

第1章 电子材料

【重点提示】绝缘材料的特性，有机绝缘材料、无机绝缘材料的种类、特点及应用，常用的高电导材料、高电阻材料、焊接材料及导线的特点和使用，磁性材料的特性，常用的软磁材料和硬磁材料的特点，电子设备中常见的软磁铁氧体元件。

1.1 绝缘材料

常用绝缘材料按其化学性质不同，可分为无机绝缘材料和有机绝缘材料。绝缘材料往往结合其实际用途，做成具有绝缘特性的各种部件。

1.1.1 绝缘材料的特性

1. 绝缘材料的基本性能

(1) 电介质的漏导电流与绝缘电阻。绝缘材料并非绝对不导电。当对绝缘材料施加一定的直流电压后，绝缘材料中会有极其微弱的漏导电流。相应地，绝缘材料存在绝缘电阻。

绝缘电阻的数值都很大，用欧姆表无法测量，要用兆欧表测量。

(2) 电介质的极化与相对介电常数。在外电场的作用下，绝缘材料中原先杂乱排列的电荷沿电场取向，称为电介质极化。极化的结果，在电介质的表面形成了符号相反的感应电荷。

以某种物质为介质的电容器的电容与以真空做介质的同样尺寸的电容之比值，称为该物质的相对介电常数。

(3) 电介质的损耗。在交变电场作用下，电介质的部分电能将转变成热能，称为电介质损耗，简称介质损耗。

(4) 电介质的击穿。处于电场中的任何电介质，当其电场强度超过某一阈值时，通过介质的电流剧烈增长，致使介质被局部破坏或分解，丧失绝缘性能，这种现象称为电介质击穿。

(5) 电介质的老化。绝缘材料在使用过程中，由于各种因素的长期作用会发生一系列不可逆的化学、物理变化，材料的电气和机械性能随时间的增加而变坏，这种不可逆的过程称为电介质老化。

(6) 除了以上电性能外，选用绝缘材料时还需注意其物理性能（吸湿性、耐热、耐寒、导热性、膨胀系数）、化学性能（稳定性、耐腐蚀性、酸值）、机械性能（抗拉强度）等。

2. 影响绝缘材料性能的主要因素

(1) 温度。温度升高，电介质的电阻率下降，电阻减小；电介质的极化特性和损耗特性也随着温度的变化而变化；温度升高还会加速热击穿和热老化。

(2) 湿度。绝缘材料的绝缘电阻，一般随湿度增大而下降；吸湿后介电常数和电导率普遍增大；介质损耗增大，抗电强度降低。电气性能在变潮后显著恶化。因此，电气设备应避免在高温、高湿环境中使用，以免加速其绝缘性能恶化。

(3) 电场强度。外加电场增大，会使绝缘材料电阻率下降，介质损耗增大，还会加速击穿与老化。如：电源开关、插座标有“250 V/6 A”等字样，表示其额定工作电压为交流 250 V，额定工作电流为 6 A。

(4) 频率。外加的电场频率变大，会影响电介质的极化特性、损耗特性，影响介质的击穿与老化。

绝缘材料应具有良好的介电性能，即具有较高的绝缘电阻和耐压强度。此外，绝缘材料还应具有良好的耐热性、导热性、防潮防霉性和较高的机械强度以及加工方便等特点。在选用绝缘材料时要根据应用场合的环境特点和材料特点，合理选择，以免选材不当，导致加速老化甚至热击穿，同时要综合考虑经济性和技术性能。在高频、高压、高温、高湿环境中选用极性绝缘材料时，尤其应该注意。

两种以上电阻率不同的绝缘材料复合使用时，须注意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，承受的电压大小与电阻率成正比，绝缘电阻越大，承受的电压越高，如果将两种电阻率相差较大的电介质复合使用，会导致材料上电压分布极不均匀。在交流电压下，电压分布取决于电阻率与材料介电常数的大小，如果介电常数大，材料上电压分布主要受介电常数的影响。

1.1.2 有机绝缘材料

1. 树脂

树脂分为天然树脂和合成树脂两种，合成树脂包括热塑性树脂和热固性树脂。

(1) 热塑性合成树脂。热塑性合成树脂是由化学方法通过聚合反应人工合成的，其聚合物是线型结构，具有热塑性。

热塑性合成树脂应用较广。聚乙烯有相当的弹性和柔韧性，可制成薄膜，常用做高频电缆的绝缘材料，高频骨架和电容器的薄膜介质；聚苯乙烯的电阻率高，常用做高频和超高频的低损耗绝缘；聚四氟乙烯的化学稳定性高，不会燃烧，用于耐高温的电容器；聚氯乙烯广泛用于制造各种塑料、导线绝缘及电缆的保护层，以及用于制造绝缘漆；聚甲基丙烯酸甲酯又称有机玻璃，可用于装饰，制作一般结构零件，读数透镜，绝缘零件及壳、罩、接线柱等。

(2) 热固性合成树脂。热固性合成树脂是通过化学缩聚反应产生的，聚合物大多是空间结构，具有热固性。常用的热固性合成树脂主要有：

酚醛树脂：酚醛树脂大多数为热固性的，是由苯酚和甲醛缩聚所得的热固性酚醛，又称胶木（电木），价格低廉，在电子工业中应用相当普遍。如用于制造合成电阻器及合成电位器的电阻体、酚醛塑料、酚醛层压板，电工中的各类开关、插座、插头等。但其高频损耗较大，只适用于工频和音频等低频场合。

环氧树脂：环氧树脂本来呈热塑性，在各种固化剂作用下，会变成热固性。环氧树脂的电气绝缘性好，耐热，耐气候变化，稳定性高，透湿性小，黏结性好，能与金属、陶瓷等多种材料密切粘合。在电子工业中主要用于黏结、浇注、包封、涂覆及层压板中。

硅氧树脂：又称有机树脂，具有有机物和无机物优点的一类新型高分子化合物。有良好的机械性能和耐热性，介电性能好，防水，防潮，耐寒，耐化学腐蚀，耐电弧高压电晕。广泛用于制造有机硅漆，有机硅模塑料，用于浸渍、涂覆和电子元器件的封装。透明的有机硅玻璃树脂，电气性能和高频性能好，适用高温、高湿条件下使用，常用做各种材料表面涂层。

2. 塑料

塑料是以合成树脂为主要原料，加入填料和各种添加剂等配制而成的粉状、粒状或纤维状，在一定的温度、压力条件下可以塑制的高分子材料。塑料质轻，电气性能优良，有足够的硬度和机械强度，易于用模具加工成型，所以在电气设备中得到广泛的应用。

(1) 塑料的基本成分。塑料的基本成分是胶黏剂和填料。胶黏剂将全部成分胶黏起来，它决定了塑料制品的基本特性，常用的胶黏剂是合成树脂。加入填料可提高塑料的机械强度，降低成本。为了使塑料获得某些不同性能，有时还加入不同种类的添加剂，如增塑剂、着色剂、稳定剂、润滑剂、固化剂等。

(2) 塑料的分类。塑料按其主要成分树脂的类型可分为热固性和热塑性两大类。

热固性塑料热压成型后成为不溶不熔的固化物，常用的有以酚醛树脂为主要成分的酚醛塑料，还有耐高温的 4250 塑料、聚酰亚胺塑料、聚酯塑料等。

热塑性塑料在热挤压成型后虽固化，但其物理、化学性质不发生明显变化，仍可溶、可熔，可反复成型。常用的热塑性塑料有以下几种。

ABS 工程塑料：象牙色的不透明体，有良好的机电综合性能，在一定的温度范围内尺寸稳定，表面硬度较高，易于机械加工和成型，表面可镀金属。但耐热性、耐寒性较差，接触某些化学药品（如冰醋酸和酸类）和某些植物油时，易产生裂纹。工程塑料适用于制作各种仪表外壳、支架、小型电机外壳、电动工具外壳、结构件和装饰件等。

聚酰胺（尼龙）1010：白色半透明体，在常温下具有较高的机械强度，较好的电气性能、冲击韧性、耐磨性、自润滑性，结构稳定，有较好的耐油、耐有机溶剂性，可用做线圈骨架、插座、接线板、炭刷架及仪表齿轮等，在电缆工业中常用做航空电线电缆护层。

聚乙烯（PE）：白色半透明固体，密度比水小，具有良好的电气性能，其相对介电常数和介质损耗几乎与频率无关，且摩擦系数小，化学稳定性高，耐潮、耐寒性优良，但软化温度较低，长期工作温度不应高于 70℃。用聚乙烯制成的薄膜，广泛用于通信电缆、高频电缆和水底电缆等做导体绝缘层。

聚氯乙烯(PVC)：分绝缘级与护层级两种，其中绝缘级按耐温条件分别为 65℃、80℃、90℃、105℃四种，护层级耐温 65℃。聚氯乙烯机械性能和电气性能良好，结构稳定，具有耐潮、耐电晕、不易燃、成本低、加工方便等优点。

聚四氟乙烯：被称为塑料王，其薄膜具有很高的耐热性和耐寒性，电气性能优良，介质损耗小，且几乎不受温度和频率变化的影响，在电弧作用下不炭化，化学性质稳定，不溶解于任何有机溶剂，不燃烧，不吸湿，只有碱金属和氟元素在高温下对其有明显腐蚀作用，高温下（如超过 300℃）抗张强度下降较大，延伸率增加，低温时情况相反，温度超过 500℃时，会分解出有毒的、化学性能活泼的气态氟。聚四氟乙烯薄膜常用于高温或腐蚀性环境下工作的电机、电缆或其他设备的绕组绝缘和槽间绝缘以及电容器制造、仪表绝缘等。

聚酯：无色透明薄膜，具有很高的抗拉强度、电气绝缘强度、耐热性和耐湿性，对大多数化学药品和溶剂都很稳定，而且不会生霉，但抗电弧性、耐碱性差，工作温度为 $-60^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ ，适宜在低压电机中用做槽间绝缘、相间绝缘和成型线圈包扎用绝缘带，常和青壳纸复合使用。

(3) 塑料的主要用途。塑料在电子工业中主要用做绝缘零件、结构零件、外观零件，用途不同对其性能要求也不同。

绝缘零件：根据其应用场合、工作频率范围对介电性能的要求，并兼顾环境条件及工艺性能等选用，如电线电缆的绝缘层、护套等。

结构零件：要求具有较高的机械性能，用于高温环境和摩擦运转的结构零件要求耐热性好，摩擦系数低，耐磨性强，在一些场合可使用增强塑料或复合塑料，如某些电子钟、收录机的机芯塑料件等。

外观零件：除具有一定机械性能外，要求表面光洁，着色性好，易于电镀，以及透光、耐热等，如仪器的塑料机壳。

3. 绝缘胶黏剂

绝缘胶黏剂是一类具有黏结性能的物质，可以部分代替焊接、铆接和螺钉等机械连接。胶黏剂按其性质大体分为热固性树脂黏剂、热塑性树脂黏剂、橡胶胶黏剂、特种胶黏剂等。常用的胶粘剂有以下两种：

(1) 502 胶。它是无色或微黄色的透明液体。在室温下很短时间内会产生聚合作用而硬化，储存期短，有较强的黏合作用。502 胶对各种金属、玻璃、塑料（聚乙烯和聚四氟乙烯除外）及橡胶等材料均有较强黏合力，适合于大面积黏合。

(2) 环氧树脂胶。它由环氧树脂加入固化剂、增塑剂和填料组成，固化时间长，需要 24 小时左右，其黏结强度随时间延长和温度提高而增强。环氧树脂胶对于各种材料均有较强黏合力，多用于密封零件的灌封。

4. 橡胶

橡胶是一种具有弹性的绝缘材料，在较大的温度范围内具有优良的弹性、电绝缘性、耐热、耐寒和耐腐蚀性，是一种用途广泛的绝缘材料，在电子工业中用做绝缘材料和封闭、密封材料，也可做缓冲防震的弹性体。常用于高压帽、密封套、键盘开关、护套、减震器等。

橡胶可分天然橡胶和合成橡胶两大类，它们均经过硫化处理，即在一定温度和压力下，通过硫化剂作用，改善橡胶分子结构，使之获得弹性。为了改善橡胶的性能，还须添加其他的配合剂，如促进硫化剂、共硫化剂、防老剂、补强剂、软化剂等。

天然橡胶的抗张强度、抗衡性和回弹性比多数合成橡胶好，但不耐热，易老化，不耐臭氧，不耐油和有机溶剂，易燃。天然橡胶适宜制作柔软性、弯曲性和弹性要求较高的电线电缆和护套，但不宜直接接触矿物油或有机溶剂，也不宜用于户外。

5. 绝缘漆

绝缘漆是以高分子聚合物为基础，能在一定条件下固化成绝缘硬膜或绝缘整体的重要绝缘材料。绝缘漆主要以合成树脂或天然树脂为漆基（即成膜物质），添加溶剂、稀释剂、填料等组成。漆基在常温下黏度很大或是固体，溶剂或稀释剂用来溶解漆基，调节漆基黏度和固体含量，使其在漆的成膜、固化过程中或者逐渐挥发，或者成为绝缘体的组成部分。

绝缘漆按用途可分为浸渍漆、漆包线漆、复盖漆、硅钢片漆和防电晕漆等数种。

6. 绝缘纸和纸板

绝缘纸和纸板属纤维绝缘材料，常用植物纤维、无碱玻璃纤维（即不含钾、钠氧化物的玻璃纤维）或合成纤维制成。植物纤维属多孔性物质，其制品有一定的机械性能，但吸湿性强，耐热性差，很容易极化。所以使用时常需与绝缘油组合或经浸渍处理，以提高其电气性能。无碱玻璃纤维耐热性好，耐腐蚀性强，吸湿性小，抗张力强度高，但较脆，柔性较差，密度大，延伸率小，对人的皮肤有刺激。而合成纤维制品则兼具二者之优点，是很有发展前途的新材料。

绝缘纸按用途分有电缆纸、电话纸、电容器纸和聚酯绝缘纸等。

绝缘纸板由木质纤维或掺有适量棉纤维的混合纸浆制成，可在空气中或温度不高于 90℃ 的变压器油中做绝缘材料的保护材料。绝缘纸板有薄型纸板（即青壳纸和黄壳纸）、厚型纸板、硬钢纸板、钢纸管、玻璃钢复合钢纸管等。

7. 层压板

层压板是以纸或布做底材，浸以不同的胶黏剂，经热压或卷制而成的层状结构的板材，可制成具有优良电气、机械性能和耐热、耐油、耐霉、耐电弧、防电晕等特性的制品。常用做接线板、骨架、衬垫、转动齿轮等结构材料和绝缘材料。其性能取决于底材和胶黏剂的性质及其成型工艺。

常用底材有木质纤维纸、无碱玻璃布等。常用胶黏剂有酚醛树脂、有机硅树脂等，其对层压制品的性能也有很大的影响。

电工层压制品可分为层压板、层压管（层压棒）、电容器套管芯三类。

8. 绝缘油

绝缘油为液体绝缘材料，主要有矿物油和合成油两大类，其中矿物油使用最为广泛。它是从石油原油中经不同程度的精制提炼而得到的一种中性液体，呈金黄色，具有很好的化学稳定性和电气稳定性，主要应用于工业电气设备中，油除了起绝缘作用外，还起冷却、灭弧、填充、浸渍等作用。矿物油主要有各类变压器油、开关油、电容器油、电缆油等。

合成油及天然植物油一般用于电容器做浸渍剂，合成油主要有十二烷基苯、硅油等。

1.1.3 无机绝缘材料

无机绝缘材料的耐热性好，不燃烧，不易老化，适合制造稳定性要求高而机械性能坚实的零件，但其柔韧性和弹性较差。

常用的无机绝缘材料有玻璃、陶瓷、云母、石棉等类别。每一类又可添加不同成分制成性能各异的制品以满足不同的要求，如保险盒、电力线架线端子、电炉的绝缘云母片等。

1. 玻璃

玻璃按所含成分的不同可分为下列两类：

碱玻璃：含有钾或钠氧化物的玻璃，如普通玻璃。

无碱玻璃：不含钾或钠氧化物的玻璃，如纯石英玻璃。

常温下的玻璃有极好的绝缘性能，温度升高，其绝缘电性能明显下降，介质损耗增大，熔化时的绝缘电阻仅为 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$ 。普通玻璃在电场作用下极化显著，介电常数达 16，纯净的石英玻璃介电常数约为 3.5。在高频情况下，玻璃的介质损耗急剧增大，可能导致热击穿。

玻璃的导热系数不大，且与成分有关，它不易传热，也没有明显的熔点，它受热时可逐渐软化，约 1700°C 时熔化。玻璃各部分温差较大时极易破裂，它对温度迅速上升的适应力远比对温度迅速下降时要好，一般经不住温度的急剧变化。石英玻璃导热系数较大，热膨胀系数小，所以热性能比普通玻璃好得多。

含碱玻璃表面吸附水分时，可能发生水解作用，造成对玻璃的侵蚀，同时产生带电离子，降低玻璃表面电阻率，导致漏电现象的出现。氢氟酸对玻璃也有腐蚀作用。石英玻璃对水稳定性最高，表面电阻基本恒定。

玻璃抗压强度高于抗拉强度，抗弯强度更差。所以，玻璃除了纤维制品外，都硬脆易裂，工作中应尽量使其受压力而不受拉力，避免振动、撞击和拉弯应力。

2. 陶瓷

陶瓷以黏土、石英等为原料，经研磨、成型、干燥、焙烧等工序制成陶瓷，具有耐热、耐湿性好，机械强度高，电绝缘性能优良，温度膨胀系数小的优点，但质地较脆，常用于制作插座、线圈骨架、瓷介电容等。按用途和性能可分为装置陶瓷、电容器陶瓷及多孔陶瓷。

(1) 装置陶瓷。装置陶瓷分两大类，其中低频瓷（电工瓷）主要用于高压、低压及通信线路用绝缘瓷瓶、绝缘套管、瓷夹板等。其原料中含有较多的碱金属氧化物，因而绝缘电阻小，介质损耗大，且随温度升高而增大，不适用于高频范围。高频瓷要求绝缘电阻大，介质损耗小。

(2) 电容器陶瓷。电容器陶瓷的最大特点是介质损耗很小，介电常数较大，适用于做高、低压电容器及高稳定度的电容器。

(3) 多孔陶瓷。多孔陶瓷击穿强度低而耐热性能高，根据用途可分为耐热陶瓷和真空陶瓷两类。多孔耐热陶瓷多用于制造各种线绕电阻器、滑线变阻器、电热元件支架和底盘。多孔真空陶瓷主要作为电真空器件的内部绝缘。

3. 云母及其制品

云母是一种天然矿物，种类很多，主要应用的是白云母和金云母两种。

白云母具有玻璃光泽，一般为无色透明。金云母近于金属光泽和半金属光泽，常见的有金黄色、棕色或浅绿色等，透明度稍差。两种云母均具有良好的电气性能和机械性能，耐热性好，化学特性稳定，耐电晕，容易剥离加工成厚度为 $0.01 \sim 0.03 \text{ mm}$ 的柔软而富有弹性的云母薄片。白云母电气性能比金云母好，而金云母柔软性、耐热性比白云母好。

杂质和皱纹是衡量云母剥片质量的重要标志。当云母剥片中含有氧化铁等杂质时，会在云母剥片的内部形成许多斑点，杂质越多斑点面积就越大，电气绝缘性能就越差。皱纹对云母片的平坦性和电气绝缘性能影响也很大。

云母为耐高温材料，它热膨胀系数小，所以能适应温度的急剧变化。温度在 500°C 以下时，仍保持其透明状态，弹性无变化。白云母最高使用温度为 550°C ，热至 $600^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ 时，其性能有显著变化。金云母最高使用温度为 1000°C ，温度在 $950^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$ 时性能开

始变化，主要用于绝缘要求高的场合。

此外，云母有耐潮、吸油性、柔顺、耐磨、化学性能稳定、抗电火花能力强、无炭化现象等特点。白云母耐酸性很强，金云母则可被硫酸分解。

云母制品是将天然云母片用虫胶、甘油树脂、沥青混合物、沥青漆等强力胶黏剂黏合而成，可制成各种形状、用途的云母板。如含胶黏剂 8%~15% 的少胶云母板适用于制造高温运行和高速旋转电机的绝缘零件，含胶黏剂 15%~25% 的多胶云母板则多用来制造外形复杂的绝缘零部件。

4. 石棉及其制品

石棉是一种矿产品，工业上应用的主要是温石棉（蛇纹石类石棉）。

石棉具有保温、耐温、绝缘、耐酸碱、防腐蚀等特点，适用于高温条件下工作的电机、电器，如用做低压空气开关的灭弧罩等。

电工中应用广泛的石棉制品主要有石棉纱、线、绳、纸、板、编织带等。

长期接触石棉对人体有害，加工制作石棉制品时要注意劳动保护。

1.2 导电材料

导电材料主要是金属材料，又称导电金属。用做导电材料的金属除应具有高导电性外，还应具有足够的机械强度，不易氧化，不易腐蚀，容易加工和焊接。在选用时需要考虑其资源情况和经济性。

导电材料按用途一般可分为高电导材料、高电阻材料、焊接材料、导线材料四类。

1.2.1 导电材料的特性

1. 电阻

当存在外电场时，金属中的自由电子在运动中不断与晶格结点上做热振动的正离子相碰撞，使电子运动受到阻碍，因而金属具有一定的电阻。金属的电阻特性通常用电阻率 ρ 来表示。

2. 电子逸出功

金属中的电子脱离其本体所必需获得的能量，单位为电子伏特（eV）。不同金属，其电子逸出功不同。

3. 接触电位差

接触电位差是指在两种不同金属或合金接触时，两者之间所产生的电位差。

4. 温差电势

两种不同的金属接触，如果两个触点间有一定温度差时，则产生温差电势。根据温差电势现象，选用温差电势大的金属，可以组成热电偶用来测量温度和高频电流。

此外，温度升高，会使金属电阻增大；合金元素和杂质也会使金属电阻增大；机械加

工也会使电阻增大；电流频率升高，金属产生趋肤效应，导体的交流电阻也增大。

1.2.2 高电导材料

高电导材料指某些具有低电阻率的导电金属。常见金属的导电能力顺序为银、铜、金、铝。由于银、金价格高，仅在一些特殊场合使用。电子工业中常用的高电导材料为铜、铝及它们的合金。

1. 铜及铜合金

铜有良好的导电性和导热性，不易氧化和腐蚀，机械强度较高，有良好的延展性和可塑性，易机械加工，易焊接。铜的这些特性，在电子工业中得到广泛应用，如导线、电池极片、屏蔽罩等。

当铜中含有杂质时，其导电性显著降低，所以电子工业中用的是杂质含量很少的电解铜。

电子工业中的绕组、导线、极片大都采用的是软铜。软铜是铜在与氧隔绝的条件下以 $400\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度进行退火处理后得到的，这种铜延展性、导电性好。

铜有好的耐蚀性，在室温干燥条件下几乎不氧化；铜在不同条件下氧化产生的黑色 CuO 膜或红色 Cu_2O 膜具有保护作用。但在潮湿空气中，铜会产生铜绿；在腐蚀气体中会受腐蚀。

铜的缺点是耐磨性不好，硬度不够，某些特殊用途的导电材料采用铜的合金。常用的高电导铜合金有黄铜和青铜。

黄铜是加入锌元素的铜合金，具有良好的机械性能和压力加工性能，其导电性能较差，抗拉强度比纯铜大得多，常用于制作焊片、螺钉、接触片、接线柱等。

青铜是除黄铜、白铜（镍铜合金）外的铜合金总称。常用的有锡磷青铜、铍青铜等。

锡磷青铜常用做弹性材料，用于制造导电的接触簧片、弹簧插头、连接器等，主要缺点是导电能力差，脆性大，制作时容易断裂。

高强度铍青铜具有特别高的机械强度、硬度和良好的耐磨、耐蚀、耐疲劳性，并有较好的导电性和导热性，弹性稳定好，弹性极限高，用于制作导电的弹性零件、开关零件、滑动接触零件等。

2. 铝及铝合金

铝是一种银白色的轻金属，具有良好的导电、导热性，易进行机械加工。铝的化学性质活泼，在室温空气中极易氧化，在工业中往往在铝的表面人为生成一层均匀而致密的氧化膜作为保护层，这个过程称为钝化。

由于铝易氧化，焊接比较困难，表面刮净后要马上搪松香焊锡，速度要快；或使用焊膏为助焊剂，但焊完后要清理干净，防止腐蚀。

铝的资源丰富，价格低廉，在工业中用做导线、极片，制成的铝箔用途也很广泛。

铝合金的机械强度比铝高，有足够轻的重量、塑性和耐蚀性。

铝硅合金又称硅铝明，流动性好，收缩率小，耐蚀，易焊接，可代替细金丝用于连接线。

3. 贵金属及其合金

(1) 金及其合金。金具有良好的导电导热性，在空气中不氧化，抗硫化性也较好，但价格较高，主要用做金属接点的电镀材料。金的硬度较低，常用的是加入各种硬化元素的金基合金。金基合金还有一个优点是具有良好的抗有机污染的能力，常用于要求较高的电接触元件中做弱电小功率接点。其中金镍合金的硬度和耐磨性均高于纯金，常用在要求使用寿命长、小负荷、小接触压力的接点，如各种继电器、波段开关等。此外，常用的还有金银、金铜、金锡等金基合金。

(2) 银及其合金。银的导电性和导热性都很好，易于加工成型，其氧化膜也能导电，对接触电阻影响不大，并能抵抗有机污染。与其他贵金属相比，银的价格比较便宜，在一般小功率继电器中应用很广。但其耐磨性较差，容易硫化，银的硫化物不易导电，也不易清除，为此，常采用银铜、银镁镍等合金，它们还具有优良的弹性，可兼做接触簧片。银铅锌、银铜等新型合金的导电性与银相近，而强度、硬度、抗硫化性均有所提高。

(3) 铂族金属及其合金。铂不会氧化，也不易形成高阻薄膜，接触电阻低而且稳定，耐磨性良好，但纯铂的硬度不高，价格昂贵，在电接触元件中用得不多。常用的是铂铱合金，它的耐磨损性能好，硬度很高，使用寿命比纯铂接点长得多。与铂基合金相近的接点材料还有钯银、钯铜、钯铱合金等。铂族金属及其合金价格昂贵，且抗有机污染的能力较差，有被金基合金所取代的趋向。

(4) 层状复合材料。层状复合材料是由两种或两种以上金属材料所形成的面结合材料。层状复合材料的基体材料可采用钢、黄铜、锌白铜、铍青铜、铜镍锡、钢铁、铜镍、镍和不锈钢等，与其复合的电接触材料则可选用金、银、钯、铂及其合金，这样既有利于节约贵金属，又可满足不同的技术要求，提高产品的可靠性和稳定性，在开关、连接器、电刷等弱电接触元件中广泛采用。

4. 敷铜板

敷铜板全称为敷铜箔层压板，又称覆铜板。敷铜板是减成法（即腐蚀法）制作印制电路板的主要材料，可分为层压敷铜板和塑料敷铜板两大类，常用的层压敷铜板按基材的材料分为酚醛纸基敷铜板、环氧纸基敷铜板和环氧玻璃布敷铜板等。

(1) 酚醛纸基敷铜板。它以酚醛树脂为黏合剂，纤维纸为增强材料。其工作温度较低，耐潮湿性差，但价格便宜，主要用于收音机、收录机、电视机等家用电器。

(2) 环氧纸基敷铜板。它以环氧树脂为黏合剂，纤维纸为增强材料。其电气性能、机械性能比酚醛纸基敷铜板好，常用于一般的电子仪器。

(3) 环氧玻璃布敷铜板。它以环氧树脂为黏合剂，玻璃纤维布为增强材料。其机械性能、尺寸稳定性、抗热冲击性等都比纸质层压板好，电气性能优良，工作温度较高，受环境温度影响小，广泛应用于要求较高的航天、科研等电子设备。

(4) 聚四氟乙烯玻璃布敷铜板。它以聚四氟乙烯为黏合剂，玻璃纤维布为增强材料。它的导电性能优良，耐高温、耐潮湿，化学稳定性好，工作温度范围宽，是比较理想的用于高频、微波电子设备的印制电路板基材，但其成本较高、刚性也较差。

敷铜板有单面板和双面板之分，它在基板材料的单面或双面敷以 0.05 mm 厚的电解紫铜

箔，分别用于制作单面印制电路板和双面印制电路板。此外，刚性多层印制板也是采用环氧玻璃布敷铜板经腐蚀、热压、黏合等工艺制成。

在选用敷铜板时要根据使用的工作频率范围选择不同基材的敷铜板。一般地，低频场合可选用酚醛板，高频工作时要用环氧板。此外，还需根据所安装的元件多少、重量、板面大小，选择不同厚度的敷铜板（1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm）。目前，大部分使用的是环氧板。

1.2.3 高电阻材料

某些场合需要用到高电阻系数的导线如电阻丝等，常用的高电阻材料大都是铜、镍、铬、铁等合金。

1. 锰铜

锰铜是铜、镍、锰的合金，具有特殊的褐红色光泽，电阻率低，主要用于电桥、电位差计、标准电阻元件及分流器、分压器。

2. 康铜

康铜是铜、镍合金，机械强度高，抗氧化和耐腐蚀性好，工作温度较高。康铜丝在空气中加热氧化，能在其表面形成一层附着能力很强的氧化膜绝缘层。康铜主要用于电流、电压调节装置或控制绕组。

3. 镍铬合金

镍铬合金是一种电阻系数大的合金，具有良好的耐高温性能，常用以制造线绕电阻器、电阻式加热器及电炉丝。

4. 铁铬铝合金

铁铬铝合金是以铁为主要成分，加入部分的铬和铝来提高电阻系数和耐热性。它的价格便宜，脆性也大，不易拉成细丝，常制成带状或直径较大的电阻丝。

1.2.4 焊接材料

焊接是一种牢固的电连接形式。焊接材料包括焊料、助焊剂、阻焊剂。

1. 焊料

焊料是填充被焊金属空隙的材料，电子工业焊接常用的是软焊料——铅锡合金，在锡中加入铅可以增大焊料流动性，增加强度，降低成本。常用的锡铅焊料中锡占 62.7%，铅占 37.3%，这种配比的焊锡熔点和凝固点都是 183℃，可以由液态直接冷却为固态，不经过半液态，焊点可迅速凝固，缩短焊接时间，减少虚焊，该点温度称为共晶点，该成分配比的焊锡称为共晶焊锡，铅锡合金的状态图如图 1.1 所示。

图 1.1 中， $A-B-C$ 线为液相线，温度在液相线以上时焊料呈液态； $A-D-B-E-C$ 为固相线，温度在固相线以下时焊料呈固态；液相线与固相线之间区域为半液体区，焊料呈稠糊状； B 为共晶点。

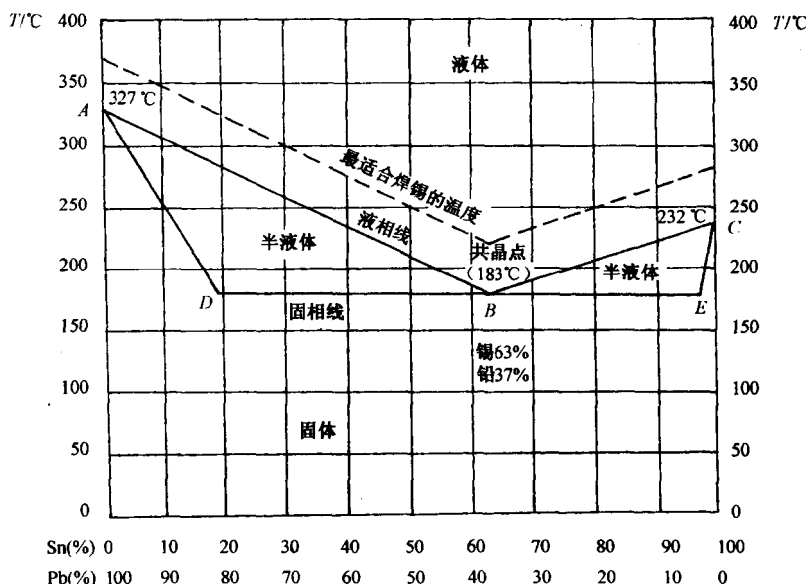


图 1.1 铅锡合金的状态图

共晶焊锡还能承受较大的拉力和剪切力，有较高的焊接强度，其熔化温度低于非共晶焊锡，可减少被焊元器件受热损坏的机会。非共晶焊锡的凝固性、流动性差，不易焊接，焊接速度慢，效率低，焊接质量差。

2. 助焊剂

对焊接质量起不良影响的主要因素是焊体表面的氧化膜，因此必须在焊接过程中用助焊剂去除氧化膜并阻止再被氧化。

手工焊接常用松香做助焊剂。松香在 74 °C 时，内部的松香呈活性，随温度上升，使金属表面氧化物以金属皂形式激离。温度超过 300 °C，松香失去活性。

为提高焊接质量和焊接效率，需在助焊剂中添加活性剂。为了使用方便，常采用中心夹有松香助焊剂、含锡量为 61 % 的焊锡丝，称为松香焊锡丝。

有些焊点的焊接时间过长，造成焊点成焊锡渣，可熔入松香用电烙铁加热还原。

3. 阻焊剂

阻焊剂是一种耐高温涂料，在焊接时，可将不需焊接的部分涂上阻焊剂保护起来，使焊接仅限于焊盘，防止在浸焊或波峰焊时发生焊锡搭连短路，同时还可使焊点饱满，减少虚焊，且有助于节约焊料。此外，由于印制电路板的板面部分为阻焊剂所覆盖，焊接时板面受到的热冲击减小，因而板面也不易起泡、分层，有利于浸焊、波峰焊等。

阻焊剂按其固化方法不同可分为热固化型、光固化型、电子束辐射固化型。

在波峰焊时，为保证波峰焊的焊接质量和节约焊锡，防止锡熔化时被氧化，还加有波峰焊抗氧化剂，可减少铅的蒸发，有助于改善生产环境、保障工人健康。

1.2.5 导线

1. 导线的种类

在电子工业中，常用线材有电线和电缆两大类，它们又可分裸导线、电磁线、绝缘电线、通信电缆等。

裸导线是没有绝缘层的单股或多股铜线、镀锡铜线、电阻合金线等。裸导线常用做电缆的芯线和电器制品，也可做电力及通信架空线，电阻合金线用于制作电阻和加热器件。

电磁线是指有涂漆或包缠纤维绝缘层的圆形或扁形铜线。电磁线主要用做电机、变压器、电感器件及电气仪表的绕组，在家用电器上应用也非常广泛。

绝缘电线电缆就是通常所说的安装线及安装电缆，一般由导电的线芯、绝缘层和保护层（护套）组成。在结构上有硬型、软型和特软型之分，线芯有单芯、二芯、三芯及多芯等并有各种不同的线径，如图 1.2 所示。绝缘电线用于电气设备、仪表内部的电路连接，还可以用于电器产品及照明装置的安装线及引出线。绝缘电缆适用于移动电气设备的连接。

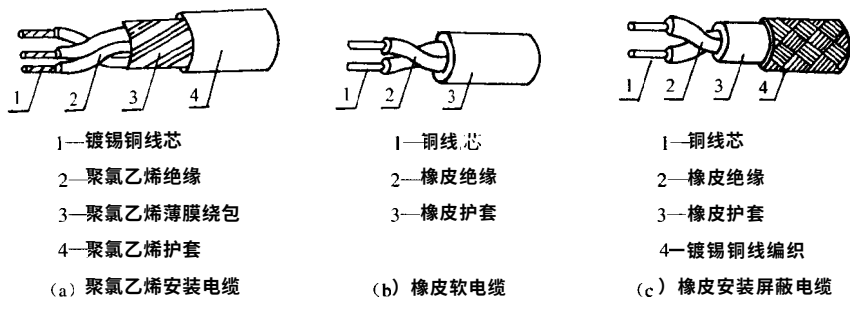


图 1.2 绝缘电线电缆种类

通信电缆包括电信系统中各种通信电缆、射频电缆、电话线及广播线等，如图 1.3 所示。

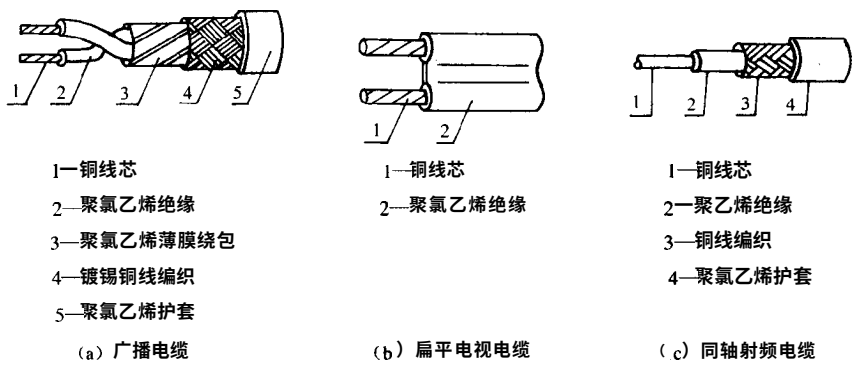


图 1.3 通信电缆种类

2. 电线、电缆型号命名

(1) 电线型号命名法如表 1.1 所示。

表 1.1 电线型号命名法

分类代号或用途		绝缘		护套		派生特性	
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义
A	安装线缆	V	聚氯乙烯	V	聚氯乙烯	P	屏蔽
B	布电线	F	氟塑料	H	橡胶套	R	软
F	飞机用低压线	Y	聚乙烯	B	编织套	S	双绞
R	日用电器用软线	X	橡皮	L	蜡克	B	平行
Y	一般工业移动电器用线	ST	天然丝	N	尼龙套	D	带形
		B	聚丙烯				
T	天线	SE	双丝包	SK	尼龙丝	T	特种

例：纤维聚氯乙烯安装线 ASTVRP。

A：分类（安装线） ST：绝缘（天然丝） V：护套（聚氯乙烯）

R：派生（软） P：派生（屏蔽）

（2 射频电缆型号命名法如表 1.2 所示。

表 1.2 射频电缆型号命名方法

分类		绝缘		护套		派生特性	
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义
S	射频同轴电缆	Y	聚乙烯实芯	V	聚氯乙烯	P	屏蔽
SE	射频对称电缆	YF	发泡聚乙烯 半空气	F	氟塑料	Z	综合式
ST	特种射频电缆	YK	纵孔聚乙烯 半空气	B	玻璃丝编织 浸有机硅漆	D	镀铜屏蔽层
SJ	强力射频电缆	X	橡皮	H	橡胶套		
SG	高压射频电缆	D	聚乙烯空气	VZ	阻燃聚氯乙烯		
SZ	延迟射频电缆	F	氟塑料实芯	Y	聚乙烯		
SS	电视电缆	U	氟塑料空气				

例：聚氯乙烯绝缘同轴射频电缆 SYV—75。

S：分类（射频同轴电缆） Y：绝缘（聚氯乙烯实芯）

V 护套（聚氯乙烯） 75：特性阻抗（75Ω）

3. 导线颜色的选用

为了整机装配及维修方便，导线和绝缘套管的颜色通常按表 1.3 所列的规定选用。有时也可选用代用色，一般红、蓝、白、黄、绿的代用色依次为粉红、天蓝、灰、橙、紫。

表 1.3 导线和绝缘套管的颜色选用

名称	电极	颜色	名称	电极	颜色
交流三相电路	A 相	黄色	晶体三极管	集电极 c	红色
	B 相	绿色		基极 b	黄色
	C 相	红色		发射极 e	蓝色
	零线或中性线	淡蓝色	晶体二极管	阳极	蓝色
	安全用接地线	黄绿双色线		阴极	红色
直流电路	正极	棕色	单向晶闸管	阳极	蓝色
	负极	蓝色		阴极	红色
	接地中线	淡蓝色		控制极	黄色
双向晶闸管	控制极	黄色	有极性电容器	正极	蓝色
	主电极	白色		负极	红色
晶体场效应管	源极 S	白色	光电耦合器	输入端阳极	蓝色
	栅极 G	绿色		输入端阴极	红色
	漏极 D	红色		输出端 e	黄色
				输出端 c	白色

4. 电线电缆使用注意事项

使用电线的目的主要是输送电能及电信号，在选用线材时应注意：

- (1) 导线的允许通过电流应大于正常工作电流。线材的允许电流是指常温下的电流值，为保证温度升高后仍能正常使用，要有适当的安全系数。
- (2) 使用时电路的最大电压应低于导线额定电压。
- (3) 在使用长导线时，由于导线本身电阻增大，对传输的电信号会产生电压降，为减少电压降，应选用直径较大的线材。
- (4) 如果电路中频率较高，则选用导线时应考虑其高频特性。为减少分布电容，介质损耗及集肤效应影响，应选用高频电缆。为减少集肤效应还可选用粗裸铜线或铜管。
- (5) 为防止反射波，一般希望同轴电缆和馈线具有一定的特性阻抗。因此，选用射频电缆时，应注意电缆和其他器件阻抗匹配。
- (6) 当信号较小时，为防止外来噪声电平的干扰，应选用有屏蔽层的导线。
- (7) 如果导线在振动条件或经常移动弯曲条件下使用时，所选用的电线应具有良好的拉伸强度、耐磨损性和柔软性，重量要轻。
- (8) 一般情况下，不应使线材受日光直射及长期置于高温下使用，也不能与有机溶剂和有腐蚀性材料接触，以免老化变质。如发现老化变质现象，应立即更换线材，以防火灾和人身事故。
- (9) 在高温条件下应选用聚四氟乙烯安装线，它的长期允许工作温度可达 200℃。

5. 线规

导线粗细的系列标准称为线规，线规有两种表示方法。

线号制：按导线粗细排列成一定的号码，线号越大，截面积越小。英、美等国采用线号制。

线径制：按导线直径大小，直接用 mm 为单位表示。

中国线规采用线径制，共分 48 级，即有 48 种线径规格。线径为 0.05~11.2 mm，截面积为 0.002~100mm²。

中国线规的 48 种线径数值呈 20 级等比级数系列，即将 1~10 之间的数值分成 20 级，任何相邻两级线径的比例都相等，这个比例为 $\sqrt[20]{10} = 1.122$ ，因此每隔 20 级线径就大 10 倍，每隔 6 级线径就大 1 倍，即 $(1.122)^6 \approx 2$ ；•任何相邻两级的截面积之比 $\sqrt[10]{10} = 1.2589$ ，每隔 10 级截面积大 10 倍，每隔 3 级截面积约大 1 倍。

1.3 磁性材料

通常所说的磁性材料指铁磁性物质，主要有铁、钴、钇、镱、锰、铬、镍及其合金、氧化物，铁磁性物质在磁记录方面得到广泛应用。

磁性材料常分成硬磁材料、软磁材料、矩磁材料三大类。

1.3.1 磁性材料的特性

1. 铁磁性理论

在没有外磁场时，铁磁性物质内的原子磁矩形成一个个小磁畴（即原子中电子旋转形成的小磁场），每个磁畴磁性取向各不相同，作用相互抵消，对外不表现出磁性，如图 1.4 (a) 所示。

磁性材料在外磁场作用下，磁畴的磁矩将从各个不同方向转动到接近外加磁场方向，对外呈现出很强的磁性，这个过程称为技术磁化，简称磁化，如图 1.4 (b) 所示。当所有磁畴的磁矩都完全与外磁场方向一致时，达到磁饱和，如图 1.4 (c) 所示。

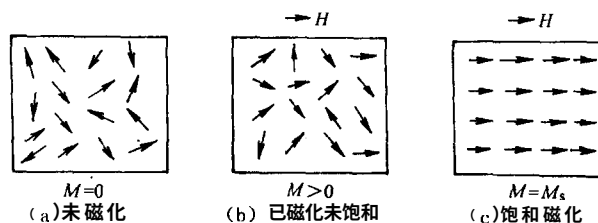


图 1.4 磁性材料的磁化

2. 磁性材料的磁性能

(1) 磁导率。磁导率又称导磁系数，表示磁化曲线上任何一点 B 与 H 之比， $\mu = B/H$ 。相对磁导率是指磁性材料磁导率与真空磁导率之比， $\mu_r = \mu/\mu_0$ 。真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

磁导率表示磁性材料在外磁场作用下工作时的磁性能。

(2) 磁化强度、磁感应强度、居里点。在外加磁场 H 作用下，铁磁性物质的磁化程度

用磁化强度 M 表示。当 H 足够大时, 再增加 H , M 也不会再增大, 这时的磁化强度称为饱和磁化强度 M_s 。

磁化之后, 铁磁物质内部的磁感应强度 B 大大增加, $B = \mu_0 \times (H + M)$ 。

铁磁性物质的 M_s 与温度有关, 当温度升高到一定值后, M_s 降为零, 这个温度称为居里点, 这是由于温度升高, 热运动破坏了磁畴磁矩的定向排列作用。居里点越高, 铁磁性物质允许使用的工作温度就越高, 铁的居里点为 768°C 。

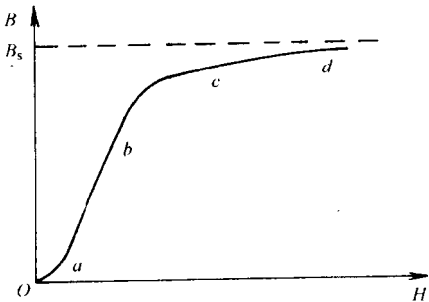


图 1.5 磁化曲线

(3) 磁化曲线与磁化过程。如果将磁性物质置于交变磁场中, 当磁场强度 H 由零逐渐增强, 磁感应强度 B 就从零开始增大, 这段曲线叫初始磁化曲线。磁化曲线表示铁磁性物质以未被磁化状态为出发点, 在外加磁场 H 作用下, 产生磁感应强度 B 随 H 变化的规律, 如图 1.5 所示。

在不同阶段上, 磁化过程是不同的。

oa 段: 软磁材料可逆磁化阶段, 若 H 退回零, 则 B 也几乎退回零;

ab 段: 软磁材料不可逆磁化阶段, B 随 H 增加而增加很快;

bc 段: 软磁材料强磁化阶段;

cd 段: 软磁材料饱和阶段, 达到饱和磁感应强度 B_s 。

(4) 磁滞回线。磁性材料被磁化后, 当 H 增大到 $+H_s$ 时, B 变为 $+B_s$, 达到磁饱和, 增加 H , B 不再增大。 B_s 为饱和磁感应强度, H_s 为饱和磁场强度。

若 H 由 $+H_s$ 减小到零, B 并不沿原曲线回到零, 而是由 $+B_s$ 降到 $+B_r$, 即还剩下一部分磁性, B_r 为剩余磁感应强度。

要想消除 $+B_r$, 得加反方向磁场 H 至 $-H_c$ 时, $B=0$ $-H_c$ 为矫顽力, 即将剩磁感应强度 B_r 减为零时所需的反向磁场强度的大小。

进一步增大 H , 则反向磁化。当 H 为 $-H_s$ 时, 达到反向饱和磁化, 磁感应强度为 $-B_s$ 。当减弱磁场强度 $H=0$ 时, B 由 $-B_s$ 减为 $-B_r$ 。需加正向 H 至 H_c 时, $B=0$ 。

继续增大 H , 又达到饱和, 形成一个封闭的曲线。

如果 H 继续按上述反复变化, 则变化仍为该曲线。这种循环交变磁化过程中, 磁感应强度 B 与磁场强度 H 的关系曲线叫磁滞回线, 如图 1.6 所示。

从磁滞回线可以看出: 磁感应强度 B 滞后于所加磁场强度 H ; 磁感应强度 B 不完全随磁场强度 H 做线性变化。

不同磁性的物质其磁滞回线是不同的, 如图 1.7 所示。

软磁材料的磁滞回线较窄而长, B_r 和 H_c 较小, 曲线变化较大。软磁材料加上较小的外磁场, 容易被磁化饱和, 当外磁场撤除时, 磁性即基本消失。录音机的磁头、变压器的铁心等采用软磁材料。

硬磁材料的磁滞回线较宽而大, 有较大的 B_r 和 H_c 。硬磁材料需要加较大的外磁场才能被磁化, 经饱和磁化后撤除外磁场, 磁性不消失, 能保留较长时间, 所以硬磁材料又称永磁材料。磁铁、扬声器的磁钢、录音/录像磁带等采用硬磁材料。

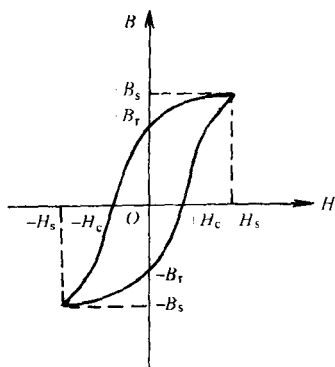


图 1.6 磁滞回线

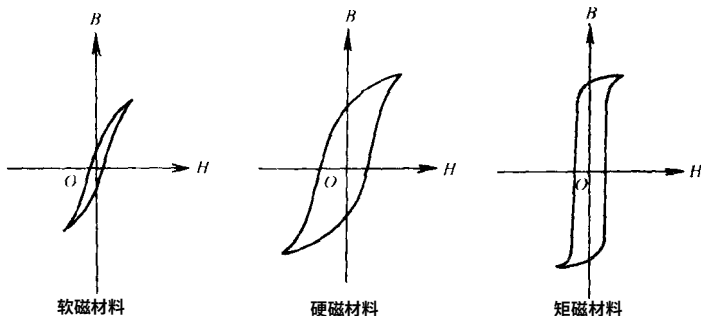


图 1.7 不同磁性的物质的磁滞回线

矩磁材料的磁滞回线窄，接近矩形。矩磁材料磁化所需要的外磁场力较小，但经饱和磁化后撤除外磁场，磁性不消失，能保留较长时间，常用的是一些合成磁性材料。计算机的硬盘/软盘等采用矩磁材料，便于记录“1”、“0”信息。

研究磁滞回线对我们使用磁性材料很有益处。例如在录音原理中， B_r 决定了录音信号磁平大小，不同磁性材料的 B_r 是不同的，因而有不同录音动态范围的磁带。又如，只有让录音的磁场工作于磁滞回线的线性区才能最小限度地减小失真，因而不同材料制成的磁带使用时要通过磁带选择开关给磁头加合适的偏磁电流。

3. 磁性材料在交变磁场中的性能

- (1) 磁性材料在交变磁场中的磁性损耗包括磁滞损耗、涡流损耗、后效损耗。
- (2) 频率升高导致金属磁性材料中涡流损耗急剧增大，涡流作用引起集肤效应，使磁通分布不均匀而降低材料的有效磁导率。

4. 磁各向异性与磁致伸缩

由于构成一个晶体的原子在晶体各个方向上的排列情况不同，造成晶体沿不同方向的磁性不同，这种现象称为磁各向异性，即不同方向的磁化能力不同。

磁性材料在外磁场中磁化时，在磁化方向上会发生伸长或缩短，这种现象称为磁致伸缩。其原因是磁畴的变化引起晶体形状的改变。利用磁致伸缩原理可制成磁致伸缩换能器，如超声波振荡器。

1.3.2 常用的软磁材料和硬磁材料

1. 软磁材料

(1) 硅钢片。硅钢片是铁硅的合金，含硅 $0.8\% \sim 4.5\%$ ，小于 1% ，其电阻率高，磁导率高，矫顽力低，铁损小，磁性能稳定。硅钢片不能在高频磁场下工作，只能用于工频和音频，常用于电源变压器、音频变压器和铁心扼流圈等的铁心。为了减小涡流损耗，硅钢片之间需采取绝缘措施，如在硅钢片上喷涂绝缘漆或进行氧化处理。

(2) 铁镍合金。铁镍合金又称坡莫合金，属于精密软磁合金，它在弱磁场下和中磁场下具有极高的磁导率和很低的矫顽力，并具有良好的防锈性能和良好的加工性能，有些品种