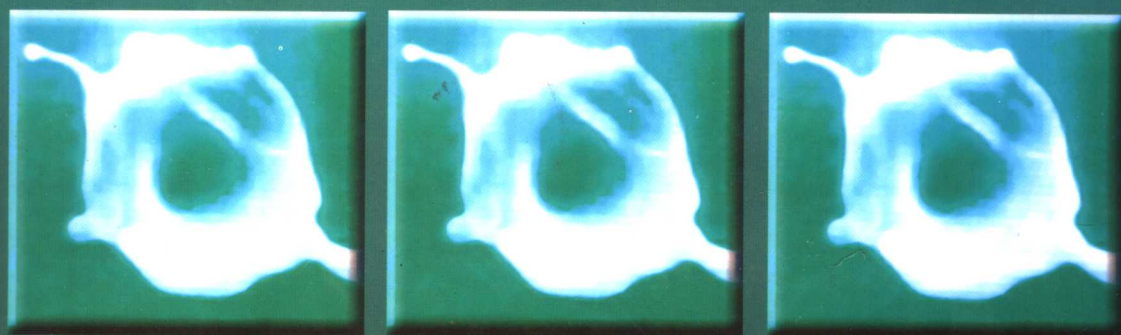


真空放电物理 和高功率脉冲技术

ЭКТОНЫ
В ВАКУУМНОМ
РАЗРЯДЕ:
ПРОБОЙ, ИСКРА, ДУГА

(俄) Г·А·米夏兹 著
李国政 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字:J-2006-084号

图书在版编目(CIP)数据

真空放电物理和高功率脉冲技术 / (俄罗斯)Г. А. 米夏兹
著;李国政译. —北京:国防工业出版社,2007.5

ISBN 978-7-118-04955-8

I. 真... II. ①米...②李... III. ①真空放电②大功率—
脉冲技术 IV. 0461.2 TN78

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第003121号

本书中文版由 Г. А. Месяц 授予国防工业出版社独家出版发行。版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 24½ 字数 600 千字

2007年5月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 75.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

中文版前言

俄罗斯科学院院士 Г. А. 米夏兹撰写出版了三卷本专著《艾可顿^①》(1993 年—1994 年), 其中的第一卷和第二卷经过修订补充更名为《真空放电中的艾可顿: 击穿, 火花, 弧》, 于 2000 年出版, 而第三卷为《电物理设备中的艾可顿》, 本书就是《真空放电中的艾可顿: 击穿, 火花, 弧》和专著《艾可顿》第三卷的中文版全译本, 为了通俗易懂, 书名改为《真空放电物理和高功率脉冲技术》。

本书从内容讲主要包括两大部分: 真空放电物理和电物理设备的脉冲功率技术。在前一部分中, 作者描述了真空放电的三个阶段: 击穿、火花和弧, 及其两个基本过程: 一个是阴极表面的微爆炸和电子爆炸发射, 另一个是这些微爆炸产生的等离子体与阴极表面的相互作用。作者用电子爆炸发射和他引进的“艾可顿”概念以统一的观点, 对真空放电的三个阶段和两个过程给出了全新的阐述。本书叙述的基本材料, 除了作者及其同事们多年来的工作成果外, 还包括了俄罗斯和其他国家研究者的主要结果, 并给出了相应的参考文献。

在后一部分中, 作者全面系统地阐述了电物理设备的脉冲功率技术, 包括它的各种基本技术: 高功率脉冲产生、传输的电容储能和电感储能脉冲发生器、磁绝缘真空线、电压型闭合开关和电流型断路开关, 以及在不同应用情况下采用的各种类型二极管: 磁绝缘的、强聚焦的、大面积的等, 还有超高功率 X 射线管、紧凑型脉冲 X 射线装置、等离子体焦点装置等。这部分的叙述是结合具体设备讲理论讲技术, 几乎涵盖了世界上所有比较著名的高功率脉冲技术装置, 其中包括作者领导的单位建立的许多装置, 同时又提供了详尽的参考文献。

本书著者是俄罗斯著名的米夏兹院士, 他是俄罗斯真空和气体放电物理和高功率脉冲技术的主要奠基人之一, 是具有世界声望的专家。他现任俄罗斯科学院副院长, 同时兼任俄罗斯科学院西伯利亚分院强流电子学研究所和乌拉尔分院电物理研究所的科学领导人。本书比较全面地反映了作者领导的这两个单位和其他俄罗斯单位以及世界上其他国家的科技工作者在这一领域的主要成果, 因此该书内容对于我国从事放电物理和脉冲功率技术的科技人员, 尤其是年轻的科研人员, 具有重要的参考意义, 能从本书中找到所需的知识、资料、经验和技能, 毫无疑问, 这将促进相关领域科研试验工作的深入开展和科技队伍的快速成长。因此, 本书的翻译出版, 对于从事放电物理、真空电物理设备、高功率粒子束加速器, 以及高功率微波、高功率激光和电磁发射等高新技术领域的研究、研制和应用方面的专家、科技人员, 以及高等院校相关专业的大学生、研究生、教师等熟悉和提高自己的专业技术水平和能力, 是十分有益的。

本书译者有幸得到 Г. А. 米夏兹院士的支持和授权翻译、出版本书的中文版, 对此表示由

^① 艾可顿(ЭКТОН), 英文为 ECTON, 是“Explosive Center”(爆炸中心)的缩写, 是指在阴极表面上爆炸产生并发射的一份份极高密度的电子流——译者注。

衷的感谢。早在2004年3月,当本书译者李国政教授从米夏兹院士过去的同事Э. Н. 阿布都林(Абдулин)博士处得到《真空放电中的艾可顿:击穿,火花,弧》一书不久,5月28日就收到了院士亲笔签名的该书中文版的翻译出版授权书。2006年5月18日,米夏兹院士在给李国政教授的信中,又同意把他的专著《艾可顿》的第三卷:《电物理设备中的艾可顿》与《真空放电中的艾可顿:击穿,火花,弧》一书合在一起出版完整的中文版,并且祝愿这将有利于两国科技合作事业的发展。此外,本书译者还要对俄罗斯托木斯克强流电子学研究所副所长Н. Н. 柯瓦尔(Коваль)博士、副所长И. Ю. 图尔恰诺夫斯基(Турчановский)博士和Э. Н. 阿布都林(Абдулин)博士、В. Б. 卓林(Зорин)博士以及其他朋友的支持和帮助表示深深的谢意。

本书的翻译同时是应我所承担的国家自然科学基金项目(资助号:10375048)的需要完成的。

本书的翻译出版得到了许多同志的支持和帮助。感谢邱爱慈院士、雷清泉院士支持本书的出版,邱爱慈院士和曾正中博士、孙凤举博士、杨海亮博士等对本书第四部分译稿的审阅。感谢潘妮妮女士在书稿计算机录入中所做的大量工作,郑翠微编辑和吴波工程师对本书第四部分给予的宝贵帮助。译者还要感谢国防工业出版社和副总编肖志力同志及责任编辑胡翠敏同志等在本书编辑出版上给予的大力支持和帮助。由于作者水平所限,译文不当之处在所难免,敬请指正。

译 者

2006年5月18日于西安

目 录

引言	1	参考文献	41	
参考文献	4	第五章 “总电压”效应和艾可顿	42	
第一部分 真空击穿				
第一章 电极表面	5	5.1 什么是“总电压”效应	42	
1.1 概述	5	5.2 关于真空击穿引发机制的假说, 阳极引发机制	43	
1.2 阴极微凸起的场致发射	6	5.3 电极上微粒子引起的击穿	45	
1.3 电介质的沾污和膜	8	5.4 “总电压”效应产生的其他原因	47	
1.4 吸附的气体原子和分子	8	参考文献	49	
1.5 电极表面上的微粒子	9	第六章 导体电爆炸	50	
1.6 微凸起的性能	9	6.1 概述	50	
参考文献	12	6.2 在高能量密度下金属的性质	51	
第二章 真空击穿的判据	14	6.3 比作用,准静态加热	54	
2.1 暗电流	14	6.4 比作用,动态加热	56	
2.2 尖锋阴极的脉冲击穿	15	参考文献	58	
2.3 平面电极的脉冲击穿	18	第七章 最简单的艾可顿模型	61	
2.4 直流电压击穿	21	7.1 导体爆炸的数值分析方法	61	
2.5 真空击穿的焦耳机制	24	7.2 艾可顿的融蚀发射模型	61	
参考文献	26	7.3 基于相似法的艾可顿模型	64	
第三章 等离子体引发的真空击穿	28	参考文献	67	
3.1 点燃真空火花引发的击穿	28	第一部分结论	68	
3.2 等离子体冲到阴极时的真空击穿	29	第二部分 真空火花		
3.3 等离子体激发击穿的机制和判据	30	第八章 研究真空火花的仪器	70	
3.4 在金属 - 电介质 - 真空三结合点 处击穿的激发	32	8.1 研究火花电参数的仪器	70	
参考文献	33	8.2 研究火花光学参数的仪器	71	
第四章 引发真空击穿的其他方法	34	8.3 真空设备	73	
4.1 激光辐射激发真空击穿	34	8.4 电极制备	74	
4.2 加速的微粒子撞击引发击穿	38	参考文献	75	
4.3 电子轰击阳极和引发击穿的其他方法	40	第九章 真空火花的一般描述	76	
		9.1 火花电流测量	76	
		9.2 对真空火花发光的研究	77	

9.3 电极融蚀的研究.....	80	14.2 阳极表面的结构	135
9.4 火花放电电流的特点	82	14.3 “涂鸦”效应.....	137
9.5 火花放电的定性机制	83	14.4 阳极射流的产生	138
参考文献	85	14.5 阳极质量向阳极的迁移	141
第十章 火花阶段的阴极融蚀.....	87	14.6 X射线的产生	142
10.1 第一次放电后阴极丢失的质量	87	参考文献	143
10.2 多次放电时的质量丢失	90	第二部分结论	145
10.3 阴极融蚀的液滴部分.....	91		
10.4 阴极表面的微起伏	93	第三部分 真空弧	
10.5 发射区等离子体压强.....	96		
10.6 确定发射区的电流密度	97	第十五章 真空弧的一般性质	147
参考文献	99	15.1 真空弧的激发方法	147
第十一章 阴极等离子体	101	15.2 真空弧阴极斑的一般性质	149
11.1 等离子体参数的测量方法	101	15.3 阴极电位降和阈值电流	151
11.2 阴极等离子体飞散速度的测量	102	15.4 阴极斑模型	154
11.3 真空火花阶段阴极等离子体的 温度、浓度和成分	104	15.5 火花和弧的阴极过程比较	155
11.4 阴极等离子体模拟	106	参考文献	156
参考文献	108	第十六章 阴极斑研究方法	158
第十二章 真空火花电流流动的规律性	110	16.1 实验数据选择判据	158
12.1 电子电流结构.....	110	16.2 弧参数的电气测量	158
12.2 真空火花电流与时间的依赖 关系	112	16.3 真空设备	160
12.3 真空火花电流.....	115	16.4 对电极表面研究的准备工作.....	162
12.4 真空火花电流和阴极等离子体 电位	117	参考文献	162
12.5 真空火花中的异常正离子电流	118	第十七章 弧的自行熄灭	164
参考文献	121	17.1 弧的寿命	164
第十三章 火花放电阶段艾可顿的自持 机制	122	17.2 弧燃烧的稳定性	165
13.1 阴极等离子体作用下的次级艾 可顿	122	17.3 放电回路参数对弧稳定性的 影响	166
13.2 新艾可顿的产生机制	124	17.4 在纳秒和微秒范围内弧的稳定 性研究	167
13.3 磁场对新艾可顿产生的影响.....	127	参考文献	168
13.4 电子体积电荷对新艾可顿产生 的影响	129	第十八章 弧阴极斑的周期过程	169
参考文献	131	18.1 弧电压的振荡.....	169
第十四章 火花放电阶段的阳极过程.....	133	18.2 纳秒时间的电位振荡	172
14.1 阳极的热工作方式	133	18.3 电压噪声的测量	173
		参考文献	174
		第十九章 阴极斑单元.....	175
		19.1 阴极斑单元的观测	175
		19.2 电流变化时阴极斑中的过程.....	177

19.3 蚀坑参数的测量	179	发生器	232
19.4 大电流时阴极斑单元	181	23.3 马克斯发生器及其类似的线路	233
参考文献	183	23.4 脉冲变压器	234
第二十章 阴极斑的运动	184	23.5 电容储能的脉冲发生器	236
20.1 无序的运动,第一类阴极斑	184	23.6 电感储能的脉冲发生器	240
20.2 第二类阴极斑的运动	187	23.6.1 具有导体电爆炸的发生器	240
20.3 阴极斑的“反向运动”	189	23.6.2 等离子体电流断路器	243
参考文献	193	23.6.3 具有半导体断路开关的 发生器	244
第二十一章 阴极斑过程的研究	195	23.7 电子直线加速器	246
21.1 电流密度	195	参考文献	247
21.2 等离子体流	197	第二十四章 获取大面积电子束的 二极管	249
21.3 离子融蚀	200	24.1 一般说明	249
21.4 液滴融蚀	202	24.2 大面积束的结构	249
21.5 真空弧阴极斑中等离子体的 性质	204	24.2.1 屏蔽效应	249
参考文献	205	24.2.2 引发效应	251
第二十二章 真空弧的艾可顿机制	207	24.2.3 相邻艾可顿电子束的相互 作用	251
22.1 弧周期的物理过程	207	24.2.4 束的环状结构	253
22.2 等离子体与液态金属的相互 作用	209	24.3 获取大面积束的二极管阴极	254
22.3 液态金属流,阈值电流	210	24.3.1 多尖峰阴极	254
22.4 关于阴极电位降	212	24.3.2 金属电介质阴极	257
22.5 艾可顿模型中弧的自发熄灭	213	24.3.3 液态金属阴极	259
22.6 在艾可顿过程中真空弧的能量 平衡	214	24.4 大面积束的性能	260
22.7 关于极限电流的本质	217	24.4.1 伏安特性	260
参考文献	218	24.4.2 大时间宽度的束	262
第三部分结论	220	24.5 获取大面积束的加速器线路和 结构	265
结束语	223	参考文献	268
 第四部分 电物理设备的脉冲 功率技术		第二十五章 形成和聚焦稠密强流相对 论电子束的二极管	271
引言	227	25.1 二极管工作特点	271
第二十三章 高功率纳秒脉冲的获取	229	25.2 平面电极二极管	272
23.1 引言	229	25.2.1 没有外加磁场的二极管	272
23.2 脉冲发生器的基本线路	229	25.2.2 外加纵向磁场的作用	274
23.2.1 具有储能线的脉冲发生器	229	25.3 刀刃阴极二极管	275
23.2.2 具有集中储能部件的脉冲		25.3.1 外加磁场的二极管	275
		25.3.2 没有外加磁场的二极管	277

25.3.3 环状几何的二极管	279	27.4 磁自绝缘线的应用	329
25.4 二极管中束的聚焦	280	27.4.1 能量输运	329
25.4.1 纵横比 R/d 小的二极管	280	27.4.2 储能	331
25.4.2 纵横比 R/d 大的二极管	281	参考文献	333
25.4.3 具有阴极凸起和等离子体流的二极管	285	第二十八章 脉冲 X 射线管	336
参考文献	288	28.1 X 射线简介	336
第二十六章 磁绝缘二极管	291	28.2 引出非相对论电子束的 X 射线管	337
26.1 磁绝缘同轴二极管工作原理	291	28.3 电子爆炸发射管的伏安特性	341
26.1.1 过程的一般描述	291	28.4 X 射线脉冲的特性	343
26.1.2 同轴二极管结构	291	28.5 超高功率 X 射线脉冲发生器	345
26.1.3 电子枪部件	293	28.5.1 概述	345
26.2 磁场中的阴极等离子体	295	28.5.2 X 射线管	347
26.2.1 阴极射流的形成	295	28.5.3 发生器结构	349
26.2.2 阴极等离子体性质	297	参考文献	352
26.3 阴极等离子体在二极管中的运动	298	第二十九章 紧凑型脉冲电子射线装置	354
26.3.1 等离子体的横向运动	298	29.1 紧凑型 X 射线设备	354
26.3.2 等离子体的纵向运动	301	29.1.1 引言	354
26.4 磁绝缘同轴二极管中电子束的形成	303	29.1.2 工业加速器	354
26.4.1 解析计算	303	29.1.3 物理研究用的脉冲设备	356
26.4.2 数值模拟	305	29.1.4 医用脉冲 X 射线装置	357
26.4.3 对束的实验研究	306	29.1.5 用于研究快速过程的装置	357
26.5 外加非均匀磁场的二极管	308	29.2 紧凑型电子加速器	359
26.5.1 阴极等离子体的飞散	308	29.3 亚纳秒电子束	363
26.5.2 电子束的形成	311	29.3.1 束的获取	363
参考文献	312	29.3.2 束的聚焦	365
第二十七章 磁绝缘真空线	316	29.4 低能电子束	368
27.1 磁绝缘物理	316	参考文献	370
27.2 磁自绝缘线的工作方式	317	第三十章 稀薄气体中的电流转换	371
27.2.1 准稳态方式	317	30.1 真空开关	371
27.2.2 线的波方式	322	30.2 低压气体开关	372
27.2.3 波的变形和反射	324	30.3 等离子体焦点装置	375
27.3 线中的等离子体和离子	326	30.3.1 基本过程	375
27.3.1 等离子体的作用	326	30.3.2 关于等离子体发展动力学	378
27.3.2 线中的离子流	327	30.3.3 对击穿和等离子体层形成过程的实验研究	380
		参考文献	381

引言

真空放电由三个阶段构成:击穿,火花和弧。真空击穿是激发真空弧的方法之一。但是在弧产生之前,放电先经过火花阶段。真空弧是真空放电中最难理解的阶段,它的典型特征是低的放电燃烧电压,其大小与阴极材料原子电离电位相当;阴极的连接区域有很大的电流密度;近阴极区域有很高的等离子体浓度;阴极斑发射高速等离子体流;以及液态金属滴,在阴极斑中还存在亚结构,即在很大的蚀坑内有许多微小蚀坑($10^{-4}\mu\text{m}$ 大小),等等。

能够解释所有实验结果的理论,现在还没有。首先试图这样做的是李和格林伍德(1961年),他们借助描述阴极斑过程的方程组,以求得阴极斑参数。他们首先给出了已知的阴极电位降值、阴极逸出功、热导系数、蒸发常数等等。别依利斯、留比莫夫和拉霍夫斯基在1969年为了描述近阴极区域的电流迁移过程,采用了一组在三成分阴极等离子体中重粒子和电子的能量平衡和运动方程。为了描述阴极上的过程,他们应用了阴极发射综合方程和阴极上能量平衡方程。上述这些以及其他基于经典的金属蒸发概念的解决阴极斑的方法,还是不能够解释已知的实验数据。此外,他们还采用了一个不正确的假设,阴极斑的电流密度不高于($10^5 \sim 10^6$) A/cm^2 。现在可以非常确定地认为,阴极斑电流密度为 $10^8\text{A}/\text{cm}^2$ 大小。因此,本书作者认为,他们描述真空弧的方法是没有前途的。

在已知的作者中还没有一个人把真空放电作为一个统一整体:击穿、火花和弧进行研究,尽管对于每一个阶段都有上千篇文章和几十本专著发表。一般认为,文章专著都是自身孤立地存在,而不是一个现象——真空放电的单个阶段的反映。在这种意义上,专著[1]是典型的例子。

本书在描述真空放电的书中的不寻常的,它首次以统一的物理观点给出了真空放电的所有三个阶段:击穿、火花和弧的描述。本书表明,这些阶段是如何很自然地从一个阶段转为另一个阶段的。这些物理观点是建立在认可阴极局部微爆炸的基本作用基础上的,这个作用就是引起电子爆炸发射(ВЭЭ)。因为爆炸过程持续时间很短,则在爆炸发射过程中电子的发射是一份一份进行的,这些份份我们称为艾可顿(由英文单词 Explosive Centre 第一个字母构成)。每一个艾可顿的出现都伴随阴极表面局部的破坏、液态金属变为液流和液滴、等离子体流等,而阴极表面遭到破坏的局部随后就变成蚀坑。这里应当补充一个重要的物理效应,这就是火花阶段电子束对阳极的加热、阳极等离子体的出现和液态金属从阳极向阴极的迁移。微爆炸产生的主要原因之一,是高密度电流对阴极微局部的焦耳加热。所有这些过程,构成了要讨论的真空放电的理论基础。

在上述机制的框架内,真空放电的全部三个阶段都得到了物理解释。击穿和击穿前的现象,是能量在阴极表面微体积内集聚的过程。一旦当这个微体积内积累的比能量超过某个极限值时,开始发生爆炸,同时击穿阶段结束。爆炸的开始和电子爆炸发射的产生,这是火花阶段的开始。火花阶段本身伴随微爆炸的不断更新,这个更新是由前一次微爆炸的等离子体和液态金属流引起。在阴极和阳极等离子体连接起来和电流上升速率减小后,火花阶段很自然

地转为弧阶段。

是什么事实迫使本书作者得出艾可顿在真空放电中起基本作用的结论？可以指出两个方向的研究促使作者得出上述结论。第一，是作者及其研究组的系列工作，它们都汇总在专著[2]中；第二，克萨耶夫(Кесаев И. Г.)关于真空弧研究的专著^[3]。本书作者的研究^[2]导致电子爆炸发射现象的发现和脉冲真空击穿和真空火花物理的理解。在这些工作中，首先采用了纳秒时间分辨的电流、电压和间隙发光的测量方法，并且光通量增强了 10^6 倍，这就有可能利用肉眼观测阴极微爆炸的过程，并将它们与电子爆炸发射电流的出现紧密地联系起来，正是这个电流决定了真空火花放电的开始阶段。

将参考文献[2]中对火花放电得到的关于阴极比融蚀和阴极电流密度的数据，以及测得的阴极等离子体、液态金属、微液滴和蚀坑的参数，与最可靠的真空弧数据进行比较，得出了重要结论。这些数据间惊人地接近，这使得作者做出了关于在阴极区域发生的火花和弧过程的一致性结论。但是已经很清楚，火花存在的基础是阴极上的微爆炸和电子爆炸发射，因此需要在弧本身中找到微爆炸存在的证据，并解释它们产生的原因。为此，本书作者及其同事安排了一系列实验，以研究弧在接近阈值电流条件下的行为，同时在实验中采用的时间分辨是纳秒的，而空间分辨是亚微米的。这些实验研究结果，更使作者确信所提出的假设的正确性。在真空弧阴极斑中，阴极局部的微爆炸确实起到了基本作用。从这些研究中作者得出结论：电子、等离子体、液态金属等的发射是一份一份进行的。电子的份就称为艾可顿。艾可顿是任何“份份”的最初原因。只是由于有了“份份”的思想，才可能更好地解释有关阴极过程的实验数据。

这就迫使重新审视已知的弧的实验数据，首先这指的是克萨耶夫的研究结果^[3]。他做出的一个非常重要的结论，就是在空间和时间上阴极斑都是间断的。阴极斑包含单个单元，它的电流不超过2倍的阈值电流，但在每一个单元里发生的却是周期过程。虽然参考文献[3]的示波器由于时间分辨不能准确地估计周期的持续时间，但是根据阴极痕迹的尺寸(约 10^{-4} cm)和热传播的大概速度(10^4 cm/s)可以证明，周期的持续时间约为 10^{-8} s。单元和周期的存在，完全可用弧的艾可顿机制说明。单元是由液态金属流的爆炸产生的，而周期则由前一次爆炸存在时间和下一次爆炸的准备时间决定的。克萨耶夫^[3]本人并不持阴极斑金属的电爆炸思想。正像他之前许多人一样，他认为，在阴极斑中发生的通常是金属蒸发。但是，为了说明许多不清楚的事实时，他常常回到爆炸过程的思想上来。例如，在分析阴极等离子体流时，他说“不排除在有爆炸现象时，等离子体流是由于热力学效应产生的^[3]可能性”。

尽管克萨耶夫得到了很好的实验结果，但它还不是令人满意，因为它并没有碰弧阴极过程的最初原因，也没有找到所有都依赖的那个现象。本书作者个人很了解克萨耶夫，并且在他生命的最后几年与他有过交往。克萨耶夫完成了弧的研究，并且发表了专著^[3]，他许多年都在研究弧的阴极过程，总是在考虑这个问题，而当我们见面时也是讨论这个问题。他对许多问题没有得到完整的答案，在这一点上他运气不好，但是他是一位学者，总是希望找出各种现象的实质本身，他对我们发现的电子爆炸发射现象表现出极大的兴趣，认为这个现象将帮助揭示出弧阴极斑的机制。根据我们的想法，艾可顿也就是克萨耶夫没能完全理解真空弧问题的那个现象。在本专著中，我们将多次利用克萨耶夫的研究结果。考虑到他的书^[3]是三十多年前发表的，并且也没有翻译成英文，它早已成为罕见的图书珍品，我们将在本书中详细地分析他的研究结果。

必须指出,关于真空弧阴极斑中金属爆炸的思想,早些时候不只一次地有人讲过,关于这一点,下面还要讲到。这里只指出几篇文章,例如,为了说明阴极蒸气流具有很大的飞散速度(10^6cm/s),坦伯格(Tanberg R.)1930年曾经确定,阴极必须加热到 10^5K 。阴极温度的直接测量表明,这个温度不高于 3000K 。因此,他发现,这样高的金属过热在导体爆炸时可以得到。为了说明阴极质量丢失,涅克拉谢维奇(Некрашевич)和巴库托(Бакуто)1959年提出假设,阴极金属的上层发生了爆炸。对此,伊林(Ильин)和列别杰夫(Лебедев)1962年进行了更细致的研究,他们用阴极斑金属的焦耳加热解释了阴极质量的丢失。比较阴极斑和导体爆炸产生的等离子体性质,罗特斯坦(Ротштейн)1964年得出结论,阴极斑可以看作是金属爆炸。但是他没有指出,这个爆炸由什么引起。对理解真空放电阴极过程物理做出贡献的还有戴克(Dyke)及其同事,他们在20世纪50年代—60年代发表了一系列关于场致电子发射的工作。他们的工作表明,在场致电子电流密度很大的情况下尖锋阴极遭到破坏,结果就产生了真空弧,并且认为,尖锋的破坏是由于它熔化的结果。在早期工作中,最有意义的是伏尔谢伊(Г. Фурсей)1967年提出的思想,他假设在真空弧阴极斑中,由于场致电子发射电流而使阴极表面尖锋发生爆炸,而弧的自持则是由于等离子体—阴极接触处电场使尖锋的电流密度增大造成的结果。

然而,真正的突破是本书作者及其同事1966年发现的电子爆炸发射现象,这就使得最终可以理解包括击穿、火花和弧在内的真空放电的机制。在推进电子爆炸发射思想和它在真空放电作用中具有重要意义的,是本书作者在第三届电气绝缘和真空放电国际研讨会(IIIth ISDEIV,巴黎,1968年)和第十届电离气体现象国际会议(Xth ICDIG,牛津,1971年)上所作的特邀述评报告。实际上,在以后每两年一次的所有ISDEIV会议和几次ICDIG会议上,作者和他的研究组都作了关于这一领域研究进展的报告和通报,而最后的报告是在第十八届ISDEIV会议(艾德霍温,1998年)和第二十四届ICDIG会议(华沙,1999年)上作的报告。因此,这里介绍的理论,多年来与真空放电领域的国际学者们进行过有益讨论。此外,作者还经常了解这一领域其他学者的最新成果。尽管如此,作者应当承认,他关于真空放电阴极过程具有艾可顿性质的思想,还没有被普遍承认,虽然也还有许多志同道合者。我们希望,本书发表后,志同道合的人数将会增加。

为了证明真空放电艾可顿模型的正确,本书作者充分利用了达尔德(Daalder J.)^[4]、尤特纳(Jüttner B.)及其同事^[5,6]以及伏尔谢伊等的三组研究结果。在第一组关于弧的工作中,需要特别指出的是蚀坑直径的测量、离子融蚀与电流无关的证明、许多金属融蚀的测量、电流密度的测量等等。在尤特纳研究组关于火花和弧的工作中,特别有兴趣的是对弧阴极斑运动的研究、近阴极等离子体参数的测量、阴极上蚀坑亚结构的研究、阴极斑单元的电子光学直接观测等,这组工作的缺点之一是它们都是在比较大电流(约 100A)的条件下完成的,这减少了它们给出的信息,因为在这种情况下阴极斑中同时存在许多单元,所以很难研究其中一个单元的行为。在第三组伏尔谢伊等人的工作中,爆炸前场致发射电流密度的测量、阴极温度对这个发射的影响、弧过程由于等离子体与阴极相互作用而自持的思想等都是非常有意义的。

应当指出,真空放电的艾可顿模型,很自然地解释了留比莫夫(Любимов Г.)和拉霍夫斯基(Раховский В.)^[8]观测到的两种类型弧阴极斑。第一种类型阴极斑,由于等离子体与阴极表面相互作用引起阴极的微爆炸而形成,而第二种类型阴极斑——这是等离子体与液态金属流相互作用,从而引起后者发生爆炸的结果。请注意不久前出版的书^[9],那里足够完整地描

述了真空放电及其应用的最新成果。

作者感谢俄罗斯科学院西伯利亚分院强流电子学研究所和乌拉尔分院电物理研究所的同事们,正是同他们一起得到了本书叙述的实验结果。

最后,作者真诚地感谢 С. А. 巴连格尔茨讨论本书的一些章节,以及 И. В. 魏曼诺夫、И. В. 卡明涅茨卡娅和 Е. Ю. 魏曼诺娃在书稿整理和出版准备中给予的大量帮助。

参 考 文 献

- [1] Vacuum arcs, theory and application / Ed. By J. M. Lafferty. New York: Wiley, 1980.
- [2] Mesyats G. A., Proskurovsky D. I. Pulsed electrical discharge in vacuum. Berlin; Springer, 1989.
- [3] Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968.
- [4] Daalder J. E. Cathode erosion of metal vapour arcs in vacuum; Thesis Tech. Univ. Eindhoven, 1978.
- [5] Jüttner B., Katodenprozesse elektrischer Entladungen im Vakuum; Dissertation. ZIE. Berlin, 1982.
- [6] Jüttner B., Puchkarev V. F. Cathode spots. Phenomenology // Handbook of vacuum arc: Science and technology / Ed. By R. L. Boxman, P. J. Martin, D. M. Sanders. Park Ridge; Noyes Publications, 1995. P. 73 – 151.
- [7] Фурсей Г. И. Исследование автоэлектронной эмиссии в экстремально сильных электрических полях и условиях перехода к вакуумной дуге: Дис. ... д - ра физ. - мат. наук. Новосибирск, 1973.
- [8] Любимов Г. А., Раховский В. И. Катодное пятно вакуумной дуги // УФН. 1978. Т. 125. С. 665 – 705.
- [9] Handbook of vacuum arc: Science and technology / Ed. By R. L. Boxman, P. J. Martin, D. M. Sanders. Park Ridge; Noyes Publications, 1995.

第一部分

真空击穿

第一章 电极表面

1.1 概 述

根据已有的概念,为了达到最大可能的真空绝缘电气强度,电极表面应当是纯净和光滑的。然而要做到这一点很难,因为电极表面状态依赖许多因素。已经确定,这个状态决定于电极制造阶段的加工方法、电极调整方法、真空间隙实际工作条件等。在此基础上,电极表面达到完全确定的状态,即它自身具有确定的微观结构和化学组成。下面将讨论微观非均匀性的基本类型(图 1.1)。

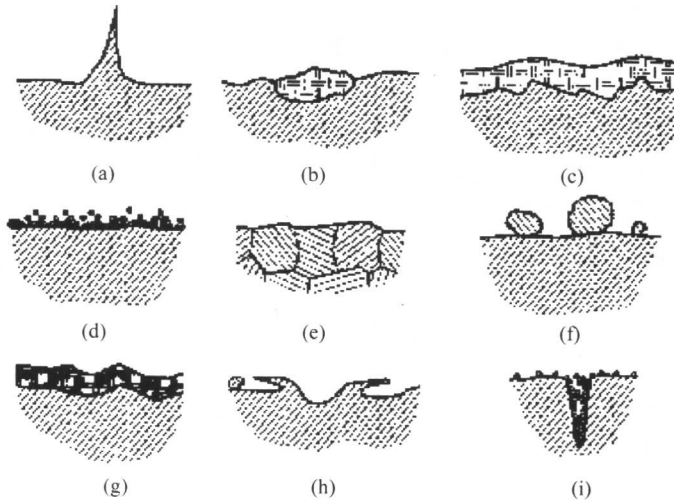


图 1.1 产生真空击穿的发射中心类型

- (a) 微凸起; (b) 电介质附加物; (c) 氧化物和其他无机电介质膜; (d) 吸附气体层; (e) 颗粒间边界表面;
(f) 微粒子; (g) 油蒸气裂解产物; (h) 在射程终点形成的团簇边界; (i) 蒸气和裂纹。

微尖锋通常在机械加工后,或者在阴极上爆炸发射中心作用下,以及在加速微粒撞击阴极时产生。电极表面上的电介质附加物,在电极研磨处理过程中出现,或者它们就是裸露的外来

杂质,因为这些杂质在技术纯度高的大块金属材料中通常都存在。氧化膜是天然的氧化物,电极表面在空气中处理后很快就出现吸附气体(水、真空油)和蒸气层,它们由于范德华力而维持在电极表面上。还存在化学非均质表面,这与在电极材料边界区域颗粒间积累的杂质有关。在电极表面进行机械预加工过程中,可能产生微裂纹,这些微裂纹里充满气体和蒸气,这也是电极表面的一种非均匀性。电极表面,尤其在放电后,有大量的微粒子和微凸起产生,它们既是爆炸中心(阴极斑)作用的结果,又是熔化的阳极金属向阴极迁移的结果。也有其他种类的微粒子(包括电介质微粒子),其中有它们在空气中遗留在电极表面的微粒子。如果电极表面被真空油蒸气覆盖,则在放电时,由于油的分解而在电极表面形成化学上和机械上都稳定的含碳膜,并且都含有电极材料的蒸气夹杂物。

总之,电极表面结构的特点使之可能成为潜在的发射中心。因此,对这些特点进行综合归纳后可以看出,电极表面具有几何的微观不均匀性(尖锋、金属粒子、团簇、槽、裂纹)和电物理的微观不均匀性(金属电介质接触、金属半导体接触、电介质膜等),后者与外来附加物有关。

1.2 阴极微凸起的场致发射

场致发射(АЭЭ)在真空击穿中起很重要的作用。因此,在叙述问题本身和有关的现象之前,将简要地介绍一下场致发射的本质及其基本规律 $j = f(E)$, 即电流密度依赖电场的关系^[1-3]。

场致发射是电子强电场中穿过金属-真空边界位垒的隧道效应。场致发射存在的定性依据是由量子力学的不确定原理 $\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$ 得出的,这里 \hbar 为普朗克常数。

我们认为,当动量瞬时不确定性 Δp 对应位垒高度 ϕ , 即有 $\Delta p \approx (2m\phi)^{1/2}$, 而位置不确定性等于位垒宽度 $\Delta x = \phi/Ee$ 时,将可能发生电子沿着隧道穿过位垒,这里 E 为外电场强度, e 为电子电荷, m 为电子质量。那么由海森堡关系式可知,产生场致发射所需的电场强度大小为 $E = (2m\phi^3)^{1/2} / \hbar e$ ^[3]。对于纯钨 $\phi = 4.5\text{eV}$, 因此 $E \approx 5 \times 10^7 \text{V/cm}$ 。

为了产生在电压相对不高条件下隧道效应所需的电场强度,场致电子阴极制成尖锋状,其顶端半径为 $0.1\mu\text{m} \sim 0.5\mu\text{m}$, 这样可以得到很高的电流密度。场致电子发射现象的理论根证,是在量子力学隧道效应发现以后,由福勒和诺尔根莫在 1928 年—1929 年间给出的(福勒和诺尔根莫理论)。场致电子发射的基本关系式,是将它的电流密度 j 与金属表面电场强度^① E 联系起来:

$$j = 1.55 \times 10^{-6} \frac{E^2}{t^2(y)\phi} \exp\left[-\frac{6.85 \times 10^7 \phi^{3/2}}{E} \theta(y)\right] \quad (1.1)$$

式中: ϕ 为金属的逸出功(eV); j 为场致电子电流密度(A/cm^2); E 为电场强度(V/cm); $t(y)$ 和 $\theta(y)$ 均为量 $y = 3.62 \times 10^{-4} E^{1/2} \phi^{-1}$ 的函数。实际计算中取 $t^2(y) \approx 1.1$, $\theta(y) \approx 0.95 - 1.03y^2$ ^[2]。考虑上述这些,式(1.1)取如下形式^[2]:

$$j = 1.4 \times 10^{-6} \left(\frac{E}{\phi}\right)^2 \times 10^{4.39(\phi^{-1/2})} \times 10^{-2.82 \times 10^7 (\phi^{3/2}/E)} \quad (1.2)$$

由式(1.2)得出,在电流密度相对不高($j < 10^8 \text{A/cm}^2$)的情况下,给定的发射体关系式即 $\lg j /$

① 原文为电流强度,似有误——译者注。

$E^2 = f(1/E)$ 将有直线形式,如图 1.2^[1]所示。然而,在电流密度更高的情况下,函数 $j(E)$ 实际上与逸出功 ϕ 无关,之所以这样的原因之一是发射体附近电子体积电荷的影响,因为它限制了电流密度^[4]。

在电子的空间电荷开始造成影响的条件下,关系式 $j(E)$ 由柴尔德 - 朗缪尔定律决定,并具有如下形式:

$$j = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} E^{3/2} \gamma_E r_s^{-1/2} \quad (1.3)$$

式中: γ_E 为由发射体形状和尺寸决定的系数,其值约为 1; r_s 为发射体表面半径; ϵ_0 为介电常数。关系式(1.3)表示在图 1.2 上(曲线 5)。

电极表面的状态及其对真空击穿的影响问题,已经讨论过许多次。关于这方面的情况,可以在专著[5,6]中找到。在本节和随后的两节中,将简要地讨论这个问题。正如前面指出的那样,有四个因素对真空放电构成了主要影响:不平整度和微观凸起,电极表面自由状态的微粒子、电介质膜、半导体膜,阴极上的附加物,以及吸附气体。

在对电极表面进行机械加工时,会发生金属结晶结构颗粒的破坏,并形成非晶层。如果电极经过电解抛光,将去掉上面的非晶层并显露出金属的结晶结构。在电解抛光时,首先溶掉了凸起部分,因此能够得到光滑的表面。例如,在电解抛光后的铝单晶上,可以得到不平整度尺寸平均约为 1000nm ^[7]。尽管如此,电解抛光也不能保证完全消除尖锋小于微米级的凸起^[8,9]。

长时间的电压作用,使表面微起伏发生很大的畸变。在这种情况下,依赖于金属种类、表面沾污及其温度和电场强度,可能会发生这样一些过程,如表面扩散、电场的重新分布、场的吸附、蒸发、沾污的迁徙等。此外,不同作者观测到了杂乱的微堆积和微凸起的增加,以及尖锋的拉长等。详细讨论这些过程已经超出本书的范围,因此这里将只讨论其中的某些过程。

金属表面在线状结晶出现时产生特别大的不均匀性,线状晶体的高度与半径的比值可以超过 1000。当电极上沉积过饱和蒸气时,在电极表面可以形成常常称为“胡须”(whiskers)这样的晶体。在金属加热或冷却时,可以在其表面上观测到微起伏的很大变化。当加热时,金属表面能量由于转到表面张力小的结晶面上而减小,还有蒸发和沉积、再晶化、相变等,它们都促使电极上产生微不平整度。预先加热的金属样品的快速冷却,将导致电极表面上出现复杂的针状花纹凸起。

不久前利用描述场致电子显微镜(CAЭМ)对针状阳极进行了研究^[10,11],电子显微镜为栅网式的。研究表明,甚至在表面存在不平整度的情况下,对预击穿电导率的主要贡献(>90%的发射中心数)来自“另类”的沾污,尤其是非金属的附加物和尘埃粒子,而它们在电极表面上实际上总是存在的。在材料特别纯的情况下,电极的主要沾污是机械加工时在其表面上生成的。参考文献[10]的作者在高纯度多晶铌的表面,借助电化学抛光,以及在特别纯净的水中连续多次的清洗,利用不加热办法实现了发射中心密度减少达到二个量级。全部清除机械加工带来的沾污,只能在表面层去掉很大厚度(几十微米)后才能达到。参考文献[11]

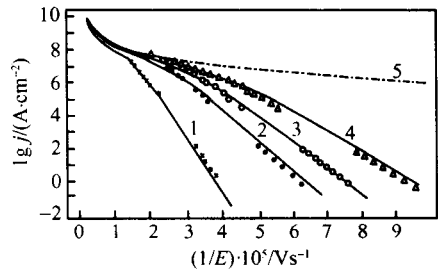


图 1.2 实验数据与考虑空间电荷的场致发射理论比较

金属逸出功 $j(E)$, eV: 1—4.50; 2—3.19; 3—2.80; 4—2.44; 5—柴尔德 - 朗缪尔曲线。

还证明,在铯电极情况下类似的清洁度,在温度 1400℃ 的超高真空条件下进行长时间的加热后才能达到。然而,甚至经过这样的处理,也不能排除其他粒子的出现,因为这些粒子是在抽真空时落到电极表面上的。

处在真空条件下阴极表面的微起伏,在电气放电过程中会发生很大的变化。由于热作用,放电电流将导致电极融蚀,同时伴有团簇和微凸起的形成,并以微滴形式抛向金属表面。

1.3 电介质的沾污和膜

微不平整度是金属粒子造成的。除此之外,阴极上还可能由电介质的附加物和膜。例如,当电极进行机械加工时,在高温作用下在电极表面上由于摩擦还可能形成研磨材料和碳化物的夹杂物。此外,在金属表面上还可能发生不同的化学反应,这将导致出现电介质膜形式的化合物。这些膜之一是金属氧化物。如果表面与氧化金属的气体接触,则将形成电介质氧化物。

在电极上,还可以有真空油和其他有机沾污的沉积物。众所周知,为了清洁表面,还采用离子轰击表面的方法。离子在与有机沾污分子作用时,可以形成高分子膜,取决于离子的种类,离子轰击可以导致表面氧化和半导体膜和其他化学化合物的形成。最后,阴极上的电介质膜也可由手接触电极表面形成。因此,为什么电极上可能会形成电介质的沾污和膜,存在许多原因。

电介质膜基本的重要特性,是它发生击穿时的电场强度 E_{mp} 。在图 1.3 上给出了在静态击穿情况下 E_{mp} 依赖 SiO、Al₂O₃ 和高分子材料膜厚度的关系^[12]。在所有这些情况下,这个电场强度 $E_{mp} > 10^6$ V/cm。在脉冲击穿情况下, E_{mp} 比在静态击穿时增大 10% ~ 40%^[12]。大部分研究薄电介质膜击穿机制的作者得出结论,这是由阴极凸起的场致发射引起的^[12]。

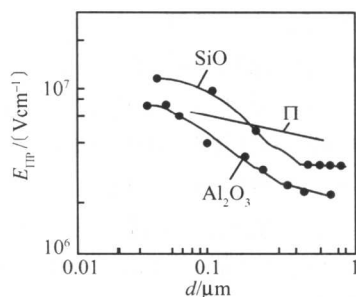


图 1.3: 不同膜的击穿电场强度与其厚度的依赖关系
Π—高分子膜; SiO—SiO 膜;
Al₂O₃—Al₂O₃ 膜。

1.4 吸附的气体原子和分子

表面吸附称为是固体表面吸收气体或液体蒸气的现象。从化学观点讲,这是吸附剂在自己表面具有未饱和价原子时发生的现象。这表明,在固体表面部分存在与被吸附粒子共有化学键。在发生吸附时,表面能量将减小。随着被吸附粒子数的增加,游离化学键的浓度将减小,并且足以使所有表面键饱和的粒子数,形成一个单层。通常当一个被吸附原子大约与 4 个表面原子耦合时,将实现这种情况,这对应被吸附原子的密度约为 10^{14} cm⁻²。

单层中被吸附粒子的键由化学力产生。因此,这种类型的吸附称为化学吸附。这里被吸附分子从表面上给出或者接收电子,并且可以蜕变成原子与表面分别耦合的自由基,这是氧、氮、氢和其他气体分子的特点。还可能在吸附层里的自由基间形成新的键。在化学吸附情况下,键能足够高,以至一个粒子有几个电子伏。

应当将吸附看作是这样的动态过程,即在此过程中,在平衡条件下单位时间由于热运动离

开表面的原子数,等于重新被表面吸附的原子数。同样在平衡条件下,在单位时间落到周围气体的单位表面上的分子数为 $nv/4$, 这里 n 为气体浓度, v 为平均分子速度。在室温和 1mm 汞柱压强条件下, $n \approx 3.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $v \approx 4.5 \times 10^4 \text{ cm/s}$ 。

如果取表面的粘合概率等于 0.5, 则吸附速率为 2.5×10^{20} 粒子/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。因此,在压强 10^{-6} mm 汞柱的情况下,单原子层近似在 1s 内形成。从前述可知,在气体的表面实际上至少总是由一层原子或分子覆盖着。被吸附在金属表面的气体,对金属逸出功有影响,它既可以降低也可以升高逸出功。

在固体表面上存在单层被吸附原子时,已经没有游离价键。因此,该层只是由于范德华极化力才可能形成。在这种情况下只讲物理吸附,因为气体和金属原子的价电子间不进行交换。在物理吸附情况下键能比在化学吸附时更低,约为每个原子几分之几电子伏。

微凸起、电介质膜和吸附物,以及被吸附气体,对真空放电的所有阶段都有很大的影响,它们在放电的第一阶段促使发生击穿,而在第二和第三阶段参加放电的自持过程,下面将分别说明,这将如何发生。

1.5 电极表面上的微粒子

在电极表面上常常伴有其他个别材料的粒子,其尺寸为几分之几微米或再大些。这些粒子的产生可能不同,但机制上它们与电极表面的关系并不太大,这是利用切削办法对电极表面初步加工时造成的,并且它们也是研磨粉的残留物和电真空器件制造时空气尘埃粒子的沉积结果等。它们是凝固的金属液滴,其直径从几分之几微米到几微米,在火花放电和弧放电时,它们由于电极的融蚀而形成,它们也可以在静电力作用下甚至在足够牢固的尖锋凸起与其表面拉断时产生。

不同尺寸和组成的粒子的存在,通常对真空电气绝缘有负面影响。处在电极表面上的粒子,可以从电极表面上被拉断,并向对面电极加速运动。在一定的条件下,这将引起真空击穿,关于这些,将在 4.2 节和 4.3 节中介绍。

1.6 微凸起的性能

引起真空击穿的主要原因之一,是阴极表面上存在微凸起,它们顶端上的电场,比平均电场要强许多倍,这将导致电场发射电流的增大。作为阴极表面的定量性能,引进了电场放大倍数 β_E 概念,它是凸起顶端电场强度的真值与其平均宏观值之比,即为 $E_{cp} = U/d$, 这里 U 为间隙电压, d 为电极间距离。

在简单几何形状凸起的情况下,得到了电场放大倍数 β_E 与非均匀度参数的关系^[13]。在实际 β_E 值区域内,可以采用 β_E 依赖 h/r 的简单近似关系式,这里 h 和 r 分别为微凸起的高度和半径。例如,对于椭圆形形状凸起,在 $\beta_E = 7 \sim 100$ 条件下有

$$\beta_E = \frac{ah}{r} + 1 \tag{1.4}$$

式中: $a = 1 \sim 0.4$ 。对于具有球形顶端的圆柱体凸起,在 $\beta_E = 10 \sim 1000$ 条件下有

$$\beta_E = \frac{h}{r} + 2 \tag{1.5}$$