



西安交通大学

研究生创新教育系列教材

工程电介质物理与介电现象

编著 钟力生 李盛涛 徐传骧 刘辅宜



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

013032931

048-43

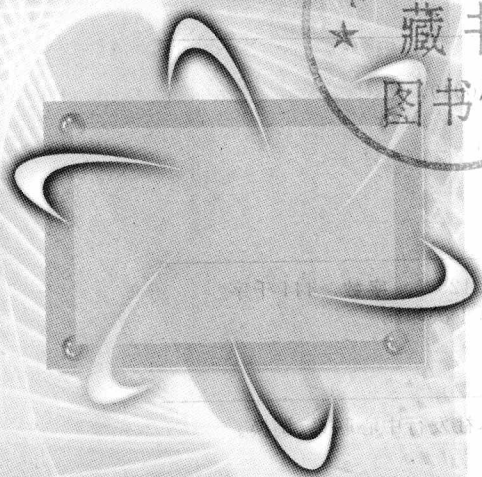
11



西安交通大学 研究生创

工程电介质物理与介电现象

编著 钟力生 李盛涛
徐传骧 刘辅宜



048-43

11



北航

C1640643



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书是根据我国电气工程专业研究生教学改革的实践经验和发​​展需求,在原电工材料及绝缘技术学科研究生电介质物理课程内容的基​​础上,修订编写而成的。本书内容主要包括:电介质的基本介电现象与物质结构,电介质在弱电场下的极化、电导与损耗,电介质的强场电导与击穿,介质的静电及驻极特性,聚合物的树枝化击穿,电介质的基本光学特性,半导体器件中的介电问题,生物材料的介电特性及其应用。

本书可作为研究生教材,也可作为本科生及从事电工、电子产品设计、制造、试验以及电力系统设计、运行、维护人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程电介质物理与介电现象/钟力生等编著. —西安:西安交通大学出版社,2013.3
ISBN 978-7-5605-4710-7

I. ①工… II. ①钟… III. ①电介质-介质物理学-高等学校-教材 IV. ①048

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 279026 号

书 名 工程电介质物理与介电现象
编 著 钟力生 李盛涛 徐传骧 刘辅宜
责任编辑 曹 朕 张 梁

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 西安明瑞印务有限公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 24.125 字数 444 千字
版次印次 2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-4710-7/O·412
定 价 48.50 元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82664954
读者信箱:jdlgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

《研究生创新教育》总序

创新是一个民族的灵魂,也是高层次人才水平的集中体现。因此,创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节,包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段,同样,课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习,使研究生在教师指导下,获取知识的同时理解知识创新过程与创新方法,对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时,开设了一批研究型课程,支持编写了一批研究型课程的教材,目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养,进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标,由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导,以本学科领域最新研究和前沿知识为内容,以探索式的教学方式为主导,适合于师生互动,使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在在学习过程中可以掌握最新的科学知识,了解最新的前沿动态,激发研究生科学研究的兴趣,掌握基本的科学方法;把教师为中心的教学模式转变为以学生为中心教师为主导的教学模式;把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材,是一项探索性的工作,也是一项艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血,但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信,通过研究型系列教材的出版与完善,必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

前 言

本书作为西安交通大学研究生创新教育系列教材,由西安交通大学电气工程学院组织编写而成。

电介质物理学属于凝聚态物理学分支,是与金属物理学、半导体物理学等并列的应用物理学科。它涉及的主要内容是电介质的组成、结构、杂质等微观性质与其介电特性(极化、电导、损耗、击穿等)的关系,以及光、电、热、机械功能转换和温度、压力、电频率等物理条件的影响。工程电介质主要涉及电介质理论在电气、电子、航空、航天、生物等工程技术领域的应用。

我国的电介质物理课程教学从1954年陈季丹先生开始已有近六十年历史。1983年西安交通大学开始给电气工程研究生开设“电介质物理专题”课程,由刘子玉先生负责,课程一开始是以讲座方式进行,数位教师各讲述一部分内容。1983年徐传骧教授为生物医学工程专业研究生开设了“生物电介质物理”课程,并首次编写了研究生专用教材讲义。1993年徐传骧、刘辅宜教授为博士研究生开设了“电介质物理进展”课程,并组织编写了《工程电介质物理基础与进展》研究生教材讲义。该讲义在巩固本科电介质物理概念的基础上,加强了发展较强的强场电导与击穿内容,并扩展了功能电介质和生物电介质方面的内容。授课教师结合各自科研,不断补充新的内容,体现了科研对教学的促进作用。研究生课程的教学采用课堂讲授、学生自学、课堂报告与讨论、结合研究方向撰写专题报告等相结合的方式进行,教学方式灵活多样,适合于促进研究生自主学习、独立研究的精神。

西安交通大学电介质物理研究生课程教学已进行了近三十年,教材讲义也使用了近二十年,随着近年来电介质领域的研究不断深入,有必要对原教材内容进行充实更新。本书由西安交通大学钟力生、李盛涛、徐传骧、刘辅宜主编。内容共分八章,其中徐传骧编写第1、2、7;刘辅宜编写第3、5、6章;李盛涛编写第3、5章;钟力生编写第1、4、6、8章。

在本书的编写过程中,我们先后得到上海交通大学江平开教授,西安交通大学崔秀芳老师,研究生张跃、赵俊伟、万代、胡波和王薇等给予的大量帮助,在此表示感谢。

本书由上海交通大学王寿泰教授担任主审。他对本书初稿提出了许多宝贵的意见,谨致以衷心的感谢。

由于本书涉及面广而我们的水平有限,加之时间仓促,本书一定还存在不少错误和不妥之处,敬请广大读者予以批评指正。

编 者

2012年2月于西安

目 录

第 0 章 绪言	(1)
第 1 章 电介质的基本介电现象与物质结构	(5)
1.1 电介质在电场作用下的基本特性	(5)
1.1.1 介质电导	(5)
1.1.2 介质极化	(6)
1.1.3 介质损耗	(7)
1.1.4 介质击穿	(8)
1.2 电介质的功能特性	(9)
1.2.1 电-机械效应	(9)
1.2.2 电热效应	(10)
1.2.3 电光效应	(11)
1.2.4 电压敏效应	(11)
1.2.5 电阻正温度系数(PTC)效应	(12)
1.3 电介质的物质结构及分子运动	(13)
1.3.1 原子的结构	(13)
1.3.2 固体中的作用力	(16)
1.3.3 分子速率和能量分布	(24)
1.4 电介质理论的物理基础	(27)
1.4.1 量子力学概论	(27)
1.4.2 固体能带理论	(42)
第 2 章 电介质在弱电场下的极化、电导与损耗	(55)
2.1 电介质极化	(55)
2.1.1 电介质极化的微观过程与表征参数	(55)
2.1.2 非极性介质电子位移极化与克-莫方程	(59)
2.1.3 极性介质的转向极化	(65)
2.1.4 离子型固体介质的极化	(78)
2.1.5 铁电体的极化	(93)
2.2 电介质电导	(99)

2.2.1	离子晶体的离子电导	(100)
2.2.2	非离子性介质的离子电导	(105)
2.2.3	液体介质中的电泳电导与华尔屯定律	(107)
2.2.4	气体介质的电导	(108)
2.3	电介质损耗	(109)
2.3.1	极化的建立过程	(109)
2.3.2	在交变电场下电介质的损耗理论	(112)
2.3.3	复介电常数与科尔-科尔(Cole-Cole)图	(115)
2.3.4	电介质在正弦交变电场下的极化损耗特性	(120)
2.3.5	复合介质的极化和损耗	(124)
第3章	电介质的强场电导与击穿	(130)
3.1	电接触界面性质	(133)
3.1.1	逸出功	(133)
3.1.2	界面接触势垒	(134)
3.1.3	金属与介质间的电接触	(135)
3.1.4	外电场对接触势垒的影响	(138)
3.2	强电场下电介质中载流子的增殖过程	(138)
3.2.1	电极效应	(139)
3.2.2	体效应	(144)
3.3	强场下介质中的电子输运	(149)
3.3.1	单晶介质的能带导电模型—扩展态迁移率问题	(149)
3.3.2	非晶态介质的跳跃电导模型—局域态迁移率问题	(151)
3.4	电介质在强电场下的电流特性	(152)
3.4.1	陷阱态与空间电荷	(153)
3.4.2	空间电荷限制电流	(154)
3.4.3	界面势垒控制电流现象	(157)
3.5	气体介质的碰撞电离击穿	(160)
3.5.1	汤森理论与巴申曲线	(160)
3.5.2	气体放电的空间电荷效应	(164)
3.5.3	负电性气体的放电条件	(165)
3.6	固体介质电击穿的试验现象与理论模型	(167)
3.6.1	固体介质电击穿的实验现象	(167)
3.6.2	本征电击穿的理论模型	(169)

3.6.3	碰撞电离雪崩击穿模型	(173)
3.6.4	隧道击穿模型	(174)
3.6.5	陷阱空间电荷的影响	(175)
3.7	电介质的热击穿	(177)
3.7.1	热平衡基本方程	(178)
3.7.2	稳态热击穿	(179)
3.7.3	瞬态热击穿	(182)
第4章	介质的静电及驻极特性	(184)
4.1	介质带电现象与静电理论的发展	(184)
4.2	接触带电理论	(185)
4.2.1	金属间的接触	(186)
4.2.2	金属与电介质的接触	(191)
4.2.3	绝缘体接触带电的离子输运	(194)
4.2.4	接触后分离带电	(196)
4.2.5	影响介质带电的因素	(197)
4.3	液体介质的带电	(199)
4.3.1	液体介质的带电机理	(200)
4.3.2	液体介质在管道中流动引起的带电	(201)
4.4	驻极体	(202)
4.4.1	驻极体的发现和发展	(202)
4.4.2	驻极体的基本特性和形成方式	(203)
4.4.3	驻极体基本理论	(207)
4.4.4	驻极体的应用	(215)
第5章	聚合物的树枝化击穿	(216)
5.1	绪论	(216)
5.2	聚合物介质的一些有关特性	(218)
5.2.1	与PE带隙有关的光吸收	(218)
5.2.2	PE的光电导与载流子迁移率	(218)
5.2.3	电极针尖附近的电场与PE的高场电导	(220)
5.3	影响聚合物中电树枝引发的各种因素	(221)
5.3.1	电树枝引发与电极系统的关系	(222)
5.3.2	电树枝引发的极性效应	(224)

5.3.3	接地电树枝	(225)
5.3.4	聚合物预处理对电树枝引发的影响	(227)
5.3.5	浸渍气体的影响	(229)
5.4	聚合物电树枝的引发理论	(230)
5.4.1	气隙放电论和麦克斯韦电机应力论	(230)
5.4.2	电荷的注入和抽出论	(231)
5.4.3	电树枝引发阶段的电荷转移——电荷偏置模型	(234)
5.4.4	电致发光的光降解理论	(236)
5.4.5	聚合物电树枝化的陷阱理论	(237)
5.5	聚合物电树枝生长的分形理论	(244)
5.5.1	NPW 模型	(245)
5.5.2	WZ 模型	(248)
第 6 章	电介质的基本光学特性	(252)
6.1	电介质的光频谱振极化	(253)
6.1.1	电子谐振极化	(254)
6.1.2	离子谐振极化	(256)
6.2	电介质的折射率与色散	(257)
6.2.1	介质的折射率	(257)
6.2.2	介质的色散	(259)
6.3	电介质的光吸收与散射	(261)
6.3.1	光在介质中的传播	(261)
6.3.2	介质的本征吸收与散射	(264)
6.3.3	电介质的非本征吸收和散射	(270)
6.4	电介质的其他光功能特性	(270)
6.4.1	电光效应	(270)
6.4.2	非线性光学效应	(272)
6.4.3	光子禁带效应	(273)
第 7 章	半导体器件中的介电问题	(276)
7.1	半导体器件的耐压和 PN 结的击穿	(276)
7.1.1	PN 结的能带结构和反向耐压特性	(276)
7.1.2	PN 结耗尽区电场的宽度及耐压	(277)
7.1.3	硅 PN 结的击穿机理	(280)

7.1.4	PN 结实验的击穿规律	(286)
7.2	高压半导体器件的表面电场与表面耐压	(289)
7.2.1	PN 结的表面击穿与表面电场	(289)
7.2.2	表面电场与表面空间电荷区的测量方法	(295)
7.3	表面保护材料带电及材料导电机理的探讨	(297)
第 8 章	生物材料的介电特性及其应用	(304)
8.1	生物体中的电磁现象	(304)
8.1.1	细胞膜电位及其变化规律	(305)
8.1.2	生物组织的压电效应	(309)
8.1.3	生物体的磁特性	(310)
8.2	生物材料的基本介电特性	(313)
8.2.1	生物电解质溶液	(313)
8.2.2	生物大分子和细胞膜	(318)
8.2.3	生物组织的介电特性	(327)
8.3	生物介电效应及其应用	(333)
8.3.1	电场效应及其应用	(333)
8.3.2	电流效应及其应用	(342)
8.3.3	频率温度效应及其应用	(347)
8.4	生物电介质研究进展	(354)
8.4.1	电阻抗成像技术	(354)
8.4.2	细胞膜电穿孔技术	(355)
8.4.3	低频高压电磁场的生物学效应	(360)
8.4.4	生物体的介电性质及外电磁场对其影响作用探讨	(362)
参考文献	(368)

第 0 章 绪 言

电介质物理学是随着 20 世纪电气工业的形成和发展而产生并发展起来的凝聚态物理学分支,是与金属物理学和半导体物理学相并列的应用物理学科。它涉及的主要内容是电介质的组成、结构、杂质等微观性质与其介电特性(极化、电导、损耗、击穿等)的关系,以及光、电、热、机械功能转换和受温度、压力、电频率等物理条件的影响。工程电介质主要涉及电介质理论在电气、电子、航空、航天、生物等工程技术领域的应用。

自 19 世纪末,安培(Ampère)、法拉第(Faraday)、麦克斯韦(Maxwell)等学者的研究奠定了电工理论基础之后,爱迪生(Edison)、贝尔(Bell)等发明家创造出来许多当时新颖的电气设备,如电机、变压器、电灯、电话、无线电等,并在 20 世纪逐步形成并成长为电气产业,从而改变了人类的生产方式,为人类创造了美好的生活。随后半导体与晶体管和晶闸管的发明、微电子与电力电子技术的产生,促进了计算机与电力电子工业的发展,使得现代社会从电气化时代进入到计算机电子信息时代。“工程电介质”是一门材料物理学科,它随着 20 世纪电气化时代的到来而形成发展,在 21 世纪又将随着电气能源、光电子信息、纳米材料和生物医学等新兴技术领域的进步而有更大的发展。

电介质学科起源于电气工业的发展对各种绝缘材料性能要求的日益提高,从而形成了绝缘电介质研究和相关产业技术领域。20 世纪初叶的电气设备,电压低、电流较小,电机、变压器、电线电缆、开关等设备的绝缘都采用天然材料,如云母、沥青、绝缘纸、矿物油、天然橡胶、大理石板等,它们的介电性能如绝缘电阻率和耐电强度都较低。随着电气设备工作电压的提高,特别是大容量电机及高压输变电设备的发展,急需发展新型绝缘电介质。在 20 世纪中叶,合成化学技术迅速发展,多种合成高分子绝缘材料面世,这些高分子合成材料不仅绝缘强度高、加工性能好,而且经过改性能够提高其耐热、阻燃、耐油等特性,促进了各种电力设备向高性能、大容量、高电压方向发展。目前,聚合物已成为各种新型绝缘电介质的主体,例如,电机绝缘由 Y(O)级、A 级(耐热 90~105 °C,天然棉、丝、纸绝缘)发展到 C 级(耐热 200 °C,聚酰亚胺绝缘);以环氧粉云母带为主绝缘的大型发电机容量由 20 世纪 50 年代的 6 MW 发展到 1000 MW;聚乙烯塑料电缆通过采用化学交联或

辐照交联,耐温也由 75 °C 提高到 90 °C 以上;采用交联聚乙烯绝缘的交流电缆电压已达 500 kV,直流电缆电压已达 ±300 kV;合成十二烷基苯二芳基烷等液体介质和聚丙烯薄膜已作为电力电容器的主绝缘,由环氧、玻璃纤维和有机硅橡胶、乙丙橡胶制成的合成绝缘子已广泛用于电力系统中。电力能源已从少数大城市使用的稀缺能源,发展成为从城市到乡村、从工业到农业的人民生活不可或缺的能源,应该说绝缘电介质的发展为世界及我国的电气化事业做出了重要贡献。

国际上,电介质学科是在 20 世纪 20~30 年代形成的,具有标志性的事件是:电气及电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)于 1920 年开始召开电气绝缘与介电现象国际会议(Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena),以后又建立了相应的分专业委员会(IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society)。这一时期,美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)建立了以冯希佩尔(Von Hippel)教授为首的绝缘研究室,前苏联莫斯科动力学院建立了“电气绝缘与电缆技术”专业。

在 20 世纪 30 年代,荷兰科学家德拜(Debye)教授,由于研究电介质的极化和介质损耗特性与其分子结构的关系而获得了诺贝尔奖,从而奠定了电介质物理学科的学术基础。随着电气和无线电工程的发展,形成了以研究电介质极化、电导、损耗、击穿为中心内容的电介质物理学科。

中国电介质领域的发展是在新中国建立以后。随着 1952 年我国第一个五年计划的制定和实施,电力工业和相应的电工器材制造业得到迅速发展,一批较大型高压绝缘电力设备工厂得到新建和发展。1952 年交通大学陈季丹教授负责筹建我国首个电气绝缘与电缆技术专业,开始招生培养电气绝缘领域的高级专业人才;1953 年成立了电气绝缘教研室,并开始招生培养研究生;同期,机械工业部建立了有关研究院所。这些校、院、所率先开展了我国有关电介质特性的研究和人才的培养。1954 年 9 月陈季丹教授首先在国内开出了“电介质理论”课程,其后许多院校先后设立相关专业,为我国培养了上万名电气绝缘方面的专业人才。1960 年陈季丹教授组织承担了国家十二年科技发展规划项目“电介质理论中心问题研究”,中科院物理所、桂林电器科学研究所、上海电缆研究所、上海硅酸盐研究所等单位也纷纷加入到电介质研究中,围绕 NaCl 晶体的击穿、绝缘材料电老化、液体电介质、高介陶瓷等方面开展研究工作,由此产生了许多有价值的工程应用,例如,解决了高压电缆、高压套管、高压电机、高介陶瓷电容器等设备中的基础问题,促进了我国工程电介质学科的发展。1984 年中国电工技术学会成立了工程电介质专业委员会,1985 年西安交通大学刘子玉教授和加拿大曼尼托巴大学高观志教授共同发起并在西安主持召开了首届 IEEE 的系列会议——“电介质材料性能与应用国际会议”(International Conference on Properties and Application of Dielectric Materi-

als, ICPADM), 将我国工程电介质的研究引向国际学术交流平台。

20 世纪 80 年代后, 我国工程电介质研究进入了新的发展时期, 在电介质击穿、电子陶瓷的晶界击穿、固体电介质中的空间电荷效应、聚合物中的树枝化和多因子老化、高介陶瓷、电力半导体器件的耐压与表面保护等方面的研究不断发展, 同时在低损耗聚合物光纤、电磁生物效应、纳米材料的损耗与击穿理论等方面的研究有新的进展。

在传统绝缘电介质领域, 聚合物电介质材料的介电特性、破坏机理和界面效应及其复合结构性能的研究一直是电介质物理学研究的重点课题。随着进行电介质中空间电荷测量的脉冲电声法、压力波法和热刺激电流法的发展, 电老化的陷阱理论和电树枝模型的建立, 加深了人们对高压聚乙烯绝缘电缆的电老化、树枝化和击穿现象的认识。固体电介质或固-气电介质的表面电荷与界面电荷的研究已用于绝缘子、套管和大型发电机绝缘中。液体电介质的组成结构、介电和电老化性能的关系、液体电介质中的空间电荷分布, 以及固-液电介质的流动带电特性等研究, 为超高压油纸绝缘电力电缆、电力电容器和电力变压器的发展提供了选材试验依据。

在无机功能电介质方面, 通过研究高介电常数陶瓷电容器的破坏机理, 提高其耐电强度, 研发出的电容器已用于 500 kV 等超高压断路器、ZnO 避雷器、气体激光器件和脉冲发生器等方面。以 ZnO 为代表的电压敏材料也已广泛用于电气电子装置与器件中。

有机/无机复合电介质应用方面的典型例子是发电机和电动机的绝缘。在大型发电机的绝缘系统中, 其主绝缘大都采用环氧粉云母带材料, 端部采用 SiC 与绝缘漆复合的非线性防晕材料。在用于变频调速的电动机绝缘中, 大多采用无机纳米材料与有机绝缘漆的复合绝缘, 以提高其耐电晕性能, 保证电机的使用寿命。

随着 20 世纪后期光电子通讯和计算机工业的发展, 用电频率由直流、工频提高到无线电频率(兆赫)以至光频, 这对降低电介质的高频极化损耗提出了迫切的要求。通过研究采用非极性塑料薄膜绝缘, 满足了高频通讯用电缆、电容器等产品的要求。而迅速发展的光通信技术则是采用了低损耗石英介质光纤。随着计算机的广泛使用, 计算机网络控制要求必须研究具有多种功能的执行元件, 其中大量是具有电-机、光-电转换特性的介质器件以及高分子光纤, 这些需求的发展导致电介质研究应用领域从传统的电气绝缘领域扩展到光电子功能材料领域。

新型电力电子器件及相关电气设备中, 也需用许多新型功能电介质材料, 如电力电子器件中的耐高压硅 PN 结单晶材料、模块用的导热绝缘材料、表面保护及封装材料等。对 PN 结击穿规律和机理及终端绝缘技术的研究, 促进了我国高压电力半导体器件耐压的提高。

生物体在一定条件下也具有介质特性, 即具有极化、损耗等特性。这些特性可

以应用于如微波治癌、电磁育种、电磁脉冲消毒、生物体再生、低温保存、生化医疗领域等方面。但也要注意电磁场的负面作用,防止电磁污染。因此生物电介质的电磁特性也成为现代电介质领域中的一个新兴研究方向。

电介质物理学越来越显示出它是一门覆盖面很宽的具有非常明显的学科包容性和可拓展性且发展前途广阔的具有很强生命力的学科。它不仅可以为电工材料与绝缘技术学科发展提供理论支持,而且能为其他材料相关学科的发展提供理论与技术平台。在人类科技发展的历程中,任何真正意义上的技术突破,往往都是建立在人们对材料性质深刻认识的基础上的。虽然电介质物理已经在电气、电子、材料、信息和生物等领域得到了广泛的应用,但它仍是一块有待开垦的肥沃土地,只要付出更多的努力,它一定会不断给我们带来惊喜和快乐。

第 1 章 电介质的基本介电现象与物质结构

1.1 电介质在电场作用下的基本特性

电介质在电场作用下最基本的电特性是电导和极化,即介质中电荷的迁移现象。

1.1.1 介质电导

电介质电导是电介质中存在的少量载流子在外电场作用下贯穿整个介质而构成“漏泄电流”的物理现象,见图 1-1,其特点是在直流电压 U 作用下有稳定的电流 I 通过。通常以电阻 R 或电导 G 来表征物体的电导特性,而以体电阻率 ρ_v 或电导率 γ 来表征材料的电导特性,分别定义如下:

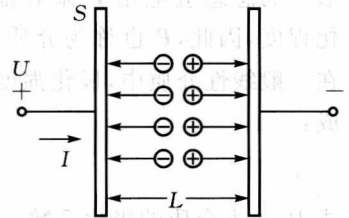


图 1-1 电介质电导模型

$$R = \frac{U}{I}, G = \frac{I}{U} \quad (1-1)$$

$$\rho_v = \frac{E}{j}, \gamma = \frac{j}{E} \quad (1-2)$$

式中, R 为电阻,单位为欧姆(Ω); G 为电导,单位为西门子(S); ρ_v 为体电阻率,单位为欧姆·米($\Omega \cdot \text{m}$); γ 为体电导率,单位为西门子/米(S/m); U 为电压,单位为伏特(V); I 为电流,单位为安培(A); E 为电场强度,单位为伏特/米(V/m); j 为电流密度,单位为安培/平方米(A/m^2)。

对于如图 1-1 所示的截面积为 S 、厚度为 L 的平板型电介质材料,则有

$$U = E \cdot L, I = j \cdot S \quad (1-3)$$

将式(1-3)分别代入式(1-1)和式(1-2)可得

$$R = \rho_v \left(\frac{L}{S} \right); G = \gamma \left(\frac{S}{L} \right) \quad (1-4)$$

电导特性并非电介质所特有,它是所有材料都具有的电学性质,但在电导率的

大小上却相差很远。一般导体 $\gamma=10^9$ S/m, 而绝缘性能良好的电介质 $\gamma=10^{-18}$ S/m, 二者相差 10^{27} 倍, 表明它们的导电机理会有明显区别, 因此需要对电介质的电导进行专门讨论。

1.1.2 介质极化

极化是电介质所特有的性质。因此, 有人就把在电场作用下能产生极化现象的材料称为“电介质”。极化是电介质中被束缚在分子内部或局部空间不能完全自由运动的电荷, 在电场作用下产生局部的迁移而形成感应偶极矩的物理现象, 如图 1-2 所示。通常以单位体积电介质中形成的总感应电矩 \mathbf{P} 来表征电介质的极化程度, 因此, \mathbf{P} 也称为介质的极化强度。

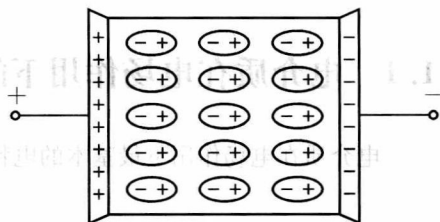


图 1-2 电介质极化模型

在一般线性介质中, 极化强度 \mathbf{P} 与介质内的电场强度 \mathbf{E} 成正比且方向相同, 可写成:

$$\mathbf{P} = \chi \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (1-5)$$

式中, χ 为介质的极化系数; ϵ_0 为真空介电常数, 其值为 8.854×10^{-12} F/m。

在工程技术中, 通常采用比电容率 ϵ_r 作为介质极化的量度, 它是以真空电容器充入介质后的电容量 C 与原真空电容器的电容量 C_0 之比来计量的。 ϵ_r 又称为相对介电常数, 它与 ϵ_0 的乘积定义为介质的介电常数 ϵ 。

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}, \quad \epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (1-6)$$

由电工学可得

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 = \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{E}} = \frac{\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}}{\mathbf{E}} \quad (1-7)$$

则

$$\epsilon_r - 1 = \frac{\mathbf{P}}{\epsilon_0 \mathbf{E}} \quad (1-8)$$

体电阻率 ρ_v 和相对介电常数 ϵ_r 是表示材料介电特性最基本的参数。在线性材料中它们是与电场强度无关的常数, 而在非线性材料中以及在强电场下它们则与电场强度有关, 同时, 当电场频率改变时 ϵ_r 也会随之改变。因此, 一般而言, 体电阻率 ρ_v 为温度 T 、电场强度 E 的函数, 相对介电常数 ϵ_r 可以看成是温度 T 、电场角频

率 ω 以及电场强度 E 的函数, 即 $\rho_v = f(T, E)$, $\epsilon_r = \varphi(T, \omega, E)$ 。

1.1.3 介质损耗

介质在交变电压下, 由于极化和电导现象而存在电容电流 I_C 和电导电流 I_R , 如图 1-3 所示。对于电容器而言, 往往希望其电容电流大, 而引起损耗的电导电流小, 故引入了一个新的介质物理参数 $\tan\delta$ —— 介质损耗角正切:

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{I_R U}{\omega C U^2} = \frac{P_r}{P_c} \quad (1-9)$$

式中, P_r 为电容器介质损耗有功功率; P_c 为电容器无功功率。

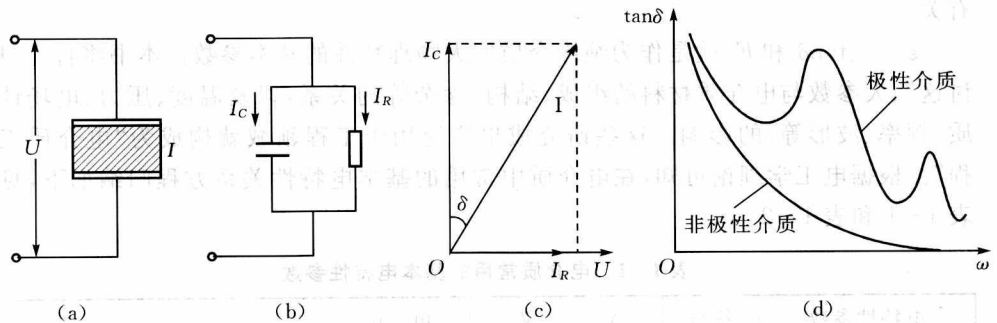


图 1-3 介质损耗示意图

(a) 介质试样; (b) 等效电路; (c) 电压电流矢量图; (d) 介质 $\tan\delta - \omega$ 图示

如介质在交变电压作用下只有纯电导电流损耗, 则 $\tan\delta$ 应与电场频率 ω 成倒数关系。实验测量表明, 极性介质的 $\tan\delta$ 与 ω 的关系是有峰值的曲线关系, 见图 1-3(d)。从图中可以看出极性介质的 $\tan\delta$ 值比非极性介质的 $\tan\delta$ 值要大, 而且随 ω 的变化呈非倒数式关系, 这是由于介质极化滞后所形成的损耗引起。因此, 研究介质损耗的重点就是要研究介质极化形成的动态过程所产生的损耗。

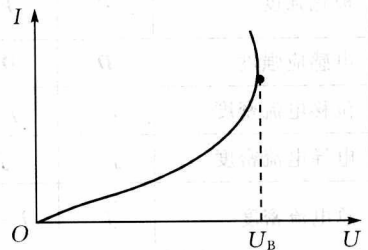


图 1-4 电介质在击穿时的伏安特性