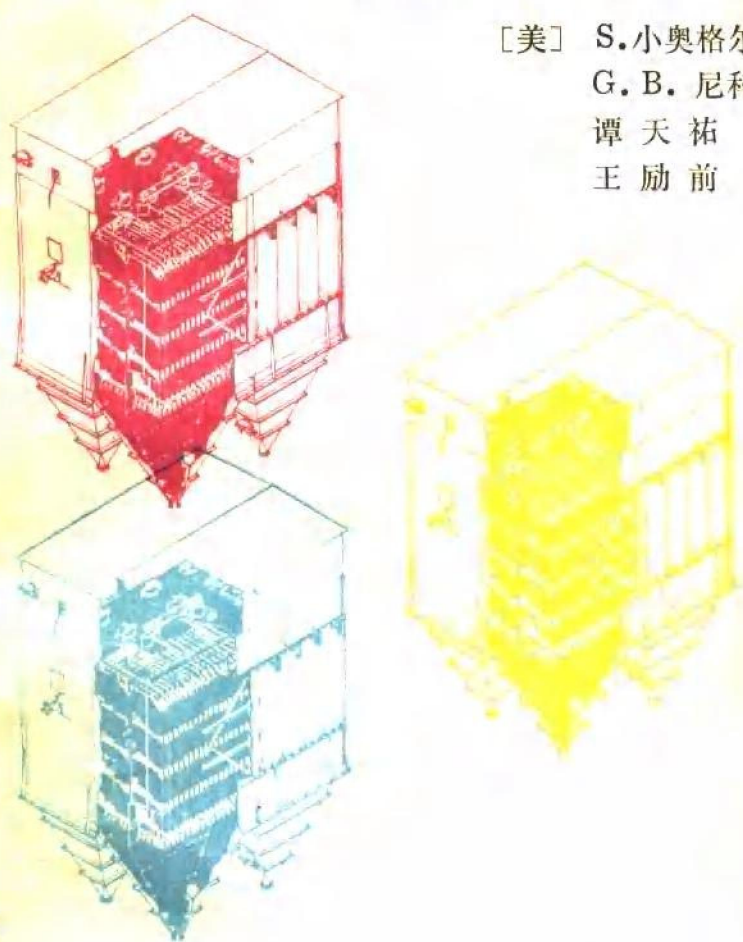


电除尘器

[美] S.小奥格尔斯比
G. B. 尼科尔斯
谭天祐 译
王励前 校



水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了电除尘器的理论和实践经验。理论方面包括电晕产生、电场强度、尘粒荷电、收尘,以及晚近发展起来的电除尘器数学模型;实践方面包括气体的调质、振打清灰、气流分布、除尘器结构部件、除尘器大小的确定及供电装置等。此外,书中还着重介绍了电除尘器的维护、故障分析等实际问题,对粉尘粒度、浓度以及比电阻的测定也作了详细的叙述。

本书可供从事环境保护、劳动保护方面的设计、科研单位的科技人员以及从事电除尘器的运行、维护管理的现场技术人员使用,也可供大专院校有关专业的师生参考。

Sabert Oglesby, Jr. Grady B. Nichols
ELECTROSTATIC PRECIPITATION
MARCEL DEKKER, INC. 1978 New York

电 除 尘 器

[美] S.小奥格尔斯比 G.B.尼科尔斯

谭天祐译 王励前校

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 11.375印张 302千字

1983年8月第一版 1983年8月北京第一次印刷

印数00001—10120册 定价1.45元

书号 15143·5116

译校者的话

电除尘器以其除尘效率高、阻力低、便于处理量大、温度高的气体等特长，而成为粉尘捕集回收和气体净化方面的主力设备。六十年代末以来，保护环境、治理大气污染的要求日趋严格，促使电除尘技术迅猛发展。作者奥格尔斯比和尼科尔斯就职于执美国电除尘器研究牛耳的南方研究所，多年来一直从事电除尘的研究工作，积累了丰富的经验。本书就是他们综合了晚近世界各国的理论研究和实践经验而编写的，是在电除尘方面继1963年怀特的名著《工业静电除尘》之后的又一部力作。

本书新内容较多，理论方面其要者有：电场强度数值解法，荷电理论（包括电场荷电和扩散荷电同起重要作用的中等直径尘粒的荷电），在低气流速度下因扩散力的影响而对经典的多伊奇公式所作的修正，灰尘粘附力、内聚力的研究、气流分布不均匀、窜气、二次扬尘等不利因素对效率的影响，以及飞灰成份对比电阻的定量关系等。

近年来，随着电场、尘粒荷电、影响收尘诸因素的定量关系的逐步建立和计算技术的普及，设计和应用电除尘器数学模型由电算求解已经获得相当的成功。美国南方研究所在这方面作了大量工作，本书的作者对此作出了重要贡献。电除尘器数学模型的发展，是电除尘理论与实践结合并向实用化迈进的重要步骤。所有这些，本书中都有充分的反映，相信会引起读者的兴趣。

本书除有理论方面的探讨外，对常见的实际问题，也多有详尽的叙述。尤其是关于气体调质、振打清灰、二次扬尘、气流分布、粉尘粒度和比电阻的测定等内容论述较为透彻。此外还着重介绍了电除尘器维护、故障分析处理等丰富的经验。这些知识都将有助于改善和提高现有电除尘器的维护管理和运行水平。

原书中若干词意欠妥和印刷错误之处，译文多以译注的形式作了改正或说明。为方便读者，已将原书中所有英制单位换算成工程制单位。

我国的电除尘器技术进入七十年代以后发展较快，无论在其应用范围、设备规模、品种、数量方面，或在其除尘效率方面均有显著的扩大或提高，但在实践中也遇到了一些问题。我们希望本书的翻译出版能对国内广大从事电除尘工作者有所裨益。

由于我们水平有限，译文中的错误在所难免，请广大读者批评指正。

谭天祐 王励前

1982年10月

前 言

本书论述电除尘在理论方面的进展和某些实际运行问题，例如烟气的调质、粉尘比电阻的测定，以及电除尘器的机械和电气设计等。某些章节还涉及到维护管理和提高设备可靠性的措施，后者在对控制空气污染要求日趋严格的情况下已显得更加重要。

本书内容多取材于美国环境保护局工业环境研究试验室 (The Industrial Environmental Research Laboratory of EPA) 所主持的研究成果。环保局的前身——国家空气污染管理局 (The National Air Pollution Control Administration) 对电除尘器的理论和应用状况曾组织过调查研究，1970年出版了《电除尘器技术手册》一书。此手册曾被广泛流传和引用。本书作者援引了其中的一些材料，并且根据此后的研究成果进行了补充。

本书力求编入电除尘器的最新理论和实践经验。美国清洁空气法通过以后以及各国对空气污染问题的普遍重视，促进了电除尘器的理论研究，再加上所积累的大量实用数据，极大地丰富了电除尘器的技术知识。电除尘的主要进展之一就是在荷电、电场及收尘方面已能较过去更多地依靠理论来指导电除尘器的运行，从而把电除尘器的设计、选用和分析，从单纯地依靠经验技巧提高到更加科学的基础上来。

目 录

译校者的话

前 言

第一章 绪论	1
1-1 电除尘过程	3
1-2 发展历史	6
第二章 电晕发生	15
2-1 电晕的物理过程	15
2-2 温度和压力的影响	25
第三章 电场	30
3-1 线-管式电极的电场	30
3-2 线-板式电极的电场	35
第四章 尘粒荷电	52
4-1 电场荷电	53
4-2 扩散荷电	57
4-3 电场荷电和扩散荷电的联合	59
4-4 尘粒荷电的试验研究	66
4-5 尘粒荷电试验数据和理论计算值的比较	68
第五章 收尘	72
5-1 粉尘动力学	72
5-2 气流为理想层流时的收尘	77
5-3 气流为紊流时的收尘	78
5-4 影响除尘的实际因素	83
5-5 效率公式的实际应用	88
5-6 多依奇公式的修正	91
第六章 清灰和二次扬尘	95
6-1 振打清灰理论	96
6-2 最佳振打清灰	100

6-3	二次扬尘	103
6-4	二次扬尘的检测	106
第七章 粉尘比电阻及烟气调质		109
7-1	火花放电和反电晕	109
7-2	影响比电阻的因素	114
7-3	克服高比电阻的方法	123
第八章 数学模型		146
8-1	电气计算	151
8-2	收尘	158
8-3	表示非理想因素影响的方法	160
8-4	输入数据格式	170
8-5	粒径分布	172
8-6	比电阻	174
8-7	确定伏-安特性曲线	176
8-8	电场划分	179
8-9	程序输出	180
8-10	模型的验证	185
8-11	燃煤电站锅炉	188
8-12	粉尘粒径分布的影响	195
第九章 确定除尘器的大小和技术条件说明书		198
9-1	用类比法确定除尘器大小	198
9-2	根据经验和试验关系式确定除尘器大小	202
9-3	通过中间试验确定除尘器大小	206
9-4	根据理论关系确定除尘器大小	208
9-5	电除尘器技术条件说明书	209
9-6	电除尘器的特定要求	210
第十章 供电		218
10-1	高压系统	218
10-2	输入功率	225
10-3	电场划分	226
第十一章 气流		229
11-1	流体流动的基本知识	229

11-2	气流品质	234
11-3	控制气流均匀性的装置	237
11-4	模型试验	243
11-5	不均匀气流的校正	247
第十二章 机械部件		254
12-1	壳体	256
12-2	放电极	257
12-3	放电极支座	261
12-4	收尘电极	263
12-5	振打器	265
12-6	灰斗	270
12-7	排灰系统	271
第十三章 维护		273
13-1	维护经验	273
13-2	放电极故障	275
13-3	排灰系统	286
13-4	振打装置	286
13-5	高压绝缘子	287
13-6	变压整流装置	287
13-7	控制线路	287
13-8	维修计划	288
第十四章 测定		290
14-1	粉尘粒度	290
14-2	气流速度分布和流量	310
14-3	含尘量的测定	315
14-4	比电阻	330
参考文献		348

第一章 绪 论

十九世纪末叶以来，防治大型工厂的粉尘排放问题日趋重要。二十世纪六十年代以后，由于在世界范围内强调保护环境空气质量，进一步促进了对此问题的重视。美国于1969年和1970年通过了“清洁空气法”，并规定了各种工业烟尘的排放标准，对防尘的要求比前十年提高了很多。

控制工业排放物的目的有三：（1）回收有经济价值的物料；（2）清除磨损性粉尘，减轻对风机的磨损；（3）清除排入大气烟气中的有害物质。回收烟气中物料的例子如：回收碱法造纸厂锅炉烟气黑液中的硫酸钠，送回蒸炼锅再用；回收水泥厂烧成窑窑灰再用；回收由石油催化裂化器排出的触媒粉尘等。这类收尘设备，一般都设计成低效或中效的，因为过分回收物料所得的收益，在经济上一般抵偿不了高效收尘设备的造价。

从卫生、观感和经济观点来看，防止有害粉尘排入大气也十分重要。人体吸入粉尘之所以有害健康，主要是它伤害了肺部或呼吸系统其它组织的表面。呼吸系统吸入粉尘并沉积的机理非常复杂，卫生工作者仍在研究中。以往对粉尘沉积的研究表明，直径约大于10微米的尘粒，或者被阻挡在上呼吸道内，或者不被吸入；而直径小于约1微米的尘粒，实际上不会沉积在肺内。因此人们认为，危害人体最厉害的是直径为1到10微米的粉尘。

然而，最近的毒物学家指出，许多更细的尘粒也能沉积于肺内，呼吸系统的组织或者直接受尘粒的影响而中毒，或者由于尘粒表面吸附了毒物而引起中毒。有的研究指出，直径在1微米以下的粉尘，其刺激性比粗粉尘要大，这可能是由于吸入空气中具有大量这类细尘的缘故。基于这些研究，目前重点控制的是直径小于1或2微米的粉尘排放。

粉尘排放到大气中在观感方面的影响，主要是与烟、雾的形成有关，这些烟、雾因为颗粒细而对光线的散射强烈，就显得更为触目。尘粒对光线的散射能力与其表面积和散射系数有关，以直径为0.2~2微米者为最强。

空气污染的经济后果，始终是个重大的研究课题。不言而喻，在周围空气中的粉尘和气态污染物越多，对各种材料的破坏作用也越大。尽管空气污染的经济损失难以定量计算，但它却是必需治理空气污染的原因之一。

1972年，美国国立工程科学研究院-国家科学研究委员会（The National Academy of Engineering-National Research Council）主持草拟了一份报告[1]。在这个报告的结论中指出，美国工业排放的粉尘将由1972年估算的每年1800万吨增加到2000年的每年5000万吨以上。现有工业气体净化设施清除微粒（直径小于3微米）的效率不高，恐难以控制微粒的排放。这些微粒对大气的可见度和气候都有不利影响。再者，它们的大小正处于可吸入的范围，所以也难免要危害人体健康。

由于对空气污染治理的需求日益增长，加以美国各州和联邦都制定了排放标准，改进气体净化设备的设计就显得更加重要了。总的来说，气体净化设备的设计已从主要依赖经验技巧，上升到使用更为可靠的科学方法。前几年，尽管在购置气体净化设备时也提出一定要求，但不少设备在安装后并没有进行测定，难以肯定其是否达到了原定的性能。可是现在如果气体净化设备满足不了既定的要求，就会影响工厂的正常生产，直接用于净化设备的费用也要增加，这些都会带来严重的经济后果。因此，必须制定更加严格的条例以确保达到所要求的性能。

工业气体净化可分为消除有害气体和清除粉尘两类，或二者兼而有之。从工业烟气排放物质的数量来看，最大的问题是燃油、燃煤时的二氧化硫和燃煤（特别是发电站）时的飞灰。1972年美国燃煤的飞灰量多达3000多万吨。

工业气体中的粉尘，可用电力、空气动力或机械力来清除。

所谓的机械除尘设备，例如旋风除尘器，已用于气体净化多年。其优点是结构简单、操作方便。但是，对直径小于 20 微米的粉尘，它的除尘效率随粉尘直径的减小而急剧降低。因此，在清除象飞灰这样的粉尘时，旋风除尘器仅能作为第一级，其后还要加设其它除尘设备。在近代的设计中也常常不采用机械除尘器。

在湿式洗涤器中，气体穿过水雾或水膜而流动。当用以清除粉尘，特别是需要同时净化象二氧化硫之类的气体时，用这种洗涤器的很多。在洗涤器中，依靠空气动力和惯性力把尘粒驱入液面内，即可达到除尘的目的；此外还有聚合和凝并的作用。洗涤器所需的阻力较大，常在250到500毫米水柱之间，有时为了有效地捕集极细的粉尘甚至高达2500毫米水柱。

袋式过滤器也广泛地用来净化工业气体，特别是在气体量不大时。滤料及其上的粉尘层的捕尘作用，主要是借助于施加在悬浮粒子上的空气动力和惯性力，静电力也有一定的作用。通过滤袋和粉尘层的阻力，通常为几十毫米水柱。

在各种气体净化设备中，只有电除尘器才能把作用力直接施加到尘粒本身上，使尘粒与气流脱离。因此，电除尘器分离尘粒所需的能量要比其它形式的除尘设备小得多。电除尘器的阻力大约为25毫米水柱或更小一些*，相比之下过滤器和洗涤器的阻力可达250到 2500 毫米水柱。电除尘器这个独特的优点，使其在处理气体量大、除细尘效率要求高的地方得到广泛的采用。

1-1 电 除 尘 过 程

电除尘过程由三个基本阶段组成：（1）尘粒荷电；（2）收尘；（3）清除所捕集的尘粒。在实际除尘器中尘粒的荷电，是通过电晕放电产生大量离子并使其附着在尘粒上来实现的。

* 对于收尘面积与气量的比值为 $16.5 \text{米}^2/1000 \text{米}^3/\text{小时}$ ，以及单位功率为 $10.76 \text{瓦}/\text{米}^2$ 的电除尘器，其典型阻力为25毫米水柱。

图 1-1 所示的一种电除尘器，由作为放电极（或称电晕极）的极线和作为接收极（或称收尘极）的圆筒所组成。产生电晕需要有一个极不均匀的电场，在极线与圆筒电极之间施加高电压时，极线附近就会形成这种条件。此电场使气体中的电子运动加速到足以使极线附近的气体达到电离的程度，由此所生成的离子在向收尘极运动过程中与气流中的悬浮粒子碰撞并附着在其上面。离子的附着导致粒子荷电，粒子荷电程度取决于附着离子的

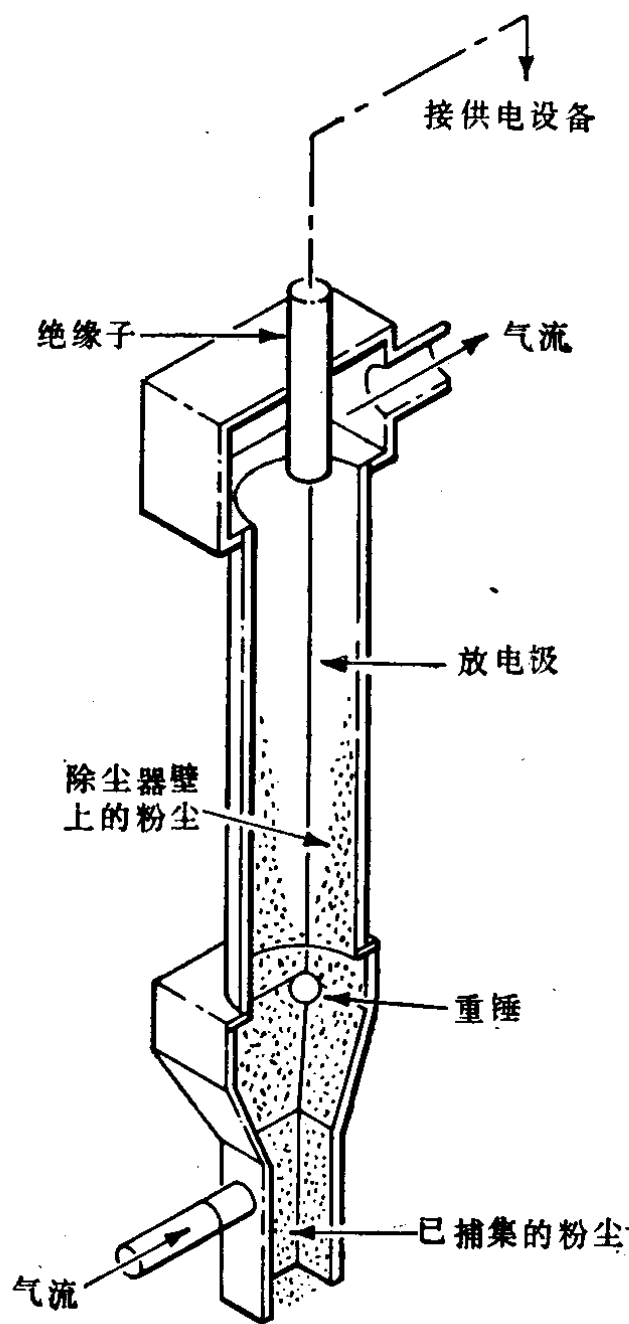


图 1-1 圆管式电除尘器

数目。

当存在着电场时，粒子上的电荷形成了一个指向收尘极的新力，其大小取决于电荷的多少和电场的强度。该力使粒子沉积于收尘极上，在机械力、电力和分子力的共同作用下，粒子得以贴附在极板上。

粒子被捕集后，如果是液态气溶胶，可用聚并和冲洗除掉；

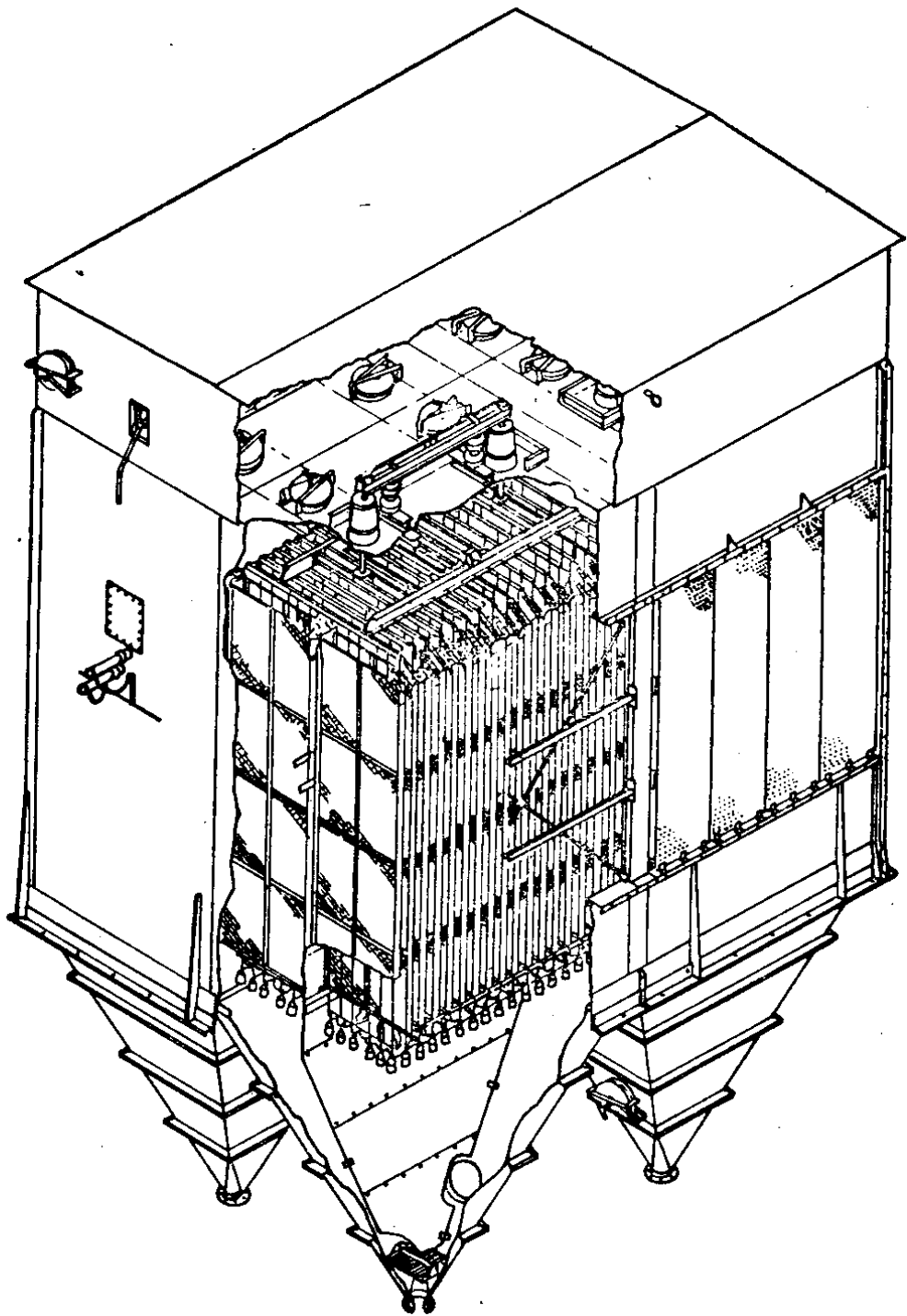


图 1-2 典型的板式工业电除尘器

如果是固体物质，则用定期撞击或振打来除掉。对于后一种情况，必须要等粉尘积到一定厚度时再振打，使粉尘成块状落入灰斗或灰仓，以防止过多的物料重新被带到气流中去。

除尘器的内部配置视其用途不同而异。虽然有时也采用圆筒形电极，但是为了节约空间，多数工业除尘器的收尘极均采用板式结构。图 1-2 为典型的板式工业电除尘器。

大多数电除尘器的荷电和收尘阶段均在同一区内进行。这种形式的电除尘器称为单区电除尘器。有时荷电是在一个区内进行，而其后的一个区是由带电的与接地的板极交替组成收尘区。分别建立电晕电场和收尘电场的除尘器称为双区电除尘器。

在特殊情况下，还可以有其它的形式。这将在第十二章中详细介绍。

1-2 发 展 历 史

古希腊的哲学家曾经观察静电现象，他们注意到用动物皮毛摩擦过的琥珀会吸引细小的粒子。十七世纪英国科学家吉尔伯特（W. Gilbert）记载了他的观察结果：经过摩擦的绝缘体能“吸引熄灯时缭绕上升的油烟”。其后若干年内，另外一些研究者也曾指出类似的现象。当时，起电理论正在形成中。十八世纪提出了作为电除尘理论基础的静电力的定量关系：

在整个十九世纪的科学文献中，可以找到各种分散的有关静电效应的报告[2-5]。第一个演示静电沉积的装置，是霍非尔德（M. Hohlfeld）在 1820 年前后制作的。他证明电火花可使瓶内的烟雾消散。1850 年，吉塔尔德（C. F. Guitard）观察到无声电晕放电也有同样的作用。1862 年高根（J. M. Gaugain）以及 1878 年纳尔渥德（R. Nahrwold）公布了类似的试验结果。

1883 年，从事静电研究工作的英国物理学家洛奇爵士（Sir Oliver Lodge）在《自然》杂志上的一篇论文中提出静电可以用来澄清被烟雾所污染的空气。显然洛奇想的是澄清城市环境空

气，但是不久他却有机会将电除尘应用于工业烟气污染源上。在洛奇的指导下，1885年沃克（Walker）和哈钦斯（Hutchings）在北威尔士炼铅厂建造了一台电除尘器。根据第一个美国专利的记载，它由设置在熔铅炉烟气中的一系列金属尖刺组成，并用直径为1.5米的玻璃板静电感应起电器供电。

但是这套装置用得很不成功，它用于此处是一种不幸，因为氧化铅烟尘极细，电阻又很高，非常难捕集。此外，静电感应起电器是当时唯一能产生高电压的方法。但它的运行却很不可靠，而且对大气状况十分敏感。综此数端，致使原定目的无法达到。

约在同一时期，德国布罗克威德的莫勒（K. Moeller）独自制作了一台电除尘器，1884年以他的名字公布了专利。但是，在工业应用的记载中没有见到有莫勒的专利。显然，电除尘器的概念被埋没了许多年。

直到1907年电除尘技术才复兴起来，并且在净化工业气体方面获得了成功。这次使用的是加利福尼亚大学化学教授科特雷尔（F. G. Cottrell）的发明[6,7]。为了设法捕集硫酸厂排出的酸雾，科特雷尔试用了霍非尔德和吉塔尔德介绍的方法。当时，这是刘易斯（E. P. Lewis）和戴维森（J. G. Davidson）在加利福尼亚大学物理系从事气体放电效应试验的课题。

不久，科特雷尔就认识到需要有更好的高压电源，于是改用了新发明的同步机械整流器。这种直流电源是他成功的关键，而且一直到二十世纪四十年代为止，仍保留着它的基本形式。

电除尘技术是在比其它空气污染控制设备更为有利的独特条件下发展起来的。加利福尼亚大学的科学技术环境有利于科特雷尔初期的研究。也许更有利的是科特雷尔1912年建立的非盈利的“研究协会”对电除尘研究的财政支持。科特雷尔将他大多数有价值的专利权转让给该协会。这个协会也曾给怀特（White）等人提供了试验研究基金，他们的研究成为美国电除尘器基础技术的重要组成部分。

电除尘在控制硫酸酸雾排放方面的成功，迅速导致其在其它

工业烟气污染源中的应用[2,3]: 首先(1910年)是在冶炼铜、铅和锌时回收烟气中的金属氧化物;几年之内,波特兰水泥厂(1912年)、纸浆和造纸厂(1916年)、电站(1923年)以及高炉(1930年)都安装了电除尘器。用电除尘器控制其它工业的空气污染比较晚些: 1950年用于平炉及铝电解槽(用于自焙阳极电解槽是在1971年), 五十年代末期用于碱性吹氧炼钢炉。

早期的冶炼生产, 给电除尘器技术带来了两个副产品: 其一是发现电除尘器可以对烟尘按组成分级。将烟气逐级冷却, 再用电除尘器捕集, 便可以分别回收各种相当纯的材料。这种方法已经成为回收有用物料的化工基础。

早期的另一个发现是当烟气中含有三氧化硫(来自硫化矿)时, 可以改善电除尘器捕集高比电阻冶炼粉尘(例如氧化铝)的工作条件。这一发现就是后来在实践中把 SO_3 和水分喷入烟气对高比电阻粉尘进行调质的开端, 用这个方法可降低粉尘的比电阻, 使其易于捕集。近年来, 这一技术已成功地用于其它装置上, 例如捕集燃煤飞灰。

无论从设备的数量还是从所处理的烟气量来看, 电除尘器的最大用途是清除电站锅炉烟气中的飞灰。现代电站设备可以发出1000兆瓦以至更多的电能, 所处理的烟气量可达每小时数百万立方米。

电力工业中大量使用电除尘器后, 人们发现由于煤的化学组成不同, 引起了飞灰性质的变化, 从而带来了种种问题。早期电除尘器多用于处理燃烧高硫煤的锅炉烟气, 而新装置中锅炉烧的往往是低硫煤, 它生成难以捕集的高比电阻飞灰。这和冶炼粉尘的问题类似, 是烟气中的三氧化硫不足所致, 因此常常可往烟气中加入此类化学物质来加以改善。

1-2-1 理论进展

电除尘器的技术发展殊多受益于其它相关科学的研究。这些科学所研究的现象涉及到电除尘原理, 其成果构成了电除尘技术

历史背景的一部分。特别值得提出的是气体中的高压放电和导电、悬浮尘粒的荷电以及荷电尘粒在收尘极表面上的沉积等的研究。

早期对电晕放电的一些研究，是由汤森 (Townsend) [8] 和汤姆森 (J.J.Thomson) [9] 在二十世纪初进行的。汤森对气体导电理论的贡献在于他证实了天然辐射可使气体产生自由电子，此外还确立了气体电离的定量关系。这些研究成为电晕放电理论、伏-安特性和电场方程的先导，为现代电除尘技术奠定了基础。

洛布 (Loeb) 及其在伯克利加利福尼亚大学的同事们进一步揭示了电晕现象的基础，他们的工作大约开始于1930年并持续到二十世纪七十年代[10]。“研究协会”为他们的研究提供了部分基金。

二十世纪三十年代米尔多 (Mierdel) 和西利格 (Seeliger) 进一步研究了电场和荷电尘粒对伏-安特性的影响[11]。库珀曼 (1952年) 研究了电子附着的概率和气体成分对伏-安特性的影响[12]。

1923年罗曼 (Rohman) 发表了有关尘粒荷电现象的初始基础研究结果[13]，确立了电场荷电的原理。这种电场荷电过程是尘粒与受电除尘器电场影响而移动的气体离子相碰撞而获得电荷。1932年波德尼尔 (Pauthenier) 和莫罗-哈诺特 (Moreau-Hanot) 发表了类似的方程式[14]。尘粒与无规则运动的气体离子相碰撞而荷电的过程称为扩散荷电，这是细小尘粒荷电的主要方法。1926年阿伦德特 (Arendt) 和卡尔曼 (Kallmann) 对此首次加以论述[15]。他们的研究成果以数学形式表示出来，即电荷数目为离子密度、温度 and 时间的函数，但未包括电场的影响。1951年怀特导出了更加精确的扩散荷电方程式[2]。

1957年郝韦特 (Hewitt) 发表了尘粒荷电最重要的试验结果[16]。试验测得的小尘粒荷电数值，现在仍被普遍承认。

1968年刘 (Liu) 和叶 (Yeh) 研究了中等大小尘粒的荷电[17]，对于这种尘粒，电场荷电和扩散荷电都起作用。最近史密斯