



高等学校教材

# 高电压设备绝缘与故障分析

北京农业工程大学 郭喜庆 主编



## 前 言

本书是根据 1988 年 5 月原能源部高等学校电力工程专业教学委员会第一次全体会议确定的教材出版计划和 1991 年高电压技术教学组通过的编写大纲编写的。

高压电气设备绝缘的故障分析,过去未曾列入高校的教学内容。但近些年来随着电力系统的不断发展,为了提高电力系统运行的可靠性,及时对故障隐患进行探测和分析,做到尽早发现故障和消除故障已为人们所注目。同时,我国在高电压设备绝缘事故分析方面也已积累了丰富的经验,为编写教材提供了条件。因此,我们把故障分析作为本书的重要内容。

全书共分五章,北京农业工程大学郭喜庆编写第一、二、四章,并对全书进行了修改、删节;东南大学王大忠编写第三、五章,全书由郭喜庆任主编。清华大学张仁豫教授担任主审,对本书提出了不少宝贵意见,使本书质量得以提高,谨向张先生致以衷心的感谢。本书从一些著作、教材和论文中吸取了有关的内容,对为本书提供参考资料的各位作者表示感谢。由于编者水平所限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1993 年 6 月

# 目 录

前 言	
第一章 电气设备绝缘一般概念	1
第二章 高压绝缘子及故障分析	4
第一节 概述	4
第二节 高压线路绝缘子	8
第三节 高压线路绝缘子的机电性能及试验方法	11
第四节 电站及电器支柱式绝缘子	18
第五节 套管绝缘子	22
第六节 绝缘子运行及故障分析	32
第三章 电力电缆绝缘及故障分析	42
第一节 概述	42
第二节 电缆的绝缘材料	43
第三节 电力电缆的典型结构	47
第四节 电力电缆绝缘层厚度的确定	53
第五节 电缆终端和电缆接头	57
第六节 电力电缆故障的试验分析	63
第七节 电缆故障点探测	71
第四章 电力变压器绝缘及故障分析	77
第一节 概述	77
第二节 油浸电力变压器常用绝缘材料	79
第三节 油浸电力变压器的绕组及纵绝缘	83
第四节 电力变压器主绝缘结构	91
第五节 电力变压器主绝缘设计校验概论	93
第六节 电力变压器绝缘工艺过程简介	98
第七节 电力变压器故障分析概论	98
第八节 用油中溶解气体气相色谱分析判断变压器内部故障	100
第九节 试验检测分析变压器内部故障	107
第十节 变压器故障检测及探测新技术	109
第五章 高压电机绝缘及故障分析	111
第一节 概述	111
第二节 高压电机的主要绝缘材料	113
第三节 高压电机定子绕组绝缘结构	118
第四节 高压电机的防晕问题	126
第五节 高压电机定子绕组绝缘工艺简介	130
第六节 转子绕组绝缘	132
第七节 电机绝缘的故障分析	133
第八节 发电机故障的检测和在线监测	142
主要参考文献	148

# 第一章 电气设备绝缘一般概念

电气绝缘的作用是把不同电位的导体分隔开，使之在电气上不相连接，没有电流通过。用作电气绝缘的材料称为绝缘材料，这些材料通常具有 $10^6 \sim 10^{19} \Omega \cdot m$ 的电阻率。从绝缘材料的电阻率来看，所谓绝缘不是绝对的，不过是电阻很高，电导很小而已。电气绝缘材料有气体、液体和固体三类。

## 一、电气设备的内绝缘和外绝缘

### (一) 内绝缘与外绝缘的含义

电气设备外壳内部由固体、液体或气体（不包括常压的空气）组成的绝缘叫做内绝缘。内绝缘基本上不受大气、污秽、潮湿和动物等外界条件的影响。图 1-1 是用套管从电气设备内部向外引线的简图。图中内绝缘包括套管绝缘子 4、在设备壳体内部的套管绝缘子 4 下部的表面绝缘间隙，以及外壳 1 与内引线 6 之间的绝缘间隙。

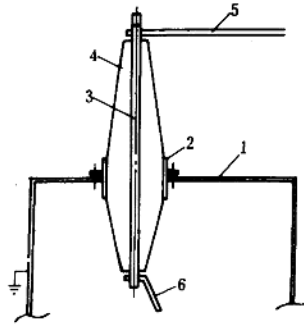


图 1-1 内绝缘和外绝缘举例

1—电气设备外壳；2—套管的法兰；3—套管导电杆；4—套管绝缘子；5—通向母线的外引线；6—通向电气设备部件的内引线

电气设备壳体外的或暴露在大气中的套管绝缘子等绝缘体表面以及空气间隙称为外绝缘。外绝缘则承受大气、污秽、潮湿和动物等外界条件的影响。图 1-1 中外绝缘包括套管绝缘子 4 在外壳 1 外部的上部表面以及外引线 5 与外壳 1 之间的空气间隙。

外绝缘又分为用于建筑物内运行的户内绝缘和用于建筑物外运行的户外绝缘。显然，后者的运行条件比前者更为恶劣。

内绝缘比外绝缘复杂得多，不同的设备有不同的结构，它是由固体、液体和气体（SF<sub>6</sub> 等压缩气体）材料构成的。由于只有采用固体绝缘部件才能在机械上牢固地支撑和固定导体，并且固体绝缘材料具有更好的电气强度，可以大大缩小电气设备的体积，带来明显的经济效果，所以固体绝缘材料是任何设备内绝缘所不可缺少的。液体绝缘材料除了用作绝缘和组合绝缘之外，由于它的对流作用还可以把设备内部的热量传到外部，所以液体绝缘材料也是一些电气设备不可缺少的。高强度气体在电缆、全封闭组合电器等电气设备中也有应用。

### (二) 自恢复绝缘与非自恢复绝缘

在施加电压引起破坏性放电（击穿）后，一经切断电源短时间内即可完全恢复其绝缘性能的绝缘，称为自恢复绝缘。高电压设备的外绝缘以及由某些液体、气体或真空构成的内绝缘属于自恢复绝缘。

在施加电压引起破坏性放电（击穿）并很快切断电源后，即丧失或不能完全恢复其绝缘性能的绝缘，称为非自恢复绝缘。内绝缘大多数属于非自恢复绝缘。

由于大多数内绝缘属于非自恢复绝缘，所以电气设备的内绝缘应比外绝缘有较高的绝缘水平，它应达到在运行寿命期限内不发生击穿的水平。此外，内绝缘的电气强度不能用击穿电压来衡量，只能用耐受电压来判断。

## 二、电气设备内绝缘的构成与材料组合

设备绝缘必须有一定的绝缘水平，既要有较高的短时电气强度（以短时试验电压来衡量），又要有足够的长期电气强度（耐局部放电性能好、介质损耗低）。此外，绝缘还应具有良好的耐热、抗热老化性能，承受各种机械负荷的能力和化学稳定性能。理论和经验都表明，在内绝缘构成方案中，采用两种或几种材料构成的组合绝缘，通过几种材料功能的互补，可使其具有更完善的性能，更好地满足对绝缘提出的各项要求。组合绝缘的组合方式有以下几种。

### （一）固体与液体绝缘材料的组合

#### 1. 弥补纸绝缘的孔隙性采用油纸绝缘

纸是内绝缘常用的材料，但是纸的最大缺陷是具有孔隙性。除了它本身有孔隙性之外，纸缠绕在导体外面时，纸层之间还有空隙。绝缘中出现空隙最容易发生局部放电，在局部放电作用下纸绝缘会迅速老化失去绝缘性能。为克服这一缺陷，采用油纸绝缘，让油代替空气充满纸绝缘中的孔隙，可以大大提高绝缘的局部放电起始电压和绝缘的电气强度，特别是长期电气强度，从而提高绝缘水平。近年来实际应用表明，用某些合成液体介质代替矿物绝缘油，具有更好的效果。油纸绝缘电缆是这种组合绝缘的代表（见第三章）。

#### 2. 油纸互补构成油—屏障绝缘

这种绝缘主要用于电力变压器绝缘。变压器绕组、铁心在运行中产生大量热量，若用固体绝缘，对散热极为不利，所以主绝缘多采用变压器油绝缘。为了提高油的绝缘强度、缩小绝缘距离，用绝缘纸板构成极间障组成油—屏障绝缘。极间障可以改善油中电场分布、阻断油中气泡、杂质“小桥”的形成，从而提高绝缘强度。

此外，在油间隙中还可用电极覆盖层及绝缘层，这种绝缘用于电力变压器和充油套管绝缘子中。电极表面的薄固体绝缘层可以限制泄漏电流、阻止“小桥”的形成而提高工频击穿电压。采用厚绝缘层除了上述作用外，还可以承担一定电压，使绝缘表面处油中最大电场强度降低，大大提高间隙的工频击穿电压。

### （二）为改善电场分布固体材料组成分阶绝缘

在高压电力电缆中，电场分布是不均匀的。在电缆线芯附近电场强度比较高，沿径向方向愈向外电场愈低。由于电场分布不均匀，电缆绝缘的厚度势必加大，使电缆的性能变坏，价格提高。为了克服上述缺陷，采用不同介电常数的固体绝缘组成分阶绝缘。靠近导线的内层绝缘采用介电常数高的固体绝缘介质，而外层则用介电常数低的介质。由于电场中电位移通量（ $D = \epsilon E$ ）是连续的，介电常数 $\epsilon$ 高的材料电场强度 $E$ 较低，反之则 $E$ 较高，因而分阶绝缘可以改善电场分布，在高压电缆中得到应用。

### （三）固体绝缘与半导体屏蔽层的配合

有些材料如聚乙烯等聚合合成材料和橡胶等，可以单独使用构成内绝缘。但它们与电极的接触不可能十分紧密，会留下容易产生局部放电的气隙，而降低绝缘的寿命。为克服这一缺陷，在与电极接触的绝缘表面加半导体屏蔽层，使电极与绝缘之间的气隙处于电极与半导体屏蔽层的包围之中，其中场强几乎为零，局部放电现象得到消除。这在塑料电缆、橡皮电缆中得到应用，在电机线槽部位的主绝缘中也得到应用。

#### (四) 固体绝缘与电气强度较高的气体绝缘的组合

在全封闭电器、电缆中采用这种组合。绝缘子把导体固定、支持在充有电气强度较高的气体（SF<sub>6</sub>）的密闭容器内，由绝缘子和电气强度较高的气体间隙构成内绝缘。由于采用了封闭容器和电气强度较高的气体绝缘，使得绝缘性能在运行中基本上不发生改变，介质损耗小，结构简单，重量小，没有火灾危险。

#### (五) 固体绝缘单独使用

一般固体绝缘与电极不能紧密接触，特别是当电极形状复杂时，更难使两者紧密接触。但采用以环氧树脂为基础的热固性复合绝缘材料，这个问题可以得到消除。热固性材料在温度较低时为液态，可以进行浇铸，而与电极紧密接触，浇铸后加热使之固化变成固体绝缘。这种浇铸绝缘在变压器、电缆中也得到应用，新型浇铸材料仍在发展。

此外，在密闭容器中形成真空，利用真空也可构成内绝缘，真空开关电器便利用了这种绝缘。

## 第二章 高压绝缘子及故障分析

### 第一节 概 述

绝缘子是由绝缘件和金属附件构成的电气器件，用来固定支撑或悬挂带电导体，使带电导体间及导体对地或对接地部件之间在电气上相互绝缘。带电导体可以敷设在室内外，也可以敷设在设备内部，从设备内部引出或从户内引出到户外。绝缘子本身可包括内绝缘和外绝缘两个部分，但它的主要作用是构成送电线路、母线或电气设备的外绝缘。在一些特殊场合，例如在全封闭配电装置和管道充气电缆中，绝缘子则用来构成内绝缘。在导体由设备内部引出时，绝缘子既用来构成外绝缘，又用于构成内绝缘。

#### 一、绝缘子分类和型式

绝缘子有多种分类方法。按以下特点可以把绝缘子分为许多类。

##### 1. 按用途和型式分类

按用途分类，用于架空送、配电线路的绝缘子称为线路绝缘子；用于发电厂、变电所或电气设备的绝缘子称为电站、电器绝缘子。

按型式分类，线路绝缘子分为线路针式、蝶式、盘形悬式、棒形悬式和横担绝缘子；电站电器绝缘子分为支柱（针式支柱、空芯支柱、棒形支柱）绝缘子和套管绝缘子。

##### 2. 按使用场所分类

用于室内的绝缘子称为户内式绝缘子，用于室外的绝缘子称为户外式绝缘子。户外式绝缘子又分为用于空气清洁地区的和用于空气有污秽地区的，后者称为防污型绝缘子。线路绝缘子均为户外式。

##### 3. 按电压等级分类

用于1 kV及以上电压的称为高压绝缘子，用于1 kV以下电压的称为低压绝缘子。

##### 4. 按绝缘子电击穿性能分类

当在绝缘子两电极间施加高电压时，绝缘子可能发生沿面闪络也可能发生击穿。如果沿面泄漏距离（爬距）远大于两极间绝缘件的厚度，则在运行中可能出现绝缘件的击穿事故，这类绝缘子称为可击穿型绝缘子（B型）。其击穿电压略高于干闪电压，约为后者的1.5倍，将绝缘子浸于油中可进行击穿试验。若绝缘子沿面爬距不超过绝缘件厚度的2倍，由于绝缘件击穿场强远大于沿面闪络场强，则不会发生绝缘件击穿事故，这类绝缘子称为不击穿型绝缘子（A型）。

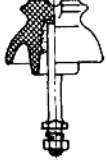




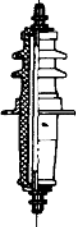



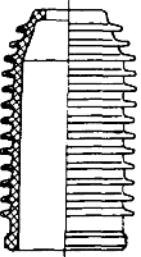
绝缘子还可以按周围媒质不同和绝缘材料不同来分类。绝缘子的分类和基本型式图形列于表2-1。

#### 二、对绝缘子的特殊要求

由于绝缘子除了起绝缘作用外，还担负固定（悬挂）支撑导体的作用，除特殊情况外，

表 2-1

绝缘子的分类和基本型式图形

种类	线路绝缘子			电站、电器绝缘子		
型式	针式	蝶式	盘形悬式	针式支柱	空心支柱	套管
可击穿型						
型式	横担		棒形悬式	棒形支柱	电器瓷套	
不击穿型						

注 电器瓷套指用于避雷器、互感器、断路器、电容器、电缆终端头等设备，作为外绝缘和内绝缘的保护容器，是绝缘结构的一部分，一般不称其为绝缘子，但和绝缘子有一些共同特点。

它主要在户内的空气中或在户外大气环境中运行，因此，对它提出以下要求。

### 1. 绝缘子应有良好的机械性能

绝缘子可能承受导线重量、导线张力、冰重、风荷载、短路电流电动力、开关设备操作力、振动力的作用，因此，绝缘子机械性能的好坏成了高压输电技术发展的一个制约因素。例如，最初输电线路采用针式绝缘子，由于其抗弯强度的限制，导线截面一般超不过  $50 \text{ mm}^2$ ，电压超不过  $60 \text{ kV}$ 。1906 年悬式绝缘子研制成功，才打破这一限制。近代随着输电电压的提高和送电容量的加大，对绝缘子的机械性能又提出更高的要求。例如，支柱式和套管绝缘子的长度随着电压的提高而加长，要求它有更高的抗弯强度，然而其抗弯性能却随着其长度的增加而下降，使解决问题的难度大大增加。又如，在电压等级升高、导线截面增加的情况下，线路盘形悬式绝缘子应具有更高的机电联合强度等。

### 2. 绝缘子应具有抗自然条件和环境条件侵蚀的稳定性

大部分绝缘子在露天运行，要承受风、雨、雾、露、冰雹、雪、温度激变、湿度变化和环境污染等多因素的作用。因此，要求绝缘子有较高的热稳定性、化学稳定性、耐电弧性能和耐污秽性能等。

### 3. 绝缘子应具有较好的电气性能

绝缘子的主要电气性能有绝缘子的击穿电压、沿面闪络电压等。沿面放电，特别是湿闪、湿污闪放电是绝缘子特有的放电形式，根据绝缘配合的要求，其沿面闪络电压应有一



定水平。

### 三、绝缘子绝缘材料

由于对于外绝缘的特殊要求，长期以来绝缘子主要使用无机绝缘材料高压电瓷，本世纪 50 年代开始使用玻璃。60 年代才采用有机绝缘材料环氧玻璃钢、环氧浇铸品等制造绝缘子。

#### 1. 电瓷材料与釉料

电瓷材料是由石英 ( $\text{SiO}_2$ )、长石  $[(\text{Na}/\text{K})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2]$  和粘土 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 按一定比例配料，经制泥、成型、干燥、上釉和烧成等工艺制成的无机陶瓷绝缘材料。它由均匀分布的石英结晶相、莫来石 ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) 结晶相和充填于结晶相之间的玻璃相和少量不均匀的气孔所构成。其中石英起骨架作用，可提高瓷的机械强度；莫来石可提高瓷的热稳定性和机电性能；玻璃相使瓷致密，提高瓷的电气强度；气孔的存在则降低瓷的机电强度。

普通电瓷原料配方中粘土约占 50%，石英、长石各占 25%；烧成的瓷中石英晶体占 15%~25%，长石占 10%~30%，玻璃相占 50%~60%，闭口气孔占 3%~7%。如果适当提高配料中石英的含量，则可制成高硅瓷，其机械强度可以提高。若以煨烧矾土或工业氧化铝部分或全部代替普通瓷中的石英可制成铝质瓷，其机械强度更高，电气强度和热稳定性也有提高。

釉是覆盖在瓷表面的玻璃态薄层。白色釉料由（钾和钠）长石、石英、高岭土、石灰石或方解石和滑石组成。配好的釉料磨成细粉调成细糊状，涂于干燥后的瓷坯件的表面，烘干后与瓷一起进行烧制。釉料中加入一定比例的氧化铁、氧化铬和氧化锰等着色氧化物可以制成棕色釉。70%左右的白釉料和 30%左右的金属氧化物 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sb}_2\text{O}_5$  等) 或预先合成的导电性化合物可配制成半导体釉。釉可以使瓷表面致密、光滑美观，便于风雨清洗，提高抗污能力和防潮能力，还可以提高瓷的机械强度。

为了提高电瓷的机电强度，对电瓷制造工艺提出了一些特殊要求。例如：控制泥料细磨粒度，细磨后用 10000 孔/ $\text{cm}^2$  的筛子过筛后其筛余物不超过 1%~4%，泥料必须经过吸铁机除铁，经压滤机榨去大量水分后还要经真空练泥机练泥除去空气并使水分均匀；大型坯件在干燥升温过程中严格控制、调节烘房湿度，以使表面水分蒸发速度约等于坯体内水分向表面扩散的速度，防止开裂；在烧成阶段，掌握好火候，控制好烧成过程各阶段的升温速度、保持时间，以防止生烧或过火；烧成后与金属附件进行胶装，要求胶合剂有足够的机械强度、化学稳定性和适宜的热膨胀系数。

由于电瓷材料的电气性能、机械性能、耐电弧性能和化学稳定性比较好，是绝缘子的良好绝缘材料。用于制造高压绝缘子的电瓷材料也叫高压电瓷，其基本性能指标列于表 2-2。表中高压电瓷的电气强度不低于 20 kV/mm，这是对于 1.5 mm 厚的标准试样的规定值，但是当试样厚度  $d$  加大时，其电气强度  $E_i$  将大大下降，见图 2-1。标准试样高压电瓷（未上釉）的抗压强度约 400~500 MPa，拉伸强度 30~50 MPa，弯曲强度约 60~140 MPa。当试样截面积  $S$  增加时，其机械强度也大大下降，图 2-2 标示了机械强度相对值随试样截面积  $S$  增加而下降的情况。由于上述原因，瓷件的厚度或截面积不宜过大，并应尽量均匀。瓷的

抗压强度远高于拉伸或弯曲强度，应使绝缘子的瓷件承受压力更为合理。

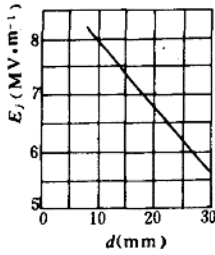


图 2-1 高压电瓷在工频下电气强度  $E_j$  与厚度  $d$  的关系

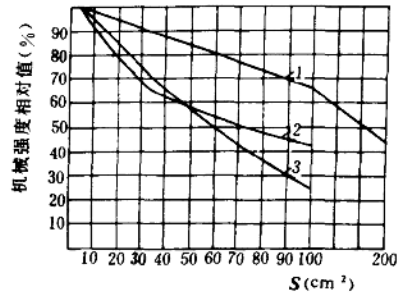


图 2-2 高压电瓷的机械强度相对值与截面积  $S$  的关系

1—抗压强度；2—拉伸强度；3—弯曲强度

表 2-2

高压电瓷的基本性能<sup>①</sup>

性 能		数 值	
		硅质电瓷	铝质电瓷
体积密度 (g/cm <sup>3</sup> )		≥2.3	≥2.4~2.5
拉伸强度 (MPa)	上釉的	≥35~40	≥50~60
	不上釉的	≥30~35	≥40~50
抗压强度 <sup>②</sup> (MPa)	上釉的	≥450~550	
	不上釉的	≥400~500	
弯曲强度 (MPa)	上釉的	≥70~100	≥140~160
	不上釉的	≥60~80	≥120~140
冲击弯曲强度 (N·mm/m <sup>2</sup> )		≥1.8	≥2.1~2.4
冷热急变性 (K)		≥150	≥160
平均线膨胀系数 (20~100℃) (1/K)		(3~5)×10 <sup>-6</sup>	(3~5)×10 <sup>-6</sup>
弹性模量 (GPa)		≥60~70	≥80~100
电气强度 (50Hz, 20±5℃) (kV/mm)		≥20	≥20
耐受电压 (50Hz, 试验电压时间 1 min) (kV)		≥30	≥30
体积电阻率 (20±5℃) (Ω·m)		≥10 <sup>11</sup>	≥10 <sup>11</sup>
表面电阻率 ρ <sub>s</sub> <sup>②</sup> (相对湿度 80%) (Ω)		10 <sup>9</sup> ~10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup> ~10 <sup>10</sup>
相对介电常数 ε <sub>r</sub> (50Hz, 20±5℃)		6~7	6~8
tgδ (50Hz) (×10 <sup>-3</sup> )	20±5℃	≤25	≤25~30
	60℃	≤40	≤40
	80℃	≤60	≤60
	100℃	≤120	≤120
比热容 (20~100℃) (J/kg·K)		750~1000	750~1050
导热系数 (20~100℃) (W/m·K)		1.0~2.5	1.5~4.0

① 本表摘自国标 GB8411.1—87《电瓷材料 第一部分：定义、分类和性能》。

② 国标 GB8411.1—87 中未规定该项指标。

普通电瓷的  $\text{tg}\delta$  随温度升高很快增加，高温高频下易发生热击穿，但在工频和  $80^\circ\text{C}$  以下一般不会发生热击穿。电瓷在  $300^\circ\text{C}$  以上高温时绝缘电阻迅速下降，甚至失去绝缘性能，特殊情况下应采用特种电瓷。

## 2. 玻璃及钢化玻璃

玻璃的电气强度优于电瓷，机械强度与电瓷相当，但它的耐冷热激变的性能比较差。玻璃经过特殊的热处理（钢化）后，可以在玻璃表面形成永久的预压应力而内部为拉应力，因表面不易产生裂纹扩张使机械强度特别是拉伸、弯曲及冲击弯曲强度大大增加（提高  $2\sim 3$  倍以上），耐冷热激变性也会增强，因此，可以用来制造高压线路悬式绝缘子。

钢化玻璃一般多用高碱玻璃。高碱玻璃的工频击穿场强约为  $35\sim 50\text{ kV/mm}$ （有效值）， $20^\circ\text{C}$  时  $\text{tg}\delta=0.008\sim 0.05$ ，低于电瓷。钢化后，其机械强度及耐冷热激变性均优于电瓷。

## 第二节 高压线路绝缘子

高压线路绝缘子分为针式、蝶式、悬式和绝缘横担等几类。线路针式、蝶式绝缘子主要用于  $10\text{ kV}$  及以下架空配电线路；瓷横担主要用于  $35\text{ kV}$  及以下，导线截面较小的架空线路；悬式绝缘子广泛用于架空送、配电线路。

### 一、盘形悬式绝缘子结构

盘形悬式绝缘子由可锻铸铁帽 5、钢脚 6 与盘形绝缘件 4 用胶合剂 3 胶装在一起构成，属于可击穿型绝缘子，其构造见图 2-3。绝缘件有瓷和钢化玻璃两类。下面主要讨论瓷绝缘子。就盘形瓷件头部的形状不同，又分为圆锥形头部 [图 2-3 (a)] 和圆柱形头部 [图 2-3 (b)] 两种。

#### 1. 圆锥形头部悬式绝缘子

圆锥形头部悬式绝缘子的头部结构示于图 2-4。瓷件 4 头部承力部位 7、8 呈倒圆锥形，

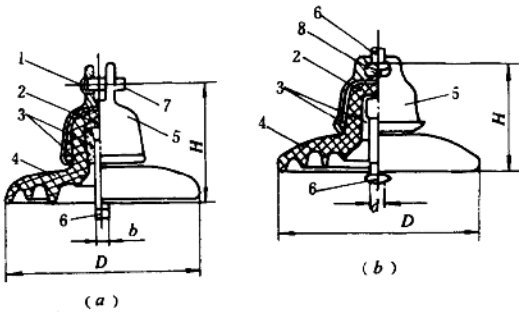


图 2-3 盘形悬式绝缘子结构

(a) 圆锥形头部悬式绝缘子；

(b) 圆柱形头部悬式绝缘子

1—圆柱销；2—纸垫；3—胶合剂；4—盘形绝缘件；

5—铸铁帽；6—钢脚；7—开口销；8—弹簧销；

$H$ —绝缘子高度； $D$ —瓷件盘径； $b$ 、 $d$ —钢脚厚度、直径

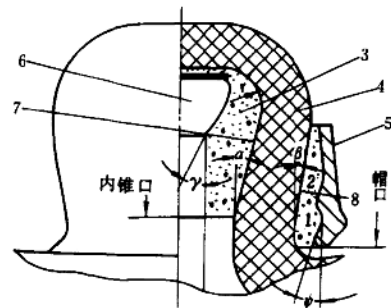


图 2-4 圆锥形头部盘形悬式

绝缘子头部结构

1、2—帽内第 1、第 2 台阶；3—胶合剂；4—瓷件；

5—铸铁帽；6—钢脚；7、8—内外瓷件承力面

$\alpha$ —内锥角； $\beta$ —外锥角； $\gamma$ —脚承力面的

锥角； $\phi$ —帽承力面的锥角

瓷件头部上部呈半球形，所以也称球形悬式绝缘子。头部内外表面均上釉，比较光滑。瓷件4、帽5、钢脚6用掺有瓷砂的水泥3胶装在一起。在帽内的顶部和脚顶部表面涂有薄层沥青，作为缓冲层。瓷件内孔浇入的水泥不可太满，通常应使水泥面与帽沿对应。

瓷件内承力面7与绝缘子轴线的夹角 $\alpha$ 称为内锥角。 $\alpha$ 的大小与瓷件的受力有关， $\alpha$ 增加，在同样外负荷下瓷件所受压力减小，但会使钢脚插入深度增加，从而增加绝缘子的高度。相反， $\alpha$ 减小则瓷件受力增加。一般取 $\alpha \approx 12^\circ \sim 18^\circ$ 。外锥角 $\beta$ 比内锥角 $\alpha$ 略小一些，约 $10^\circ \sim 13^\circ$ 。

钢脚承力面为略带弧形的圆锥面，钢脚承力面的锥角为 $\gamma$ 。铁帽口内承力面有1个或2个台阶，其锥角为 $\psi$ 。锥角 $\gamma$ 和 $\psi$ 大致相等，约为 $25^\circ \sim 30^\circ$ 。当绝缘子受拉力作用时，瓷件主要承受压力，而承受的剪切力不大。由于瓷件的抗压强度高于其它受力形式的机械强度，所以这种结构中瓷件的受力比较合理，其机械强度比较稳定可靠。绝缘子的机电破坏强度与瓷件头部内承力锥面面积成线性关系。

瓷件在绝缘子中承担了内外绝缘两种作用。绝缘件头部使帽和脚两个电极绝缘，起内绝缘作用，为了使绝缘子达到所必须的击穿电压，绝缘件头部应有一定的厚度。瓷件下部的盘形瓷伞及下部的3~4个棱所构成的爬电距离，构成外绝缘，使绝缘子具有一定的干闪电压和湿闪电压。瓷伞盘径的大小决定其闪络电压的高低，在设计瓷伞盘径时，要考虑它与绝缘子高度的配合。希望组成绝缘子串后，在发生湿放电时瓷伞之间的空气间隙距离（约等于绝缘子高度）得到充分利用。一般瓷伞盘径不小于绝缘子高度的2倍。

绝缘子的内、外绝缘强度应有适当的配合，外绝缘为自恢复绝缘，而内绝缘则为非自恢复绝缘。为了避免瓷件击穿损坏，瓷件的击穿电压约为绝缘子额定干闪络电压的1.5倍（或为额定干耐受电压的1.6倍）。确定瓷件的厚度和盘径应考虑这种配合。

悬式绝缘子可以串接起来，用于不同电压的送电线路和户外配电装置。绝缘子串接的方式有球窝型连接和槽型连接两种。球窝型连接如图2-3(b)所示，把铸铁帽5的窝孔套在上一个绝缘子钢脚6的球形托上，用弹簧销锁紧。球型连接没有方向性，可自由转动，拆装方便，通常多采用这种连接结构。槽型连接形式见图2-3(a)，钢脚6下端插入铸铁帽5的槽内，用圆柱销销住，再用开口销7将圆柱销销住。这种方法的缺点是连接具有方向性，且拆装不便，已很少使用。

## 2. 圆柱形头部绝缘子

圆柱形头部绝缘子与圆锥形头部绝缘子不同之处，仅在于瓷件头部的形状和结构，其瓷件头部形状为圆柱形，见图2-5。浸了釉的瓷砂用釉粘在坯件头部内、外壁侧面（受力面）1上，成瓷后瓷砂与瓷固结在一起，使侧面有粗糙圆滑的突起。胶装时瓷件粗糙侧面涂一薄层沥青或其它树脂材料做缓冲层。

这种绝缘子瓷件头部应力主要是压应力，但也有一定的剪应力，甚至还有弯曲应力。受力条

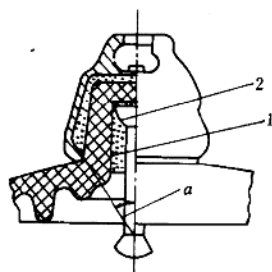


图2-5 头部形状为圆柱形的绝缘子结构  
1—瓷件头部的内、外壁侧面；2—钢脚的承力面，略呈弧形； $\alpha$ —铸铁帽的锥角

件比圆锥形头部的瓷件有些恶化，铸铁帽、钢脚边缘的集中应力和铸铁帽与钢脚承力面的轴向相对位置对绝缘子的机械强度有很大影响。应用光弹性模拟试验和有限元法可以对瓷件头部应力进行试验和分析，但由于情况复杂，分析只有参考价值。

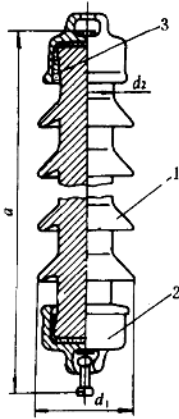


图 2-6 棒形悬式绝缘子(L75/14)结构图

1—棒形绝缘件；2—球窝形金属帽；3—胶合剂

注：a=1270mm；d<sub>1</sub>=150mm；d<sub>2</sub>=75mm

头部形状为圆柱形绝缘子的结构紧凑、头部尺寸小、各项性能均好，我国虽使用不多，但正进行深入的研究。

## 二、棒形悬式绝缘子结构

棒形悬式绝缘子由带裙伞的棒形绝缘件 1 与球窝形金属帽 2 胶装构成，属于不击穿型绝缘子，见图 2-6。

绝缘件 1 两端呈锥形（应去尖角，否则受力后尖角损坏，裂纹会继续发展），绝缘子受力时端部受压力，不会因胶合剂水泥膨胀造成瓷件断裂老化。瓷件其它部位受拉力，这是不利的一面。瓷件烧成后，其轴线应是直线，不发生变形，否则会影响绝缘子的机械强度。对这种瓷件的制造工艺一般有严格的要求，以保证其机电性能良好、稳定。这种绝缘子的缺点是瓷件一旦断裂，则易造成

导线落地和断线事故，优点是泄漏距离较长。

棒形悬式绝缘子在德、日等国使用较多，我国只有在电气化铁道线路、较低电压配电线路上等少数情况下采用。

## 三、针式绝缘子和蝶式绝缘子

图 2-7 (a) 所示为用于 3~10 kV 线路的针式绝缘子，由带裙伞的瓷件 1 与钢脚 2 胶装构成，属可击穿型绝缘子。导线置于其顶部或颈部线槽内，用绑线绑扎固定。钢脚有直脚和弯脚之分，但弯脚已很少采用。过去 35 kV 线路也用针式绝缘子，因尺寸大、笨重和老化率高，已被悬式绝缘子取代。

图 2-7 (b) 为 3~10 kV 蝶式绝缘子。它只是有两个裙伞的空心瓷件，要和螺栓、拉板配合使用。瓷件在工作时承受压力，也属于可击穿型绝缘子。蝶式绝缘子一般是与悬式绝缘子相串联，用于配电线路的耐张杆。但由于两者电容差别较大，电压分配不合理，易造成蝶式绝缘子故障，已较少采用。

## 四、瓷横担绝缘子

图 2-8 (a)、(b) 所示为瓷横担绝缘子，它由带突棱的棒形瓷件 1 或瓷件 1 与金属附件

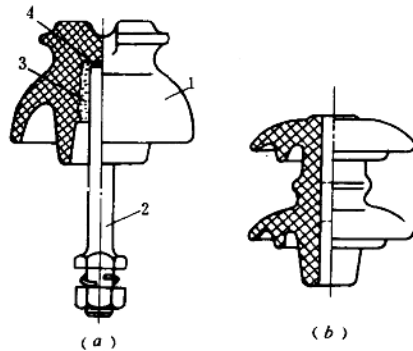


图 2-7 针式、蝶式绝缘子

(a) P-10 型线路针式绝缘子；(b) 蝶式绝缘子

1—瓷件；2—钢脚；3—胶合剂；4—纸垫

2 胶装在一起构成,前者称为纯瓷式,后者称为胶装式,属于不击穿型绝缘子。瓷横担绝缘子用于 3~35 (66) kV 线路的直线杆塔。装在线路上的情况见图 2-8 (c)。瓷横担在运行中承受弯矩作用。从受力形式而论,这种受力形式对瓷件是很不合理的,但用于配电线路,导线截面较小、受力较小时,机械强度不是突出问题。它的优点是,泄漏距离较大、冲击闪络电压高、运行可靠、结构简单、可以缩短杆塔及横担尺寸,因而比较经济。

110~220 kV 瓷横担由 2~3 节瓷件组成。当要求较高的机械强度时,可由两组瓷横担组成 V 型桁架结构。

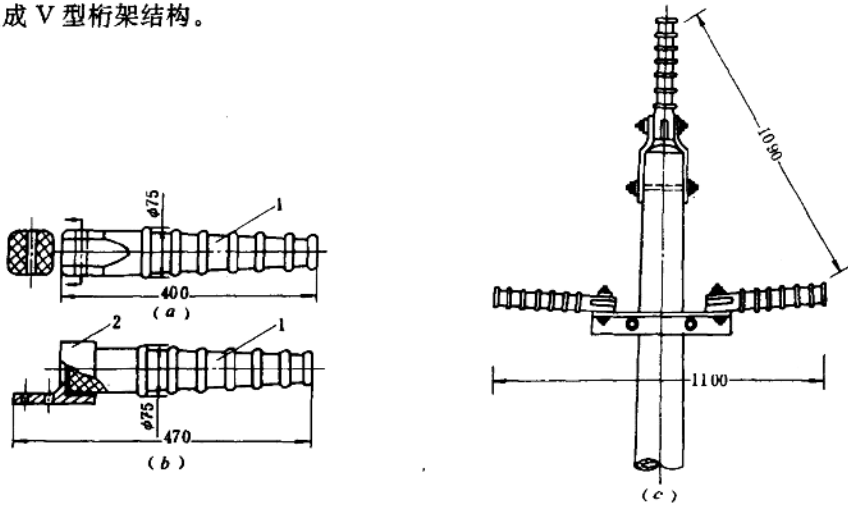


图 2-8 瓷横担绝缘子结构图

(a) 纯瓷式 SC—185 型; (b) 胶装式 S—185 型; (c) 安装后情况

1—瓷件; 2—金属附件

### 第三节 高压线路绝缘子的机电性能及试验方法

线路绝缘子的电气性能主要有闪络电压、耐受电压和击穿电压。机械特性有抗弯或抗拉强度。对于盘形悬式绝缘子还有机电破坏负荷和 1 h 机电负荷。

#### 一、线路绝缘子的闪络电压

##### 1. 线路绝缘子闪络路径

单个绝缘子的闪络路径如图 2-9 所示。干闪和湿闪路径由瓷伞上表面和下部空气间隙组成,污闪的路径主要由瓷表面组成。瓷横担绝缘子的闪络路径,就是两电极间瓷件的沿面间隙。

盘形悬式绝缘子串的闪络路径和闪络距离如图 2-10 所示。干闪路径大致为绝缘子串两极间的空气间隙,由  $\widehat{DE}$ 、 $\overline{EF}$  和  $\overline{FG}$  组成。干闪络距离为上述三个线段的长度之和,约等于绝缘子串的总长度  $nH$ ,  $n$  为绝缘子片数。绝缘子串的湿闪路径与单片时相同。湿闪距离为 1 片湿闪距离的  $n$  倍,其中对提高闪络电压起主要作用的是空气间隙部分的长度  $n\overline{BC}$ 。污

闪路径也与单片相同。

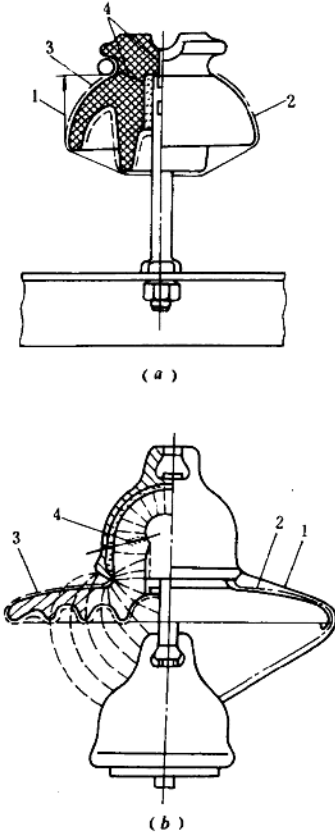


图 2-9 绝缘子闪络路径

(a) 针式绝缘子的闪络路径；

(b) 盘形悬式绝缘子闪络路径

1—干闪的放电路径；2—湿闪的放电路径；3—污闪的放电路径；4—击穿路径、机械负荷下破坏处

## 2. 干闪络电压

指在规定的电压波形和绝缘子表面清洁、干燥状态下，按照规定的条件测量并折算到标准大气条件的绝缘子闪络电压。试验时环境温度应在 $+10\sim+40^{\circ}\text{C}$ 范围内，空气相对湿度不超过85%。试验时，试件温度应与环境温度相同。

按所加电压波形不同，干闪电压又分为工频干闪电压、50%雷电冲击干闪电压和50%操作冲击干闪电压。雷电冲击试验用 $1.2\pm 30\%/50\pm 20\%$ 的标准雷电冲击全波；操作冲击试验采用 $250\pm 20\%/2500\pm 60\%$ 标准操作冲击波。冲击闪络电压有极性效应，正极性闪络电压比负极性的略低。

## 3. 湿闪络电压

指在规定的电压波形和规定的人工降雨条件下，绝缘子表面清洁时测得并折算到标准

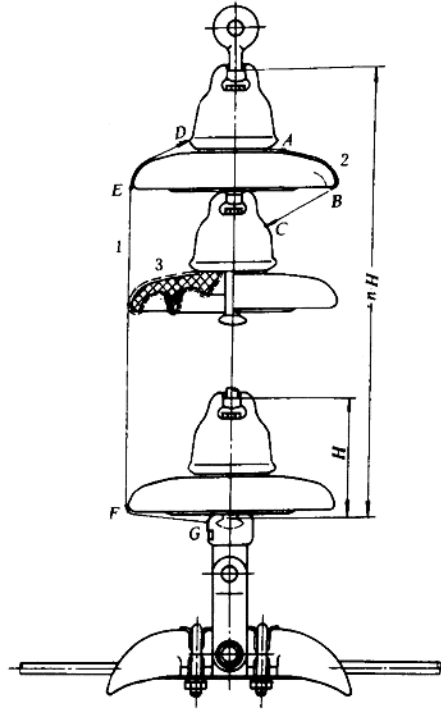


图 2-10 盘形悬式绝缘子串的  
闪络路径和闪络距离

1—干闪路径；2—湿闪路径；

3—污闪路径

大气条件的绝缘子闪络电压。人工雨的特性为：降雨量的垂直分量平均值和水平分量平均值为 1.0~1.5 mm/min，雨水温度与环境温度的差不超过±15℃；水的体积电阻率校正到 20℃时为 100±15Ω·m。试验的环境温度为+10~+40℃。按电压波形不同，又分为工频湿闪络电压、50%雷电冲击湿闪络电压和 50%操作冲击湿闪络电压。

## 二、绝缘子工频击穿电压

对于可击穿型绝缘子规定这一性能，指使绝缘子瓷件击穿的最小工频电压有效值。绝缘子击穿试验在油中进行。如前所述，根据绝缘子本身内外绝缘配合的要求，绝缘子击穿电压约为其干闪络电压的 1.5 倍。

## 三、线路绝缘子的耐受电压

绝缘子的耐受电压是表示在耐压试验时绝缘子不发生破坏性放电或闪络概率小于规定值的电压值。耐受电压的规定值称为额定耐受电压。

### 1. 额定短时工频耐受电压

指按规定的条件和时间（通常不超过 1 min）进行试验时，绝缘子耐受（不发生破坏性放电）的工频正弦电压规定值（有效值）。又分为工频干、湿耐受电压。耐受试验在规定的干燥、淋雨条件下，按规定的速度升压至规定的电压值保持 1 min，绝缘子不发生闪络或绝缘体击穿，然后迅速降低并退掉电压（不应突然截断电源）。试验时所加试验电压应是额定耐受电压按式 (2-1) 和式 (2-2) 进行校正后的电压（见国家标准 GB775.2-87《绝缘子试验方法》）。

工频或操作冲击湿耐受试验电压

$$U = U_0 K_d \quad (2-1)$$

工频、雷电或操作冲击干耐受试验电压

$$U = U_0 \frac{K_d}{K_h} \quad (2-2)$$

式中  $U_0$ ——额定耐受电压（标准大气条件下）；

$U$ ——试验时应施加的电压，即耐受试验电压；

$K_d$ ——空气密度校正系数；

$K_h$ ——空气湿度校正系数。

### 2. 冲击耐受电压

指在规定的试验条件和标准冲击波形下闪络概率不超过规定值（10%）的冲击电压幅值。采用耐受程序试验时，施加 15 次冲击波，若闪络次数不超过 2 次，则所加电压即为冲击耐受电压。当采用 50% 闪络程序用升降法试验时，如果 50% 闪络电压不小于规定的雷电冲击耐受电压的  $\frac{1}{1-1.3\sigma} = 1.040$  倍（标准偏差  $\sigma = 0.03$ ），操作冲击耐受电压的  $\frac{1}{1-1.3\sigma} = 1.085$  倍（ $\sigma = 0.06$ ）时，则认为耐受试验通过。试品经试验后不应有击穿、损坏（瓷件表面有轻微放电痕迹或出现胶装物等小碎片不算损坏）。冲击耐受电压应等于或高于额定冲击耐受电压。进行冲击耐受电压试验时，试验电压也应进行大气条件校正，计算公式见式 (2-1)、式 (2-2)。

对于悬式绝缘子串，当电压为 330 kV 及以上时，应给出雷电全波冲击耐受电压和操作



冲击湿耐受电压；220 kV 及以下时应给出雷电全波冲击耐受电压和工频 1 min 湿耐受电压。

#### 四、线路绝缘子的机械性能和机电联合性能

##### 1. 针式绝缘子、瓷横担绝缘子的抗弯强度

针式绝缘子和瓷横担绝缘子在运行中承受的机械负荷主要是弯曲负荷，所以用弯曲破坏负荷来衡量其抗弯机械强度。绝缘子按规定的安装方式安装并按规定的方式和速率施加负荷，试品破坏时的负荷值即为其弯曲破坏负荷。试验时，绝缘子的安装方式与其运行时的安装方式基本相同，施加的负荷（用钢索套在绝缘子线槽上加力）应通过试品的轴线并与其轴线垂直；施加负荷的方式是：平稳无冲击地把负荷由零增加到规定的弯曲破坏负荷的 75%，之后以每分钟为规定弯曲破坏负荷的 30%~60% 的速率升高，直至试品破坏。对于带钢脚的针式绝缘子或对单独钢脚进行试验时，在规定的负荷下，轴线的变形偏移角度不应超过 5°，其变形量  $f$  按下式计算

$$f = htg\alpha \quad (2-3)$$

式中  $h$ ——力臂；

$\alpha$ ——偏移角。

##### 2. 悬式绝缘子的抗拉强度

悬式绝缘子运行中主要承受拉力，用拉伸破坏负荷来衡量其抗拉强度。绝缘子按近似正常使用情况安装在试验机上，使试品承受纯粹拉伸负荷，并按规定的速率升高负荷至试品破坏，破坏时的负荷即为拉伸破坏负荷。

##### 3. 盘形悬式绝缘子的机电联合强度

盘形悬式绝缘子在运行中其瓷件头部既承受较强的机械力，又承受较高的电压。在机电联合作用下，当机械负荷达到一定值时，瓷件头部可能产生微小的裂纹。此时瓷件虽不致发生机械损坏，但可能在电压作用下发生电击穿而导致绝缘子损坏。为此，用机电破坏负荷来衡量其机电联合强度。

洁净干燥的试品与加强的悬式绝缘子相串联安装在试验机上，试品与试验机连接的一端接地。对试品先施加工频电压，其值等于绝缘子工频击穿电压值的  $\frac{1}{2}$ ，然后按规定的速率升高拉伸负荷，直到试品破坏为止。破坏时的拉伸负荷即为其机电破坏负荷。试品破坏指出现能够观察到的破坏现象（如帽、脚的破坏等，此时一般看不到瓷件的破坏）、击穿或试验机指针停止不前等。

对盘形悬式绝缘子而言，这一性能比单独机械拉伸破坏负荷更为重要。

##### 4. 盘形悬式绝缘子的 1 h 机电负荷

试验时，绝缘子的安装方式与机电破坏负荷试验时相同。先以均匀而无冲击的速率将拉伸负荷升高至规定值，然后施加工频电压（为工频击穿电压的  $\frac{1}{2}$ ）。在此机械和电负荷下保持 1 h，如果试品不损坏、不击穿，则所加的拉伸负荷即为绝缘子的 1 h 机电负荷。一般，绝缘子的 1 h 机电负荷约为其机电破坏负荷的 75%。悬式绝缘子的机械安全系数是用 1 h 机电负荷（不是机电破坏负荷）与最大使用负荷的比值来表示的，这与其它设备有些不同。