价要求确定，但不得低于 45m。新建锅炉烟囱周围半径 200m 距离内有建筑时，烟囱应高出最高建筑物 3m 以上。

## 第二章 机械除尘技术

机械除尘技术是指依靠机械力进行除尘的技术。所谓机械力在这里是指重力、惯性和离心力。任何粉尘颗粒都有一定的质量，在地球引力作用下会有重力，在运动中会有惯性力，旋转运动时方向的改变会有离心力。这三种力构成机械除尘过程中粉尘颗粒受力的基本内容。利用这些力设计的除尘装置称为机械除尘器。机械除尘器在环境工程或生产工艺过程中有广泛的应用。

机械除尘具有以下几个方面的特征。

(1) 机械除尘利用的力比较单一。沉降除尘利用的是重力。所谓重力即地球对其附近物体的吸引力。惯性除尘利用的是惯性力。惯性是物质的基本属性之一，反映物体具有保持原有运动状态的性质，惯性力是反映物质自身运动状态的力，受到外力时物质改变运动状态。在相同的作用力下质量大的物体和运动加速度大的物体得到的惯性力较大，这对粉尘分离是有利的。旋风除尘利用的是离心力。所谓离心力是指做圆周运动的物体对施于它的向心力的旋转的反作用力。利用离心力分离非均匀系统的分离过程通称离心分离。它是依据在旋转过程中质量大的、旋转速度快的物质获得的离心力也大的原理进行工作的。

机械除尘装置构造简单且没有运动部件。由于机械除尘装置没有运动部件，所以除尘装置故障少，容易操作和管理，运行费用相对较低，投资费用也较小。

(2) 机械除尘分离细小粉尘的能力比较弱，它对粒径较大（大于  $50\mu\text{m}$ ）的粉尘有较高的除尘效果，但对粒径较小（小于  $5\mu\text{m}$ ）的粉尘分离效果较差。同时对真密度小的粉尘颗粒也不易有效分离。尽管如此，机械除尘仍有广泛的应用。

(3) 机械除尘可以用于多级除尘的第一级分离，也可以单独使用。当单独使用时，一般用于对除尘效率要求不高，或者仅仅需要简单除尘的场合。

(4) 机械除尘器的设计计算较复杂，而且设计计算数据往往与实际运行结果不吻合，这是因为机械除尘容易受到多种因素影响造成的，特别是外来气流（如漏风）对除尘效果影响特别大。

### 第一节 重力沉降室

重力沉降室是利用粉尘颗粒的重力沉降作用而使粉尘与气体分离的除尘技术，是一种较简易的烟气除尘装置，其主要优点是：结构简单，维护容易；阻力低，一般约为  $100\sim 150\text{Pa}$ ，主要是气体入口和出口的压力损失；投资省，施工快，可用砖石砌筑，不用或少用钢材，维护费用低，经久耐用。它的缺点是，除尘效率低，一般干式沉降室约为  $50\%\sim 60\%$ ，采用喷雾、水封池等措施的湿式沉降室约为  $60\%\sim 80\%$ 。适用捕集粒径大于  $40\sim 50\mu\text{m}$  的粉尘粒子；设备较庞大，适用处理中等气量的常温或高温气体，多作为多级除尘的预除尘使用。重力沉降室的结构如图 2-1 所示。含尘气流进入重力沉降室后，由于扩大了流动截面积而使气体流速大大降低，使较重颗粒在重力作用下缓慢向灰斗沉降。



图 2-1 重力沉降室结构