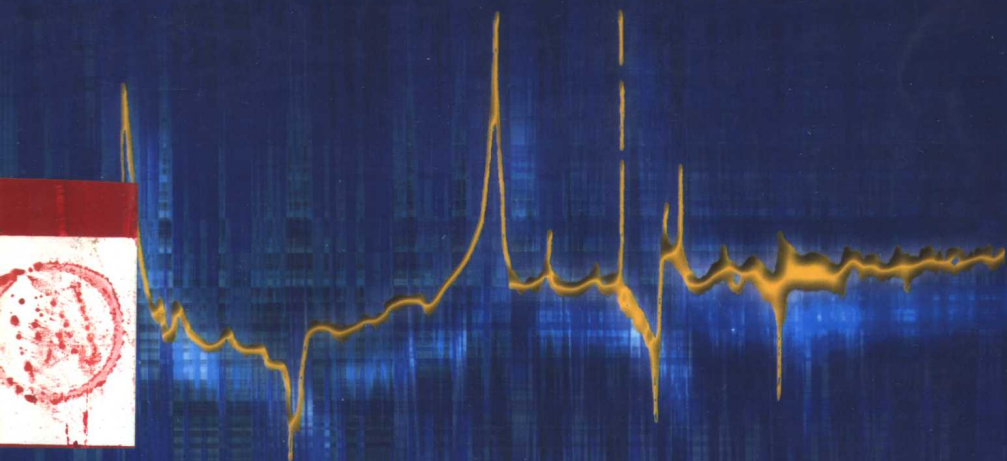


高压强脉冲放电及其应用

秦曾衍 左公宁 王永荣 著
吴 弘 孙广生 孙鹤鸿



北京工业大学出版社

高压强脉冲放电及其应用

秦曾衍 左公宁 王永荣 著
吴 弘 孙广生 孙鹤鸿

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高压强脉冲放电及其应用/秦曾衍等著. —北京: 北京工业大学出版社, 2000.12

ISBN 7-5639-0945-1

I. 高… II. 秦… III. 高压-压力脉冲-脉冲放电-研究 IV. 0461.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 58300 号

高压强脉冲放电及其应用

秦曾衍 左公宁 王永荣 著
吴 弘 孙广生 孙鹤鸿

*

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: (010) 67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

*

2000 年 12 月第 1 版 2000 年 12 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 32 开本 12.5 印张 309 千字

印数: 1~1000 册

ISBN 7-5639-0945-1/T·167

定价: 25.00 元

出 版 前 言

电工科学是一门有着上百年发展历史、理论基础比较完善的技术科学，对国民经济发展起着举足轻重的作用。跨入 20 世纪 90 年代，世界进入科学技术更加迅猛发展和科技成果更加快速转向生产实践的时代，电工科学和其他学科一样，也面临着汲取别的新兴学科成就促进自身创新和向其他学科渗透派生出新的交叉学科的任务。对于我国这样一个发展中的开放的大国来说，拓宽电工学科领域，增加电工学科活力，发展电工电能高新技术，使之更好地服务于提高国力的各项建设，更是不可忽视的课题。

30 多年来，我国电工界的科学技术人员为发展电机电能新技术进行了大量艰苦卓绝的研究工作，在电工新材料、新工艺、新能源、先进制造技术，以及环保、医学、生物中的高新电工技术等方面取得了一批批成果。由丁肇中教授主持的 α -磁谱仪中的大型永磁设备主要是

中国科学院电工研究所的研制成果，就充分地证实了这一点。

为了向国内外读者介绍近年来我国电工电能高新科学技术的发展情况和主要研究成果，为促进我国高新技术发展尽一份力量，1996年以来，我们特请中国科学院电工研究所研究员万遇良、沈国镠为学术顾问，朱尚廉、张瑚为选题策划，先后组织中国科学院电工研究所、中国科学院物理研究所、北京大学、东南大学等单位的资深研究人员，就超导电工新技术、磁流体发电、超导磁流体推进、太阳能发电、风力发电、宽离子束加工、电子束加工、永磁机构，以及高压强脉冲放电技术等撰写了一批学术专著，于1998年至2002年陆续出版。其中不乏“863”国家高技术研究发展计划主题项目，有的还是率先发表的著作。在选题和选题计划实施过程中得到了中国科学院院士、原中国科学院电工研究所所长严陆光和北京市新闻出版单位的指导与支持，在此谨致谢意。

北京工业大学出版社

2000年12月

作者简介



秦曾衍 1927 年出生于江苏淮安。中国科学院电工研究所副研究员，硕士生导师。1955 年毕业于南京工学院（现东南大学），同年开始在中国科学院电工研究所从事高电压技术研究。1989 年退休，退休前曾任电工研究所第三研究室副主任和中科电气高技术公司高压部经理。

长期从事电晕放电、雷电防护和陆地电火花震源的研究工作。获得“车载陆地电火花震源”、“高压放电基因轰击器”和“三极等离子触发开关”三项国家发明专利。陆地电火花震源获中国科学院科学技术进步奖三等奖。



左公宁 1937 年生。1959 年毕业于清华大学电机工程系。在中国科学院电工研究所从事高电压技术及“液电效应”方面的研究和产品生产工作达 40 年。高级工程师，曾任课题组长，多次参加全国性学术会议，公开发表学术论

文近 20 篇，如《电容器对非线性电阻放电的数学分析》、《陆地电火花震源的组合和垂直迭加效果》、《海洋电火花震源的电极结构》等。获得两项部级科技进步奖二等奖，两项部级科技进步奖三等奖。



王永荣 1939 年生于福建福州。中国科学院电工研究所高级工程师，硕士生导师。1963 年 1 年月毕业于清华大学电机系高电压技术专业。同年，分配在中国科学院电工研究所工作。长期从事液中放电及其效应的理论和应用研究，曾任课题组长。1989 年至 1993 年从事国家基金委重大课题“高压直流开断合成试验回路和电弧不稳定性的研究”。

目前主要从事液电效应的应用和有关脉冲放电及防雷方面的研究。曾获全国科学大会奖、中国科学院重大科技成果一等奖、中国科学院科学技术进步奖三等奖、安徽省重大科学技术研究成果和中国科学院重要成果等。



吴弘 1936 年 5 月生。山东青州人，生于浙江杭州。1965 年清华大学电机系高电压技术专业研究生毕业。同年，分配到中国科学院电工研究所从事高电压脉冲放电技术的应用研究工作。1993 年任三级高级工程师。1996 年退休。参加过电磁成形技术、鱼雷水电发射技术、海洋电火花震源、高压快脉冲放电技术和体外冲击波碎石机的研究与开发等工作。曾获得全国科技大会重大成果奖、中国科学院科研成果一等奖、中国科学院科

学技术进步奖三等奖、铁道部科技进步奖二等奖和江苏省科技进步奖三等奖。



孙广生 研究员。1944年5月出生。1967年毕业于清华大学,1981年于清华大学获工学硕士学位。曾任中国科学院电工研究所科技处处长,现任第一研究室(新能源与新型发电技术研究室)副主任和科技部磁悬浮办公室副主任,兼任北京电工技术学会理事。

长期从事高电压、新能源、永磁体等领域的科研工作,发表论文41篇。其中,《真空断路器多次重燃过电压》被中国电工技术学会评为优秀论文;“大储能爆炸丝模拟实验方法与装置研究”获中国科学院军工项目表彰奖;“高压直流开断合成实验回路和电弧不稳定性的研究”通过国家基金委组织的专家评审验收,并被评为中国科学院重要成果;“电磁脉冲干扰弹可行性研究”获中国人民解放军科技进步奖三等奖;研建的西藏双湖25 kW光伏电站,获中国科学院科学技术进步奖二等奖。作为电工所国际合作联系人,参加由丁肇中教授领导的探测反物质国际科研合作计划,参与领导阿尔法磁谱仪(AMS)永磁磁体的研制工作。该磁体于1998年6月搭乘美国“发现号”航天飞机成功升空并进行首次实验,成为人类第一个进入太空的大型磁体。此件探索宇宙成因的国际合作科学盛事被我国两院院士评为1998年世界十大科技进展新闻之一,获中国科学院科学技术进步奖一等奖。作为访问学者曾留学美国麻省理工学院(MIT)2年。

孙鹞鸿 1968年生。中国科学院电工研究所高级工程师。1989年毕业于华中理工大学自动控制工程系,获学士学位。同



年，开始在中国科学院电工研究所从事高电压脉冲放电技术和电力电子技术的应用研究及产品的开发生产工作。主要科研项目有高压放电基因枪的研制、石油地震勘探陆地电火花震源的研制、井下电脉冲仪的研制，以及50 kW中高频 X 线发生器的研制等。获得一项中国科学院重要成果奖及多项发明专利。

前 言

随着科学技术的发展，高压强脉冲放电技术迫切需要大功率脉冲电源，如强磁场、高能加速器、高超音速风洞、受控热核反应、强激光和强束流等都有这方面的需求。近四五十年来，高压强脉冲放电技术得到了迅速发展，贮能方法也多种多样。有电容器贮能、电磁贮能、机械贮能，还有磁流体发电机和超导压缩磁通发电机等。所贮能量在 10^6 J 以上，高的可达 10^9 J，放电速度从秒级到纳秒级。讲述这方面的专著已有很多。

早为人知的高压强脉冲放电可用于液电成形、矿藏勘探和与人民生活紧密相联的医疗领域。所需贮能等级在 10^6 J 以下，放电速度在毫秒至微秒级。这样范围的强脉冲放电技术在实验室内应该说是成熟的。但要走出实验室，适应生产和使用环境，就有很多问题。举例来说吧，要把十几吨重的高压装置，装在运载车上，不但要随时到处移动，还要能即时正常运行；又如井下震源，要求将高压装置装在内径只有

86 mm的管子里,还需要密封并在承受 5 000 m 静水压的作用下正常充放电等,类似的问题还有不少。而更主要的是对应用高压强脉冲放电的各种效应,如力效应、声效应等的研究还很不够。因此需要结合实际应用进行研究,并且随着应用对象的不同,侧重研究的性能也各异。以海洋震源和陆地震源来说,它们都是用产生的地震波进行物理勘探,但激发地震波的机理却完全不一样,一个用声效应,一个用力效应。

本书将把中国科学院电工研究所 30 多年来在完成各项应用项目的过程中对高压强脉冲放电装置和其效应特性的研究结果,介绍给读者,力争在阐明高压强脉冲放电机理的基础上对其在水中放电的力效应和声效应加以阐述,并尽可能地反映我国在这些应用方面的水平和产品情况。

本书的第一、二章由秦曾衍撰写,第三、七章由王永荣撰写,第四、五章和第一章第四节由左公宁撰写,第六章由吴弘撰写,第八章由孙鹤鸿撰写,第九章由孙广生撰写,第十章由吴弘、左公宁共同撰写。在本书撰写过程中还得到多位参加过高压强脉冲放电有关工作的专家的帮助,对此,笔者表示衷心感谢。希望本书的出版能对我国高压强脉冲放电的应用研究起到良好的促进作用,并期望能对从事高压脉冲放电应用研究的科技工作者、有关大专院校相关专业的师生、操作与使用有关产品的技术人员有所帮助。由于我们水平有限,书中错误和不妥之处一定不少,希望读者批评指正。

本书作者

2000 年 12 月

目 录



第一章 高压强脉冲放电的机理与技术	1
一、液中放电时的物理现象.....	1
二、海洋和陆地电火花震源激发声信号的差异.....	6
三、海水中不同电极型式的放电机理和特性 ^[2,3]	10
四、对非线性电阻放电的数学分析	16
五、三极点火开关和三极等离子触发开关 ^[8~10]	36
六、充电方法	43
七、脉冲电容器的保护	50
八、接地和安全问题	54
参考文献	58
第二章 液电成形	60
一、液中放电的压力	60
二、液电自由成形的规律性 ^①	68
三、液电成形膜片等工件的试验 ^[15]	88
四、我国第一台试验性液电成形机床.....	100
参考文献.....	111

第三章 海洋电火花震源	113
一、海洋电火花震源的地震勘探工作原理 ^[4,5]	114
二、海洋电火花震源放电特性和效率分析 ^[8~10]	134
三、海洋电火花震源声信号及声效率分析 ^[13~18]	149
四、海洋电火花震源的频率特性 ^[19~21]	169
五、海洋电火花震源的特点	180
参考文献	183
第四章 陆地电火花震源	186
一、应用范围及要求	187
二、陆地电火花震源	189
三、地面换能器	202
四、野外施工方法、特性分析及勘探效果	208
五、横波震源	230
参考文献	236
第五章 深井激发的电火花震源	238
一、静水压对放电效果的影响 ^①	239
二、井下电火花震源	244
三、传输式电火花震源	251
参考文献	263
第六章 体外冲击波碎石	264
一、冲击波的碎石原理 ^[7]	266
二、对冲击波的要求	270
三、定位系统	275
四、体外冲击波碎石机简介	278
五、冲击波在医疗领域的应用前景	287
参考文献	289
第七章 液电清砂和清垢	290
一、液电清砂	292

二、液电清垢·····	314
参考文献·····	325
第八章 高压放电基因枪·····	326
一、概述·····	326
二、基因枪的几种推进方式·····	327
三、脉冲放电特性决定高压放电基因枪的推进机构·····	330
四、射弹速度的测试与计算·····	335
五、JYQ型高压放电基因轰击器·····	340
六、高压放电基因枪的生物学实验·····	346
七、向治疗人类疾病的基因枪迈进·····	347
参考文献·····	350
第九章 大储能爆炸丝的模拟方法与装置·····	352
一、爆炸丝模拟方法的理论依据·····	352
二、爆炸丝模拟方法与装置研究的技术路线·····	356
三、大储能爆炸丝模拟试验放电现象的研究·····	357
四、爆炸室的研制·····	363
五、放电方式的研究·····	367
六、模拟试验·····	371
参考文献·····	374
第十章 高压强脉冲放电技术的发展前景·····	375
一、各种应用对高压强脉冲放电技术的要求·····	375
二、高压强脉冲放电技术的前景和其他应用·····	377

第一章 高压强脉冲放电 的机理与技术

一、液中放电时的物理现象

很早以前人们就注意到，液中放电具有破坏力。在实际工作中人们也发现，变压器和电容器中发生电击穿时，其外壳会被炸裂。后来尤特金（Л.А.Юткин）将这种现象称为“液电效应”并将它应用于冲压、破碎和铸件清砂等方面。现在水中放电已经得到广泛的应用，本书内容就说明了这个问题。但对水中放电时的物理现象，特别是对放电的水力特性研究得还不够，而这方面的知识对于实际应用是重要的。本书基本上是讲述中等放电能量的水中放电效应及其应用，对脉冲压力源的问题也作了一定的探讨。

1. 先导或流柱的说法

在高电压（10kV以上）作用下，水间隙的击穿过程就是先导产生和发展的过程，直到其中一个先导接通间隙。这个过程与气体击

穿相似。为了产生先导，电极表面电场强度必须超过每厘米几十千伏的“阈”值。可以采用尖端—板或尖端—尖端电极，形成极不均匀的电场，以获得必须的最大场强。在正尖端和负板的情况下，电子向尖端集聚产生电子雪崩，结果形成向电子雪崩的游离中心方向生长的先导。正尖端的先导的联合有刷状电晕形成，先导之一接通电极间隙，便完成了形成放电通道的过程。尖端场强主要决定于尖端曲率半径 r 和电压 u 。当曲率半径 r 比间隙距离 l 小很多时，曲率半径 r 的尖端电场强度可以按下列的近似公式求出：

$$\text{对于尖端—板电极 } E \approx 2u/r \ln 4l/r \quad (1-1)$$

$$\text{对于尖端—尖端电极 } E \approx u r \ln 2l/r \quad (1-2)$$

对于尖端—平板电极情况，场强要高些。

Наугольных К. А. 做了这样的试验^[1]：用直径 8 mm 的铜棒，外套真空橡皮管绝缘，尖端是 30°角锥体，尖端曲率半径为 0.5~4 mm，与水接触面积为 0.8~4 cm²，外加电压在 16~100 kV 范围，电容器容量在 0.01~10 μF 范围变化。采用正尖端、负板条件所得的最小但还能发生先导的电压，按公式(1-1)计算近似地等于 36 kV/cm。但试验者对于其他条件相应于发生先导的最小场强，认为是不知道的。因尖端电极附近各种因素引起场的失真，电极表面粗糙度在形成先导过程中起重要作用。粗糙使电极表面的个别点容易形成气泡，而气泡的击穿就是先导形成的发起者。对尖端高压电极的侧表面加以绝缘是必要的，但在绝缘介质表面附着有电荷，这些电荷造成电场变形，使得先导的形成不是在计算出的场强最大的电极尖端，而是在电极与绝缘的界面，从而导致绝缘的破坏。

尖端极性不一样时，尖端和板间的先导发展形式也不一样。在正尖端情况下，由个别游离中心向尖端冲去的电子雪崩，为先导继续生长选择路径；在负尖端情况下，电场把电子吹离尖端，尖端周围产生负体荷，降低负极区的场强，使先导的形成变得困

难了。而落在电极绝缘上的正表面电荷，能使尖端到绝缘表面的方向上产生大的电场梯度，并在这个方向形成先导。

先导形成后，其发展决定于先导头部的场强，当场强低于某一临界值时，雪崩形成的终止使先导的生长也停止。先导头部场强降低有两个原因：一是因先导本身长度上的电压下降；二是因电容器放电电极上的电压下降。因此电容器电压越高和电容器容量越大，先导越易于生长，生长的极限长度也越大。

2. 热力击穿

在低电压情况下，电极尖端的场强达不到形成先导的临界值。这时，水的电导对放电的发生产生重要影响。实际上，液体电导 κ 在很宽的范围内变化：从自来水的 $10^{-4}\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 到海水的 $10^{-2}\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。在这情况下，加在电极上的电压使液体介质中有传导电流流过，这一电流虽然不大，但它能使电极附近的水受到加热，并发生汽化。结果在电极间隙中形成汽体“小桥”，沿着这个小桥进一步形成放电通道，发展为间隙击穿，导致电容器储能向该放电通道释放。在热力击穿情况下，击穿延时较先导击穿长，可达几毫秒，这里说的击穿延时是指在放电电极加上电压的瞬间到形成击穿放电通道之间的时间。

热力击穿的特征除电压较低外，就是击穿间隙不长和击穿延时随着液体静压力的增长而迅速增大。而在先导击穿的情况下，击穿延时与液体静压力值(极限达 $1.0\times 10^5\text{ kPa}$)无关。

3. 击穿效应

通道击穿后电容器贮能向液中放电通道释放，放电电流达几十千安至几百千安，通道中形成电弧放电，温度可以高达 $10\times 10^3\text{ K}$ 。放电过程中通道的温度变化不大，在放电接近完了时温度下降。通道截面的增大和电弧放电电导率的某些增长，使

* 在电工学领域中，电导单位规定为 $\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，目前仍这样使用。