

141600

TK223.27
2703

高等学校教材

高压静电除尘

武汉水利电力学院 解广润 合编
陈慈萱

(京)新登字115号

高等学校教材

高压静电除尘

武汉水利电力学院 解广润 合编
陈慈萱

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 9.25印张 202千字

1993年6月第一版 1993年6月北京第一次印刷

印数 0001—2010册

ISBN 7-120-01675-X/TM·451

定价2.50元

内 容 提 要

本书共分八章。书中阐述了大气中气溶胶状态污染物的危害；详细讨论了与粉尘在电场中的荷电和运动有关的气体动力学、静电场和气体放电的基础理论；分析了影响静电除尘器除尘效率的因素以及对供电电源的要求；介绍了静电除尘器的工作原理和结构，国产除尘器的种类和性能及其在工业部门的应用。

本书可作为高等院校电力类高电压技术和电力系统及其自动化专业的选修课教材，也可供从事设计、制造和使用静电除尘器的工程技术人员参考。

前 言

随着工业的发展,环境保护在世界各国得到愈来愈多的重视,也是我国的一项基本国策。烟尘的控制是环境保护的一大任务。在诸多除尘设备中,静电除尘器不仅具有除尘效率高,处理烟气量大,阻力损失小,耗能很小及运行费用低等优点,还可在某些工业部门中用来回收有用材料和能源。因此静电除尘器在工业部门中的应用正日益增多。

静电除尘的机理涉及到气体放电、静电场和气体动力学等多方面的理论。国内外虽已有一些关于静电除尘的专著,但还没有适宜于作为高等学校教材的书籍。

本书是根据高等学校电力工程类教学委员会过电压绝缘及测试教学组的决定编写的,可作为高等学校的选修课教材。编者在本教材编写中参阅了大量国内外资料及产品说明书,力图使其内容做到理论与实际并用,知识与方法并重。

本书由陈慈萱写出初稿,经解广润修改定稿。**唐耀宗**同志审阅了全部书稿。编者在此表示衷心感谢。

由于编者的水平有限,书中不妥及错误之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

1990年1月

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 大气中气溶胶状态污染物的危害及其消除	3
第一节 气溶胶状态污染物的形成	3
第二节 粉尘和烟气对环境的影响	4
第三节 烟尘的治理	6
第四节 静电除尘器概述	10
第二章 电晕的发生	14
第一节 电晕放电	14
第二节 电晕放电的电压和电流	16
第三节 空间电荷的影响	21
第三章 尘粒荷电	23
第一节 场致荷电	28
第二节 扩散荷电	37
第三节 场致荷电和扩散荷电的综合作用	47
第四章 尘粒捕集	50
第一节 荷电尘粒在除尘器中的运动	50
第二节 荷电尘粒的沉集	57
第三节 影响静电除尘器捕集效率的因素	62
第四节 尘粒捕集时的材料分离现象	63
第五章 静电除尘的供电	71
第一节 回收粒子所需的能量	71
第二节 捕集效率和电气参数的关系	72
第三节 火花放电及其影响	75
第四节 高压供电电源及其控制	79
第五节 高压供电电源的分组	84
第六章 静电除尘器的结构	87
第一节 静电除尘器的壳体	87
第二节 电晕电极	88
第三节 集尘电极	91
第四节 电极的振打装置	96
第五节 气流分布均匀装置	99
第七章 静电除尘设备	101
第一节 卧式静电除尘器	101

第二节	管式静电除尘器	107
第三节	双区静电除尘器	110
第四节	带辅助电极的静电除尘器	112
第五节	屋顶静电除尘器	114
第六节	静电透镜陷井静电除尘器	115
第七节	静电除尘器的操作维护	117
第八章	静电除尘器在不同企业中的应用	121
第一节	静电除尘器在有色冶金工业中的应用	121
第二节	静电除尘器在黑色冶金工业中的应用	123
第三节	静电除尘器在建材工业中的应用	129
第四节	静电除尘器在电力工业中的应用	132
第五节	静电除尘器在化学工业中的应用	134
第六节	静电除尘原理的简易应用	136
参考文献		138

绪 论

在人类的生产活动中,随着生产规模的扩大,环境污染如水污染、空气污染、废物污染、化学污染、噪音污染、热污染等日趋严重。粉尘是造成空气污染的主要污染物之一。据统计全世界每年向大气中排放人为污染物的总重量估计为6亿多吨,其中粉尘约占16%。煤炭加工、采矿、电力、冶金、炼油、化工、造纸等工业都是粉尘的排放源。工业粉尘的大量排放,不仅会危及人体健康,在某些情况下还会造成大量贵重材料的流失。为了减少工业生产中粉尘的排放量,可以采用各种除尘装置,诸如重力除尘装置、惯性除尘装置、离心力除尘装置、洗涤除尘装置、过滤除尘装置以及静电除尘装置等。各种除尘装置的性能及优缺点见表0-1。本书主要讨论静电除尘问题。

表 0-1 各种除尘装置的性能及优缺点比较

除尘装置类别	型 式	处理的粒度 (μm)	压力损失 (Pa)	集 尘 率 (%)	优 点	缺 点
重 力	沉 降 室	100~50	98~147	40~60	价廉,易维护	不能处理微粒
惯 性	通 风 型	100~50	294~686	50~70	价廉,易维护,可处理高温气体	不能处理微粒
离 心	旋 风	小型5~3 大型5以上	490~1470	10~40 50~80	不占场地,可处理高温气体,适合含尘浓度较高的气体	压力损失大,不适于湿尘、粘着性大和腐蚀性大的气体
洗 涤	文丘里洗涤器	小型1以下 大型1以上	2450~7840	80~90 90~99	集尘率高,占地少,在含尘率低时效率也高	需大量水,烟囱下部需用花岗石砌
过 滤	袋式除尘器	20~0.1	980~1960	90~99	集尘率高,操作简单,含尘率低时效率也高	占地大,布耗大,不宜于高温气体
静 电	科特雷尔型	20~0.05	98~196	80~99.9	集尘率高,可处理高温气体,含尘率低时效率也高	占地大,投资大,易老化,受粉尘电性质的影响(ρ 在 $10^8 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 范围内)
声 波			588~980	80~95	运行费用少	设备费用较高

静电除尘是1824年德国莱比锡市一位数学教师霍尔菲德尔首先提出的,他指出电可使烟粒沉淀。1906年科特雷尔(F.G.Cottrell)在美国伯克利加州大学实验成功,并继续研究出商业化的处理工艺,称为科特雷尔型工业用电除尘装置。第一台工业用静电除尘器于1907年在美国旧金山市附近建成,成功地处理了95l/s的含尘气体。静电除尘的原理是,在电极间加上高电压,使气体放电,产生电子与正离子,气体中的尘粒获得电子而带负电荷,

它在电场的作用下被吸向带正电荷的大电极而附着在大电极上，然后用振动、刮削或冲洗的方法将其清除。静电除尘装置具有净化效率高，压力损失小，耐高温，处理气体量大等特点，又能使混合粉末分离，达到回收贵重材料的目的，所以获得了广泛的应用。它最早应用于冶炼、制硫酸工业和水泥厂中，继而发展到用于清除焦炉煤气中的煤焦油，净化粉碎、研磨及抛光车间的通风道空气，过滤炼油厂和化工厂中的酸雾，回收煤炭干燥器中的粉尘，以及为大型热电厂清除烟囱气体中的飘尘等。自从静电除尘技术问世以来，围绕其基础理论和实际应用方面的问题开展过很多研究工作，已取得了不少进展。近十几年来，静电除尘器在结构上有了重大改进，技术上也有了很大进步。但因特高除尘效率的需要，处理特高及特低电阻率颗粒的需要，减小除尘装置的尺寸和降低费用及能耗的需要，静电除尘技术的研究仍是一个十分活跃的课题。第四届国际静电除尘会议于1990年9月在北京召开，提交大会的论文有138篇之多。

我国于1936年首次使用静电除尘器，安装在本溪水泥厂。1954年我国自行设计制造的第一台 12.6m^2 静电除尘器问世，但到1960年为止，全国应用的静电除尘器也不超过60台。近十几年来，随着工业生产的发展和对大气环境质量控制日益严格的要求，对静电除尘器的需求也日益增加。据1984年的不完全统计，我国投入运行的静电除尘器已超过1000台，烟气总处理量超过 $1.25 \times 10^8 \text{m}^3/\text{h}$ ，其中钢铁工业占30%，有色冶金工业占32%，建材工业占18%，电力工业占10%，其它工业共占10%。目前我国静电除尘器的专业制造厂已发展到数十家，“七五”计划末期年生产力达7.5万吨。静电除尘技术也取得了长足的进步，技术经济指标有的已达到国际先进水平。1984年我国自行设计的最大截面为 223.2m^2 的静电除尘器已在江苏谏壁电厂投运。1988年武汉工业大学陈学构教授提出了静电透镜除尘结构，它能够提高除尘效率并扩大适用的电阻率范围，已于1991年在湖北黄石华新水泥厂试运行。但是，我国的静电除尘技术也还存在一些问题，如一些基础研究设施尚未建立，测试仪器和科研手段比较落后，选型设计水平较低，设计效率与实际效率偏差较大，设备制造钢耗大（尤其是外壳部分，约比国外同类产品重20%~40%），电子计算机在静电除尘设计、计算及管理方面的应用尚未普及等。为了降低静电除尘装置的一次投资，提高产品的质量和运行性能，扩大其使用范围，还应该进行大量的工作。

第一章 大气中气溶胶状态污染物的危害及其消除

大气污染物根据其存在状态的不同可概括为两大类：气溶胶状态污染物和气体状态污染物。气溶胶系指沉降速度可以忽略的固体粒子、液体粒子或固体和液体粒子在气体介质中的悬浮体。通过固体和液体研磨或分子化，以及通过气流作用或振动使粉末呈悬浮状态而产生的气溶胶称分散气溶胶。当过饱和蒸汽凝聚时，或当气体化学反应生成非挥发性产物时，会产生凝聚气溶胶。气溶胶粒子的粒径在 $0.001\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 的范围内。从防止大气污染的角度要求加以控制的是直径为 $0.01\sim 100\mu\text{m}$ 的粒子。因为小于 $0.01\mu\text{m}$ 的粒子不易和大分子区分，可以看作是气体污染物，而大于 $100\mu\text{m}$ 的粒子沉降快，在排入大气前容易除掉，即使排入大气，对空气污染也不起严重作用。在多数情况下，分散气溶胶粒子的粒径要比凝聚气溶胶大得多，而且前者包含的粒径范围也大于后者。

第一节 气溶胶状态污染物的形成

粉尘、烟、飞灰和烟雾均为大气中的气溶胶状污染物。

一、粉尘

粉尘是指悬浮于气体介质中的小固体粒子，其粒径在 $1\sim 200\mu\text{m}$ 左右。在人类的生产活动中，如研磨、破碎和钻岩等的生产过程，都会产生大量粉尘。粉尘粒子的形状大都是不规则的。有些矿物粉尘的形状则与其结晶形态有关，例如云母粉尘是片状的，而石棉粉尘是针状的，其长度可以是其直径的数百倍。粉尘的组成成分与生成粉尘前的物质相同。

在工程实际中通常按其在大气中的不同沉降情况分为落尘和飘尘两类。粒径大于 $10\mu\text{m}$ 的称为落尘，如水泥粉尘、粉煤、石灰粉、大部分金属粉尘和飞灰等。落尘的粒子比较大，又比较重，在重力作用下，容易沉降。由于沉降的快慢不同，将在离污染源不同距离的地面降落。粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的称为飘尘。飘尘的颗粒小（有的比细菌还小），也比较轻，它们在空气中可以飘浮几小时，甚至几年，可以飞得很远，甚至可随气流环绕全球运动。

在各种飘尘中，以粒径为 $0.5\sim 5\mu\text{m}$ 的飘尘对人体危害最大。因为粒径大于 $5\mu\text{m}$ 的飘尘，由于惯性力作用，可为鼻毛和呼吸道粘液挡住而排除，粒径小于 $0.5\mu\text{m}$ 的飘尘，可由气体扩散作用被粘附在上呼吸道表面而随痰排出。只有粒径在 $0.5\sim 5\mu\text{m}$ 之间的飘尘，可直接深入肺部，在肺泡内沉积，并可能进入血液输往全身，在身体各个部位累积，引起症状。

二、烟和烟雾

烟是一种含有固体和液体微粒的气溶胶，其微粒的直径在 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ 左右，一般在燃

料燃烧或冶炼过程中出现。冶炼过程中的烟是金属熔化过程中升华或蒸发所生成的金属蒸气以及金属氧化物蒸气的冷凝物，是一种凝聚气溶胶，故也称凝结固体烟雾。常见的有铅烟雾、锌烟雾、铁烟雾、镉烟雾、镁烟雾、锰烟雾等。凝结固体烟雾的粒子与粉尘粒子相比更富有规则性，通常呈球形。

燃料燃烧所生成的烟由飞灰、烟黑等固体微粒以及水滴 (H_2O) 和硫酸微滴 (H_2SO_4) 等液体微粒组成。燃料完全燃烧的生成物主要是 CO_2 、 H_2O 、 SO_2 和作为含碳物质燃烧后残留的固体残渣的灰分，此时从炉膛排出的是淡淡的轻烟，其中包含灰分中能为烟气带走的较细的粒子——飞灰。燃料在不完全燃烧时会出现黑烟，其中除 CO_2 、 H_2O 和飞灰外，还存在大量的烟黑。烟黑中不完全是碳粒，而有许多稠合多环碳氢化物，其中有的是致癌物质，如苯比芘和苯比蒽等。

由于各种燃料都含有硫，有色金属和黑色金属多为硫化物矿床。因此，在许多工业如火力发电工业、冶金工业、石油工业和化学工业等的生产过程中，均会排出大量的含硫废气，其中主要是 SO_2 ，它是刺激性很强的气体。 SO_2 及其他含硫化合物和粉尘混合后会形成含硫烟雾。全球闻名的英国“伦敦烟雾”以及美国“多诺拉烟雾”都是因为大气中的 SO_2 与含重金属的飘尘等协同作用的结果。 SO_2 在大气中可被氧化成毒性比 SO_2 更大的 SO_3 。当有钒、铁、锰等氧化物粉尘起触媒作用时，氧化反应将大大加速。 SO_3 与水结合后会形成 H_2SO_4 ，导致硫酸烟雾的出现。硫酸烟雾是一种固、液分散相的凝聚气溶胶，它会引起人们喉头气管收缩甚至引起肺气肿。防止 SO_2 污染的主要措施有燃料脱硫、烟气脱硫、废气制酸和高烟囱扩散等。

大型锅炉中非常强烈的高温炉内过程，形成了氧与氮化合的条件，因此随着烟气排出的还有 NO 和 NO_2 等氮氧化合物，它可形成硝酸烟雾。在阳光照射下大气中的氮氧化合物、碳氢化合物和氧化剂之间会产生一系列的光化学反应，生成由臭氧、过氧乙酰基硝酸酯、酮类及醛类组成的兰色烟雾（有时带紫色或黄褐色），称为光化学烟雾。光化学烟雾一般是颗粒物与气体污染物一起存在，但也可以只以气体污染物的形式存在，它对人的眼睛有刺激作用，支气管哮喘的发病率也与其浓度有关。控制烟气中 NO_2 的方法是降低燃烧过程中的火焰温度或减少供氧量。

应当指出，讨论大气污染物时，在工程实际中往往只用“粉尘”、“烟气”和“烟尘”等名词。在泛指小固体粒子时用“粉尘”一词。在述及燃料燃烧或冶炼过程产生的污染物时用“烟气”一词，它包括小固体粒子、液体分子和气体状态的污染物。“烟尘”则用来指燃料燃烧或冶炼过程产生的小固体粒子。也有以粒径 $1\mu m$ 为界线来划分烟气和烟尘的，即把粒径小于 $1\mu m$ 者称为烟气，粒径大于 $1\mu m$ 者称为烟尘。

悬浮在大气中的烟尘并非是稳定状态，它们迟早会从大气中分离出去。人们采用使粒状物分离的方法和装置是为了尽可能缩短这一时间，以减轻或消除其危害。

第二节 粉尘和烟气对环境的影响

由工业生产排出的粉尘和烟气中往往会有很多有害或有毒的物质。当大气中有害物质

的浓度达到一定程度就会对人、动物、植物造成危害，金属、古建筑以及其他材料也会受到腐蚀和损坏，并影响气候。此外，生产过程中尘粒或烟雾的散发，还会使设备磨损，使各种产品的质量降低，影响照明，降低劳动生产率。

粉尘和烟气一般是通过人的呼吸道系统进入人体，引起各种呼吸道系统的病症和其它全身症状。空气中小于 $5\mu\text{m}$ 的细微粉尘——飘尘可以在进入人的呼吸系统后深入肺部，引起各种尘肺病，成为广泛的职业病之一。有毒的金属粉尘和非金属粉尘（铬、锰、镉、铅、汞、砷等）进入人体后，会引起中毒甚至死亡。尘粒表面可以吸附空气中的各种有害气体及其它污染物，而成为它们的载体，如可以承载苯比芘等致癌物质以及细菌等。

从图1-1可看出粉尘含量与呼吸道疾病死亡率之间的关系相当密切。据我国某地区调查，污染区中学生慢性支气管炎为对照区的2倍，慢性鼻炎、慢性咽炎以及一般呼吸系统病和肺心病死亡率也以污染区为高。国外研究资料表明，飘尘浓度大于 $1\text{mg}/\text{m}^3$ ，儿童支气管喘息病增多；大于 $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ ，老弱居民的死亡率就有所增加。长期接触年平均浓度各自达到 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 的二氧化硫和烟尘时，人体健康就会受到有害的影响，如呼吸道病症加剧或呼吸道病患者死亡数上升。当呼吸道患者短期接触“24小时平均浓度”为 $0.25\text{mg}/\text{m}^3$ 的二氧化硫或烟尘时，病情即会恶化。当二氧化硫或烟尘的“24小时平均浓度”达到 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 时，老年人或肺病患者的死亡率就可能增加。硫酸烟雾在 0.8ppm 时人就受不了。国外多次出现过烟雾事件（如伦敦市）或光化学烟雾事件（如洛杉矶市），曾使大量呼吸道疾病患者受害。

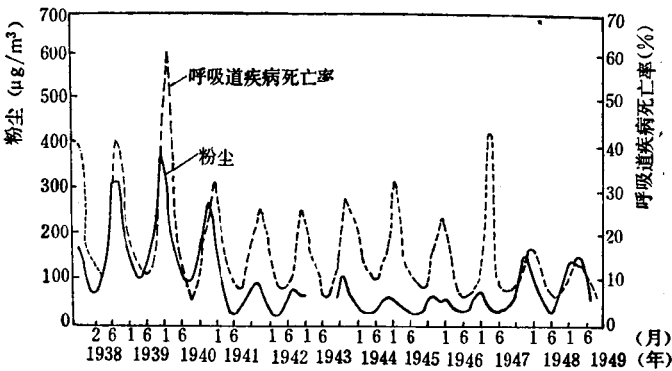


图 1-1 呼吸道疾病死亡率与大气污染之间的关系（爱尔兰都柏林1938~1949）

烟气对植物的危害表现为植物叶面产生伤斑甚至枯萎脱落，或植物生理机能受到影响，使植物的生长减慢，对病虫害的抵抗能力降低，造成产量下降、品质变坏等后果。尘粒对植物的危害，除因尘粒落在叶片上影响其光合作用外，还会使可食用的叶片失去其食用的可能性。有毒烟尘对植物的污染还可间接对家畜带来危害。例如美国蒙塔那州的阿那空大铜矿的冶炼厂排出含砷废气引起的牧草污染，使周围 24km 内的牛、羊、马等家畜中毒。1954年瑞典铁厂排出的大量含钼粉尘引起的牧草污染，使大批牛发生肝病而死亡。1955年西德铅锌工厂周围由于含铅废气引起的牧草的污染，使 5km 内牧场的牛、马发生四肢神经麻痹而跛足。

粉尘、烟气对家畜的危害也表现在家畜吸入污染物质，引起呼吸道感染、发生中毒甚至死亡。日本曾利用猪、狗、兔、猴进行动物试验，发现粉尘烟气在动物肺、淋巴腺、支气管周围血管中累积，使动物体质变弱。鸡在粉尘污染空气中难以长肥。蚕吃粉尘污染的桑叶也不易长大，丝产量也大大降低。

烟气中二氧化硫及其生成的酸雾、酸滴等，能使金属表面严重腐蚀，使纸品、纺织品、皮革制品等腐蚀破碎，使涂料变质，使白铁皮屋顶变黑，使油画等美术品失去艺术价值。光化学烟雾中的臭氧能使一般橡胶制品迅速老化脆裂。

粉尘和烟雾中的颗粒物可使大气变得混浊，能见度降低，减少阳光辐射，增加雾天数。

第三节 烟尘的治理

为了减少粉尘和烟气对大气的污染，必须采取多方面的综合治理，诸如改进燃料的燃烧过程，把黑烟消灭在燃烧装置中；采用燃料脱硫、烟气脱硫和废气制酸的措施来降低 SO_2 的排放等。用除尘装置分离和捕集烟气及工业生产中的粉尘，是防治大气污染的重要措施之一。

按照除尘机制的不同，除尘装置可分成五大类：机械除尘器，洗涤式除尘器，过滤式除尘器，静电除尘器，声波除尘器。本书要介绍的是静电除尘器。应该指出，除尘装置一般是按其主要作用机制而分类命名的，实际上在一种除尘装置中往往同时利用了几种除尘机制，因此这里先对其他常用的除尘装置作一简单介绍。

机械除尘器是利用重力、惯性和离心力等来达到去除尘粒目的的。其中利用烟气通过突然放大断面的烟道时其速度下降，在重力作用下烟气中的尘粒会自然下沉而与气流分离以达到除尘目的的叫重力除尘器（图1-2, a）；采用挡板或滤层使气流急剧改变方向，使

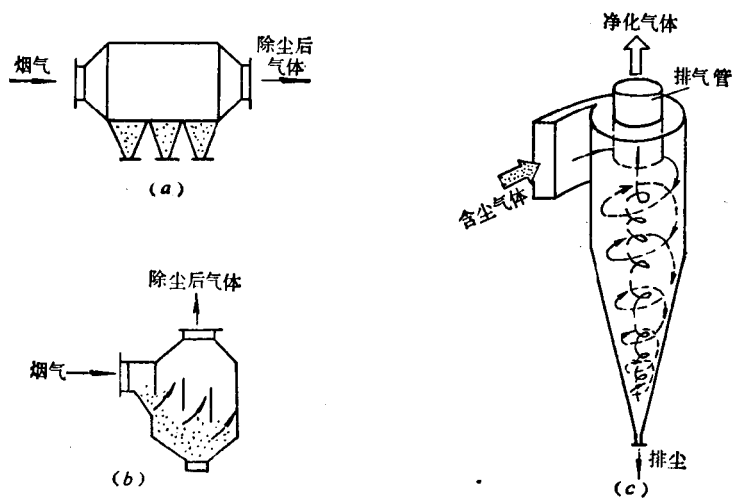


图 1-2 机械除尘器

(a)重力除尘器；(b)惯性除尘器；(c)旋风除尘器

粉尘由于惯性力作用继续按原方向运动，与挡板或滤层颗粒碰撞后下沉而与气流分离以达到除尘目的的称惯性除尘器（图1-2,b）；使烟气成旋转运动，产生离心力作用，把尘粒甩到器壁上碰撞下落以达到除尘目的的称离心力除尘器或旋风除尘器（图1-2,c）。机械除尘器适用于处理含尘浓度高及粉尘颗粒较大（粒径在 $5\sim 10\mu\text{m}$ 以上）的烟气，其特点是构造简单，经济耐用，维修和运转费用少，动力消耗低，但其除尘效率较低（一般为 $40\%\sim 90\%$ ），并且除不掉微细粉尘。它是国内常用的一种除尘设备。在排尘量比较大或除尘要求比较严格的地方这类设备可作为预处理用，以减轻第二级除尘器的负担。

洗涤式除尘器是利用含尘气体与水或其它液体密切接触来去除尘粒和有害气体的。常用的有喷淋洗涤除尘器、文丘里除尘器、自击式除尘器和水膜除尘器。使含尘气体通过喷淋洗涤液体所形成的液滴空间，靠尘粒和液滴之间的碰撞、拦截和凝聚等作用，使较大较重的尘粒靠重力作用沉降下来与洗涤液一起排走以达到除尘目的的称喷淋洗涤除尘器（图1-3,a）。靠含尘气体通过喉管形成高速气流使由喉管处注入的水雾化成细小液滴，来加强尘粒与液滴之间的有效碰撞，并在扩散管中凝聚成较大粒径含尘液滴再用离心分离器截留以达到除尘目的的称文丘里除尘器（图1-3,b）。让含尘气体直接冲击于洗涤液表面，使一定量的较粗的尘粒附在水中而被分离，而较细尘粒的烟气带着水进入弯曲通道在通道内形成喷雾，使气液充分接触来捕获尘粒以达到除尘目的的称自击式（或冲击式）除尘器（图1-3,c）。利用含尘气体对水冲击带出水分在旋风除尘器的内壁形成水膜，将沉降到其上的尘粒捕获以达到除尘目的的称为水膜除尘器（图1-3,d）。应该指出，在洗涤式除尘气中净化的气体从洗涤器排出时一般都带有水滴，为了除去这部分水滴，在洗涤器后都附有脱水装置。洗涤式除尘器的结构简单，造价低，兼备吸收有害气体的功能，可以处理高温废气及粘性的尘粒和液滴。其缺点是能耗比较大，洗涤后的污水和污泥需处理。

过滤式除尘器是一种使含尘气体通过过滤材料，将尘粒分离捕集的除尘装置。可分为内部过滤式和外部过滤式两种类型。把松散的过滤材料以一定体积填充在框架等处，作为过滤层，当含尘气体通过过滤层时，在过滤材料内部捕集尘粒的称为内部过滤式（图1-4,a）在这种除尘装置中，当粘附的尘粒达到一定量时，要更换新的过滤材料。如果用一定厚度的固体颗粒作为过滤层，也称颗粒层除尘器，它适用于冲天炉和一般工业炉窑，其最大特点是耐高温（可达 400°C ），耐腐蚀，过滤材料可长期使用。用滤布或滤纸等较薄的过滤材料将最初粘附在表面的尘粒层（初层）作为过滤层捕集尘粒的称为外部过滤式（图1-4,b）。在这种除尘方式中，当尘粒的粘附达到一定量而影响烟气通过时，可利用清灰结构进行清灰后继续使用。袋式除尘器（图1-5）是一种应用最广泛的过滤除尘装置。近年来随着清灰技术和新型过滤材料的发展，过滤式除尘器在冶金、水泥、陶瓷、化工、食品和机械制造等工业以及燃煤锅炉的烟气净化中得到广泛地应用。

声波除尘器是用声波促使含尘烟气中的尘粒凝并，再利用离心力等作用使其分离的除尘装置（图1-6）。由于声波除尘器在噪声、经济性、除尘率等方面还存在许多问题，所以目前还未投入实际运行。

表0-1给出了各类除尘器的基本性能，表中压力损失一项是指含尘气体在排放过程中所遇的阻力。当阻力大时，含尘气体的排放要借助风机来实现，因此一般阻力愈大，除尘

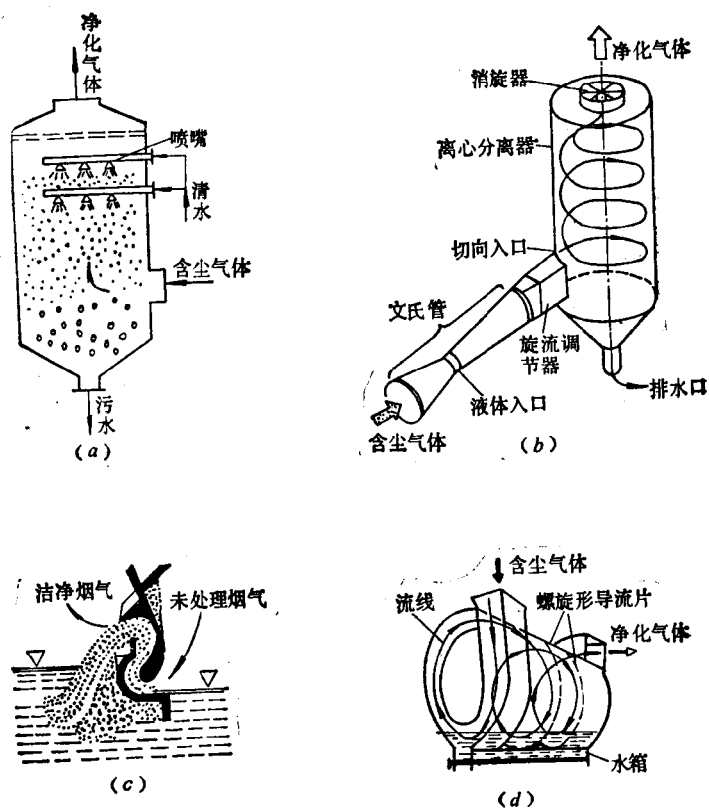


图 1-3 洗涤式除尘器
(a)喷淋洗涤除尘器；(b)文丘里除尘器；(c)自击式除尘器；(d)水膜除尘器

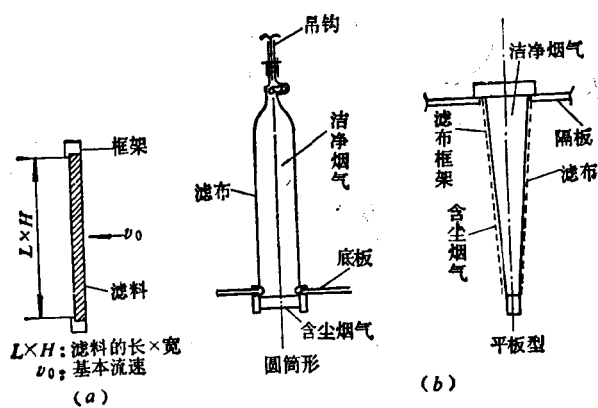


图 1-4 过滤式除尘器
(a)内部过滤式；(b)外部过滤式

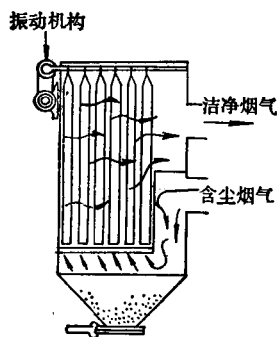


图 1-5 袋式除尘器

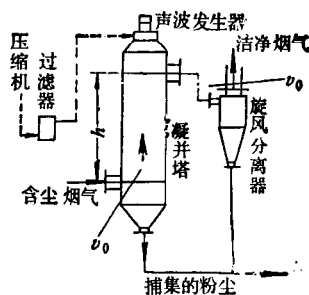


图 1-6 声波除尘器

v_0 —塔内烟气速度; h —声波的作用高度

气体在运行中的动力消耗也愈大。除尘效率 η 可根据除尘器进口、出口管道内烟气的流量 Q_i 和 Q_o 以及烟尘浓度 C_i 和 C_o 按下式计算

$$\eta = \left(1 - \frac{C_o Q_o}{C_i Q_i} \right) \times 100\% \quad (1-3-1)$$

或根据出口管道内烟气流量、烟尘浓度和除尘器灰斗收入的尘量 M_o 按下式计算

$$\eta = \frac{M_o}{M_o + C_o Q_o} \times 100\% \quad (1-3-2)$$

根据定义不难证明, 两级除尘时的总效率为

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \eta_2 \quad (1-3-3)$$

式中 η_1 为第一级除尘器的效率, η_2 为第二级除尘器的效率。

在尘粒密度一定的情况下, 除尘效率的高低与其粒径有密切的关系。对不同粒径范围(粒级)尘粒的去除效率称为分级效率。某一粒级的除尘效率 $\Delta\eta_i$ 可根据除尘器进口粉尘和出口粉尘在该粒级下的百分数 f_i 、 f_o 以及除尘器的总除尘效率 η 按下式计算

$$\Delta\eta_i = 1 - \frac{f_o}{f_i} (1 - \eta) \quad (1-3-4)$$

或根据进口粉尘在该粒级下的百分数 f_i 和除尘器收尘在该粒级下的百分数 f_o 按下式计算

$$\Delta\eta_i = \frac{f_o}{f_i} \eta \quad (1-3-5)$$

分级除尘效率通常可以用指数曲线表示为

$$\Delta\eta_i = 1 - e^{-a d^m} \quad (1-3-6)$$

式中 d 为粒径; a 、 m 对不同除尘器有不同的数值。 a 值愈大, 分级除尘效率越高。 m 值越大, 则粒径 d 对 $\Delta\eta_i$ 的影响越大。

图1-7给出了各种除尘器的分级除尘效率，各种除尘器适用的粒径范围则可用图1-8来表示。

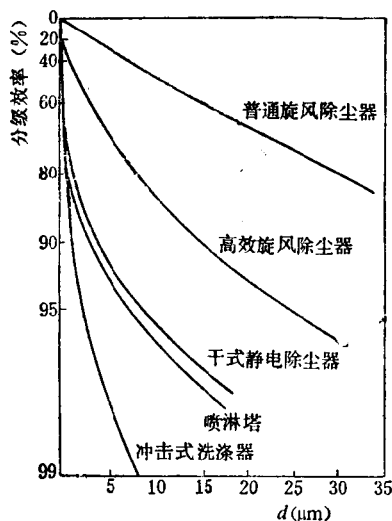


图 1-7 各种除尘器的分级除尘效率

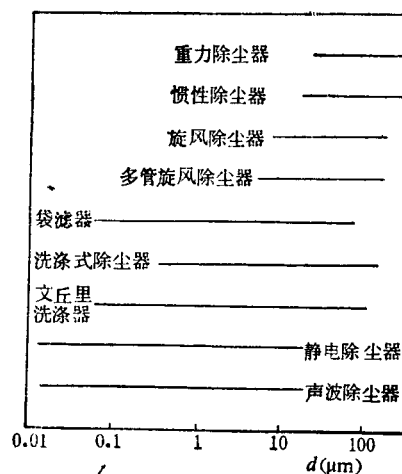


图 1-8 各种除尘器适用的粒径范围

由表0-1和图1-8可以看出，静电除尘器是一种可以捕集粒径为 $0.01\mu\text{m}$ 的微细粉尘的高效除尘器，同时具有适用粒径范围大，阻力小，运行费用低等优点。其主要缺点是设备费用高，所要求的一次投资大。

第四节 静电除尘器概述

静电除尘器（简称电除尘器）是美国工程师E.G.科特雷尔在1906年研制成功的，是一种利用电场力使气溶胶粒子从气体中分离出来的除尘装置。目前静电除尘器已广泛地应用于冶金、化工、水泥、建材、火力发电、纺织工业等部门。由于静电除尘器中的电场力是由直流高电压（通常为 30kV 以上）作用的静电场中形成的，所以这种除尘机理称为高压静电除尘或静电除尘。

一、静电除尘器的工作原理

静电除尘器实质上是由两个极性相反的电极组成的（图1-9），其中一个表面曲率很大的线状电极（通常是负极），称电晕极或放电极，另一个是板状电极（通常是正极），称集尘极。工作时需在电晕极和集尘极之间施加直流高电压使电晕极发生电晕放电，在电晕极附近形成电晕区。电晕放电使电晕区内生成大量的自由电子和正离子，以及由自由电子附着而带负电的气体分子——负离子。正离子在电场力的作用下向电晕极运动。自由电子和负离子在电场力的作用下向集尘极移动，充满到两极间的绝大部分空间。当污染气体通过这一电场空间时，充满在空间的自由电子和负离子将与污染气体中的气溶胶粒子碰撞并附着在气溶胶粒子上使之带电，形成带负电的粒子。由于在静电场中作用在荷电粒子上的电场力比重力大得多（对于直径为 $1\mu\text{m}$ 的粒子，电场力比重力约大10000倍，对于直径

10 μ m的粒子，电场力比重力约大1000倍）。所以在电场力的作用下，这些带负电的粒子将被驱往集尘极，放出所带电荷而沉积在集尘极上。当然，由电晕放电形成的正离子与气溶胶粒子碰撞时也可使之带电，形成带正电的粒子，沉积到电晕极上。但是由于出现在电晕区内的正离子向电晕极运动的路径极短，只能与少数气溶胶粒子相遇而使之荷电，所以沉积在电晕极上的粉尘颗粒是不多的。当沉积在集尘极（或电晕极）上的粉尘到一定厚度时，应由清灰装置及时清理，使粉尘落入灰斗后排出。

综上所述，静电除尘器的除尘过程可概括为以下四个阶段：①气体的电离；②粉尘的荷电；③荷电粉尘的沉集；④清灰。为了充分发挥静电除尘器的除尘作用，提高其性能，扩大应用范围，必须对电晕的形成方式、气溶胶粒子的荷电过程、荷电粒子在静电场中的运动以及粉尘在集尘极上的沉集规律等基本理论作深入的研究。近几十年中，随着对静电除尘器的理论研究和技术开发，静电除尘得到了不断改进且日趋完善，目前已发展为可以捕集细微粉尘的高效除尘器。

二、静电除尘器的类型

静电除尘器可以按下面几种方式分类。

（一）按集尘板的型式分

可分为管式和板式两种。管式静电除尘器的集尘极为一圆形金属管，管的直径为1.5~3 m，长度为2~5m。电晕极由一根电线（也称极线）构成，其上部通过绝缘子悬挂在顶部，下端靠重锤固定位置。图1-10为管式静电除尘器的示意图。含尘气体由靠近底部的地方进入圆筒内，净化后由顶部排出。工程实际应用时通常采用多组并联的结构。板式静电除尘器的集尘极为两个相距2.5~3m的平行板，电晕极由多根极线构成，悬挂在平行板的中间。图1-11为板式静电除尘器的示意图。含尘气体在两个平行板间流动而净化。

（二）按气体流动的方向分

可分为立式和卧式两种。在立式静电除尘器中，气体自下而上沿铅垂方向流动。管式静电除尘器都是立式的。板式静电除尘器也有采用立式的。立式除尘器的高度较大。在卧式静电除尘器中，气体沿水平方向流动。图1-11所示的板式静电除尘器是卧式的。在工业废气除尘中，卧式的板式除尘器是应用最广泛的一种。

（三）按沉集粉尘的清灰方式分

可分为湿式和干式两种。干式静电除尘器是用机械振打的方法清灰的，也是最常见的一种型式。清灰所回收的是干粉尘，便于处理和利用。但振打清灰会引起沉集粉尘的再飞扬，导致除尘效率降低。湿式静电除尘器是用喷水或溢流水等方式使集尘极表面形成一层水膜，将沉集在极板上的粉尘冲走。图1-12为溢流型湿式静电除尘器的示意图。湿式清灰

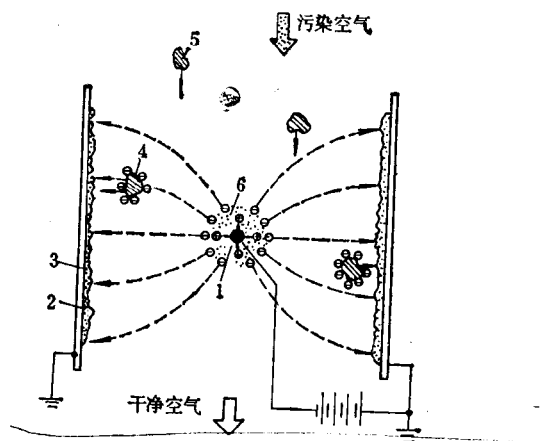


图 1-9 静电除尘器的工作原理
1—电晕极；2—集尘极；3—粉尘层；4—荷电的粉尘颗粒；5—未荷电的粉尘；6—电晕区