

主要由电导引起，故温度对 $\tan \delta$ 值的影响与温度对电导的影响相似，即 $\tan \delta$ 随温度的升高而按指数规律增大，且 $\tan \delta$ 较小。

极性介质中，极化损耗不能忽略， $\tan \delta$ 值与温度的关系如图 1.10 所示。当温度 $t < t_1$ 时，由于温度较低，电导损耗与极化损耗都小，电导损耗随温度升高而略有增大，而极化损耗随温度升高也增大（黏滞性减小，偶极子转向容易），所以 $\tan \delta$ 随温度升高而增大。

当温度 $t_1 < t < t_2$ 时，温度已不太低，此时分子的热运动会妨碍偶极子沿电场方向作有规则的排列，极化损耗随温度升高而降低，而且降低的程度又要超过电导损耗随温度升高的程度，因此 $\tan \delta$ 随温度升高而减小。当温度在 $t > t_2$ 时，温度已很高，电导损耗已占主导地位， $\tan \delta$ 又随温度升高而增大。

2. 频率对 $\tan \delta$ 值的影响

频率对 $\tan \delta$ 值的影响主要体现于频率对极化损耗的影响。 $\tan \delta$ 与频率 ω 的关系如图 1.11 所示。在频率不太高的一定范围内，随频率的升高，偶极子往复转向频率加快，极化程度加强，介质损耗增大， $\tan \delta$ 值增大。当频率超过某一数值后，由于偶极子质量的惯性及相互间的摩擦作用，偶极子来不及随电压极性的改变而转向，极化作用减弱，极化损耗下降， $\tan \delta$ 值降低。

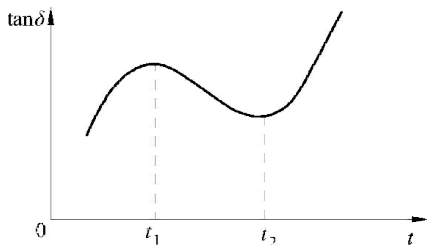


图 1.10 极性电介质 $\tan \delta$ 值与温度的关系

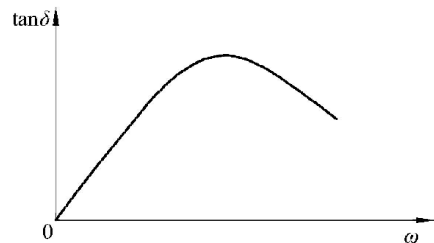


图 1.11 $\tan \delta$ 与角频率的关系

3. 电压对 $\tan \delta$ 值的影响

电压对 $\tan \delta$ 值的影响主要表现为电场强度对 $\tan \delta$ 值的影响。在电场强度不很高的一定范围内，电场强度增大（由于电压升高），介质损耗功率变大，但 $\tan \delta$ 几乎不变。当电场强度达到某一较高数值时，随着介质内部不可避免存在的弱点或气泡而发生局部放电， $\tan \delta$ 随电场强度升高而迅速增大。因此，在较高电压下测 $\tan \delta$ 值，可以检查出介质中夹杂的气隙、分层、龟裂等缺陷。此外，湿度对暴露于空气中电介质的 $\tan \delta$ 影响也很大。介质受潮后，电导损耗增大， $\tan \delta$ 也增大。例如绝缘纸中水分含量从 4% 增加到 10%， $\tan \delta$ 值可增大 100 倍。然而，假如 $\tan \delta$ 值的测试是在温度低于 0°C 时进行，含水量增加， $\tan \delta$ 反而不会增大，这是因为此时介质中的水分已凝结成冰，导电性又变差，电导损耗变小的缘故。为此，在进行绝缘试验时规定被试品温度不低于 $+5^\circ\text{C}$ ，这对 $\tan \delta$ 的测试尤为重要。在工程实际中，通过 $\tan \delta$ 以及 $\tan \delta = f(u)$ 曲线的测量及判断，对监督绝缘的工作状况以及老化的进程有非常重要的意义。

四、电介质的老化

电介质的老化大致可分三类：电老化、热老化和环境老化。环境老化由大气条件下的光、氧、臭氧、盐、雾、酸、碱等因素引起。环境老化主要对暴露于户外大气中的外绝缘有较大的影响。对于高压电气设备的绝缘，主要是电老化和热老化。

1. 电老化

电老化是指在电场作用下的老化，并且主要来自于介质中的局部放电，故有时也称为局部放电老化。由于液体、固体电介质中不可避免地存在气泡、气隙等缺陷以及电场分布的不均匀，这些气泡、气隙中或固体介质表面局部场强达到一定值以上时，就会发生局部

放电。这种局部放电并不会马上形成贯穿性通道，介质并不发生击穿，但长期局部放电所带来的机械作用（带电粒子的撞击）、热作用（局部放电产生高温）、氧化作用（局部放电产生腐蚀性气体）使介质逐渐老化。随着老化程度加剧，严重时可使绝缘在工作电压下发生击穿或沿面闪络。所以对于高压（尤其是超高压）电气设备绝缘中局部放电必须予以高度重视。

2. 热老化

热老化是指电介质在受热作用下所发生的劣化。固体电介质的热老化过程包括热裂解、氧化裂解、交联，以及低分子挥发物的逸出，主要表现为机械强度降低（如失去弹性、变脆）以及电性能变差。液体介质如绝缘油的热老化为电介质在热作用下的氧化，而氧化所需的氧气为油箱中残留的空气，或者油中纤维因热分解产生的氧气。绝缘油氧化后酸价升高颜色加深，黏度增大，绝缘性能降低。

热老化的进程与电介质工作温度有关。绝缘油的温度低于 $60 \sim 70^\circ\text{C}$ 时，热老化（或者说氧化）速度很慢，高于此温度后热老化的作用就显著了，大约温度每升高 10°C ，油的氧化速度就增大一倍。当温度超过 $115 \sim 120^\circ\text{C}$ 时，其情况就大有不同，不仅出现氧化的进一步加速，还可能伴有油本身的热裂解，在这一温度下，绝缘油的降解机理可能发生改变。为此，绝缘油的运行或处理过程中，都应避免油温过高。固体介质的绝缘材料，为了保证绝缘具有必要的较长寿命，通常规定了各类绝缘材料的最高允许温度，根据不同的耐热性能划分成七个耐热等级，如表 1.3 所示。

表 1.3 绝缘材料的耐热等级

耐热等级	最高允许温度 (°C)	材 料
Y (0)	90	未浸渍的棉纱、丝、纸及其组合物
A	105	浸渍剂浸渍的或浸入油中棉纱、丝、纸及其组合物
E	120	合成有机膜、合成有机漆等
B	130	用有机胶粘剂黏合或浸渍剂浸渍的云母、石棉、玻璃纤维等无机物
F	155	用相应的合成树脂黏合或浸渍的无机物
H	180	耐热硅有机树脂、硅有机漆或用它们浸渍的无机物
C	>180	硅塑料、聚酰亚胺以及与玻璃纤维、云母、陶瓷的组合物；未浸渍的玻璃、云母、石英、氧化铝、氧化镁等无机物

对于 A、E 级绝缘，在最高允许工作温度下持续运行时的寿命约为 10 年。若运行温度低于此最高允许温度，绝缘寿命会大大延长，一般能安全运行 20~25 年。反之，若工作温度超过表 1.3 中规定的最高允许值，绝缘将加速老化，绝缘寿命缩短。对 A 级绝缘，工作温度每增加 8°C，寿命便缩短一半左右，这通常称为热老化的 8°C 规则。对 B 级和 H 级绝缘，则温度分别每升高 10°C 与 12°C，寿命也将缩短一半左右。

任务二 固体的电气特性

固体电介质的击穿主要有两个特点：一是固体电介质的击穿场强一般比液体、气体电介质高，例如在均匀电场中，云母的工频击穿场强可达 2 000~3 000 kV/cm；二是固体电介质击穿后其绝缘性能不能恢复，在介质中留有不能恢复的痕迹，如贯穿两电极的熔洞、烧穿的孔道、开裂等。

一、固体电介质的击穿形式

固体电介质有三种击穿形式。不同形式的击穿过程不同，击穿场强和击穿时间也不同。

1. 电击穿

固体电介质的电击穿过程，是因电场破坏介质晶格结构导致击穿。电击穿的主要特征是：击穿电压高（相对于另外两种击穿形式）；击穿过程极快；击穿前发热不显著；与环境温度无关。当介质损耗很小，又有良好散热条件，以及介质内部不存在局部放电时的击穿通常为电击穿。

2. 热击穿

当固体电介质加上电压，由于损耗而发热，介质温度升高，而介质的电阻具有负的温度系数，即温度升高电阻变小，这又使电流进一步增大，发热也跟着增大，直至达到某个温度时，发热量等于散热量，达到热的平衡，温度不再升高，介质不击穿。然而，当电压升高至某一临界值（称为临界热击穿电压）时，在所有温度下，发热量总是大于散热量，因此介质温度将持续上升，引起介质的局部分解、熔化、烧焦等，使介质击穿，这就是热击穿。由于热击穿是在温度升至很高情况下导致的，这当然需要一定的电压作用时间。

热击穿的主要特点为：发生热击穿时，介质温度（尤其是击穿通道处的温度）特别高，击穿电压与电压作用时间、周围温度以及散热条件有关。

3. 电化学击穿

固体电介质受到电、热、化学和机械力的长期作用，其绝缘性能以及其他性能的劣化，称为绝缘的老化。由于绝缘老化而最终导致发生热击穿或电击穿，称为电化学击穿。电化学击穿通常是在长期电压作用以后（数十小时至若干年）逐步发展形成的，它与固体电介质本身的耐游离性能、制造工艺、工作条件等都有密切的关系。此外，电化学击穿是在其绝缘性能下降之后的击穿，其击穿电压要比电击穿和热击穿的击穿电压低，所以对固体电介质的老

化和由于老化引起的电化学击穿应予以足够的重视。

二、影响固体电介质击穿电压的因素

1. 电压作用时间

电压作用时间对击穿电压的影响很大。通常，对于多数固体电介质，其击穿电压随电压作用时间的延长而明显地下降，且明显存在临界点。如图 1.12 所示为常用的电工纸板击穿电压相对于 1 min 的工频击穿电压的百分比 $U_F/U_{1\text{min}}$ (%) 与电压作用时间 t 的关系。

从图中可以看出，在时间很短的冲击电压作用下，击穿电压约为 1 min 的工频击穿电压 (幅值) $U_{1\text{min}}$ 的 300%，且电压作用时间再增加的一段范围内，击穿电压与电压作用时间几乎无关，属于电击穿范围，因为在这段时间内，热与化学的影响都来不及起作用。在此区域，当时间处于微秒级时 (与放电时延相近)，击穿电压随电压作用时间缩短而升高。随击穿时间的增加，击穿电压显著下降，这只能用发展较慢的热过程来解释，即击穿属于热击穿。如果电压作用时间更长，击穿电压仅为工频 1 min 的击穿电压的几分之一，这表明，此时由于绝缘老化，绝缘性能降低后纸板发生了电化学击穿。

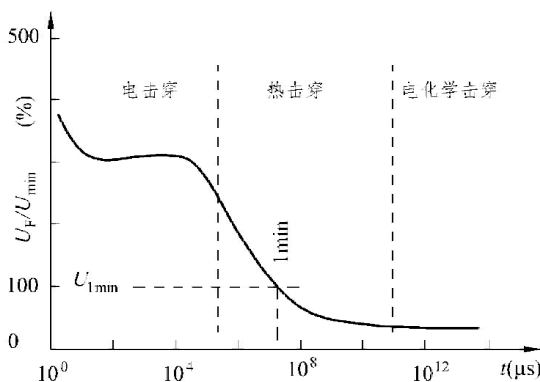


图 1.12 油浸电工纸板的击穿电压与加压时间关系 (25 °C)

2. 电场均匀程度与介质厚度

均匀电场中的击穿场强要高于不均匀电场中的击穿场强。均匀电场中的击穿电压随介质厚度增加近似呈线性关系，而在不均匀电场中的击穿电压不随介质厚度的增加而线性增加。这是因为厚度增加，电场不均匀程度也增加的缘故。还要注意的：随着介质厚度的增加，散热条件也变差，所以当厚度增加到可能出现热击穿时，采用增加厚度来提高击穿电压的意义不大。

3. 电压种类

同一固体电介质、相同电极情况下，直流电压作用下的击穿电压要高于工频交流电压（幅值）下的击穿电压，这是由于在直流电压下介质损耗主要为电导损耗，而在工频交流电压下还包括极化损耗甚至还有游离损耗。另外，因为极化损耗随频率升高而增大，高频交流击穿电压要高于工频交流击穿电压。由于冲击电压作用时间短而使冲击击穿电压更高。

4. 电压作用的累积效应

固体电介质在冲击电压作用下，有时虽未形成贯穿的击穿通道，但已在介质中形成局部损伤或局部击穿，在多次冲击电压作用下这种局部损伤或不完全击穿会扩大而导致击穿，所以冲击击穿电压随加压次数增多而下降，这就是击穿电压的累积效应。大部分有机材料都有明显的累积效应。

5. 受潮

固体电介质受潮后击穿电压会迅速下降，其下降程度与材料吸潮性有关。对于不易吸潮的

聚乙烯、聚四氟乙烯等中性介质，吸潮后的击穿电压就可大约降低一半，而对于易吸潮的棉纱、纸等纤维材料，吸潮后击穿电压可能仅为干燥时的百分之几甚至更低。所以高压电气设备的绝缘不但在制造时要注意除去水分，而且运行中还要注意防潮，并定期进行受潮情况的检测。

三、提高固体电介质击穿电压的措施

为了提高固体电介质的击穿电压，可从以下几个方面着手：

1. 改进制造工艺

如尽可能地清除固体介质中残留的杂质、气泡、水分等，使介质尽可能均匀致密。这可以通过精选材料、改善工艺、真空干燥、加强浸渍（油、胶、漆等）等方法来达到。

2. 改进绝缘设计

如采用合理的绝缘结构，使各部分绝缘的耐电强度能与其所承担的场强有适当的配合；改进电极形状，使电场尽可能均匀。改善电极与绝缘体的接触状态，以消除接触处的气隙或使接触处的气隙不承受电位差（如采用半导体漆）。

3. 改善运行条件

如注意防潮，防止尘污和各种有害气体的侵蚀，加强散热冷却（如自然通风、强迫通风、氢冷、水内冷等）。

任务三 液体的电气特性

用于高压电气设备中的液体电介质除了用作绝缘之外，还起冷却（如在油浸式电力变压

器中)以及灭弧(如在油断路器中)作用。目前常用的液体电介质主要是从石油中提炼出来的碳氢化合物的矿物油,除此之外还有蓖麻油、人工合成的硅油、十二烷基苯等,但它们不如矿物油应用广泛。根据用途不同,这些液体电介质分别称为变压器油、电容器油和电缆油。下面以变压器油为例讨论液体电介质的击穿。

一、变压器油的击穿机理

纯净液体电介质的击穿过程是由液体中带电质点的碰撞游离导致击穿的,其击穿场强很高(达 1 MV/cm),因此讨论这种纯净液体电介质的击穿并无实际意义。

工程实际中使用的液体电介质不可能是纯净的,在液体电介质的生产、运行中不可避免要混入杂质。这些杂质主要是气体、水分和纤维。正由于杂质的存在,液体电介质的击穿过程与纯净液体电介质(或气体介质)是不同的,击穿场强也不同,如变压器油击穿场强为 $120\sim 250\text{ kV(幅值)/cm}$ 。对于工程上所使用的含有杂质液体电介质的击穿过程可用“小桥”理论来解释。液体电介质中的水分和纤维的介电系数很大(分别为 81 和 $6\sim 7$),它们在电场作用下很容易极化,受电场力吸引且被拉长,并且逐渐沿电场方向头尾相连排列成“小桥”。如果此“小桥”贯穿电极,则由于组成此“小桥”的水分和纤维的电导较大,使流过“小桥”的泄漏电流增大,发热增加,使水分汽化和小桥周围的油分解或汽化,即形成气泡。这种气泡也可以是液体电介质中原先存在的(即气体杂质所形成)。由于气泡中的电场强度要比油中高得多(与介电系数成反比),而气泡中气体的击穿强度又比油低得多,所以一旦气泡在电场作用下排列连成贯通两电极的“小桥”,击穿就在此气泡通道中发生。换句话说,一旦油中形成气泡“小桥”就发生击穿。油中的水分和纤维形成“小桥”,并不马上击穿,而仍要发展成气泡“小桥”才击穿,所以

“小桥”理论也称为气泡击穿理论。

二、影响液体电介质击穿电压的因素

液体电介质击穿电压的大小既决定于其自身品质的优劣，也与外界因素，如温度、电压有关。

1. 液体电介质的自身品质

液体电介质的品质决定于其所含杂质的多少。含杂质越多，品质越差，击穿电压越低。

变压器油的品质通常采用标准油杯中变压器油的工频击穿电压来衡量。由于在均匀电场中杂质对击穿电压的影响要比在不均匀电场中大，所以标准油杯中电极做成如图 1.13 所示的电极 2 的形状。

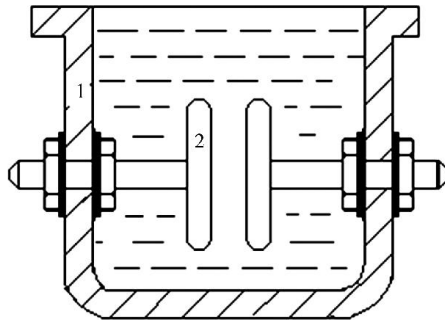


图 1.13 标准油杯

1—绝缘外壳；2—黄铜电极

下面具体讨论影响品质的各种因素与击穿电压的关系。

(1) 含水量。含水量对液体电介质击穿电压影响较大。当含水量极微小时，水分均以溶解状态存在，它对击穿电压影响不大。当含水量增加到超过溶解度时（25 °C 时水在变压器油中的溶解度为 50 ppm，1 ppm 为百万分之一的体积含量即 10^{-6} ），多余的水分常以悬浮状

态出现。这种悬浮状态的小水滴在电场作用下极化并形成小桥，导致击穿，所以击穿电压随含水量增加而降低。当含水量超过 0.02% 时，多余的水分沉淀到容器底部，击穿电压不再降低。

(2) 含纤维量。含纤维量越多，越易形成纤维小桥，则击穿电压越低。由于纤维具有很强的吸附水分能力，所以吸湿的纤维对击穿电压影响更大。

(3) 含气量。当含气量很小时，溶解状态的气体对击穿电压影响很小。但当含气量增加而出现自由状态的气体时，将使击穿电压随含气量增加而降低。

2. 温 度

温度对液体电介质击穿电压的影响随介质的品质、电场的均匀程度以及电压种类的不同而异。如图 1.14 所示在标准油杯中变压器油的工频击穿电压与温度 $U-t$ 的关系。干燥的变压器油 $U-t$ 关系为曲线 I，是直且比较平的图线，即干燥的变压器油的击穿电压随温度的升高有所降低；而受潮的变压器油的 $U-t$ 关系为曲线 II，当温度由 0°C 开始逐渐上升时，水在油中的溶解度逐渐增大，原来悬浮状态的水分逐渐转化为溶解状态，故油的击穿电压逐渐升高；当温度超过 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ 时，温度再升高，则水分开始汽化，油亦将逐渐汽化，产生气泡，又使击穿电压降低，从而在 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ 时出现最大值。在 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 时，油中水分是悬浮状态为最多，此时小桥最易形成，故击穿电压达最小值。温度再降低，水滴将凝结成冰粒，其介电系数与油相近，电场畸变减弱，再加上油黏度增大，小桥不易形成，故此时变压器油的击穿电压随温度的下降反而提高。曲线 I、II 相比较，显示了受潮的变压器油的击穿电压比干燥的变压器油低。

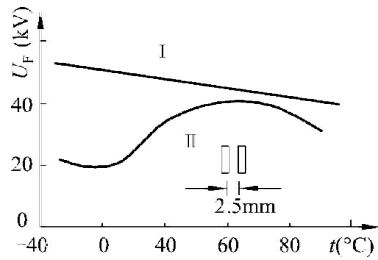


图 1.14 变压器油工频击穿电压与温度的关系

I—干燥的油；II—潮湿的油

3. 压 力

不论电场均匀与否，工程上用的变压器油在工频电压作用下，其击穿电压均随压力增加而增大，因为压力增大时，气体在油中溶解度增大。

4. 电压作用时间

液体电介质的击穿过程存在发热现象，伴随有温度的升高，而温度的升高需要一定的时间。当电压非常高时，在加压后短至几个微秒时的击穿表现为电击穿，此时杂质形成小桥的作用来不及显示出来，因此击穿电压很高。当电压作用时间大于毫秒级时，击穿将发展为热击穿，一般情况下液体电介质的击穿都属于热击穿。击穿电压随电压作用时间增加而降低。但在油不太脏的情况下，1 min 的击穿电压与长时间的击穿电压相差不大。为此，变压器油的工频耐压试验（即品质试验）通常加压 1 min。

5. 电场均匀程度

电场愈均匀，水分等杂质对击穿电压的影响愈大，击穿电压的分散性也愈大，击穿电压也愈高。当绝缘油的纯度较高时，改善电场的均匀程度使工频交流或直流电压下的击穿电压明显提高。而品质较差的绝缘油，杂质的聚集和排列已使电场畸变，改善电场以提高击穿电压的作用并不明显。

三、提高液体电介质击穿电压的措施

由于杂质对液体电介质击穿电压有很大影响，所以要提高击穿电压，首先要减少杂质，其次是降低杂质对击穿电压的影响。具体措施主要有：

1. 过 滤

将绝缘油在压力下连续通过装有大量事先烘干的过滤纸层的过滤机，将油中炭粒、纤维等杂质滤去，油中部分水分及有机酸也被滤纸所吸收。运行中，常采用此法来恢复绝缘油的绝缘性能。

2. 防 潮

油浸式绝缘在浸油前必须烘干，必要时可用真空干燥法去除水分。有些电气设备如变压器，不可能全密封时，则可在呼吸器的空气入口处放置干燥剂，以防止潮气进入。

3. 脱 气

常用的脱气办法是将油加热、喷成雾状，且抽真空，除去油中的水分和气体。电压等级较高的油浸绝缘设备，常要求在真空下灌油。

4. 添加固体电介质

采用固体电介质可以降低绝缘油中杂质的影响，常采用的措施为加覆盖层、绝缘层和屏障。

(1) 覆盖层。覆盖层为在电极表面覆盖的一层很薄的绝缘材料，如电缆纸、黄蜡布、漆膜等。覆盖层的主要作用在于限制泄漏电流，阻止杂质小桥的形成，从而可使工频击穿电压显著提高，例如在均匀电场中可提高至 70%~100%，在极不均匀电场中可提高 10%左右。

(2) 绝缘层。当覆盖层厚度增大，本身承担一定电压时，其称为绝缘层。其作用除了像

覆盖层那样能阻止杂质、小桥形成外，还具有降低不均匀电场中电极附近绝缘油中最大场强的作用，因而可显著提高绝缘油的工频和冲击击穿电压。

(3)屏障。屏障是指在油间隙中放置的，尺寸较大(与电极形状相适应)、厚度在1~3mm的层压纸板或层压布板。它既能阻止杂质小桥的形成，又能改善不均匀电场中的电场分布。因此在不均匀电场中效果非常显著，屏障在最佳位置时，工频击穿电压可提高一倍以上。所以在变压器等充油设备中广泛采用此种油-屏障绝缘结构。

习题 1.1

1-1 列表比较电介质四种极化形式的形成原因、过程进行的快慢、有无损耗、是否受温度的影响。

1-2 说明绝缘电阻、泄漏电流、表面泄漏的含义。

1-3 说明介质电导与金属电导的本质区别。

1-4 何为吸收现象？在什么条件下出现吸收现象？说明吸收现象的成因。

1-5 说明介质损失角正切 $\tan \delta$ 值的物理意义以及其与电源频率、温度和电压的关系。

1-6 说明固体电介质的击穿形式和特点。

1-7 说明提高固体电介质击穿电压的措施。

1-8 说明造成固体电介质老化的原因和固体绝缘材料耐热等级的划分。

1-9 说明变压器油的击穿过程以及影响其击穿电压的因素。

任务四 气体的电气特性

气体（特别是空气）是电力系统中应用相当广泛的绝缘材料，如架空输电线路相与相之间、线路与铁塔之间、变压器引出线之间都是以空气作为绝缘介质的。此外，在一些液体与固体绝缘材料内部也或多或少的含有一些气泡。所以气体放电的研究是高电压技术中的一个基本任务。

在通常情况下，由于宇宙射线及地层放射性物质的作用，气体中含有少量的带电质点（约为 1000 对/cm³）。在电场作用下，这些带电质点沿电场方向运动，形成电导电流，故气体通常并不是理想的绝缘材料。当电场较弱时，由于带电质点极少，气体中的电导电流也极小，故可认为气体电介质是良好的绝缘介质。在电场作用下，电子在气体介质中的运动轨迹如图 1.15 所示。

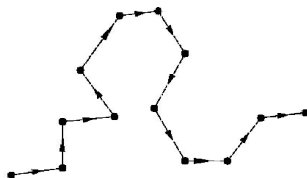


图 1.15 电场作用下气体介质中的电子的运动轨迹

当加在气体间隙上的电场强度达到某一临界值后，间隙中的电流会突然剧增，气体介质会失去绝缘性能，这种现象称为气体介质的击穿，也称气体放电。击穿时加在气体间隙两端的电压称为该气隙的击穿电压，或称放电电压，用 U_F 表示。均匀电场中，击穿电压与间隙距离之比称为该气体介质的击穿场强。击穿场强反映了气体介质耐受电场作用的能力，即该气体的电气强度，或称气体的绝缘强度。在不均匀电场中，击穿电压与间隙距离之比，称为该气体介质的平均击穿场强。

气体间隙击穿后，由于电源容量、电极形式、气体压力等的不同，其具有不同的放电形

式。在大气压或更高的气压下常表现为火花放电的形式，但如果电源功率大、内阻小时，就可能出现电流大、温度高的电弧放电。不管是火花放电还是电弧放电，放电通常限制在一个带状的狭窄通道中。在极不均匀电场中，可能只有局部间隙中的场强达到临界值，在此局部处首先出现放电，叫局部放电。高压输电线路导线周围出现的电晕放电就属于局部放电。当电极间既有固体介质，又有气体或液体介质，它们构成并联的放电路径时，放电往往沿着固体介质表面发生，通常叫作闪络。例如当输电线路出现较高的电压时，常常会引起沿绝缘子表面的闪络。固体介质中的击穿将使介质绝缘强度永久丧失；而在气体或液体介质中发生击穿则一般只引起介质绝缘强度的暂时丧失，当外加电压去掉后，介质便能恢复其绝缘性能，故称为自恢复绝缘。

一、气体的游离

(一) 气体原子的激发与游离

气体原子在电场、高温和其他粒子碰撞等作用下，吸收能量使内能增加，原子核外的电子将从离原子核较近的轨道跳到离原子核较远的轨道上去，此过程称为原子的激发，也称激励。被激发的原子称为激发原子，激发原子内部的能量比正常原子大。原子的激发状态是不稳定状态，一般经过约 10^{-8} s就会回复到正常状态，激发原子回到正常状态时将以短波光的形式放出能量。

中性原子从外界获得足够的能量，以致使原子中的一个或几个电子完全脱离原子核的束缚而成为自由电子和正离子（即带电质点），此过程称为原子的游离，也称电离。游离是激发的极限状态，气体分子（或原子）游离所需要的能量称为游离能，游离能随气体种类而不同，一般在 $10 \sim 15$ eV。

分子或原子的游离可以一次完成，也可以分级完成，先经过激发阶段，然后再产生的游

离，称为分级游离。分级游离时，一次需要获得的能量较小，但几次获得的总能量应大于或等于其游离能。

按照外界能量来源的不同，游离可以分为下列不同的形式：

1. 碰撞游离

处于电场中的带电质点，除了经常地作不规则的热运动，不断地与其他质点发生碰撞以外，还受着电场力的作用，沿电场方向不断得到加速并积累动能。当具有的动能积累到一定数值后，在其与气体原子（或分子）发生碰撞时，可以使后者产生游离。由碰撞而引起的游离称为碰撞游离。碰撞游离是气体放电过程中产生带电质点的极重要来源。

电子、离子、中性质点与中性原子（或分子）的碰撞以及激发原子间的碰撞都能产生游离。而在气体放电过程中，碰撞游离主要是由自由电子与气体原子（或分子）相撞而引起的，故电子在碰撞游离中起着极其重要的作用。通过碰撞，能使中性原子（或分子）发生游离的电子称为有效电子。离子或其他的质点因其本身的体积和质量较大，难以在碰撞前积累到足够的能量，因而产生碰撞游离的可能性是很小的。

当电子从电场获得的动能等于或大于气体原子（或分子）的游离能时，就有可能因碰撞而使气体原子（或分子）分裂成电子（或负离子）和正离子，即电子的动能满足如下条件时就有可能引起碰撞游离：

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (1-13)$$

式中 m ——电子的质量；

v ——电子的运动速度；

W_i ——气体原子（或分子）的游离能。

质点两次碰撞之间的距离称为自由行程。大量质点相互碰撞的平均自由行程与气体间的压力成反比，与绝对温度成正比。一般情况下，平均自由行程越大，越容易发生碰撞游离。

2. 光游离

由光辐射引起气体原子（或分子）的游离称为光游离。光辐射的能量以不连续的光子的形式发出。当光子的能量等于或大于气体原子（或分、离子）的游离能时，就可能引起光游离，即产生光游离的条件为

$$h\nu \geq W_i \quad (1-14)$$

式中 h ——普朗克常数，其值为 6.62×10^{-27} J·s；

ν ——光的频率。

因为波长 $\lambda = c/\nu$ ， c 为光速 (3×10^8 m/s)，说明产生光游离的能力不决定于光的强度，而决定于光的波长，波长越短，光子的能量越大，游离能力就越强。通常可见光是不能直接产生光游离的，只有各种短波长的高能辐射线，例如宇宙射线、 γ 射线、X 射线以及短波长的紫外线等才有使气体产生光游离的能力。在气体放电过程中，当处于激发状态的原子回到正常状态，以及异号带电质点复合成中性原子（或分子）时，都以光子的形式放出多余的能量，成为导致产生光游离的因素。光游离在气体放电中起着很重要的作用。

3. 热游离

气体在热状态下引起的游离过程称为热游离。在常温下，由于气体质点的热运动所具有的平均动能远低于气体的游离能，因此不可能产生热游离。但在高温下的气体，例如发生电弧放电时，弧柱的温度可高达数千度以上，这时气体质点的动能就足以使得气体分子（或原子）碰撞时产生游离。此外，高温气体的热辐射也能导致气体分子（或原子）产生光游离。故热游离实质上并不是另外一种独立的游离形式，而是在热状态下碰撞游离和光游离的综合。气体分子（或原子）产生热游离的条件是

$$\frac{3}{2}KT \geq W_i \quad (1-15)$$

式中 K ——玻尔兹曼常数，其值为 $1.38 \times 10^{-16} \text{ J/K}$ ；

T ——绝对温度，K。

4. 表面游离

以上讨论的是气体介质中电子和正离子的产生，但在气体放电中存在着电流的循环，因此必然有阴极发射电子的过程，电子从金属电极表面逸出来的过程称为表面游离。电子从金属电极表面释放出来所需要的能量称为逸出功。逸出功的大小与金属电极的材料及其表面状态有关，一般需要 $1 \sim 5 \text{ eV}$ ，小于气体在空间游离时的游离能，这说明从阴极发射电子比在空间使气体分子（或原子）游离容易。用各种不同的方式供给金属电极能量，例如，将金属电极加热、正离子撞击阴极、短波光照射电极以及强电场的作用等，都可以使阴极发射电子。

（二）气体中的去游离过程

在气体发生放电过程中，除了有不断产生带电质点的游离过程外，还存在着导致带电质点从游离区域消失，或者游离削弱的相反过程，通常称为去游离过程。任何形式的放电过程总存在着带电质点的产生（游离）和带电质点的消失（去游离）过程。带电质点在电场作用下定向运动，消失于电极，带电质点的扩散与复合以及电子的附着效应都属于去游离过程。当导致气体游离的因素消失以后，这些去游离过程可使气体迅速恢复中性的绝缘状态。

1. 带电质点的扩散

气体中带电质点经常处于不规则的热运动中，如果不同区域的带电质点存在着浓度差，则它们总是不断地从高浓度区域向低浓度区域运动，使各处带电质点的浓度变得均匀，此现象称为带电质点的扩散。当空气间隙中发生放电以后去掉电源，放电通道中高浓度的带电质

点迅速地向四周扩散，使空气间隙恢复原来的绝缘状态。

气体中带电质点的扩散是热运动造成的，故它与气体的状态有关。气体的压力越高或温度越低，扩散过程也就越弱。电子的质量远小于离子，所以电子的热运动速度很大，它在热运动过程中的碰撞机会也较少，因此，电子的扩散作用比离子要强得多。

2. 带电质点的复合

正离子与负离子或电子相遇，发生电荷的传递而互相中和，还原为中性分子或中性原子的过程称为复合。复合可在气体中进行，也可在容器壁上发生。在带电质点的复合过程中会放出能量。异号带电质点的浓度愈大，复合也愈强烈，所以，强烈的游离区也总是强烈的复合区。

在带电质点的复合过程中会发生光辐射，这种光辐射在一定条件下又可能成为导致光游离的因素。复合进行的速度取决于带电质点的浓度，正、负带电质点的浓度越大，它们相遇的机会也越大，复合进行得就越快。但并不是异号带电质点每次相遇都能引起复合。要能引起复合，参加复合的异号带电质点需相互接触一定的时间，异号带电质点间的相对速度越大，相互作用的时间就越短，复合的可能性也就越小。气体中电子的运动速度比离子要大得多，所以正、负离子间的复合要比正离子和电子间的复合容易发生得多。故在气体放电过程中，通常以异性离子间的复合更为重要。

3. 附着效应

电子与气体原子（或分子）碰撞时，不但有可能发生碰撞游离产生电子和正离子，也有可能发生电子的附着过程而形成负离子。与碰撞游离相反，电子的附着过程放出能量。使基

态的气体原子获得一个电子形成负离子时所放出的能量称为电子的亲合能。电子亲合能的大小可用来衡量原子捕获一个电子的难易，电子的亲合能越大，则越易形成负离子。卤族元素的电子外层轨道中增添一个电子，则可形成像惰性气体一样稳定的电子排布结构，因而具有很大的亲合能，所以，卤族元素很容易俘获一个电子而形成负离子。容易吸附电子形成负离子的气体称为电负性气体，如氧气、氟气、氯气、水蒸气、六氟化硫等都属于电负性气体，惰性气体和氮则不会形成负离子。

如前所述，离子的游离能力不如电子。电子为原子或分子俘获而形成质量大、运动速度慢的负离子后，游离能力大减，因此，俘获自由电子而成为负离子这一现象会对气体放电的发展起抑制作用，有助于气体绝缘强度的提高，这是值得注意和利用的。

二、均匀电场中气体间隙的放电特性

21 世纪初，汤森 (Townsend) 在均匀电场、低气压、短间隙的条件下进行了放电试验，依据试验研究结果提出了比较系统的理论和计算公式，解释了整个间隙放电的过程和击穿条件，这是最早的气体放电理论，称为汤逊放电理论 (亦称汤逊的电子崩理论)。整个理论虽然有很大的局限性，但其对电子崩发展过程的分析为气体放电的研究奠定了基础。随着电力系统电压等级的提高和试验研究工作的不断完善，高气压、长间隙条件下气体间隙击穿的实验研究逐渐发展起来，在此实验研究的基础上，总结出了大气中气体间隙击穿的流注理论。这两个理论可以解释大气压强 P 和极间距离 S 的乘积 PS 在广阔范围内的气体放电现象。