

环保装备技术丛书

电 除 尘 器

全国环保产品标准化技术委员会
浙江菲达环保科技股份有限公司



NLIC 2970696017

机械分技术委员会



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

环保装备技术丛书

电 除 尘 器

全国环保产品标准化技术委员会环境保护机械分技术委员会
浙江菲达环保科技股份有限公司



NLIC 2970696017



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为《环保装备技术丛书》的《电除尘器》分册。

全书共分十二章, 主要内容包括电除尘器概述、电除尘器术语、电除尘器本体结构、电除尘器气流分布模拟试验、电除尘器电控设备、电除尘器的安装、电除尘器的调试、电除尘器的运行、电除尘器的维护和检修、电除尘器常见故障、原因及处理方法、电除尘器安全工作要求、电除尘器性能测试等。

本书适用于电除尘器的设计研究、安装调试及维护管理人员, 也可供相关专业院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电除尘器/全国环保产品标准化技术委员会环境保护机械分技术委员会, 浙江菲达环保科技股份有限公司编. —北京: 中国电力出版社, 2010. 11

(环保装备技术丛书)

ISBN 978-7-5123-0981-4

I. ①电… II. ①全… ②浙… III. ①静电除尘器-基本知识 IV. ①TU834.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 201889 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 1 月第一版 2011 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.625 印张 324 千字

印数 0001—5000 册 定价 30.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

保护环境

造福人类

王金弟

中国机械工业联合会副秘书长 王金弟

提供一流装备，为保护环境

做贡献！

舒英钢

2010.8.26

中国环保机械行业协会理事长 舒英钢

《环保装备技术丛书 电除尘器》

编 委 会

主 任 朱建波

副主任 王剑波 郦建国

主 编 郦建国

参 编 林澄波 沈志昂 宣伟桥 赵 辉

朱少平 何毓忠 徐小峰 汤 丰

宣建强 潘民兴 王建忠 袁伟锋

王贤明 吴 金 王 华 许东旭



同一个地球，同一片蓝天，环境保护不分国界。让天更蓝、水更清、山更绿，是人类的共同责任与目标。

以污染换取繁荣不是人类发展的初衷，高能耗、高污染的工业生产，人类过度消费的生活方式，以及对自然资源的掠夺性开发，使人类赖以生存的环境日趋恶化，已经严重威胁着人类的生存。有效遏制环境恶化已刻不容缓。

尽管现在我国钢产量、水泥产量已居世界第一位，发电量居世界第二位，正从制造大国向制造强国转变，但能源浪费情况依然触目惊心，污染仍然十分严重，环保形势更趋严峻。近年来，电除尘器的提效创新，袋式除尘的蓬勃发展，烟气脱硫的迅速推进，烟气脱硝的蓄势待发，环保装备的发展呈现了多头并进的可喜局面。如何因势利导，规范有序、科学地进行综合管理，其中的一个重要环节是把治理污染的装备使用好、管理好，并使其发挥应有的效能。

以企业为主体，以市场为导向，产、学、研相结合的产品技术自主创新正在不断深入，科研开发进入了新一轮百花齐放、百家争鸣阶段，不断涌现出的新技术、新产品，谱写着污染治理装备的新篇章。

1987年，原机械工业部组建了电除尘器标准化技术委员会（简称标委会）。2005年，经国家发展和改革委员会及中国机械工业联合会批准，标委会兼并了原机械工业部布袋除尘标准化技术委员会，并扩展到烟气脱硫、烟气脱硝等大气污染治理装备领域，组建了机械工业环境保护机械标准化技术委员会大气净化设备分技术委员会。2008年，经国家标准化管理委员会批准，成立了全国环保产品标准化技术委员会环境保护机械分技术委员会。24年来，在政府的引导和推动下，按照《标准化法》的规定，瞄准国际先进技术，并结合我国国情，依法制定并修订了大气治理装备及相关领域的国家标准、行业标准75项，在提高我国大气污染治理装备技术水平和系统性能保证等方面起到了十分重要的作用。特别是创造性地制定了填补我国空白的脱硫、脱硝系列国家标准。国际上首次对脱硫、脱硝技术装备的核心设备，关键装置的设计选型、制造安装、运行维护及安全问题等各个重要环节进行了全面的质量控制，首次提出燃煤烟

气脱硫装备系统全面的性能测试方法。脱硫、脱硝系列国家标准被国内外供应商、用户及科研机构广泛采纳与应用。

以脱硫、脱硝系列国家标准为核心，数十项行业标准为支撑的脱硫、脱硝行业标准体系，融合了委员单位中 80 余项自主创新的专利技术，整合了 59 家龙头企业、大专院校、科研院所等国内外同行的优势力量和重大科技成果，引领着国内企业在烟气脱硫、脱硝方面健康发展与技术专利化、专利标准化、标准产业化，有力地推动行业真正从中国制造走上中国创造的创新之路。

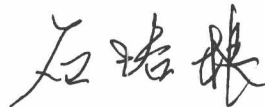
坚持以科学发展观为指导，以实现经济、社会的可持续发展为目标，加快大气污染治理装备行业的技术进步速度，引导并规范行业的健康发展，大力推广新技术、新工艺、新产品、新材料，应从教育着手，从基础抓起。2007 年，标委会决定编写烟气脱硫、烟气脱硝、电除尘器、布袋除尘器四大大气污染治理装备主导产品系列丛书。由浙江菲达环保科技股份有限公司、浙江大学、武汉凯迪电力环保有限公司、中钢集团天澄环保科技股份有限公司分别牵头成立电除尘器、烟气脱硝、烟气脱硫、布袋除尘器编写小组，集国内外数十家企业之经验，瞄准国际先进水平，结合标准的宣贯、培训，历时 3 年，几经审查论证，终得以成书。

环保装备技术丛书较全面地反映了我国大气污染治理装备的技术现状、技术要点及使用要求，是理论与实践的有机结合。其对基础教育、科技普及、运行维护大有益处，可供该领域的科研单位、大专院校及广大企事业工程技术人员和一线工人参考。

环境保护，事业崇高、责任重大、使命光荣，是造福人类最具意义的公益事业。让我们同心协力，与时俱进，为祖国美好的明天，为社会的全面和谐与经济的可持续发展作出更大的贡献。

全国环保产品标准化技术委员会环境保护机械分技术委员会
机械工业环境保护机械标准化技术委员会大气净化设备分技术委员会

主任委员



2010 年 10 月



电除尘器已经有 100 多年的发展历史。自 1907 年美国柯特雷尔 (F. G. Cottrell) 在加利福尼亚州的一个火药厂成功安装第一台电除尘器以来,电除尘器迅速得到推广应用,到 20 世纪 60 年代电除尘器已遍及各工业领域。随着研究的不断深入,电除尘器在结构、性能、控制方式等方面日臻完善,其除尘效率高、适应范围广、运行费用低、经济性好、使用方便且无二次污染等独特优点也日益凸显出来,早已成为许多工业领域除尘设备的首选产品,也成为了工业粉尘治理的主流设备。

1982 年,在原机械工业部的统一领导下,诸暨电除尘器厂(浙江菲达环保科技股份有限公司前身)、上海冶矿两家单位同时从瑞典 FLAKT 公司引进燃煤电厂电除尘技术。大型国产化电除尘器在山东石横电厂 300MW 机组上成功投运,从此拉开了电除尘器在国内快速发展的序幕。经过几代人的艰苦奋斗和不懈努力,我国电除尘技术已达到国际先进水平,其产业在环保产业中实力最雄厚、规模最大,且能与国外同类产品分庭抗礼,我国也已成为世界公认的电除尘器生产和应用大国。

电除尘器对控制我国工业粉尘排放、保护生态环境、建设和谐社会、推动经济健康可持续发展作出了突出的贡献。近年来,我国电除尘技术的研究仍然十分活跃,但与发达国家相比,尚存在一定差距,基础理论研究有待进一步深入,技术创新有待进一步推进和深化。要实现电除尘器由“中国制造”到“中国创造”的转变,不断提升市场竞争力,就要扎实掌握其设计、制造、安装、调试运行、维护管理技术。本书的编写想法正是在此背景下提出来的,旨在为电除尘技术的更大突破和创新抛砖引玉。

编者所在的浙江菲达环保科技股份有限公司在电除尘器研发、设计、调试、运行和检修维护方面积累了 30 余年的经验,此书即为公司及同行 30 余年经验的全面、系统的总结,内容涵盖电除尘器原理和结构、气流分布试验、电控、安装、调试、运行、维护检修、故障处理、性能测试等。本书主要编写人员为:第一、二章由郦建国、林澄波编写,第三章由何毓忠、沈志昂、许东

旭、赵辉、王建忠编写，第四章由袁伟锋、潘民兴编写，第五章由林澄波、汤丰编写，第六章由宣伟桥编写，第七章由宣建强编写，第八、九章由王华编写，第十章由郦建国、王贤明、吴金、徐小峰编写，第十一章由徐小峰编写，第十二章由朱少平编写，全书由郦建国、朱建波、王剑波统稿。希望本书能为电除尘器的设计研究、安装、调试及维护管理人员提供帮助。

本书在编写过程中参考了原电除尘器标准化技术委员会编写的资料《电除尘器安装、运行及维修》，并得到了石培根、黎在时、唐国山、王励前、张德轩等多位资深专家的悉心指导，也得到了国内同行、学者、用户以及浙江省环保装备科技创新服务平台的帮助，同时得到了浙江菲达环保科技股份有限公司在人力、财力方面的大力支持，在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者学识及经验有限，书中难免存在疏漏，不足之处恳请专家、读者批评指正。

编 委 会

2010 年 10 月



序 前言

第一章 电除尘器概述	1
第一节 电场捕集粉尘的基本原理.....	1
第二节 电场的工作特性	12
第三节 除尘效率的设计与保证	27
第四节 影响电除尘器性能的主要因素	30
第二章 电除尘器术语	39
第一节 电除尘器基本术语	39
第二节 电除尘器构造术语	41
第三节 电除尘器外壳结构术语	42
第四节 阳极系统(收尘系统)术语	43
第五节 阴极系统(电晕放电系统)术语	43
第六节 电除尘器电气术语	43
第三章 电除尘器本体结构	46
第一节 电除尘器型号及组成	46
第二节 壳体	47
第三节 阳极系统	48
第四节 阳极振打装置	52
第五节 阴极系统	56
第六节 阴极振打装置	63
第七节 气流分布装置	66
第八节 灰斗与灰斗挡风	68
第九节 电除尘器的支承	70
第十节 电除尘器下出灰系统	71
第四章 电除尘器气流分布模拟试验	82
第一节 物理模型试验	82
第二节 数值模拟试验	85

第三节	现场气流分布测定	89
第四节	气流均匀性评判标准	91
第五章	电除尘器电控设备	92
第一节	电除尘器用高压供电装置	92
第二节	电除尘器用低压控制设备	96
第三节	常用的高压电源技术	98
第六章	电除尘器的安装	104
第一节	电除尘器施工准备	104
第二节	电除尘器施工工艺流程	107
第三节	设备基础交验与连接	108
第四节	钢支架的安装	109
第五节	支承安装	110
第六节	底梁安装	112
第七节	灰斗及挡风安装	113
第八节	尘中走道安装	114
第九节	壳体安装	115
第十节	进出口封头安装	116
第十一节	阴极系统安装	117
第十二节	阳极系统安装	121
第十三节	阴、阳极振打装置安装	124
第十四节	附属设施安装	126
第十五节	电气施工	127
第七章	电除尘器的调试	133
第一节	调试内容及调试前的准备	133
第二节	电除尘器电气元件的检查与试验	134
第三节	电除尘器本体安装后的检查与调整	135
第四节	电除尘器低压控制回路的检查与调试	137
第五节	电除尘器高压控制回路的检查与调试	138
第六节	电除尘器阴、阳极振打装置的调试	139
第七节	电除尘器电加热器通电调试	140
第八节	电除尘器冷态空载调试	140
第九节	电除尘器热态负荷整机调试 (168h 联动运行)	143
第八章	电除尘器的运行	145
第一节	电除尘器的启、停操作	145
第二节	运行中的正常调节	152

第三节	节能保效运行	157
第四节	运行值班制度	158
第五节	绝缘与接地	160
第九章	电除尘器的维护和检修	164
第一节	电除尘器的维护保养	164
第二节	电除尘器的检修	165
第十章	电除尘器常见故障、原因及处理方法	182
第十一章	电除尘器安全工作要求	199
第十二章	电除尘器性能测试	202
第一节	测试目的、内容及要求	202
第二节	除尘效率的测试方法	203
第三节	本体压力降测试及漏风率测试	210
第四节	烟气参数的测试	212
第五节	电除尘器功耗测试及测试报告	216
附录	电除尘器除尘效率的修正及评判	217
参考文献		218



电除尘器概述

第一节 电场捕集粉尘的基本原理

一、气体的电离

众所周知，物质的原子由带正电荷的质子与不带电荷的中子组成的原子核以及在原子核外层高速旋转着的带负电荷的电子组成。电子比较容易受撞击或外力影响而脱离原子核的束缚，成为带负电的“自由电子”。这些“自由电子”有些还会附着在其他颗粒或分子上，成为带负电的质点，称为“负离子”。气体分子失去一个电子后，就多出一个正电荷，呈现带正电的性质，称为“正离子”。这种中性气体分子分离为正离子和负离子（包括自由电子）的现象，称为气体的电离。气体的电离是电除尘工作原理的一个重要组成部分。电除尘是“一门技术”，但在工作实践中又被人们称为“一门艺术”，因其使用情况受到众多因素直接或间接、复杂或直观的制约，要求我们能够透过现象看本质，掌握气体的电离规律，这是进入电除尘这个艺术殿堂的第一把钥匙。

1. 电子、原子、正负离子及负电性气体

物质由分子组成，分子由原子构成，而原子又是由带负电荷的电子、带正电荷的质子及中性的中子组成，质子与中子紧密结合成一团，称为原子核。整个原子中，电子的负电荷与质子的正电荷是等量的，一个电子或一个质子的电荷量是电荷的最小单位，这个电荷量用 e 表示。电子在离原子核相对较远的轨道上运行，如果没有电子从原子核的周围空间逸出，则整个原子呈电中性；如果在某种情况下，一个中性原子或分子失去（或得到）一个或数个电子，则剩下的带正（或负）电荷的结构就称为正（负）离子。从原子或分子荷电的角度看，电离是分子（或原子）失去（或得到）电子的过程。

负电性气体分子是指电子附着容易的气体。表 1-1 列出了部分气体分子捕获电子的概率，用电子附着成功所需要的碰撞次数（平均值） β 表示。实验表明，卤族元素与分子结构中有氧原子的气体大多都有良好的电子附着性。负电性气体得到电子后，就成为在工业电除尘器中起主要作用的荷电粒子——负离子。工业烟气除尘中，像二氧化碳、氧、水气之类负电性气体是大量存在的，在这里，负电性气体是粉尘荷电的中间媒介。



表 1-1

部分气体分子捕获电子的概率

气 体	β (平均撞击次数)	气 体	β (平均撞击次数)
惰性气体	∞	N_2O	6.1×10^5
$N_2 \cdot H_2$	∞	C_2HCl	3.7×10^5
CO	1.6×10^8	H_2O	4.0×10^4
NH_3	9.9×10^7	O_2	8.7×10^3
C_2H_4	4.7×10^7	Cl_2	2.1×10^3
C_2H_2	7.8×10^6	SO_2	3.5×10^3
C_2H_6	2.5×10^6	空气	4.3×10^4

2. 气体电离过程

图 1-1 所示为气体电离过程曲线, 图 1-2 则为工业电除尘器的原理示意图。借助图 1-1, 可以更好地阐述气体电离过程。电荷的定向移动产生电流, 当高压直流电加到电除尘器电场的正、负两极时 (工业电除尘器中一般负极作电晕极, 正极作收尘兼接地极), 电晕极表面的电场强度与电极间形成的电流关系也由图 1-1 表示出来。由于电场强度与施加的电压有着直接的联系, 电场强度随着电压的升高而增大, 因此可以定性、粗略地将图 1-1 中的曲线看作空载电场中电压与电流的关系。

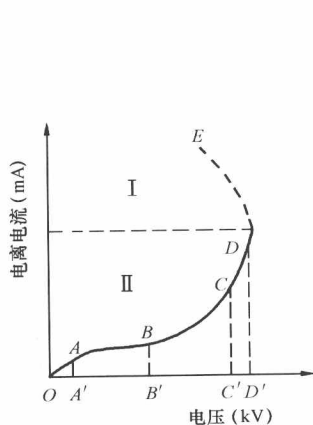


图 1-1 气体电离过程曲线

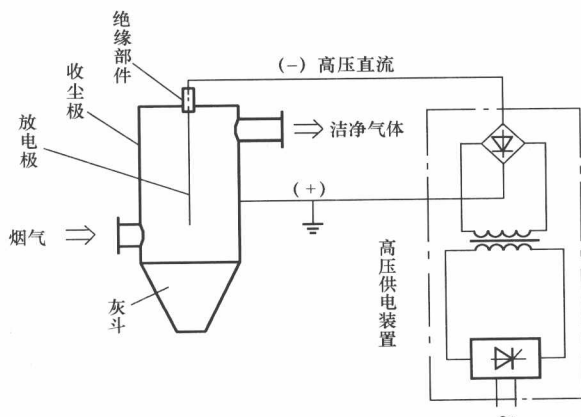


图 1-2 工业电除尘器的原理示意图

OA 段: 气体导电主要借助于大气中所存在的少量自由电子与离子。在烟气或自然界空气中, 由于宇宙射线及分子热运动等作用, 会产生极少量的游离的电子与离子, 当电场两极间施加的电压较低时, 两极间会出现随电压同步增加的微弱的电流, 此电流在除尘器供电装置的电流测量仪表上是毫无反映的。图 1-1 仅仅是定性表示了此电流, 通常此时的气体状态被看作是绝缘的, 这些极少量的电子与离子随着电压的增加, 获得的动能不断升级。

AB 段: 当电压达到 U'_A 时, 随着电压的上升, 电子同时获得更大的动能, 但由于受到气体分子平均自由行程 (λ) 的限制, 只能与气体分子作弹性碰撞, 总的行进速度无法提高, 故电流暂中止上升。



BC段：当这极少量的电子在 U'_B 的电压作用下被加速达到一定动能时，能够使与其碰撞的原子逸出电子（发生电离），各种不同气体电离需要不同的能量，称为气体的电离能。部分气体的电离能见表1-2。

表 1-2 部分气体的电离能

气体名称	氧 (O_2 , O)	氮 (N_2 , N)	氢 (H_2 , H)	汞 (Hg , Hg_2)	水 (H_2O)	氦 (He)
电离能 (eV)	12.50 13.61	15.60 14.54	5.40 13.59	10.43 9.60	12.59	24.47

eV 即电子伏特：一个电子在电场强度为 $1V/cm$ 的电场中行进 $1cm$ 路径所得到的能量 ($1eV=1.6\times 10^{-19}J$)。电离过程是比较复杂多样的，其基本过程示意图 1-3 (a)。电子碰撞中性气体分子 M 并使气体分子电离，气体分子逸出电子 e^- 后带正电，成为正离子 M^+ ， M^+ 与 e^- 在电场力的作用下按同性相斥、异性相吸的原理相向而行，从而产生电流，可以说气体开始导电。此时的电离称为碰撞电离。 U'_B 称为临界电离电压，由于此时电离不伴随声响，故又称为无声自发放电。

电离发生在放电极附近，是因为放电极的尖端效应使其附近电场强度特别高，电子能够获得足够的动能使气体发生电离，离开此区域后，电子在向正极行进的过程中被负电性气体分子俘获结合成负离子，或径直到达正极。碰撞电离发生后，随着电压的增加，电离过程越发激烈，电流迅速增加，其原理如图 1-3 (b) 所示。这时，不仅是作为发射

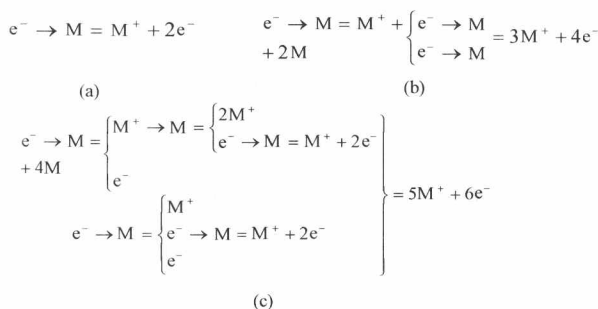


图 1-3 气体电离过程示意图

(a) 碰撞电离开始；(b) 碰撞电离加剧；(c) 电晕电离

源的原始存在的电子参与电离，被激发出来的电子及曾参与电离的电子都可能继续参与电离，从而使电荷数目迅速增加，电流较电压增加更快，曲线向上弯曲。

CD段：CD段为电晕电离阶段， U'_C 称为起晕电压， U'_D 称为火花放电电压或临界击穿电压。其实，从碰撞电离到电晕电离，并没有一个明显的界限，这里面有一个从量变到质变的过程，电晕电离的最大特点是正离子参与了气体的电离，其原理可用图 1-3 (c) 来演示。

DE段：过了D点，电晕区迅速扩大，致使电极间产生火花，若不立即加以控制，会迅速出现闪络并发展到两极间出现电弧，此时电流迅猛增加而电压下降，其对电极产生的电蚀与对电源的冲击是实际中不希望出现的。

从以下几方面可进一步了解电晕电离的特点：

(1) 电晕电离使气体电离程度迅速加快（曲线显得越来越陡）。从图 1-3 (c) 可知，当众多气体发生电离后，就会产生许多电子及等量的正离子，当放电极周围的电场强度高达使正离子也获得足够能量并参与电离时，参与电离的电荷粒子从数量上增加了 1 倍，并且由于正离子是在趋向于放电极过程中使气体电离，因此在这个过程中产生的电子由于加速路径长更容易获得参与电离的能量，从而使得总的电离程度更加激烈，从而产生了一个



雪崩似的效应。这个雪崩形的电离最终受空间分布电荷的影响而达到平衡，当电压继续升高时，则在更高一级电离水平上达到平衡。从离子数量看，电晕电离时电场中捕集粉尘的主要荷电粒子负离子密度可达每立方米上亿个。另外，当电晕电离发生后，已不再需要外界源源不断的电子补充作发射源，电离已进入自续放电阶段。由于电晕电离能够最大量地产生除尘所需的负离子与电子，因此电除尘器一般工作在电晕电离区。

(2) 电晕电离使放电极周围出现电晕光斑与声响。从以上分析可知，电晕电离的结果会在放电极周围出现 M^+ 、 M^- 与 e^- 密集的情况，使得 M^+ 与 M^- 及 e^- 结合成中性分子的机会大大增多，复合过程中将有电子从高能级跳回低能级，同时伴随发出光能与电能，在放电极周围 2~3mm 范围内产生淡蓝色的晕状光晕或光斑、亮点，并可听到较大的滋滋和噼噼的爆裂声（犹如夜间在高压线下观察到那样）。

(3) 正、负电晕与极性效应。根据放电极的极性不同，电晕有正电晕与负电晕之分，放电极接高压直流电源的负极产生负电晕，接正极产生正电晕。在电除尘器的应用中，除一些空气净化考虑到负电晕会产生较多的臭氧而采用正电晕外，工业应用大都采用负电晕，这是由正、负电晕的极性效应决定的。在一般工业除尘条件下，负电晕可以获得比正电晕明显高的电压、电流与电场强度，这对提高除尘效率是十分必要的。

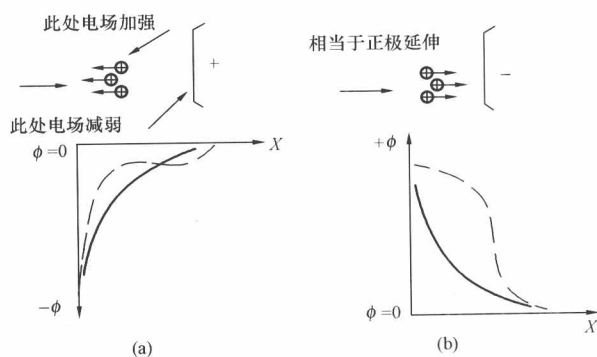


图 1-4 正、负电晕示意图

(a) 负电晕；(b) 正电晕

ϕ —电场强度

极性效应可以用针—圆盘的电场来说明，见图 1-4。

电晕电离发生时，在电场强度最大的针尖附近必然聚积大量正的空间电荷，当针为负极性时，它们削弱了极板一侧的电场强度而加强了向尖端的电场强度，从而使整个电场均匀分布，如图 1-4 (a) 所示。此时，负电晕被压缩在负尖端附近，而使以后的游离不易发展，使电场击穿需要较高电压；当针尖为正极时，正空间电荷的作用犹如将正极

延伸，这些正电荷削弱了正的针尖附近的电场强度而加强了向极板方向的电场强度，它们向负极板的运动相当于正极延伸，如图 1-4 (b) 所示，使电场在较低的电压下就被击穿。这就是由空间电荷引起的极性效应。图 1-4 中的虚线和实线分别代表空间电荷作用后与没有作用时的 ϕ 分布。通过实验演示（见图 1-5），当针尖为正极时，放电沿直线路径从最近的点开始，见图 1-5 (a)；当针尖为负极时，则从圆盘边缘进行放电，见图 1-5 (b)，放电路径被拉长，说明击穿需要较高的电压。这就是正、负电场的边缘效应。

综上所述，采用负电晕可以得到较高的击穿电压，同时由于电场分布相对均匀，也可以得到较高的电晕电流。

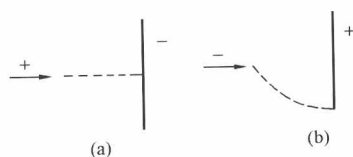


图 1-5 边缘效应示意图

(a) 正电场边缘效应；(b) 负电场边缘效应