



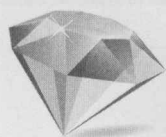
DIANLI SHEBEI
GANBING QINGXI JISHU

电力设备 干冰清洗技术

刘世念 周文俊 刘学武 等编著



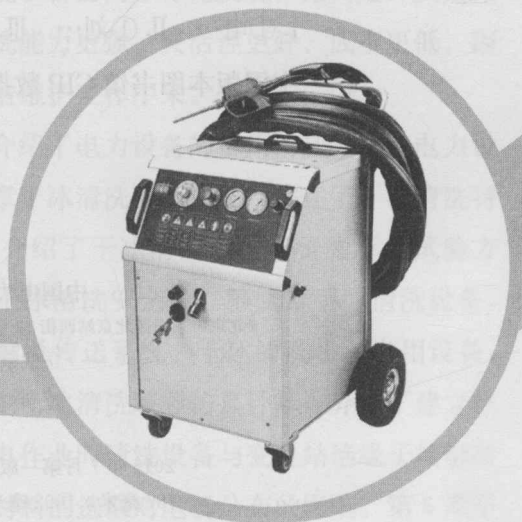
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



DIANLI SHEBEI
GANBING QINGXI JISHU

电力设备 干冰清洗技术

刘世念 周文俊 刘学武
苏 伟 魏增福 陈淑花 编著
范圣平 马存仁 李振柱



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书全面叙述了电力设备干冰清洗技术的特点,系统阐述了电力设备干冰清洗的专用设备参数和性能,全面分析了电力设备带电干冰清洗技术的安全性、可靠性和可操作性,详细介绍了变电站绝缘子及变压器绝缘套管的带电干冰清洗应用、配电网设备的干冰清洗应用。

全书分7章,主要内容包括电力设备清洗概论、干冰清洗原理、干冰清洗技术、干冰清洗设备、带电干冰清洗装置仿真计算、干冰清洗设备关键部件喷嘴模拟和干冰清洗技术应用。

本书主要供从事电力设备维运技术研究、电力设备清洗技术应用的相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电力设备干冰清洗技术/刘世念等编著. —北京:中国电力出版社, 2015.7

ISBN 978-7-5123-7691-5

I. ①电… II. ①刘… III. ①电力设备—清洗技术 IV. ①TM4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第093320号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015年7月第一版 2015年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9印张 219千字

印数0001—2000册 定价28.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

前言

随着电力工业的迅速发展和技术装备水平的提高,大容量、高参数、高效环保机组不断增多,电网容量和输电电压等级相应提高。同时,在雾、霜、露、毛毛雨等不利气象条件下,电力设备如变压器套管和绝缘子,在较低的电压作用下就可能发生污秽闪络,电力系统输变电设备外绝缘的污闪事故所造成的危害也日益严重。在污闪、湿闪、冰闪、雷闪、操作闪络等几种闪络中,对电力系统危害最大的是污闪。套管和绝缘子表面的积污是影响电气设备外绝缘的主要因素,若能及时清除套管和绝缘子表面的污秽,将在很大程度上降低污闪事故的发生次数。目前国内采用的清污方式基本上是传统的停电清扫,虽然比较安全,但随着电网输电容量和电压等级的提高,一次设备停电的机会越来越少。因此,电力设备带电除污技术对于防止污闪事故的发生、保障电网安全稳定运行有着重要的现实意义。

目前,国外干冰清洗技术已逐步完善,干冰清洗装备已向多样化发展,尤其是开发出微型、便携式小型清洗机械,以求清洗速度更快、清洗能力更强、灵活性更好、成本更低。因此,有必要将干冰清洗技术引入到电力设备带电清洁维护工作中来。

本书共7章。第1章电力设备清洗概论,简要介绍了电力设备的常用清洗方法、电力设备带电清洗基本知识及清洗的必要性和意义。第2章干冰清洗原理,系统阐述了干冰清洗特性、除污原理和参数特点。第3章干冰清洗技术,介绍了干冰清洗效果评价指标、试验方法,分析了清洗参数对干冰清洗效果的影响和带电干冰清洗安全性。第4章干冰清洗设备,详细介绍了干冰造粒系统、干冰喷射系统、空气压缩及传送系统、干冰清洗小型专用设备,重点介绍了新型带电干冰清洗专用设备。第5章带电干冰清洗装置仿真计算,介绍了建立三维仿真静电场有限元模型的过程,并详细探讨了带电作业时清洗设备与变电站绝缘子接触所导致的电气设备安全问题,给出了清洗设备各部分材料的选取对电场分布的影响。第6章干冰清洗设备关键部件喷嘴模拟,利用现有软件进行数值模拟,研究了方形和圆形喷嘴工作时内部及空气中气体流场的分布特性,给出了不同喷嘴的清洗效率。第7章干冰清洗技术应用,介绍了干冰清洗技术应用于变电站绝缘子和变压器套管的带电清洗方式,以及干冰清洗技术在配电网中的应用过程。

全书由广东电网有限责任公司电力科学研究院刘世念、苏伟、魏增福、范圣平、马存

仁；武汉大学周文俊、李振柱和大连理工大学刘学武、陈淑花编写。作者还参考了大量书籍、文献资料，在参考文献中大部分已经列出，对这些文献的作者表示感谢。

由于编著者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编著者

2015 年 5 月

目 录

前言

1 电力设备清洗概论	1
1.1 电力设备清洗方法	1
1.2 电力设备带电清洗	3
1.3 干冰清洗的必要性和意义	24
2 干冰清洗原理	26
2.1 干冰清洗概述	26
2.2 干冰清洗特性	26
2.3 干冰清洗除污原理	29
3 干冰清洗技术	33
3.1 清洗效果及清洗评价指标	33
3.2 清洗试验方法	35
3.3 清洗参数对干冰清洗效果的影响	38
3.4 带电干冰清洗安全性	50
4 干冰清洗设备	58
4.1 概述	58
4.2 干冰造粒系统	59
4.3 干冰喷射系统	62
4.4 空气压缩及传送系统	64
4.5 干冰清洗小型专用设备	66
4.6 新型带电干冰清洗专用设备	77
5 带电干冰清洗装置仿真计算	97
5.1 清洗装置仿真必要性	97
5.2 清洗装置仿真模型	97
5.3 电场分布计算	100

6 干冰清洗设备关键部件喷嘴模拟 103

6.1 喷嘴流场分析理论基础 103

6.2 喷嘴流场模拟过程 105

6.3 喷嘴气相流场模拟 107

6.4 喷嘴流场干冰颗粒运动模拟 115

7 干冰清洗技术应用 118

7.1 干冰清洗应用概述 118

7.2 变压器绝缘套管及绝缘子清洗 121

7.3 配电网设备的清洗 130

参考文献 137

电力设备清洗概论

1.1 电力设备清洗方法

1.1.1 电力设备概述

电力系统由电源（水电站、火电厂、核电站等发电厂）、变电站（升压变电站和负荷中心变电站等）、输电线路、配电线路和负荷中心等组成。其功能是将自然界的一次能源通过发电动力装置转化成电能，再经输电、变电和配电将电能供应到各用户。电力系统的主体结构有电源、电力网络和负荷中心。电源指各类发电厂、站，它将一次能源转换成电能。电力网络由电源的升压变电站、输电线路、负荷中心变电站、配电线路等构成，它的功能是将电源发出的电能升压到一定等级后输送到负荷中心变电站，再降压至一定等级后，经配电线路与用户相连^[1]。

电力设备主要包括发电设备、电气一次设备、电气二次设备、电力环保设备等。

发电设备主要是电站锅炉、蒸汽轮机、燃气轮机、水轮机、发电机、变压器等。火电厂发电中锅炉、汽轮机、发电机是火电厂中的主要设备，称为三大主机。与三大主机相辅工作的设备称为辅助设备或辅机。主机与辅机及其相连的管道、线路等称为系统。火电厂的主要系统有燃烧系统、汽水系统、发电系统等。汽水系统由锅炉、汽轮机、凝汽器、高低压加热器、凝结水泵和给水泵等组成，包括汽水循环、化学水处理和冷却系统等；燃烧系统由输煤、磨煤、粗细分离、排粉、给粉、锅炉、除尘、脱硫等组成；发电系统由副励磁机、励磁盘、主励磁机（备用励磁机）、发电机、变压器、高压断路器、升压站、配电装置等组成。

电气一次设备主要包括 110~500kV 变电站用变压器、高压并联电抗器、气体绝缘金属封闭开关设备（GIS、HGIS）、断路器、隔离开关（含接地开关）、电流互感器、电压互感器、变电站用电容器装置、低压并联电抗器、避雷器、支柱绝缘子等，共计 12 类设备。

电气二次设备是指对一次设备的工作进行监测、控制、调节、保护以及为运行、维护人员提供运行工况或生产指挥信号所需的低压电气设备，主要包括：仪表；控制和信号元件；继电保护装置；操作、信号电源回路；控制电缆及连接导线；发出音响的信号元件；接线端子排及熔断器等。

电力环保主要是指火电厂方面的环保，其设备主要包括脱硫脱硝、除灰除尘、污水处理、固废处理、垃圾发电等。

1.1.2 清洗技术

清洗的目的主要是：改善设备外观、净化和美化环境；维持正常生产，延长设备寿命；提高生产能力，改善产品质量；减少能源消耗，降低生产成本；减少生产事故，有利人体健

康。从作用原理上分,清洗技术一般包括化学清洗、物理清洗及生物清洗;清洗方法可分为物理清洗法、化学清洗法和生物清洗法^[2]。

1. 物理清洗法

物理清洗是指利用各种机械外力和能量,如力、热、声、光、电、射线等物理作用,使污垢粉碎、分解并剥离开物体表面,达到清洗有效果。物理清洗的发展经历了由人工捅刷到清管器(pipeline pig, PIG)清洗、射流清洗,再到多元化、集成化三个阶段。目前,常用的物理清洗方法有高压水射流清洗、PIG 管道清洗、激光清洗、超声波清洗、干冰清洗等。

(1) 高压水射流清洗。高压水射流清洗原理是用高压泵打出高压水,并使其经管子到达喷嘴再把高压低流速的水转换为低压高流速的射流,然后以其很高的冲击动能,连续不断地作用在被清洗表面,从而使垢物脱落,达到清洗目的。近年来,高压水射流清洗技术发展很快,在石油、化工、电力、冶金等工业部门中得到广泛的应用。它可以用于清洗容器,如高压釜、反应器、冷却塔、贮罐、槽车等;也可用于清洗各种设备、管道、煤气管线及换热器,其效率高、效果佳,容易满足清洗要求。

(2) PIG 管道清洗。PIG 管道清洗是依靠泵推动流体产生的推动力驱动 PIG 在管内向前推动,将堆积在管线内的污垢排出管外,从而达到清洗的目的。PIG 管道清洗技术是我国从欧美发达国家引进的一项先进的管道维护、清洗方法。在管道清洗方面,PIG 管道清洗具有清洗距离长、工期短、成本低、使用人工少、清洗效果好等优点。通过十几年来在管道清洗工程中的施工,从引进技术到消化吸收,国内已积累了丰富的施工管理经验,总结出一整套完善的管道清洗施工技术,装备了成套先进的检测、跟踪、定位仪器,现已把该项技术成功地应用于石油、化工、天然气、电力、市政等领域的多种管道清洗施工中。

(3) 激光清洗。激光清洗是一种新的清洗方法,它利用激光的方向性和高亮度,通过光剥离、光分解等原理清除材料表面的污染物,具有简单、方便、无二次污染等独特优点。它可以用于液体、固体和宇宙空间,适用范围广,尤其适用于用激光去除固体表面层。在飞机、船舶等金属表面除锈、除漆,建筑物表面清洁泥污,原子发电设施中管道内室放射性物质清除回收,微电子行业晶片表面清洗等方面的应用,具有极佳的优越性。可以预见,随着激光技术的发展和激光成本的下降,激光清洗技术应用会更加广泛。在国外,各种激光清洗机已经相继问世,且应用于很多领域,在国内,由于对环境保护和激光技术的认识不足,以及对一次性投入较高的担忧,激光清洗的工业应用还较少。

(4) 超声波清洗。把超过人耳朵能感觉到的声波频率以上的声波称为超声波。20 世纪 50 年代,超声波技术广泛应用于航空航天工业的发动机、液压及过滤系统的清洗,电力行业硅片、电路板、电器元件的清洗,核工业放射性设备及零件的清洗,超声波清洗已经成为各种工业领域必不可少的清洗方法。超声波清洗机由超声波发生器、电声换能器及清洗箱组成。超声波发生器是一个大功率的信号发生器,是产生电磁振荡信号、提供能量的工作部分;电声换能器的作用是将高频电源的电磁振荡信号能量转换成机械振动的能量而发生超声波;超声波清洗箱就是容纳清洗液及清洗对象的器件。

(5) 干冰清洗。干冰清洗技术是将液体二氧化碳通过干冰造粒机制成一定规格的干冰颗粒,并将其放到干冰箱中储存以作备用,当外接压缩空气通入干冰清洗机时,干冰颗粒随高速运动的气流经过喷嘴喷射到被清洗物表面,高速运动的干冰颗粒对污垢层有磨削、冲击作用。同时,吸热能力强的干冰颗粒喷射到被清洗物表面,使污垢层降温以致脆化,污垢层与

接触的材料产生不同的收缩效果,减小了污垢与材料表面的黏附力,这些综合作用使得污垢被去除。

2. 化学清洗法

化学清洗法是采用一种或几种化学药剂清除设备工艺侧或水侧表面污垢的方法。它借清洗剂对物体表面污染物或覆盖层进行化学转化、溶解、剥离以达到脱脂、除锈和去污的效果。为使基材在化学清洗中不受腐蚀或使腐蚀率控制在允许范围内,通常在化学清洗液中加入适量的缓蚀剂和起活化、渗透、润湿作用的添加剂。

化学清洗技术发展到现在,已经取得了很大的进步,成功地解决了生产实践中的很多实际问题,但化学清洗总体上呈衰减态势,为保护自然环境,化学清洗技术将向环保型、功能型、精细化、集成化方向发展。随着精细有机合成技术、生物技术、检测技术等相关技术的进步,化学清洗技术正在向绿色环保方向发展:将合成具有生物降解能力和酶催化作用的绿色环保型化学清洗剂;弱酸性或中性的有机化合物将取代强酸强碱;直链型有机化合物和植物提取物将取代芳香基化合物;无磷、无氟清洗剂将取代含磷含氟清洗剂;水基清洗剂将取代溶剂型和乳液型清洗剂;可生物降解的绿色环保型清洗剂将取代难分解的污染性清洗剂。

目前我国常用的酸性清洗剂有盐酸、硝酸、硫酸、氨基磺酸、磷酸、氢氟酸、甲酸、乙酸、次磷酸等。

常用的络合(螯合)清洗剂有EDTA钠(胺)盐、柠檬酸、羟基乙酸、乙二酸、苹果酸(羟基丁二酸)、次氨基三乙酸、丙烯酸-衣康酸共聚物等。

常用的碱性清洗剂有氢氧化钠、碳酸钠、磷酸钠、硅酸钠等。

常用的表面活性剂有脂肪醇聚氧乙烯醚、壬基酚聚氧乙烯醚、烷醇酰胺、琥珀酸二烷酯磺酸钠、石油磺酸钠等。

3. 生物清洗法

生物清洗法就是利用微生物将设备表面附着的油污等污物转化成为无毒无害的水溶性物质的过程。这类清洗剂可将污物如油类和有机物彻底分解,是一种真正意义上的绿色环保型清洗技术。生物清洗技术在国外已取得很大发展,并成功应用于许多领域,但在国内仍处于研发阶段。

❖ 1.2 电力设备带电清洗

电力设备带电清洗可在设备正常工作情况下,无需擦洗,快速彻底清除各种精密电子仪器及设备上的静电、油污、灰尘、纤维物质、盐分、金属尘埃等有害物质,并对设备有特殊保护作用,能够有效地提高精密电子仪器及设备的安全可靠性,确保精密电子仪器及设备处于最佳技术状态工作。

1.2.1 带电作业基本知识

带电作业是指采用专门制造的高绝缘性能及高强度的绝缘装置,能使作业人员在带电设备上进行安全可靠的工作;在不间断供电的情况下直接或间接在有电设备上进行测试、维修、更换部件及处理缺陷等工作。

在带电作业中电对人体的作用方式有两种:一种是不论电压高低直接接触了有电位差带电体时发生的;另一种是在人体临近带电体,但尚未接触高压带电体时发生的。前者是由电

路中的电压和电流引起的；后者是由空间电场对人体的静电感应引起的。

带电作业的三个技术条件是：

- (1) 流经人体的电流不超过人体的感知水平 1mA；
- (2) 人体体表局部场强不超过人体的感知水平 2.4kV/cm；
- (3) 人体与带电体（或接地体）保持规定的安全距离。

只要满足以上三个技术条件，则带电作业不仅能保证人身不致受到触电伤害的危险，而且能保证带电作业人员没有任何不舒服的感觉^[3]。

1. 带电作业分类

带电作业按人体的电位分类，可分成零（地）电位法、中间电位法、等（或称同）电位法。

零（地）电位法，是指人体处于地（零）电位上使用绝缘工具间接接触设备的作业方法。作业方式可表示为接地体→人体→绝缘体→带电体。

等电位法，是指采用绝缘工具使人体与接地体隔离，人体直接接触带电设备的作业方法。作业方式可表示为接地体→绝缘体→人体→带电体。

中间电位法，是指采用绝缘工具使人体与接地体隔离，而又与带电体保持一定距离的情况下，用绝缘工具对带电体进行作业的方法，作业人员所处的电位低于带电体而高于地电位。作业方式可表示为接地体→绝缘体→人体→绝缘体→带电体。

2. 带电作业气象条件

带电作业的气象条件主要考虑风、雨、雪、雾、雷、温度和湿度等。带电作业应在良好天气下进行，如遇雷电（听见雷声、看见闪电）、雪、雨、雾等，不应进行带电作业；风力大于 5 级或湿度大于 80% 时，不宜进行带电作业。

如带电水冲洗一般应在良好天气下进行，即风力不大于 4 级、气温不低于 0℃ 时进行，雨、雪、雾及雷雨天气不宜进行。

3. 带电作业基本要求

(1) 参加带电作业的人员，应经专门培训，并经考试合格取得资格、单位书面批准后，方能参加相应的作业。带电作业工作票签发人和工作负责人、专责监护人应由具有带电作业实践经验的人员担任。

(2) 带电作业应设专责监护人。监护人不得直接操作，监护范围不得超过一个作业点，复杂或高杆塔作业时应增设（塔上）监护人。

(3) 带电作业工作票签发人或工作负责人认为有必要时，应组织有经验的人员到现场勘察，根据勘察结果作出能否进行带电作业的判断，并确定作业方法和所需工具以及应采取的措施。

(4) 带电作业工作负责人在带电作业工作开始前，应与值班调度员联系。

(5) 在带电作业过程中如设备突然停电，作业人员应视设备仍然带电。值班调度员未与工作负责人取得联系前不得强送电。

4. 带电作业安全距离

防止过电压伤害的根本手段就是不同电位的物体（包括人体）之间保持必要的距离，称为安全距离。安全距离是指为了保证人身安全，作业人员与带电体之间所保持各种最小空气间隔距离的总称。具体地说，安全距离包括 5 种间隔距离：最小安全距离、最小对地安全

距离、最小相间安全距离、最小安全作业距离和最小组合间隔。在规定的安全间距下，带电作业中即使产生了最高过电压，该间隙可能发生击穿的概率也总是低于预先规定的可接受值。安全距离的确定，应根据系统所能出现的最大内过电压幅值和最大外过电压幅值求出其相应的危险距离，取其中最大的数再增加 20% 的安全尺度来确定。

带电作业安全距离的确定属于绝缘配合的计算方法。绝缘配合就是按设备所在系统可能出现的各种过电压和设备耐压强度来选择设备的绝缘水平，以便把作用于设备上引起损坏或影响连续运行的可能性，降低到经济上和运行上能接受的水平。

(1) 各电压等级系统安全距离。表 1-1 列举出常见电压等级带电作业的安全距离，各电压等级下的详细规定参见 GB 26860—2011《电力安全工作规程 发电厂和变电站电气部分》。

表 1-1 常见电压等级带电作业的安全距离

电压等级 (kV)		10	35	66	110	220	330	500
人体对带电体最小安全距离 (m)		0.4	0.6	0.7	1.0	1.8	2.6	3.2*
等电位作业时人体对地安全距离 (m)		0.4	0.6	0.7	1.0	1.8	2.6	3.2*
最小相间安全距离 (m)		0.6	0.8	0.9	1.4	2.5	3.5	5.0
最小组合间隔 (m)		—	0.7	0.8	1.2	2.1	3.1	4.0
最短绝缘有效长度 (m)	操作杆	0.7	0.9	1.0	1.3	2.1	3.1	4.0
	承力杆、绝缘绳	0.4	0.6	0.7	1.0	1.8	2.8	3.7

* 海拔在 500m 以下，取 3.2m 值；海拔在 500~1000m 时，取 3.4m 值。

(2) 绝缘工具最小有效绝缘长度。绝缘操作杆、绝缘承力工具和绝缘绳索的有效绝缘长度不得小于表 1-2 的规定。

5. 感应电压的防护

(1) 在 330kV 和 ±400kV 及以上电压等级的线路杆塔上及变电站构架上作业，应采取防静电感应措施，例如穿静电感应防护服、导电鞋等（在 220kV 线路杆塔上作业时宜穿导电鞋）。

(2) 绝缘架空地线应视为带电体。在绝缘架空地线附近作业时，作业人员与绝缘架空地线之间的距离不应小于 0.4m。如需在绝缘架空地线上作业，应用接地线将其可靠接地或采用等电位方式进行。

(3) 用绝缘绳索传递大件金属物品（包括工具、材料等）时，杆塔或地面上作业人员应将金属物品接地后再接触，以防电击。

表 1-2 绝缘工具最小有效绝缘长度

绝缘工具类型	电压等级 (kV)	最小有效绝缘长度 (m)
绝缘操作杆	10	0.7
	35	0.9
	66	1.0
	110	1.3
	220	2.1
	330	3.1
	500	4.0
	1000	—
	750	—
	±500	3.5
	±660	—
	±800	—
绝缘承力工具、绝缘绳索	10	0.4
	35	0.6
	66	0.7
	110	1.0
	220	1.8
	330	2.8
	500	3.7
	1000	5.3
	750	6.8
	±500	3.2
	±660	5.3
	±800	6.6

注 500kV 紧凑型线路相地最大操作过电压倍数在 1.80 及以下时为 3.2m，过电压倍数在 1.80 以上时为 3.4m。

6. 带电作业工具的保管、使用和试验

(1) 带电作业工具的保管。

1) 带电作业工具应存放于符合 DL/T 974 《带电作业用工具库房》条件的带电作业工具房内。

2) 带电作业工具房进行室内通风时，应在干燥的天气下进行，并且室外的相对湿度不得高于 75%。通风结束后，应立即检查室内的相对湿度，并加以调控。

3) 有缺陷的带电作业工具应及时修复，不合格的应予以报废，禁止继续使用。

4) 高架绝缘斗臂车应存放在干燥通风的车库内，其绝缘部分应有防潮措施。

(2) 带电作业工具的使用。

1) 带电作业工具应绝缘良好、连接牢固、转动灵活，并按厂家使用说明书、现场操作规程正确使用。

2) 带电作业工具使用前应根据工作负荷校核机械强度，并满足规定的安全系数。

3) 带电作业工具在运输过程中，带电绝缘工具应装在专用工具袋、工具箱或专用工具车内，以防受潮和损伤。发现绝缘工具受潮或表面损伤、脏污时，应及时处理并经试验或检测合格后方可使用。

4) 进入作业现场应将使用的带电作业工具放置在防潮的帆布或绝缘垫上，防止绝缘工具在使用中脏污和受潮。

5) 带电作业工具使用前，仔细检查确认没有损坏、受潮、变形、失灵，否则禁止使用。并使用 2500V 及以上绝缘电阻表或绝缘检测仪进行分段绝缘检测（电极宽 2cm，极间宽 2cm），阻值应不低于 700MΩ。操作绝缘工具时应戴清洁、干燥的手套。

(3) 带电作业工具的试验。

1) 带电作业工具应定期进行电气试验及机械试验，其试验周期为：

a) 电气试验：绝缘工具预防性试验每年一次，检查性试验每年一次，两次试验间隔半年；防护用具预防性试验每半年一次；

b) 机械试验：绝缘工具每两年一次，承力工具每年一次。

2) 绝缘工具试验项目和标准见表 1-3。

表 1-3 绝缘工具试验项目和标准

额定电压（kV）	试验长度（m）	试验类型	1min 工频 耐压（kV）	3min 工频 耐压（kV）	15 次操作冲击 耐压（kV）
35	0.6	预防性试验	95	—	—
66	0.7	出厂及型式试验	175	—	—
		预防性试验	175	—	—
110	1.0	出厂及型式试验	250	—	—
		预防性试验	220	—	—
220	1.8	出厂及型式试验	450	—	—
		预防性试验	440	—	—
330	2.8	出厂及型式试验	—	420	900
		预防性试验	—	380	800
500	3.7	出厂及型式试验	—	640	1175
		预防性试验	—	580	1050

续表

额定电压 (kV)	试验长度 (m)	试验类型	1min 工频 耐压 (kV)	3min 工频 耐压 (kV)	15 次操作冲击 耐压 (kV)
750	4.7	出厂及型式试验	—	860	1430
		预防性试验	—	780	1300
1000	6.3	出厂及型式试验	—	1270	1865
		预防性试验	—	1150	1695
±500	3.2	出厂及型式试验	—	625	1070
		预防性试验	—	565	970
±660	4.8	出厂及型式试验	—	820	1480
		预防性试验	—	745	1345
±800	6.6	出厂及型式试验	—	985	1685
		预防性试验	—	895	1530

注 ±500、±660、±800kV 预防性试验采用 3min 直流耐压。

操作冲击耐压试验宜采用 250/2500 μ s 的标准波，以无一次击穿、闪络为合格；工频耐压试验以无击穿、闪络及过热为合格。

高压电极应使用直径不小于 30mm 的金属管，被试品应垂直悬挂，接地极的对地距离为 1.0~1.2m。

接地极及接高压的电极（无金具时）处，以 50mm 宽金属铂缠绕。试品间距不小于 500mm，单导线两侧均压球直径不小于 200mm，均压球距试品不小于 1.5m。

试品应整根进行试验，不得分段。

3) 绝缘工具的检查性试验条件是：将绝缘工具分成若干段进行工频耐压试验，每 300mm 耐压 75kV，时间为 1min，以无击穿、闪络及过热为合格。

4) 带电作业高架绝缘斗臂车电气试验标准见相关标准。

5) 屏蔽服上衣、裤子、手套、袜子任意两端点之间的电阻值均不得大于 15 Ω ；整套屏蔽服任意两端点之间的电阻值均不得大于 20 Ω 。

6) 带电作业工具的机械试验标准包括：

a) 在工作负荷状态承担各类线夹和连接金具荷重时，应按有关金具标准进行试验；

b) 在工作负荷状态承担其他静荷重时，应根据设计荷载，按 DL/T 875《输电线路施工机具设计、试验基本要求》的规定进行试验；

c) 在工作负荷状态承担人员操作荷载时：①静荷重试验：2.5 倍允许工作负荷下持续 5min，工具无变形及损伤者为合格；②动荷重试验：1.5 倍允许工作负荷下实际操作 3 次，工具灵活、轻便、无卡住现象为合格。

1.2.2 污闪机理

污秽闪络，是指外绝缘表面受到固体的、液体的和气体的导电物质的污染，在受到雾、露、毛毛雨等湿润作用后，污层电导增大、泄漏电流增加产生局部电弧，在运行电压下绝缘子表面的局部电弧发展成为电弧闪络。这种闪络的发生不是由于作用电压的升高，而是因为绝缘子表面绝缘能力的降低所致^[4]。

按所选的系统绝缘水平和空气间隙碰撞游离的放电机理，在运行电压下绝缘子不可能发生闪络事故。但在实际运行中的绝缘子串却一再发生污闪，说明污闪有不同于空气间隙击穿

的机理。到目前为止，有关绝缘子表面染污放电机理较为一致的认识是：沿绝缘子湿润污秽表面的闪络现象已不是一种单纯的空气间隙击穿，而是一种与电、热、化学等因素有关的污秽表面气体电离及局部电弧发生、发展的热动力平衡过程。

绝缘子的污闪过程一般受绝缘子表面特性的影响，现有绝缘子的表面状况有憎水性和亲水性两种。瓷和玻璃绝缘子表面一般为亲水性；复合绝缘子，特别是硅橡胶复合绝缘子表面一般为憎水性。在受潮条件（如雨、薄雾等）下，亲水性表面将完全湿润而形成水膜覆盖在绝缘子上；相比之下，同样的受潮条件，憎水性表面上形成的是多个水珠。干冰清洗主要针对亲水性绝缘子表面的污秽。

绝缘子表面的污秽放电是一个涉及电、热和化学的错综复杂的变化过程，宏观上亲水性表面发生污闪必须经历积污、潮湿、形成干燥带并产生局部电弧、局部电弧发展至完全闪络四个阶段。

1. 绝缘子表面形成污秽层

绝缘子表面沉积一层污秽物，污秽物中含有不导电的惰性物质和受潮能溶解的盐类或酸碱等物质。只要污秽层不是电解液如盐水和稀酸，一般在干燥状态下是不导电的，积污是污秽闪络的前提条件。

运行绝缘子在大气环境中受到工业排放物及自然扬尘等因素的影响，表面逐渐沉积一层污秽物。这些污秽物按不同起因，可分为无人参与的自然条件下产生的自然型污秽和生产过程中产生的工业型污秽。

绝缘子表面的积污，一方面取决于促使微粒接近绝缘子表面的力；另一方面取决于微粒和表面接触时保持微粒的条件。微粒在绝缘子表面的沉积，受风力、重力、电场力的作用，其中风力是最主要的。空气运动的速度和绝缘子的外形决定了绝缘子表面附近的气流特性，在不形成涡流的光滑表面，微粒运动速度快，减少了它们降落在绝缘子表面的可能性；反之，具有高棱和深槽的绝缘子下表面附近则易于形成涡流，使气流速度下降，产生了污秽沉积的有利条件。重力只对直径较大的微粒起作用，且主要影响污源附近的绝缘子上表面。微粒在交流电场中做振荡运动，作用在中性微粒上的电场力指向电力线密集的一端；在直流电场的作用下固体微粒可带电，更易吸附于绝缘子表面，因此直流系统绝缘子的积污比交流系统严重得多。带电与否对绝缘子积污有一定的影响，但更与环境因素有关。一般来说，如果积污是急剧形成的（如风、雾），则带电与否对积污的影响不大；如果污秽是缓慢积聚的，则带电绝缘子的积污比不带电绝缘子的积污要严重。

2. 污秽湿润或染污绝缘子表面受潮

大多数污秽物在干燥状态下是不导电的（电阻值很高），该状态下绝缘子的放电电压和洁净干燥时非常接近，因此，发生污秽闪络前必须要有受潮过程。只有污秽物吸水受潮，在绝缘子表面形成一层导电水膜，污秽物中的电解质成分电离，在水溶液中以离子形态存在时，绝缘子的闪络电压才会明显降低，闪络电压降低的程度与湿污层的电导率有关。潮气吸收、凝露和降雨都可能使绝缘子受潮。在相对湿度较大（大于75%），绝缘子的温度和环境温度相同时，其表面吸收潮气；当绝缘子表面温度低于露点时，空气中的水分在其表面凝露，该情况一般出现在日出或刚刚日出之前；大雨可能冲洗掉部分电解质和全部污秽层，则放电过程的其他阶段不再发生，或者直接由雨水桥接伞裙而闪络。长期的运行经验表明，雾、露、毛毛雨最容易引起绝缘子的污秽放电，其中雾的威胁性最大。

在毛毛雨、雾、露、雨夹雪或融雪、融冰等潮湿天气时，绝缘子表面的局部或全部受潮，污秽层变成导电层，在运行电压下有泄漏电流流过。大雨具有冲刷作用，一般不构成污闪危险。

绝缘子的湿润加大了它的表面导电性能，使得通过绝缘子表面的泄漏电流增大，导电薄层发热。发热从正、反两个方面改变表面层的导电性能，即表面层的烘干将使电导率减小同时受表面层中正温度系数电解质的影响，随着温度的升高而使电导率增加。

3. 形成干燥带并产生局部电弧

在潮湿的气象条件下，表面覆有导电污秽层的绝缘子在电压作用下产生泄漏电流，泄漏电流的大小不仅取决于绝缘子脏污的程度及污秽物的成分，而且与污秽物的湿润程度有关。

由于污秽沿绝缘子表面的分布通常是不均的，且沿绝缘子泄漏路径的直径也不同，因此，绝缘子各个区段的泄漏电流密度不同，这就使得表面泄漏电流产生的热量对污秽层的烘干不均匀。由于结构形状或其他偶然因素的影响，在电流密度较大或污秽层电阻较大的局部地区，首先被烘干成干燥带或干燥区。绝缘子表面各处的电流密度不同，在悬式绝缘子的钢脚、钢帽附近，或棒形、支柱绝缘子的杆径处，电流密度较大。表面泄漏电流产生的焦耳热效应在几个周波内会使电流密度很大的地方水分蒸发，从而形成干燥区（干燥带）。

干燥带的出现将减小甚至中断泄漏电流，在这种情况下作用电压将主要集中在干燥带上。由于干燥带比较窄，往往仅几毫米宽，导致干燥带上的空气可能击穿和产生泄漏电流脉冲。

当绝缘子表面形成干燥带后，由于作用电压的大小不同，其表面物理过程的发展也将不同。

(1) 当电压很低时，干燥区的电场强度不足以使空气发生碰撞电离形成局部放电，泄漏电流的建立过程是平稳的，其值一般不超过几百微安，如图 1-1 中的 A 区所示。

(2) 当电压稍高时，如图 1-1 中的 B 区所示，干燥区的电场强度足以使空气发生碰撞电离并形成局部放电。局部放电的电流将由加在绝缘子上的电压、局部放电和与局部放电串联的绝缘子表面部分两者的总电阻所决定，电流值一般在几个毫安以下。这种放电具有上升型的“伏-安”特性。

4. 局部电弧发展至完全闪络

(1) 当加在绝缘子上的电压相当大时 ($U_B \leq U < U_{50\%}$)，如图 1-1 中的 C 区所示，如果绝缘子湿污秽层的电阻较小（绝缘子污染比较严重，表面又充分受潮，且泄漏距离较小），则会出现较强烈的放电现象，此时跨越干燥区的放电形式为具有下降型“伏-安”特性的电弧放电，放电通道中的温度可升高到热电离的程度，与这种放电形式相对应的泄漏电流脉冲值较大，可达数十或数百毫安。在一定条件下，桥接干燥区的局部电弧沿绝缘子表面持续发展，其趋势使与电弧串联的剩余污秽层电阻减小，电流增加，甚至将绝缘子表面桥接，最终导致相对地闪络。

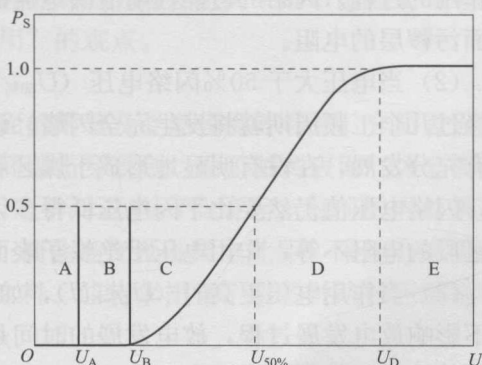


图 1-1 污秽绝缘子沿面放电发展的各个阶段 (A、B、C、D) 的闪络概率

短接干燥带的局部放电具有电弧特性，其伏安特性是下降型的。这类局部放电一般称为局部电弧。局部电弧的电阻不大，因此出现局部电弧后绝缘子的总电阻将显著降低（主要由未被局部电弧短接的绝缘子表面部分的电阻决定）。随污秽程度的不同，泄漏电流将突增至数十或数百毫安，局部电弧的颜色也由蓝紫色改变为红黄色或白色，电压沿绝缘子（带）表面很快进行重新分布。

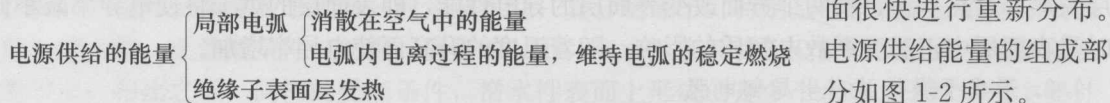


图 1-2 电源供给能量的组成部分

对于消耗在绝缘子
表面层发热上的能量,

它取决于电压的大小和污秽层的性能:

1) 当表面层的干燥影响占优势时电阻值将增加, 绝缘子泄漏电流将减小, 与之相应的局部电弧电流也随之减小, 取自电网的能量减小, 耗费在电离过程中的能量也就减少, 为熄弧创造了条件, 被局部电弧分路的绝缘子表面干燥区逐渐受潮, 干燥区逐渐减少, 电导逐渐恢复, 使局部电弧旁路而熄灭, 然后再次出现干燥区, 加在干燥区的电压可能使其重新放电, 从而再次形成局部电弧, 这种状态称为间歇小电弧状态。

2) 当电解质的正温度系数影响占优势时电阻值将减小, 绝缘子表面层的发热将引起绝缘子电阻的减小和泄漏电流的增加, 相应的电弧电流就增大, 使得供给电弧的能量增加, 电弧温度升高, 建立了有利于电离过程发展的条件, 促使局部电弧伸长。由于电弧的下降型“伏-安”特性, 电流的增加将使电弧电阻和电弧上的压降进一步减小, 随着局部电弧的伸长和局部电弧电阻的减小, 绝缘子非干燥区表面的电场强度逐步升高, 当电场强度超过临界值时, 就将发生绝缘子的完全闪络。

整个过程可归纳为绝缘子、污秽、受潮条件和所加电压（在实验室为电源阻抗）之间相互作用的过程。闪络的可能性随泄漏电流的增大而增加，而泄漏电流大小主要取决于绝缘子表面污秽层的电阻。

(2) 当电压大于 50% 闪络电压 ($U_{50\%}$) 时 ($U_{50\%} \leq U < U_D$), 如图 1-1 中的 D 区所示, 只经过几个工频周期就将发生完全闪络。该电压作用下绝缘子表面层内的热动力平衡过程并没有充分发展, 在没有明显地形成干燥区和出现局部电弧的情况下就将发生绝缘子闪络。但是, 闪络电压值仍然要比干闪电压低得多, 其原因可能是污秽分布不均匀, 使得绝缘子表面各区段的电阻不等, 作用电压沿绝缘子表面的分布也就不均匀, 促使发生分段依次闪络。

(3) 当作用电压更高时 ($U_D \leq U$), 如图 1-1 中的 E 区所示, 绝缘子表面层的存在实际上不影响放电发展过程, 放电发展的时间是几十至几百微秒, 放电电压接近干闪电压而与绝缘子的结构、外形关系不大。

由上分析可知,如果 A、B 区和 C 区相当于正常运行方式下污秽绝缘子的放电发展过程,则部分 D 区和 E 区相当于过电压作用下的污秽绝缘子闪络,而且其中部分 C 区和 D 区相应于内部过电压的作用,D 区右边的区域相当于大气过电压的作用。

亲水性表面局部电弧延伸发展的机理，国内外学者从不同角度进行了分析和研究，还提出了一些不同的观点：

1) Wilkins 等认为电弧端部的电离和在电离基础上弧根连续不断的生成,是导致电弧发展的主要因素,从能量角度考虑, $dW_p/dx > 0$ 是电弧发展的必要条件。