全国技工学校电工专业通用教材

电工材料

（第二版）

[illegible]

[illegible]出版社

全国技工学校电工类通用教材

TM2
1

电 工 材 料

（第二版）

劳动部培训司组织编写

中国劳动出版社

内 容 提 要

本书是根据劳动部培训司审定颁发的《电工材料教学大纲》修订版编写的，供技工学校招收初中毕业生使用的统编教材。

本书内容包括：绝缘材料、普通导电材料、特殊导电材料、磁性材料、其他电工材料，书后并附有电工材料性能表格。

本书也可作为职业高中和企业维修电工、电工中级技术工人培训的教材及职工的自学用书。

本书由陈建华、熊光奎、关雪君编写，陈建华主编：王瑚、杨东方审稿，王瑚主审。

电 工 材 料
（第二版）
劳动部培训司组织编写
责任编辑：高永新

中国劳动出版社出版
（北京市惠新东街1号）
京安印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所发行
787×1092毫米　16开本　9.25印张　225千字
1988年8月北京第1版　1993年9月北京第2版
1997年2月北京第14次印刷　印数100000册
ISBN 7-5045-1292-3/TM·070(课)　定价：8.40元

前　言

为了更好地提高技工学校电工类工种（专业）的教学质量，适应生产发展的需要，我们在修订技工学校电工类工种（专业）教学计划教学大纲的基础上，组织修订了技工学校电工类工种（专业）各门课程的教材。修订后的教材从培养目标出发，以中级电工技术等级标准为依据，坚持理论联系实际的原则，突出技能训练，注重针对性、实用性、科学性，并适当增加了新技术、新工艺、新材料、新设备的内容。

此套教材计有：维修电工生产实习、电工生产实习、数学、物理、电工基础、机械知识、机械制图、电气制图、电子技术基础、电机与变压器、电工仪表与测量、电力拖动控制线路、企业供电系统及运行、安全用电、电工材料等15种。

组织修订教材的工作得到了黑龙江、山东、上海、江苏、浙江、河南、陕西、四川、江西、湖南、广西、福建、云南及沈阳、大连、重庆等省市自治区及计划单列市劳动厅（局）的大力支持和协助，在此表示衷心的感谢。

由于技工学校教学改革正在研究探索之中，此次修订的教材肯定还会存在一些缺点和不足，恳切希望读者提出宝贵意见，以便在适当时候再次进行修订，使之更加完善。

劳动部培训司

目　录

绪　论

材料学科是边缘科学，对科学技术的发展具有明显的先导作用。事实证明，新型材料的问世对科学技术和社会经济发展起了巨大的推动作用。高强度耐热合金出现后，喷气式发动机才可能研制成功，才会有超音速喷气式飞机。1946 年第一台电子计算机诞生了，它是由一万多只电子管，一千多只继电器及其他元件组成，体积有三间套房那么大，造价十分昂贵。1956 年半导体材料面世引起了电子技术革命，如今一台微型电子计算机可放在办公桌上供人们使用。超微型化计算机可放在衣服口袋中，其功能已超过第一台电子计算机，而体积和价格都只有第一台电子计算机的几万分之一。光导纤维材料的出现，使通讯工程发生了质的变化。综上所述，材料科学的重要作用是显而易见的了。

电工材料是研究、生产、使用电气工程材料的学科。如今电工材料的种类之多，新型材料的不断涌现，这给电气工作者在选材时增加了难度。因此，需要学习更多的知识，才能正确用材。如某次美国航天飞机试航，在离起飞前几分钟时，突然发生起火爆炸，造成机毁人亡，直接经济损失几十亿美元。据事后调查报告指出：事故原因是机内电源转换开关的触头发生“熔焊”故障，使操作失控所致。在一般电气工程中也不例外，当修理电动机更换绕组时，若所选用的电磁线的耐热等级偏低，电动机使用后不久就会烧坏。可见选用材料是非常重要的，而且不是很容易的事。因此，作为未来的电气工人，必须学好《电工材料》这门电专业技术基础课。

电气工程上常将电工材料作如下分类：

- 电工材料
  - 导电材料
    - 普通导电材料
    - 特殊导电材料
  - 半导体材料
    - 元素半导体
    - 化合物半导体
    - 固熔体半导体
  - 绝缘材料
    - 气态绝缘材料
    - 液态绝缘材料（绝缘油）
    - 半固态绝缘材料（漆和胶等）
    - 固态绝缘材料
  - 磁性材料
    - 软磁材料
    - 硬磁材料
    - 特殊磁性材料
  - 其他电工材料

除上述材料之外，还有超导材料、压电材料等等。随着科学技术的不断发展，还将出现各种新型的电工材料。如今，绝缘材料正朝着耐高压、耐高温、阻燃、耐低温、无毒无害、节能及复合型方向发展。导电材料则寻求节省铜材，以铝代铜，提高综合性能（高强度、轻、耐

温、耐燃）的途径。特殊导电材料向高品位、多样化方向发展。半导体工业则更加精益求精，已能生产超纯度的“单晶”、“多晶”、超大规模集成电路，用于制造高科技产品（如：电子计算机、电视机、录像机、摄像机等）。近年来超导体研究取得令世人瞩目的成就。高速（400公里/时），舒适的磁悬浮列车就是运用了超导技术。超导专家们正努力寻找临界值温度较高的超导材料，以扩大其应用范围。磁性材料是制造电机、变压器铁芯不可缺少的第三大类电工材料。磁性材料的产量、质量、使用量是衡量一个国家电气化水平的重要标志之一，我国现已能大批量生产高导磁性、低损耗的优质软磁材料。例如现在造一台同容量的大型变压器所用硅钢片量约为50年代的70%。硬磁材料性能也有很大的提高，如超级永磁材料钕铁硼（号称永磁王）能吸引为自重七百倍的磁性物质。特种磁性材料更是其妙无比，有用于计算机存储零件的磁记忆材料，有造录音和录像带的磁记录材料，还有用于磁控开关的磁感温材料。该开关中的磁钢限温器由感温磁钢（镍锌铁氧体材料）和永磁钢（锶铁氧体材料）组成。利用感温磁钢的温度特性——常温下属于铁磁物质，能与永久磁钢相吸引，当温度升高到居里点（临界值）温度时则失去铁磁属性，不与永久磁钢相吸引，再通过机械装置带动开关，控制电源的通断，达到自控制的目的。

为适应中级技工学校培养维修电工、内外线电工的需要，本教材分绝缘材料、普通导电材料、特殊导电材料、磁性材料和其他电工材料共五章。学习时应注意对基本概念、名词术语、技术参数等含义的确切理解，要了解型号的含义及其编制方法，记住最常用材料的名称、型号、性能和用途。由于材料名目繁多，记忆时可能感到枯燥乏味，建议采用“比较记忆法”，列表对照，找出异同。为了较全面认识和评价各种具体材料，除了应该注意其电和磁的性能以外，还应注意其耐热性、防潮性、温度特性、化学稳定性、机械特性能及价格因素，同类型材料还应该比较优劣，建立相对的概念。学习材料选用时，应注意联系已学过的电工知识和生产实习课中的实例，进行自测和与同学们讨论的方法。即使在毕业后仍要坚持在工作实践中培养选材、用材能力，巩固所学知识。检验本课程是否学好的唯一标准，就是看能否在实践中根据工作要求，查阅材料手册等资料，做到“合理选材、正确用材”。

第一章 绝 缘 材 料

§1—1 概 述

一、绝缘材料的基本概念

自然界有些物质能让电流顺利通过，这种物质称为导体。而有些物质其电阻率大于 10^7 欧，在直流电压作用下，只有极其微弱的电流通过，一般情况下可忽略而认为其不导电。工程上把这类物质称为绝缘材料，研究绝缘材料在电场中物理现象时，称其为电介质。

绝缘材料主要用来隔离电位不同的导体，如隔离变压器绕阻与铁芯，或隔离高、低压绕组、或隔离导体保证人身安全，如导线的外塑套。在某些情况下，绝缘材料还能起支承固定（如在接触器中）、灭弧（如断路器中）、防潮、防霉、及保护导体（如在线圈中）等作用。

绝缘材料种类繁多，一般中分为：

①气体绝缘材料：常用的有空气、氮气、二氧化碳和六氟化硫（SF_6）等。

②液体绝缘材料：常用的有变压器油、断路器油、电容器油、电缆油等。

③固体绝缘材料：常用的有绝缘漆、胶、纸、纸板等绝缘材料制品，以及漆布、漆管等绝缘浸渍纤维制品，云母制品、电工塑料、陶瓷、橡胶等。

电工产品的性能、体积、价格、质量和使用寿命，很大程度上取决于绝缘材料的电、热、机械和理化性能。如采用 SF_6 绝缘的 500 千伏组合电器，其体积仅为空气组合电器的 5%，广泛使用的中小型异步电机采用 F 极绝缘，比同机座号的 B 级绝缘异步电机功率升高 1～2 级，重量减轻 25%，体积缩小 30%。所以熟悉绝缘材料的主要性能和掌握正确的使用维护方法，有着极其重要的意义。我们学习本章的目的，就是了解绝缘材料的主要基本特性和使用方法，从而在今后的工作中能够科学合理地选择和使用绝缘材料。

二、绝缘材料的基本性能

1、绝缘材料的电阻率和绝缘电阻

如前所述，绝缘材料并非绝对不导电，在直流电压作用下，仍会有微弱的电流流过。在固体电介质中，这个电流由以下三部分组成，如图 1—1 所示。

①瞬时充电电流 i_c：这时电介质相当于一个电容器，故外电压加上瞬间，电容器相当于短路，电流值较大，且随时间增加而逐渐衰减为零。

②吸收电流 i_a：由于电介质极化而产生，也随时间增加而衰减为零。

③泄漏电流 I_L：是个稳定不变流过电介质的电流。这个电流由沿电介质表面流过的电流和从电介质内部流过的电流两部分组成，相关的有表面电阻率和体积电阻率。表面电阻率反映电介质表面的导电能力，其值较小，易受环境影响。体积电阻率反映电介质内部的导电能力，其值较大。工程上使用的绝缘电阻是指体积电阻，用兆欧表（俗称摇表）测出的绝缘电阻即是体积电阻，其测量机理简单说就是用手摇发电机，使之输出一直流电压加于电介质，经

过一定时间电介质中就流过一稳定电流，两者之比即为介质的绝缘电阻。

为了准确地测知电气设备的绝缘电阻，必须正确地选择和使用兆欧表。一般额定电压为500伏以下的设备用500伏或1000伏的兆欧表，额定电压500伏以上的设备，要选用1000伏或2500伏的兆欧表。选择兆欧表的量限时，测低压电气设备绝缘电阻应选用0～200兆欧的摇表，测高压电气设备或电缆时须用0～1000兆欧及以上的摇表。每次测量前均须检查兆欧表是否完好。具体方法是：兆欧表接线端钮全部断开，摇动手柄到额定转速，表的指针应指“∞”，将兆欧表端钮短接，缓慢摇动手柄，表的指针应指“O”，否则该表便不能使用。

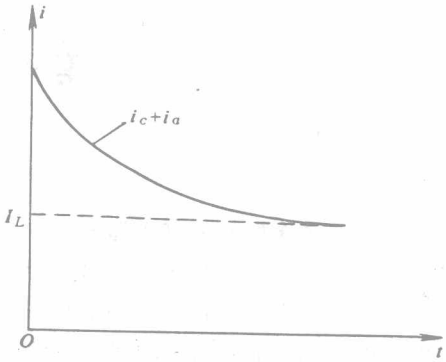

图 1-1　电介质的电流与时间的关系示意图

必须注意，只有在电气设备完全不带电，甚至连感应电也没有的情况下，才可用兆欧表测绝缘电阻，这样才能保证设备和人身安全，并正确地测出绝缘电阻的大小。所以测量前电气设备应切断电源，电容性设备应可靠放电完毕。

兆欧表接线柱一般有三个，分别标有“L”（电路）、“E”（接地），“G”（保护环）字样，被测绝缘电阻应接于L、E之间，G端钮作用是排除被测物表面电流。

兆欧表常用测量方式及接线如图1—2所示，但须注意：连接导线应用单线，分开连接L和E，不能用双股平行线、绞线或护套线，以免线间绝缘电阻影响测量结果的准确度。

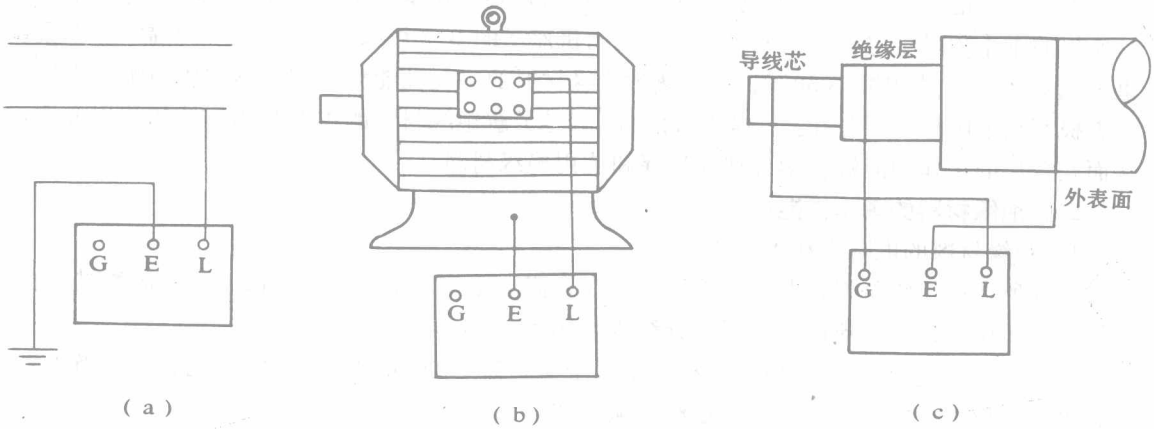

图 1—2　摇表测量绝缘电阻接线图

(a) 测线路电阻 (b) 测电机绝缘电阻 (c) 测电缆绝缘电阻

另外还必须注意，测量时兆欧表手柄转速应逐渐加快至额定转速，不要忽快忽慢，并且只有在指针稳定不再摇摆后的大约一分钟再读数，才能测出准确的结果。

还有一种新型的自动绝缘电阻表，采用了晶体管直流变换器将表内干电池的直流低电压

转换成直流高电压，作用于被测绝缘电阻，同时用磁电系微安表作阻值指示。因为省去了老式兆欧表的手摇发电机，所以这种表体积小巧，使用十分方便。

两种以上电阻率不相同的绝缘材料复合使用时，则必须注意；具有不同电阻率的双层电介质，复合时相当于串联。在直流电压下，承受电压大小与电阻率成正比，即绝缘电阻越大，承受的电压就越高。这时务必要注意不能将两种电阻率相差较大的电介质复合使用，否则将导致材料上电压分布极不均匀。在交流电压作用下，电压分布取决于电阻率与材料介电系数的大小，如介电系数大，则材料上电压分布主要受介电系数的影响。

影响材料绝缘电阻的因素主要有以下几种：

①温度：温度升高，电阻率下降，绝缘电阻减小，这点正与金属导体相反。这是因为温度升高，绝缘材料分子平均动能增大，电离增加促使内部带电粒子迁移，从而增大泄漏电流。例如运行中的直流电缆，靠近芯线附近的内绝缘层温度总是高于外绝缘层温度，因而内绝缘层绝缘电阻下降，承受的电压降低，外绝缘层承受电压增大。

②湿度：水分的浸入，促进杂质及材料分子的水解，可使电介质中导电离子增加，故湿度增大，使电阻率降低，绝缘电阻减小。

③杂质：绝缘材料原材料及制作过程中难免伴有杂质，而杂质在电介质内部会直接增加导电离子，使电阻率下降，绝缘电阻减小。杂质对材料的绝缘性能有较大的影响，故应严格控制监视其含量。

④电场强度：在较高的场强作用下，固体、液体电介质中离子迁移能力相应增强，使电阻率下降，绝缘电阻减小。在场强足够大的情形下，电介质的绝缘电阻几乎消失，泄漏电流急剧增大。我们称之为绝缘材料的击穿。气体的导电机理有所不同，气体分子在外场强影响下，一方面不断出现电子产生的游离过程，另一方面又不断存在着正、负离子结合的复合过程。如图 1—3 所示可知，当场强较小时，气体中因游离而产生的电流的密度 j 几乎与场强增加成正比，如 1 段。在场强升高到 E_2 时的 2 区域，场强变化大，因游离产生的电流的密度几乎不变，因而气体仍具有良好的绝缘性能。在场强大于 E_2 的区域 3 中的 E_b 点，场强的高值使气体分子的碰撞游离大大加剧，电流密度急剧升高，气体因游离而击穿。

2、绝缘材料的极化与介电系数

电介质在无外电场作用时，不呈现电性，在外电场作用下，电介质沿场强方向在两端出现不能自由移动的束缚电荷，我们把这种现象称之为电介质的极化，如图 1—4 所示。场强越大，表面束缚电荷就越多，极化就越显著。外电场撤除，极化即消失。电容器极板间介质的极化情况正是这样。不同的电介质，由于其分子结构不同，在相同的电场作用下，其极化程度也多不相同，表征介质极化程度的物理量就是介电系数。

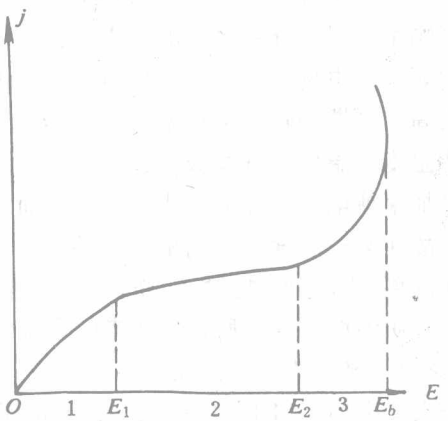

图 1—3　气体中场强与电流密度的关系

介电系数又称为电容率，工程上常采用相对介电系数 ε_r。ε_r 越大，则表明电介质在同一交

流电场作用下极化程度越高。

设电容器极板间为真空时的电容为 C_0，极板间填充某种电介质时其电容为 C，则定义相对介电系数 $\varepsilon_r=C/C_0$，其值总是大于 1。因为电容器填充电介质的目的就是为了增大电容。如空气的 $\varepsilon_r=1.00059$，称为弱极性介质，变压器油的 $\varepsilon_r=2.2\sim2.5$，电瓷的 $\varepsilon_r=5.5\sim6.5$，胶木的 $\varepsilon_r=4.5$ 称为一般极性介质，纯净的水的 $\varepsilon_r=81$，称为强极性介质。

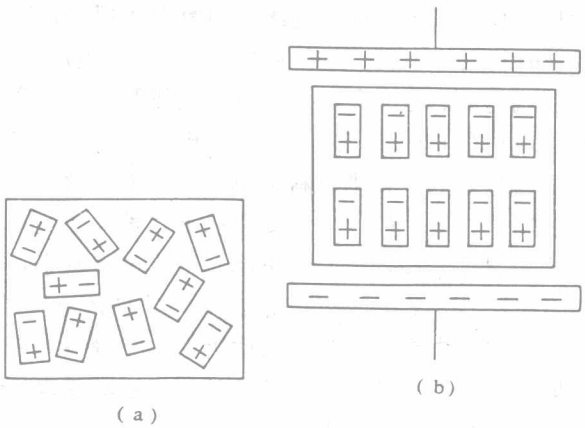

图 1—4　电介质的极化

(a) 未加电场时　(b) 外加电场后

介电系数在工程上对选择绝缘材料有很重要的实际意义，如用作电容器极板间介质时，要求 ε_r 值越大越好，以缩小电容器体积和增大电容量；用于电气设备作一般绝缘材料时，则应尽量选 ε_r 值小的材料，以减小其电容量，降低充电电流和介质损耗；用作复合绝缘材料时，则要求各绝缘材料的 ε_r 值尽可能接近，以使电场分布均匀，避免交流电压的大部分集中在 ε_r 值小的材料上。因而可能降低整个电气系统的绝缘能力。另外材料在复合过程中易产生气泡而降低绝缘能力。这是因为同一电场中气泡的场强和其周围固体介质的场强，按介电系数成反比分布，设气泡的场强为 E_1，介电系数为 ε_1，固体介质介电系数为 ε_2，场强为 E_2，则据电工原理可知：

$$\varepsilon_1 E_1=\varepsilon_2 E_2 \qquad E_1=\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}E_2$$

由前面介绍可知：$\varepsilon_2\gg\varepsilon_1$，所以气泡中场强相当强，易引起气泡局部游离放电，绝缘老化、甚至击穿，对绝缘材料的性能影响极大。

影响绝缘材料介电系数的因素有：

①频率：电场频率升高，材料相对介电系数减小。这是因为介质极化形成需要时间，当频率增高，周期缩短，极化就来不及形成。

②温度：温度对某些极化过程影响极大。由于温度升高、加快电介质分子热运动，一方面可增加束缚电荷，加强极化，另一方面分子热运动加剧又使分子难以整齐排列而削弱极化强度，故在某一温度下 ε_r 可能出现峰值。极性介质 ε_r 与温度的关系如图 1—5 所示。

③湿度：因为水属强极性介质，ε_r 很大，绝缘材料吸湿后，介电系数和电导增大，介损增高，使介质温度升高，所以在受潮的情况下，电气设备均需进行干燥处理。

3、绝缘材料的介质损耗

在交变电场作用下，电介质会损耗电能，即介质损耗简称介损。它由两部分能量组成，一是由于泄漏电流引起的电阻损耗，另一部分是极化过程中交变电场作用下，介质分子交变定向排列过程中相互碰撞摩擦而引起的极化损耗。

介损的存在，使介质发热，如介损过大，则将产生高温，易削弱介质的绝缘性能，缩短

使用寿命，甚至导致热击穿，所以我们要尽量降低绝缘材料的介损。

承受交流电压的电介质，可用一漏阻 R_L 与一电容 C 并联的等值电路来表示。这时，瞬时充电电流只引起电容电流 I_c，它超前电压 90°，不产生有功损耗。漏阻电流 I_1 则与电压同相位，产生介损。由极化所引起的吸收电流 I_s，其有功分量 I_a 也与电压同相位而引起介损，I_x 为 I_s 的无功分量。相量图如图 1—6 所示，图中 φ 为电路电流与电压的相位差角，δ 为它的余角。

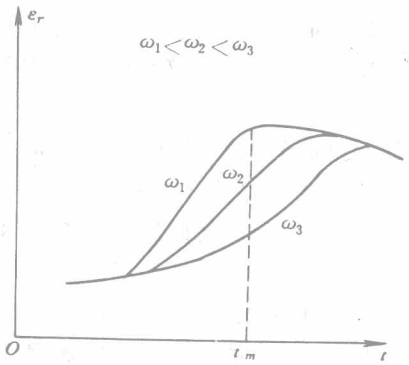

图 1—5　极性介质 ε_r 与温度的关系

$$且\ \mathrm{tg}\delta=\frac{I_a+I_L}{I_c+I_x}=\frac{I_{有功}}{I_{无功}}$$

由电工学知识可知，该等值电路有功损耗为：

$$P=U\ (I_a+I_L)\ =U\ (I_x+I_c)\ \mathrm{tg}\delta=UU\omega C\mathrm{tg}\delta=U^2\omega C\mathrm{tg}\delta$$

式中 U—加于电介质上的电压；

ω—交流电压的角频率；

C—电介质的电容。

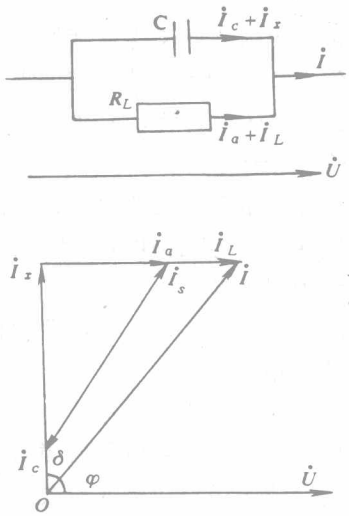

图 1—6　交流电场作用下的电介质等值电路与相量图

由此可知，介损与 δ 或 $\mathrm{tg}\delta$ 成正比，我们把 δ 称为介损角，$\mathrm{tg}\delta$ 称为介损因数。在电气设备的绝缘预防性试验中，对某些设备中介质的 $\mathrm{tg}\delta$ 测试是主要的测试项目之一。介质的 $\mathrm{tg}\delta$ 越小，介损就越小，质量就越好，介损过大，则易使绝缘材料发生热老化甚至引起热击穿。

因为介损由漏阻电流和极化电流引起，故所有影响介质电阻和极化的因素都会影响介损的大小。主要的影响因素有：

①频率：温度不变时，在低频范围内，频率增大，介质容抗减小，瞬时充电电流与极化电流无功分量增大，$\mathrm{tg}\delta$ 减小，但每秒极化周期数增加，总损耗几乎与频率无关，在高频区，虽然 $\mathrm{tg}\delta$ 迅速减小，每一极化周期损耗小，但每秒周期数很大，介损值仍很大，所以高频条件下务须采用 $\mathrm{tg}\delta$ 很小的介质。

②温度：温度对介损的影响较大，而且机理较复杂，图 1—7 所示为 $\mathrm{tg}\delta$ 与温度 t 的关系图线。可知，低温区 $\mathrm{tg}\delta$ 随温度升高而增大，在 t_m 处达到峰值，温度再升高，$\mathrm{tg}\delta$ 反而会减小，如温度继续升高，则 $\mathrm{tg}\delta$ 将急剧增大，易导致介质击穿。介质损耗与温度的关系与此相同，所以在高频或高压电气设备中采用极性绝缘材料时，应据此慎重选择适当材料，注意避免出现工作频率和温度的 $\mathrm{tg}\delta$ 峰值。

③湿度：电介质吸湿以后，漏阻减小，有功漏导电流增大，介损会明显增大，如纸的含水量从 4%增加到 10%时，$\mathrm{tg}\delta$ 会增加 100 倍。

④场强：场强增大，一般来说 tgδ 基本不变。但由实验可知，如介质内部有气泡或气隙，则在外施于电介质上的电压升高到某一值时，气泡或气隙处会出现游离放电，如图 1—8 所示。这是因为正常条件下，气体的耐压能力一般均比固体绝缘材料低，介电系数也较小，所以承受的场强较周围固体介质大，易使气体发生游离，这时 tgδ 突然显著增大。这一电压 u_o，称为起始游离电压，工程上常用此法来检查绝缘材料内部是否存在气泡和气隙，以保证绝缘质量。

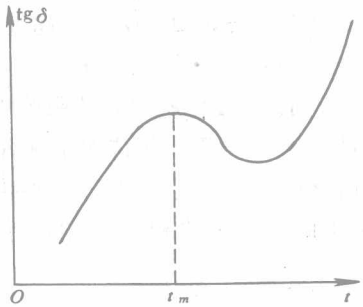

图 1—7　介质 tgδ 与温度 t 的关系

4、电介质的绝缘强度与电击穿

绝缘材料外施电压被击穿时的电场强度称为绝缘强度，单位与场强相同，为千伏/毫米。它反映绝缘材料在外施电压达某一级限时保持绝缘性能的能力。绝缘强度越大，使之击穿的场强或电压就越高，也就越不易击穿。

几种常用电介质绝缘强度如下：

空气：3.3 千伏/毫米（匀强电场下），变压器油：18.0～21.0 千伏/毫米（25#油）；沥青玻璃云母带：16～25 千伏/毫米。

当外施于电介质上的电场强度高于临界值时，会使电介质通过的电流剧增，直致完全失去绝缘性能，这种现象称为电击穿。

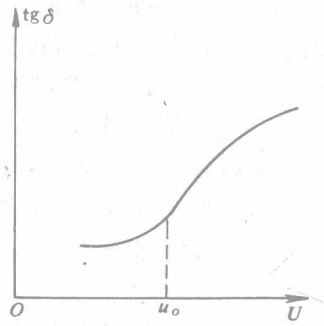

图 1—8　介质 tgδ 与电压 U 的关系

不同的电介质，发生电击穿的机理和影响电击穿的因素各不相同。

(1) 气体电介质的击穿

气体电击穿一般由电子碰撞游离引起，在强电场作用下，气体中带电质点（主要是电子）获得巨大能量而向阳极运动，并撞击气体分子使之游离为正离子和电子。这些电子又从电场获得能量，并在向阳极运动的过程中继续撞击其它的气体分子使之游离。这种连锁反应的结果是形成了一条电子向阳极运动的高电导通道，导致气体最终被击穿。

实验证明：温度一定时，明显改变气体的压力，可提高其击穿电压。这是因为，如加大气体的压力，使单位体积内气体分子密度增大，则电子平均自由行程和动能均较小，碰撞次数虽较多，但游离效果差，只有加大电压，才能使电子获得足够的动能，产生有效的碰撞游离。而减小气体的压力，使单位体积内气体分子密度大大降低，则电子平均自由行程虽较大，但气体分子相互碰撞次数较少，这情况下，也只有升高电压，再加大电子动能，才能促进气体分子的碰撞游离。工程上常采用高真空或高气压两种方法来提高气体的击穿电压，如真空断路器、SF_6 气体断路器和充气电缆等。

场强不均匀时，在场强较大的介质局部表面易发生击穿，称沿面放电。尤其是在空气中，

沿固体介质表面的击穿电压要比介质本身的击穿电压低得多，且与电场形状、电介质表面状况（是否洁净）、电源频率等有关。可见提高气体击穿电压的主要方法有，改进电极形状以改善电场分布、采用高真空或高压力以及高耐电强度的气体等。

（2）液体电介质的击穿

纯净的液体电击穿机理与气体相似，但液体分子密度较大，碰撞游离不易，因此击穿电压比气体的高。

但实际上工程用液体绝缘材料不可避免地含有杂质，在强电场作用下，这些杂质可能发生极化而定向排列，并运动到场强最强处，联成小桥贯穿两电极，引起杂质形成的小桥的电导剧增，液体电介质局部温度升高、汽化、最后导致击穿。如变压器油中，只要含极少量的水就会大大降低其绝缘强度。如图 1—9 所示，而气体杂质混入液体电介质中，会使液体呈现不均匀性。如液体局部过热，会使气体杂质运动，集聚，而导致气泡出现，由于气体 ε_r 较低，所以气泡场强升高，反过来又促进局部发热加剧，导致附近液体受热沸腾汽化，使气泡逐渐增大，形成连通两电极的导电小桥，最终导致电介质的击穿。可见，液体电介质的净化，并在使用过程中尽量减少杂质的渗入是很重要的。

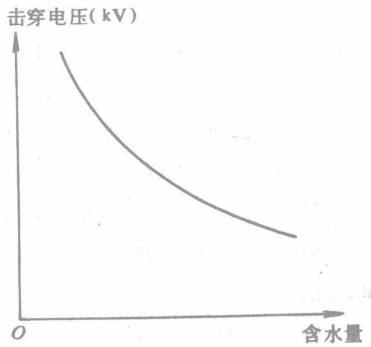

图 1—9　变压器油击穿电压与含水量的关系

影响液体电介质击穿特性的因素有：

①纯净度：纯净度越高，越不容易击穿。

②电源频率：同一电介质，电源频率越高越难击穿。这是因为电源交变越频繁，两电极间搭桥就越困难。

③电压作用时间：电压作用时间越长，击穿电压越低。

④电场均匀度：电场越不均匀，介质越易击穿。

提高液体电介质击穿电压的主要方法就是提高并保持液体电介质的品质。

（3）固体电介质的击穿

固体电介质的击穿分强电击穿、放电击穿、热击穿三种。

①强电击穿：是在强电场作用下，介质内部带电质点剧烈地定向运动而产生碰撞游离，形成导电通道而导致的击穿。这种击穿只与场强有关，与电压作用时间及环境因素无关。

②放电击穿：在电场作用下，电介质内部所含气泡首先因碰撞游离而放电，发热。介质中的杂质也因发热而汽化，产生新的气泡，反过来又促进碰撞游离，加剧放电，直致电介质的击穿。显然，这样电击穿不仅与场强有关，也与介质内部气泡和杂质含量有关。

③热击穿：运行中的绝缘材料内部同时存在一个发热与散热的过程，如发热量大于散热量，将使介质温度升高，使漏阻减小，漏导电流增加、损耗加大，反过来又使温度升高，如此循环，最后导致热击穿。

影响固体介质击穿的因素有：

①温度：环境温度增加，热击穿电压降低。

②时间：一般情况下，电压作用时间增长，击穿电压降低。

③材质：绝缘材料内含气泡和杂质均会使击穿电压降低。