



第三讲 高电压下固、液 体介质的绝缘特性

严 璋 冯允平

(西安交通大学)

当前国内外使用的各种高压电力设备(如变压器、互感器、电缆、电容器等),其外绝缘与输电线路一样,除了用瓷绝缘外,主要是靠气体绝缘,而内绝缘却可用液体和固体绝缘,因为气体耐电强度低,散热能力差。例如,同样电压等级、同样容量的电力变压器,从干式改用浸变压器油(油浸式)时,尺寸可大大减小,性能显著改善,所以充油式,特别是油浸纸及油浸塑料薄膜绝缘已广泛用于各种高压电力设备中。

一、液体介质的绝缘特性

目前最常用的液体介质主要是从石油中提炼出来的碳氢化合物的混合物——变压器油、电容器油、电缆油等,但由于矿物油的介电系数低、有爆炸危险等,国内外也正研究将硅油、十二烷基苯等绝缘介质用于高压电力设备。

1. 液体介质的击穿过程

液体或固体介质在外电场作用下,内部会产生极化、流有泄漏电流,并引起损耗发热(在交流下的损耗发热比直流下大得多)。

如果外施电压不太高时,通常不会引起固体介质的迅速损坏。只有当电场强度或外施电压超过某临界值(这与材料性能等有关)时,电流就跃增,使介质中形成导电通道而丧失绝缘性能——即介质的击穿。液体介质象气体介质那样,在击穿后如去掉外施电压,能自己恢复绝缘性能。

极纯液体介质的击穿过程与气体的火花放电相类似:由电场所加速的电子碰撞液体分子而产生碰撞游离,最后导致击穿。

极纯液体介质的击穿场强(耐电强度)虽然很高,但其精制提纯极其复杂,而在设备制造过程中又难免有杂质重新混入,在运行中又因液体介质老化而分解出气体和聚合物,所以实际在工业中采用的液体介质中总多少含有一些杂质。

含有杂质的液体介质的击穿过程,往往是由于液体中的气体(原来存在的、杂质或油分解出的)发生击穿而引起的;因为在交流电压下,串联介质中电场强度 E 的分布与各介质的介电系数 ϵ 成反比,这样使气泡中的场强将为变压器油中场强的2.2倍($E_{气}/E_{油} = \epsilon_{油}/\epsilon_{气}$, $\epsilon_{气} = 1$, $\epsilon_{油} = 2.2$),但气体的耐电强度却比油低得多,所以气泡先开始游离,使气泡温度升高,体积膨胀,游离将进一步发展;

而带电粒子又撞击油分子，使油也分解出气体，又扩大了气体通道；如游离的气泡在电场中堆积成气体“小桥”，由于气体的耐电强度比油小得多，击穿就可能在此气体通道中发生。

油常受潮而含有水份，再加上纸或布中纤维的脱落，这样，水滴、纤维、特别是含潮的纤维，它们的介电系数都很大 ($\epsilon_{水} = 81$ 、 $\epsilon_{纤} = 6 \sim 7$)，很容易沿电场方向极化定向，排成杂质的“小桥”。如此桥贯穿电极间 (如图 1、a) 示)，由于水份及纤维等电导大，引起泄漏电流增大，发热增多，促使水分汽化，气泡扩大；即使纤维未贯穿间隙 (如图 1 b) 所示)，在此杂质端部的油中电场强 E_A 也将显著增高 (油与纤维相串联，而 $\epsilon_{纤} > \epsilon_{油}$ ，纤维占了距离，但在其上压降低)，而且杂质将使电场不均匀化，这都会使油易游离而分解出气体，气泡增大、游离增强，如同前面所讲，也可能最后仍在气体通道中击穿。

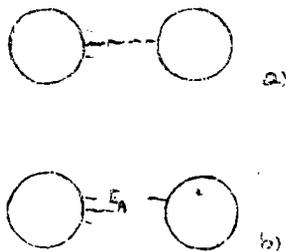


图 1 含潮纤维在电极间定向示意图

- a) 形成“小桥”；
- b) 未形成“小桥”

2. 液体介质的击穿电压

电场愈均匀，杂质对液体介质的击穿电压的影响就会愈大。通常给出的变压器油的击穿电压数据，常是指其平均值。各种电极布置的变压器油工频击穿电压与距离关系的典

型曲线如图 2、3 所示。工频击穿电压的分

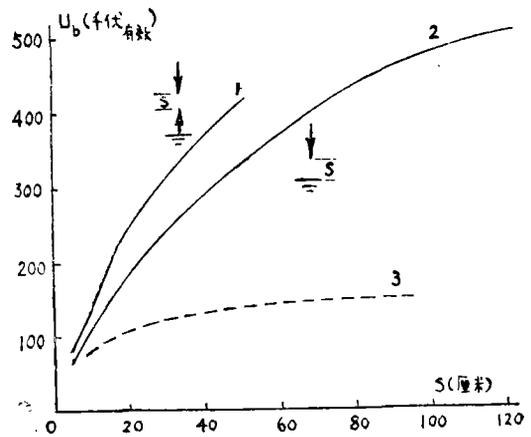


图 2 工频下，不均匀电场中变压器油的击穿电压 U_b (曲线 1、2) 或电晕电压 (曲线 3) 与电极间距离 S 的关系

散性在极不均匀电场中常不超过 5%，而在均匀电场中可达 30~40% (参看图 3)。

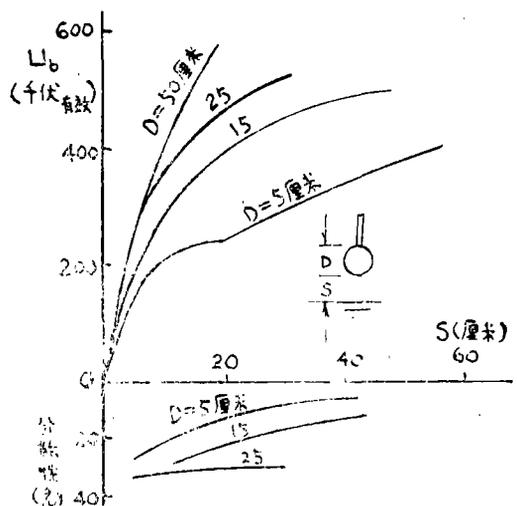


图 3 变压器油工频击穿电压及最大分散性与距离的关系 (油质 45 千伏/2.5 毫米)

当油间隙很小时，与气体短间隙相似，碰撞游离不易发展，击穿场强显著提高，参

看图 4。

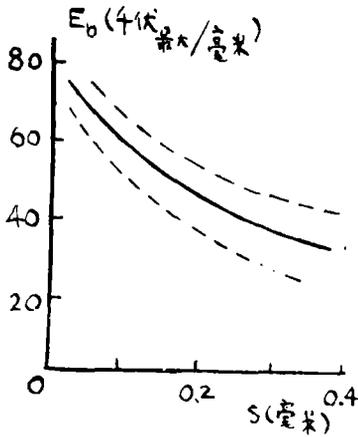


图 4 均匀电场中，油层的工频击穿场强(E_b)与油层厚度(δ)的关系

冲击电压下，不均匀电场及均匀电场中油间隙的击穿电压曲线可参看图 5 及图 6。

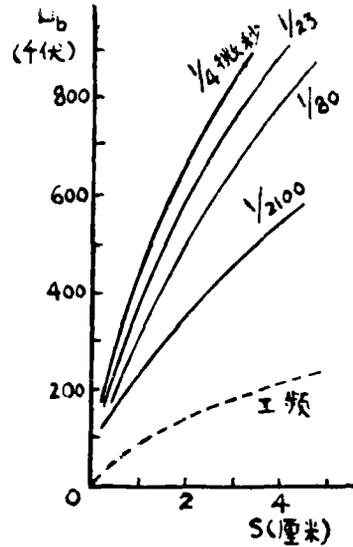


图 6 冲击全波下 $\phi 50$ 两球间变压器油的击穿电压与距离的关系

3. 影响液体介质击穿电压的主要因素

气体和水分如系溶解于液体介质中，则对耐压影响不大；如呈悬浮状态，则如前所述，将形成“小桥”等而使击穿电压显著下降；如图 7 所示，当油中含水仅十万分之一时，就使耐压大大下降；含水再多，也不过增加几条击穿的并联路径而已（水多了还会沉淀下来），击穿电压已不再继续下降。当

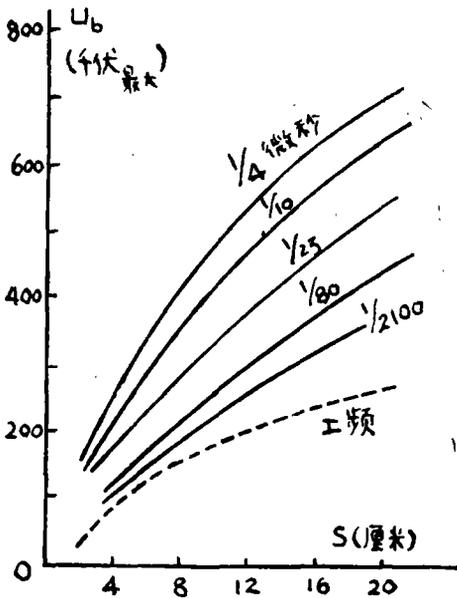


图 5 冲击全波下棒-棒间变压器油的击穿电压与距离的关系

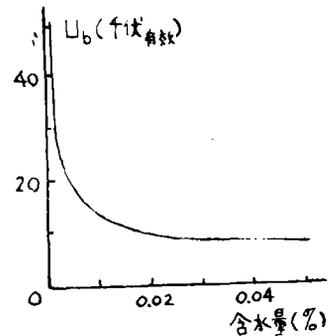


图 7 在标准油杯(间距 2.5 毫米)中，变压器油的工频击穿电压和油中含水量的关系

有纤维存在时,水分的影响特别明显,如图8所示。在不均匀电场中,杂质对耐压的影响较小,因场强高处先发生的局部放电使油发生扰动,杂质已不易形成“小桥”。对于冲击击穿电压,杂质的影响也较小,因在冲击下杂质还来不及形成“小桥”。

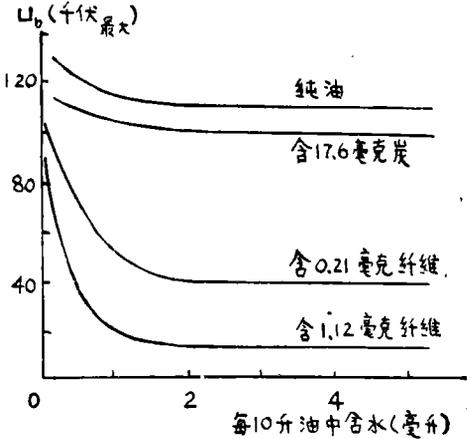


图8 水分、杂质对变压器油击穿电压的影响

我国试油用的标准油杯电极的尺寸如图9:平板电极间电场均匀,因而油中稍有受潮、含杂,耐压就明显下降。规程规定用来灌注高压电力变压器等的变压器油,要求它在此标准油杯中的耐压在25~40千伏以上(与设备的额定电压有关);如用来灌注高压电缆和电容器时,常要求油在标准油杯中的耐压在50或60千伏以上。

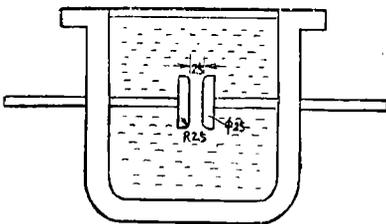


图9 标准油杯(绝缘外壳,黄铜电极)

油的击穿电压与温度也有关系,在0~60℃范围内,受潮的液体介质随着温度的

增加,击穿电压常明显上升(如图10及图11b),这这是由于油中悬浮状态的水分随着温度升高转变为溶解状态的缘故。受潮的变压器油在温度较高时击穿电压还可能出现最大值;如图11曲线b,在60~80℃时耐压最高,这是因为温度更高时,油中所含的水分汽化增多,使击穿电压下降。

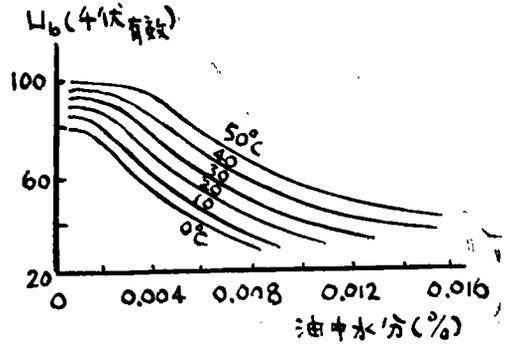


图10 烷基苯液体介质的工频击穿电压与所含水分及温度的关系(φ12.5球电极间,间距2.5毫米)

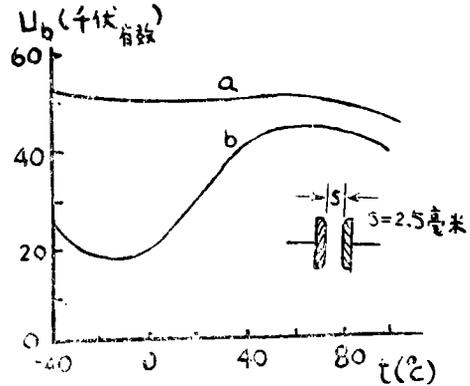


图11 标准油杯中变压器油工频击穿电压与温度的关系
(a—干燥的油, b—潮湿的油)

由于加上电压后,油中的杂质渐聚集到电极间或者是介质的发热等都需要一定时间,所以油间隙的击穿电压会随着加电压时间的增加而下降,如图12。当液体的净度和温度提高时,电压作用时间对击穿电压的影

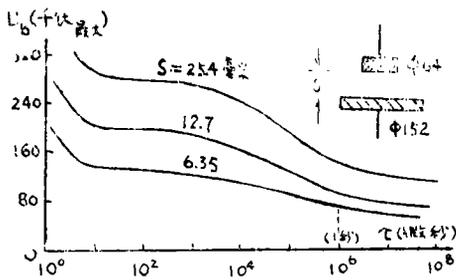


图12 变压器油的击穿电压和作用时间的关系

响减小。而长时间工作后，油的击穿电压缓慢下降，这常常是由于油老化、变脏的结果。当油不太脏时，一分钟耐电强度和较长时间的强度相差不大，因而工频耐压试验时一般只加电压一分钟。

在冲击电压作用下，变压器油的伏秒特性(冲击下击穿电压与电压作用时间的关系)可参看图13。

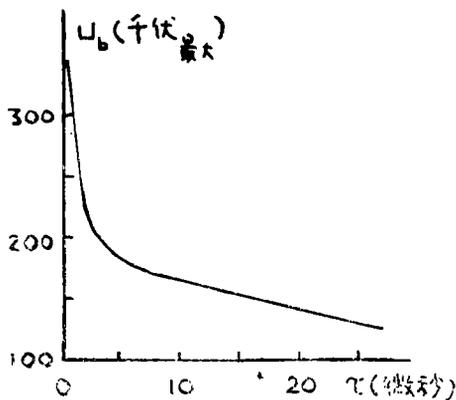


图13 变压器内油道(6毫米宽)的冲击伏秒特性(匝绝缘0.45毫米)

大，所以应设法除去杂质(如过滤、脱气等)，或设法减少杂质的影响(如用油——屏障绝缘)。

过滤可除去油中水分、纤维、有机酸等杂质。在用滤纸过滤以前也可在油中先加入吸附能力很强的吸附剂，如白土、硅胶，以吸去油中大量杂质。在运行过程中也常用过滤的方法来恢复油的绝缘性能。

对于那些在运行中处于密封状态(与大气隔绝)的内绝缘，如高压电容器、电缆等，在制造过程中，绝缘件不仅事先经过烘干、抽以真空，而且在真空下灌油。对于象变压器、互感器等油浸电力设备，除了在制造过程中要除去水份、杂质外，在运行过程中也应尽量减少大气的影：例如采用油枕、装上带干燥剂的呼吸器、充氮保护、塑料隔膜保护等措施。

常用的液体介质不可避免地会含有些杂质，为了减小杂质的影响、提高油间隙的击穿电压，常用油——屏障绝缘，如覆盖层、绝缘、屏障等。

在不太均匀电场里那个曲率半径较小的电极上，常覆盖以薄电缆纸或黄腊布、或涂以漆膜(对称电极时，两个曲率半径小处都包)如图14a)所示。这层覆盖虽然很薄(零点几毫米以下)，但它限制了泄漏电流，阻止了杂质“小桥”的发展，使工频下击穿电压显著提高，分散性明显降低：例如在均匀电场中耐压可提高70~100%，在极不均匀电场中也可提高10~15%。因此在充油电力设备里极少采用裸导体。

如图14 b)那样，在不均匀电场曲率半径小的电极上包缠以较厚的电缆纸(或黄腊

4. 减少杂质影响的措施

既然杂质对油间隙击穿电压的影响较

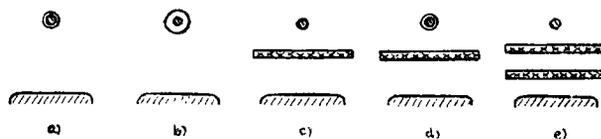


图14 油屏障绝缘

- a) 覆盖
- b) 绝缘
- c) 屏障
- d) 覆盖加屏障
- e) 多重屏障

布)等固体绝缘层(常称为“绝缘”),它不但象覆盖那样可减小油中杂质的有害影响,而且这几毫米厚的绝缘层承担电压,使油中最大电场强度降低,大大提高了整个间隙工频和冲击击穿电压。例如:变压器引线对箱壁间的油间隙为100毫米时,当引线包以3毫米绝缘层后,击穿电压较裸线时可提高一倍左右。变压器中某些线饼或静电板上加包以较厚的绝缘层、充油套管中铝箔上包的绝缘层也都是这个道理。

如图14c)那样,在油间隙中放以尺寸较大(要与电极形状相适应)、厚度常为1~3毫米的纸质或胶木屏障(或称隔板、极间障),它既能阻止杂质“小桥”的形成,而且象气体介质中那样,当电极曲率半径小处(如图15中A处)先发生游离后,离子积聚在屏障一侧(如图15中B B'侧),使屏障与另一电极(如图15中C C')间的电场变得均匀了。所以极不均匀电场中屏障的效果最显著:如图15中,当 $\frac{a}{S} \leq 0.4$ 时,工频击穿电压可达无屏障时的2倍或更高。稍有些不均匀的电场中(例如110或220千伏油浸电力变压器绕组和箱壁间),采用屏障也比无屏障时提高耐压约25%以上。所以充油套管、多油断路器、变压器等充油设备中都广泛采用油——屏障绝缘。

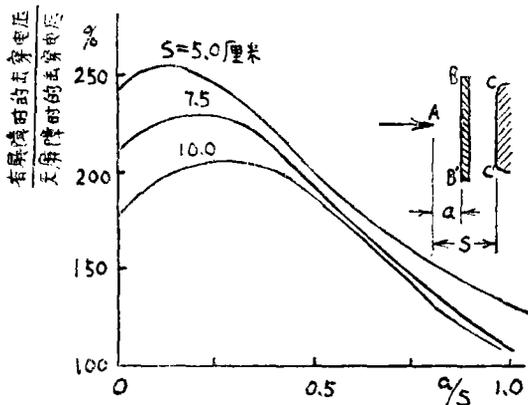


图15 极不均匀电场中,屏障对油间隙工频击穿电压的提高作用

如将油间隙用多重屏障(图14中e)所示)分隔成多个较短的油间隙,则由于分隔愈多,间隙就愈短,击穿场强愈高(参看图16)。但细而长的油间隙中,油的流动困难,将不利于散热,例如变压器的轴向油道一般不宜小于6毫米左右。多重屏障时整个间隙的最小击穿电压可用下式进行近似计算:

$$U_{\text{最小}} = E_{\text{油、最小}} (\Sigma S_{\text{油}} + \frac{\epsilon_{\text{油}}}{\epsilon_{\text{纸}}} \cdot \Sigma S_{\text{纸}})$$

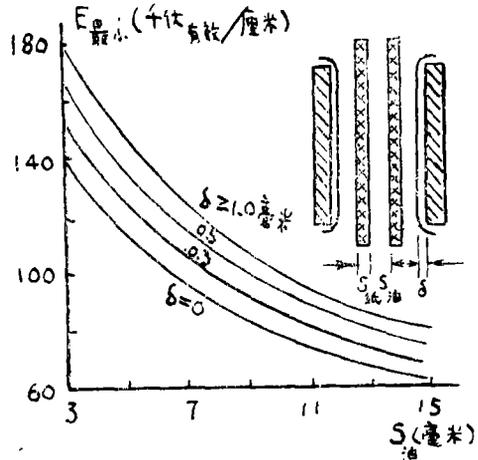


图16 包以不同厚度 δ 的绝缘层时,油层的工频最小击穿场强与该处油间隙距离S的关系

式中 $\Sigma S_{\text{油}}$ 、 $\Sigma S_{\text{纸}}$ 分别为油隙及纸层的总厚度; $\epsilon_{\text{油}}$ 、 $\epsilon_{\text{纸}}$ 分别为油及纸的介电系数;而从图16可根据最大场强所在处的油隙距离查得 $E_{\text{油、最小}}$ 。

5. 油中沿面放电

在液体介质中也经常发生沿着固体介质的闪络,其规律性与气体中的沿面放电很相似(参看第二讲“四”)。

当电极如图17那样布置,即电力线与分界面几乎平行时,随着电极间距离的增大,油中闪络电压增长较快,这时改善电场的作用也明显(在实际结构中还应改善

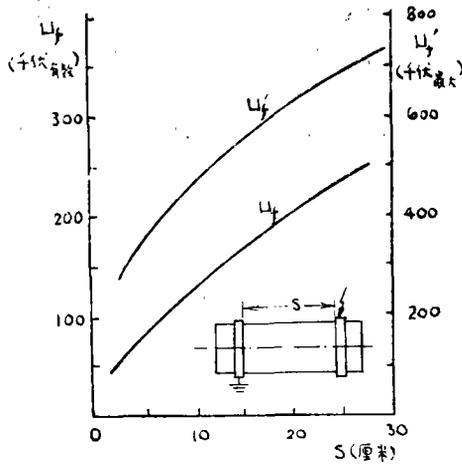


图17 变压器油中沿纸筒的工频闪络电压 U_f 及全波下冲击闪络电压 U'_f 与电极间距离的关系

电极形状以防止油中电晕的过早产生)；此时油中工频闪络电压和纯油间隙的击穿电压相近，而冲击闪络电压低于纯油间隙的击穿电压。另外，吸潮后沿面放电场强将下降，如图18所示。

中发生沿面滑闪放电那样，由于电场强度不仅有沿面（切线）分量，且有较强的垂直于分界面的法线分量，使闪络容易发展，闪络电压显著下降。这时随着电极间距离 S 的增大，油中闪络电压增加很少。所以高压套管在油中的部分也靠均压极板进行均压，使沿下瓷套表面的轴向场强也尽可能均匀些，以提高其电晕及滑闪放电电压。

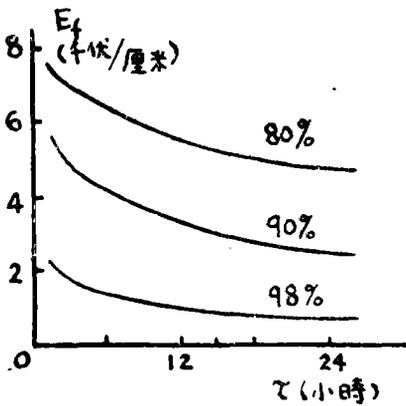


图18 油浸纸绝缘在工频电压下当相对湿度不同时（曲线上所注），油中沿面放电场强与潮湿空气中暴露时间的关系

当电极如图19中曲线2附图那样布置，即电力线有可能与分界面斜交时，犹如气体

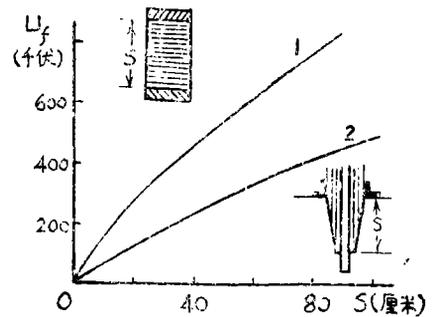


图19 工频下油中沿面闪络电压与电极间距离的关系

曲线1 电力线与分界面平行；
曲线2 电力线与分界面斜交。

二、固体介质的绝缘特性

1. 固体介质的击穿过程

固体介质的击穿常见的有电击穿、热击

穿及电化学反应等形式。固体介质击穿后，出现烧焦或熔化的通道、裂缝等，即使去掉外加电压，也不象气体、液体介质那样能自己

恢复绝缘性能。

电击穿——固体介质中有少量处于传导带的电子，在足够强的外施电场作用下，它将与晶格上的原子（或离子）碰撞而产生游离，使传导电子增多；这些电子再与原子（或离子）碰撞游离，如此发展下去，犹如气体中碰撞游离那样，传导电子迅速增多，电流猛增，最后导致介质击穿。电击穿的特点是：电压作用时间很短就发生了击穿、击穿电压高、电介质温度不高，电击穿时击穿场强与电场均匀程度有着密切关系，而与周围温度的高低及电压作用时间的长短等几乎无关，参看图20、图22、图23等。

热击穿——交流电压下，如果介质损耗等所产生的热量来不及散逸，将使介质温度升高；而随着温度的上升，介质损耗及发热往往更多，如果出现热不平衡（当发热总量大于散热时），会导致温度不断升高，使介质局部熔化、烧焦或烧裂，也就是出现了热击穿。它的特点是：随着外施电压作用时间的增长，击穿电压就下降；介质温度（特别是局部的温度）高；随着周围温度的升高，热击穿电压降低（参看图23），但与电场的均匀程度关系不大。

电化学击穿——高压电力设备的固体介质内部或电极边缘常存在着气泡（这些气泡是在制造或运行过程中产生的），在较强的外施电压作用下，由于气泡介电系数比固体介质小，因而在气泡上分配到的场强高，但气泡的击穿场强却低于固体介质，这样气泡先发生游离（局部放电），它所形成的带电粒子撞击固体介质，并引起损耗发热，形成臭氧和二氧化氮等氧化剂。对于有机介质，在这样的电、热、化学等的综合作用下，很容易引起损伤、劣化，最终导致击穿。即使对于陶瓷等无机介质，也有可能因游离所引起的局部强烈发热而出现裂缝。由于电击穿通常是在长期电压作用下逐步发展而成的，它与介质本身的耐游离性能、制造工

艺、工作条件等都有密切关系。电击穿时的击穿电压通常要比电、热击穿时的击穿电压更低，这就很值得我们注意。例如超高压绝缘结构中，长期工作电压下（有时还同时存在有较大机械或发热负荷下）的击穿特性经常起着决定性的作用。

2. 影响固体介质击穿电压的主要因素

电压作用时间：若在外施电压作用时间很短时（如 $\frac{1}{10}$ 秒以下等），固体介质就被击穿，那就很可能是电击穿，因为时间太短，热、化学等影响还不明显。当交流电压作用时间较长时（如几分钟到数十小时）击穿

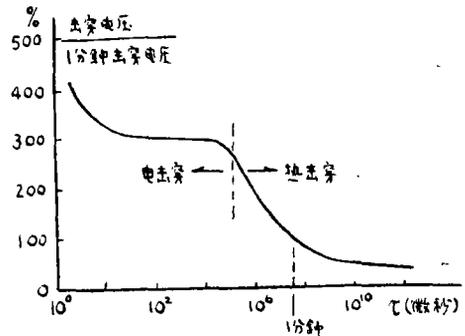


图20 油浸电工纸板的击穿电压和加电压时间(τ)的关系

的，则热击穿往往起决定性作用（还要看介质损耗的大小和散热条件的好坏）。有时也很难分清。如在常用的交流1分钟耐压试验中被击穿时，就会具有电和热的联合作用。如系电压作用时间很长（从几十小时到几年）时击穿的，则大多属于电击穿范围。欲要明确区分，还应根据击穿时的现象和介质的情况来具体分析，不能仅以加电压时间的长短来衡量。图20中以常用的油浸电工纸板为例，如其1分钟工频击穿电压（幅值）作为100%，则在雷电等冲击下的击穿电压约达300%，且在较宽的时间范围内击穿电压与电压作用时间几乎无关，只有

在外施冲击电压时间极短(小于微秒级)时,击穿电压又升高,这与气体中火花放电电压在极短冲击电压下放电电压会升高的原因相似(因外施电压的时间已与放电时延相近了)。在长期工作电压下击穿电压仅为工频1分钟时的几分之一,说明由于游离放电对介质的损害而出现了电化击穿。对于很多有机介质,虽其短时耐电强度很高,但由于其耐游离性能很差,长时耐电强度就很低。如图21中号称“塑料之王”的聚四氟乙烯,它耐热可达180℃,短时耐电强度也高,但由于耐游离性能差,在长期的放电作用下会迅速老化,这也是不少有机介质的普遍规律。在不可能用浸油等方法消除游离放电的绝缘结构中,例如高压电机里,就需采用耐游离放电的云母等无机材料,并配以玻璃丝带为补强材料。

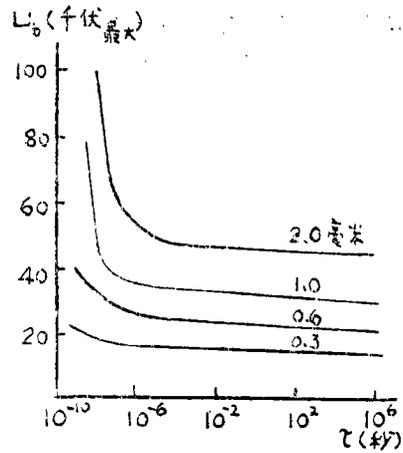


图22 不同厚度玻璃的击穿电压与电压作用时间的关系(浸在变压器油中试验)

难, $t^{\circ}\text{C}$ 就可能出现在更低温度处,即在周围温度较低时就出现热击穿。

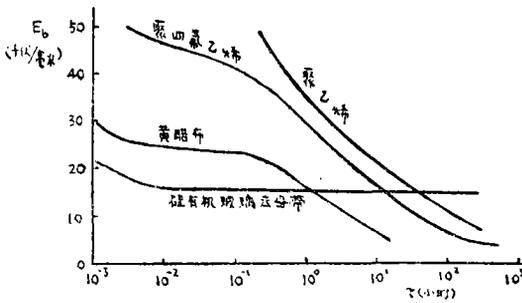


图21 常用固体介质在较长时间电压作用下击穿场强的下降情况

因为在无机介质(如云母、电瓷、玻璃)中,如散热条件好、介质损耗又不大时,主要为电击穿,击穿电压与加压时间关系不大;仅在冲击电压下,伏秒特性曲线有所上翘(参看图22)。

温度: 如图23所示,温度在某 $t^{\circ}\text{C}$ 值以下时,固体介质的击穿场强很高而且与温度几乎无关,属于电击穿;在 $t^{\circ}\text{C}$ 以上时,周围温度愈高、散热条件愈差,热击穿电压就愈低。不同材料此转折温度 $t^{\circ}\text{C}$ 是不同的,即使同一材料,如果材料愈厚、散热愈困

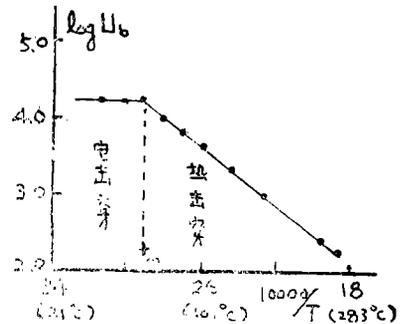


图23 1毫米厚的玻璃在工频下的击穿电压 U_b 与绝对温度 T 的关系(括号内为摄氏温度)

电场均匀程度: 均匀致密的固体介质处于均匀电场中,其击穿电压往往较高,而且与介质厚度的增加近似呈直线性关系(参看图24中曲线1和2);如在不均匀电场中,则随着介质厚度的增加,电场更不均匀,击穿电压已不随厚度直线上升了,这时击穿电压和电场分布的不均匀程度有关。当厚度增加、散热困难到可能出现热击穿时,增加厚度的意义更不大。

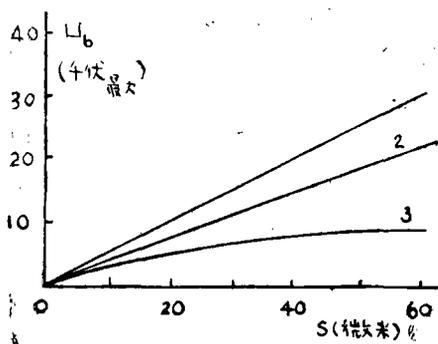


图24 聚酯薄膜在室温下击穿电压与厚度的关系：1) 直流、均匀场；2) 交流、均匀场；3) 交流、不均匀场。

常用的固体介质往往不很均匀致密，即使处于均匀电场中，由于气孔或其他缺陷都将使电场畸变，最高场强常是集中在缺陷处，如气体中先产生局部放电（游离），也会逐渐损害到固体介质。所以如纸、纸板、布等固体介质，经过干燥、浸油等工艺过程让矿物油充满了空气隙，则允许工作场强可明显提高。

电压的种类：同一介质、同一电极布置时，其交流、直流、冲击下的击穿电压往往也是不相同的：冲击下击穿电压和交流击穿电压（幅值）之比称为该介质的冲击系数，介质在冲击电压下的击穿电压常大于工频下的击穿电压（例如图20所示），即其冲击系数常大于1，而固体介质在直流下的耐压也常比交流（幅值）要高得多，这是因为直流下固体介质中损耗小，局部放电也弱的缘故。

当加以高频电压时，由于游离更强、介质损耗更大和因而引起的发热严重，或是更容易发生热击穿，或是由于局部放电、化学变化、发热等损伤绝缘，使老化加速电化击穿提前到来。

累积效应：在不均匀电场中，特别是在雷电等冲击电压作用下，有时外施电压虽已较高，并已发生局部性放电，但由于加电压时间短，还未形成贯穿的击穿通道，仅在固

体介质中形成局部损伤或不完全击穿。在多次冲击电压作用下，一系列的不完全击穿将导致介质的完全击穿，所以随着冲击电压的次数增多，固体介质的击穿电压将下降。在确定电气设备的试验电压和试验次数时都须注意到此累积效应。

受潮：绝缘材料受潮后击穿场强的下降程度与该材料的性能有关：对于不易受潮的材料，如聚乙烯、聚四氟乙烯等中性介质，受潮后耐压仅下降一半左右；但对于容易受潮的极性介质，如棉、纸等纤维材料，受潮后的耐压可能仅为干燥时的数百分之一。所以高压绝缘结构不但在制造时要注意除去水分，在运行中还要注意防潮，并定期检査受潮情况。

机械负荷：有些绝缘结构在运行中可能迁到较大的机械负荷，当材料出现开裂或微观裂缝时，击穿电压将显著下降。例如悬式绝缘子在出厂前常经过机电负荷联合试验的考验，就能更易于暴露瓷件中的缺陷。

不少有机固体介质在长期运行中，因热、化学等作用已渐渐发脆，迁到较大的机械应力（如短路力等）就可能裂开或松散，如在这些裂缝中充有污物或受潮后，击穿电压下降更多。

在运行中，由于长期较高温度的作用，绝缘材料、特别是纸、布纤维、塑料等有机绝缘材料很容易老化变脆、丧失弹性、机械强度剧烈下降，这时也就不能再当作绝缘材料用了。按绝缘材料的耐热性能的高低，常将它们分成O、A、E、B、F、H、C等不同的耐热等级。例如油浸变压器中常用的矿物油与纸（纸板、布等）组合的油纸绝缘属于A级；高压电机定子绕组用的沥青云母带绝缘属于B级；干式变压器中常用的玻璃纤维、硅有机漆等属于H级。它们在不同温度下的热寿命如图25所示，同一绝缘材料如果长期在较高温下运行，就易老化，即热寿命愈短。所以电力设备要注意散热、避免

长期过负荷运行。

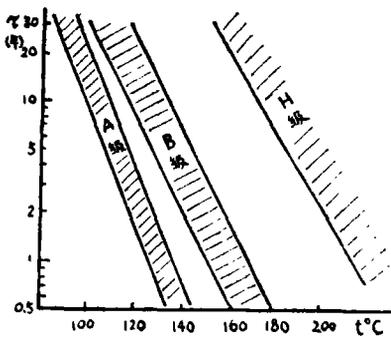


图25 不同耐热等级的绝缘材料在各种运行温度下长期运行时的热寿命

3. 油纸绝缘的击穿电压及影响因素

前面在液体介质中已讲到油——屏障绝缘的优点。如果采用一个接一个的屏障，即用包缠或迭合而成的密集纸层，再经过浸油（或真空浸油）而成的油纸绝缘，则由于纸纤维在油中起了屏障的作用，而油又填充了纸中的空隙，所以耐电强度很高，特别是其短时耐电强度可达100千伏/毫米以上（参看图28等）。如今在高压设备中已广泛采用油纸绝缘。

油纸绝缘的击穿过程如同一般固体介质那样，也可分为短时电压作用下的电击穿、稍长时间作用下的热击穿以及更长时间电压作用下的电化击穿。由于油纸绝缘（包括油塑料薄膜绝缘、以及胶纸套管中的胶纸绝缘等）短时间耐电强度很高，但这些有机介质耐游离（局部放电）性能常都很差，因此

除了有些因材料的介质损耗大或绝缘过厚而散热困难等出现热击穿外，更为突出的是油纸绝缘在长期电压作用下的击穿场强远较短时的为低，在制造、运行中都应予以注意。

影响油纸绝缘击穿电压的因素主要有：

电压作用时间：油纸绝缘的短时及长时耐电强度既然相差很大，为确保质量，通常先制成一批试样，以确定其耐电强度（E）与加电压时间（ τ ）的关系（寿命曲线），它一般具有下列形式：

$$E = A_0 + \frac{B_0}{\sqrt[n_0]{\tau}}$$

式中 A_0 、 B_0 、 n_0 为因材料、工艺而异的常数。我国在模拟电缆上进行了多次较长时间下的耐压试验后，绘出该结构在工频下的寿命曲线如图26，从中就可分别求得以上各常数如下表所示：

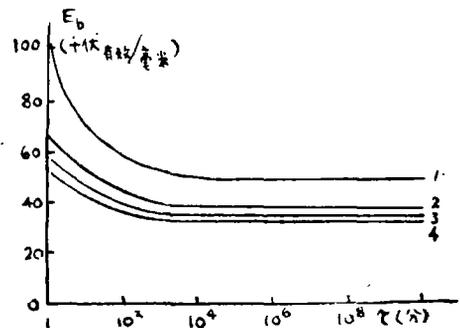


图26 油浸电缆纸在工频下的寿命曲线（除曲线4为6层纸外，曲线1~3均为9层纸；每隔3层都有一个 1.5×10 毫米的模拟间隙

可见每层纸的厚度增加时，如前所述，击穿场强显著下降。根据这个寿命曲线中的

图 26 中曲线	每层纸厚 (微米)	短时耐电强度E (千伏有效/毫米)	很长时间下耐电强度 $E_{\tau \rightarrow \infty}$ (千伏有效/毫米)	A_0	B_0	n_0
1	14	94.4	49.1	49.1	55.2	2.6
2	45	66	38.2	38.2	25.2	1.6
3	75	60	34.7	34.7	21.3	1.4
4	125	55.8	33.4	33.4	16.8	1.2

$E_{\tau \rightarrow \infty}$ 值，加上一定安全裕度就可决定此种电缆的允许长期工作的场强值（由于试样的电极面积小，而实际电缆中电极面积大，介质中弱点、缺陷出现的机会增多，击穿场强也会低些）。

油纸绝缘在直流下的耐压常为交流（幅值）的 2 倍以上，这是因为局部放电、损耗等都是交流下严重得多。每层纸厚在 0.02 毫米以上的油纸绝缘中，其雷电冲击和操作波下耐电强度具有相同的水平，而且随着纸厚增加而下降的趋势也相近。冲击电压下的伏秒特性可参看图 27。

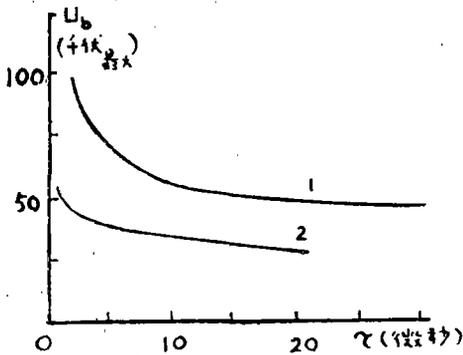


图 27 油纸绝缘在冲击电压下的伏秒特性（试样为 $\phi 0.51/0.55$ 聚酯漆包线包以电缆纸的线卷绝缘，曲线 1、2 分别为包有 9 及 4 层 0.12 毫米电缆纸）

介质厚度：每层纸的厚度不变，增加层数，即电极间距离增大时，一方面由于纸中弱点（导电点、孔隙等）重合的机会减小而使击穿场强提高；另一方面，极间距离增大后，边缘效应及散热问题都严重起来，使击穿场强下降。因而电容器元件的极板间常用几层 8~12 微米电容器纸迭成，极间距离在 70~90 微米时其短时耐电强度最高（参看图 28）。如今在电力电容器中一般常采用这个厚度作为每个元件的极间距离；如果所需额定电压比这样一个元件的工作电压要高，则可用多个这样的元件串联而成。

从图 28 中也可看到，这样的极间总厚度，如果每层纸愈薄，即层数增多，则短时

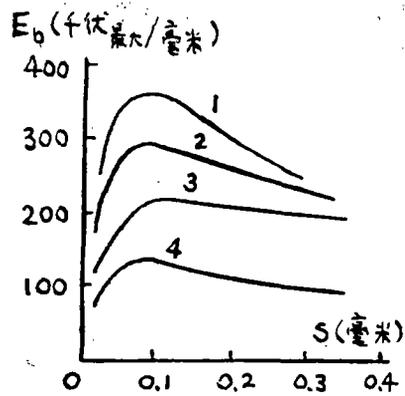


图 28 油浸电容器纸的短时击穿场强与极间纸厚 S 的关系

- 1——每层纸厚 8 微米，直流下
- 2——每层纸厚 12 微米，直流下
- 3——每层纸厚 15 微米，直流下
- 4——每层纸厚 12 微米，交流下

耐电强度增高。这也就是高压变压器等层间绝缘常用较薄的电缆纸包几层而不用一层厚纸的道理。

油压：在交流电压下油纸绝缘中的油层与气隙是薄弱环节（因它们的介电系数比纤维小，但耐电强度却比纤维低），所以充油后再提高油压，即可提高油纸绝缘的工频长期作用下的耐电强度。例如高压充油电缆中当油压从 1 提高到 15 公斤/厘米² 时，油浸电缆的长期耐电强度可提高一半左右（参看图 29）。

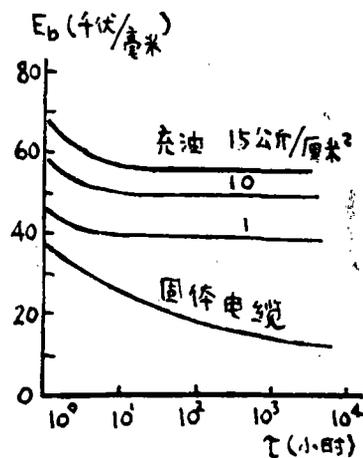


图 29 油浸电缆纸的耐电强度与工频下电压作用时间的关系

冲击或直流电压下,纤维层的击穿也将起重要作用,这时增加油压对耐压影响已不大。

温度:油的粘度随温度而变化,这要影响到短时耐电强度。例如粘度较大(在几百厘司以上),油中带电粒子运动困难,使击穿场强提高,但粘度大后,浸渍能力降低;而一般低粘度油(100厘司以下)在20~85℃下对短时击穿场强影响不大。至于长期电压作用下的耐电强度,则因温度高后可能出现热击穿或加速绝缘的热老化(如缩聚、裂解等)过程,而使其耐压下降。所以油纸绝缘需检查其介质损耗是否过大,在运行中要注意冷却等条件。

当外施电压频率很高时,由于局部放电、损耗发热都增加,油纸绝缘的耐电强度下降。例如当从50赫增加到1兆赫时,耐电强度下降一半左右。

温度过低,粘度增大,影响油的吸气性,甚至在介质内部收缩而形成气隙,使耐电强度显著下降。

局部放电:前面已讲到,局部放电对油纸绝缘的长期耐电强度是很大的威胁,通常先在气隙或极板边缘电场集中处的油层中先发生局部放电(游离),以后逐渐扩大。它对油浸纸(或塑料等)有着电、热、化学等腐蚀作用,十分有害。

为改善游离性能,提高油纸绝缘的长期电压作用下的耐电强度,可从改进浸渍剂的吸气性能、提高浸渍剂的介电系数等多方面着手。

因为在幅值很高、时间很短的过电压作用下,通常是允许油纸中发生少量游离并放出一些气体,但当过电压消逝后,希望此气体逐渐被油所吸收,这样就不会影响到游离

电压的下降,所以宜选用吸气性较好的油,并事先经过祛气处理。

在工作电压下油纸绝缘中一般是不允许发生游离放电的,即工作电压应低于游离熄灭电压,不然在长期工作电压下不断发生游离放电引起外壳膨胀(如电容器常发生铁壳膨胀大)和过早损坏。另外如改用硅油来浸渍时,其游离熄灭场强比矿物油为高。

纸的密度愈大,介电系数 ϵ 亦增大,分配在油层(或气隙)上的场强将增大,使整个结构的游离电压下降。如选用介电系数较小的纸(或塑料)、或选用介电系数较大的浸渍剂,就可减低浸渍剂(或气隙)中的场强,改善游离性能。氯化联苯的介电系数比矿物油大得多,用作电容器里的浸渍剂不但可提高单台容量,而且电场分布也较合理;但它有毒,我国早已行止生产,现正研制高介电系数的无毒介质。

如采用聚丙烯等薄膜,不但薄膜的介电系数比纸纤维低,电场分布较合理,而且由于薄膜比纸层少含导电杂质和小孔,工作场强可进一步提高。目前塑料薄膜还常与纸层间隔使用,因要纸层在其中起着“灯芯”作用,便于浸渍剂进入所有空隙处。

由此可见,无机固体介质(如电瓷、玻璃等)由于老化性能好、机械强度较高、又耐放电,目前在外绝缘中获得广泛应用。而油纸绝缘的短时耐电强度高、工艺性好,已在多种电力设备中用作内绝缘,但它的耐游离等性能差,因此随着电压等级的提高、限制过电压措施的改善,长期工作电压下的游离问题将日益突出。为了降低造价、确保安全运行,对绝缘结构的生产、维护、预防性试验等还需进行大量的工作。