

# 电气材料基础

---

## 绪论

- 电力系统  
电力系统是由发电、输电、变电、用电等环节组成的电能生产与消费系统。
  - 电气材料定义及分类  
是用于电气、电子工程领域内各种材料的统称。
    - 根据电气功能分类  
电介质绝缘材料、半导体材料、导电材料、磁性材料  
还包括一些结构材料和功能转换材料。
    - 绝缘材料又分为绝缘气体、绝缘液体、绝缘固体（有机、无机、复合材料）
    - 绝缘液体中植物绝缘油已作为环境友好材料在使用
  - 电力设备及分类  
电力设备是指在电力系统中能够实现电能的生产、传输、变换、分配、使用的设备的总称。
  - 根据电力先后顺序  
发电设备、变电设备、输电设备、用电设备
  - 根据在电力系统中起的作用  
一次设备、二次设备
  - 按技术重要程度  
核心设备、辅助设备
  - 按经济价值差异  
大型贵重设备、普通设备
  - 电气材料的作用和地位
    - 电气材料是构成电力设备的基础物质，是实现电力设备各种功能的基础，是电力设备可靠运行的保证。
    - 在电气功能技术领域中，电气材料始终占有不可替代的地位。
  - 一些电气材料的应用举例
    - 导电材料的发展以及超导的出现，电力设备传输电能的容量不断增大，损耗降低，设备体积减小，经济性提高
    - 半导体材料的发展，开发出大功率电力电子器件，提高电能利用效率
    - 磁性材料发展使得电力设备的磁滞损耗降低，电磁转换效率提高，设备体积减小
    - 绝缘材料发展，是电力设备长期可靠运行的关键，影响电气工业的发展水平和运行质量
  - 电气设备的作用和地位
    - 电力设备是电力系统的基本组成单元。
    - 电力系统的安全稳定运行的关键在于电力设备的绝缘和电力设备的故障检测。
    - 电力设备的生产能力和技术水平决定着电力系统运行的效率和质量。
  - 电气材料和电力设备二者之间的发展关系
    - 在电气工程领域中，电气材料始终占有着不可替代的重要地位，电气材料是构成电力设备的基础物质，是实现电力设备各种功能的基础，是电力设备安全运行的基本保证。
    - 电力系统和电力设备发展也对于电气材料发展提出新的要求。
-

# 电气材料结构与性能

- 电气材料中的四面体关系
  - **材料成分-组织结构-制备合成与加工工艺-性能**
  - 成分指构成电气材料的基本元素
  - 组织结构描述材料在不同尺度的原子排列规律
  - 制备合成是从天然或人工的化学药品合成材料的制备过程；加工工艺是为实现特定功能或性能而进行材料加工或处理
  - 电气材料的性能包括电学性能、热学性能、力学性能、化学性能以及老化性能
- 举例说明电气材料结构与功能的关系
  - ZnO压敏陶瓷
  - 电气材料的结构对性能起决定性作用
- 原子模型
  - 壳层模型认为原子是由位于原子中心带正电的原子核和环绕核带负电的电子云组成。
- 电子运动
  - 按照量子力学用统计的观点去认识电子在核外空间的几率分布。用四个量子数表述电子运动。
    1. 主量子数：决定电子能量
    2. 轨道量子数：又叫角量子数，决定电子绕核运动的轨道动量矩
    3. 磁量子数：决定轨道动量矩在外磁场方向的投影
    4. 自旋量子数：决定自旋动量矩在外磁场方向的投影
- 原子中电子分布
  - 每一主壳层只能容纳一定数量的电子，也不能把所有电子纳入一个亚壳层中。原子中电子的分布主要有**泡利不相容原理**和**能量最低原理**确定，并遵循**洪特规则**
- 化学键的类型及构成物质的特点
  - **共价键、离子键、金属键**
  - 1. **共价键**：以电子云重叠的方式部分或全部电子形成的化学键
  - 共价键形成的化合物称为共价化合物，有**分子型**、**离子型**两类
  - **分子型共价键物质**以分子间作用力连接起来，这种物质的固体熔化或者液体气化时，分子间化学键没有破坏，只是克服了分子间作用力，因此，**具有较低的熔沸点**
  - **原子型共价化合物**原子间共价键非常牢固，解离需要断键，因此具有**极高的熔沸点和硬度**
  - 共价键构成的固体材料**化学稳定性好**、**几乎不溶于所有溶剂**，共价键具有饱和性，因此价电子不能自由移动，所以**电导率非常小**，是良好的**绝缘材料**。共价键有方向性和强的键能，因此材料**缺乏延展性**，在**强力作用下易碎裂**。
  - 2. **离子键**
  - 有许多共通的物理性质
    1. 强度高、易碎、与金属相比熔点高
    2. 易溶于极性液体
    3. 电子被束缚在离子上，因此离子型固体是典型的绝缘体
    4. 离子键固体具有比金属键和共价键固体更低的热导率
  - 3. **金属键**
    - 金属具有**延展性**
    - 金属具有**高电导率**
    - 金属具有**良好的导热性**，这是因为自由电子会和金属离子碰撞而导热
- 分子间作用力
  - 包含**取向力**、**诱导力**、**色散力**三种
  - 1. **取向力**  
**极性分子和极性分子之间的作用力（强）**

## 2. 诱导力

极性分子和非极性分子之间的作用力（次）

## 3. 色散力

非极性分子和非极性分子之间的力（菜）通常分子量越大，色散力越大，熔沸点也相应提高

- 氢键：在 $H_2O$ 和 $HF$ 溶液中存在，主要是由于强极性的H与非金属性强的原子结合，氢键的形成使物质的熔沸点降低

## • 晶体和晶体结构

- 晶体是原子、离子、分子按照**一定的周期性在空间排列**，在结晶过程中形成具有一定规则几何外形的固体。
- 晶体结构=点阵+原胞（我更愿意理解为乘）
- 上式中点阵叫做**晶格**，**原胞**是一个点阵的最小结构单元（重复的最小内容）

## • 晶格缺陷

- 晶格缺陷是指晶体结构中周期性的排列规律被破坏的情况。理想的晶体是长程有序的。实际上晶体会有缺陷

### ◦ 点缺陷

- 是最简单的晶体缺陷，在结点上或者邻近的围观区域内偏离正常结构，因为三维方向上尺寸都很小，又叫零维缺陷
- 点缺陷与温度密切相关，又被称为热缺陷，是晶格原子在热作用下脱离结点位置，因此又被称为**本征缺陷**
- 若晶格中原子直接脱落补充到表面（原来没有原子的地方），而留下空位，叫**肖特基缺陷**

若原子跑到邻近的原子空隙中，填隙原子和空位同时出现，则称为**弗兰克尔缺陷**

### ◦ 线缺陷

- 是二维尺度很小但是第三维尺度很大的缺陷，又称为一维缺陷
- 集中表现形式为**位错**，位错主要影响晶体的机械强度，以及对晶体中的电子和晶格振动的声子起散射作用，使得自由电子迁移率降低

### ◦ 面缺陷

- 指一块晶体被一些界面分割成许多较小的畴区。
- 主要有：表面、晶界、亚晶界、相界

## • 能级

- 由玻尔的能级理论：原子的状态是不连续的，每个状态对应着一个能量值，这些能量值叫做能级。

## • 能级分裂和能带形成

- **能级分裂**：两个原子相互靠近，一个原子上的电子和另一个原子的电子及原子核发生相互作用，电子系统获得新的能量和波函数。两个波函数产生**同相交叠**和**异相交叠**，分别形成两个分子轨道，能级分裂成两个。
- **能带形成**：能带分裂的最大宽度，取决于固体原子间的最小距离，N个轨道形成N个分裂能级，当N很大时，相邻分裂能级间隔非常小，几乎是连续的，连成能带。

## • 从能带理论的角度简述导体、半导体、绝缘体的异同（大概率考简答题）

- 所有能级都被电子填满的能带叫做**满带**；没填满的叫不满带或者**导带**。满带电子不导电，导带导电。
- **导体**：有满带也有导带，导带以下第一个满带称为**价带**
- **绝缘体**：最低的一系列能带被填满，其上的能带全为空带。禁带宽度较宽，一般大于3eV。
- **半导体**：能带结构跟绝缘体相同，但是禁带宽度较窄，一般小于2eV，满带电子容易被热激发到空带参与导电。

## • 缺陷结构及缺陷能级

- 晶体中容易有缺陷，往往来源于结晶的不完整（结构缺陷）和外来杂质。结构缺陷包括**点缺陷**、**线缺陷**、**面缺陷**；外来缺陷有**替位**、**填隙**两种，一般属于**点缺陷**。
- 晶体中有缺陷时，会在**禁带**中引入附加能级，称之为**缺陷能级**。分为**深能级**和**浅能级**。
  - 深能级：离导带比较远，电离能比较大。一旦捕获了电子或空穴，就不会轻易放出来，因此又称为**陷阱能级**。
  - 浅能级：离导带比较近，电离能比较小。容易释放电子或空穴（这个能级自带的）到导带或价带中，成为载流子，因此被称为施主或者受主能级
- 电气材料的导热性
  - 热量的传递可以通过三种方式：传导、对流和辐射
  - 晶格具有周期性，因此，晶格的振动具有波的形式，称为格波，格波简谐振动的能量量子称为**声子**（后面会再提到），声子的定向移动就意味着热量的传递。
  - 晶格热传导可以看作是声子扩散运动的结果

## 电介质材料

- 电介质分类及各类的基本特征
  - 按照分子中正负电荷的分布情况可以分为：**非极性电介质**、**极性电介质**、**离子型电介质**。
    1. **非极性电介质**：无外电场作用时，分子的正负电荷中心重合，因此分子的电偶极矩等于零，电气性能稳定。分子结构对称，呈各向同性。
    2. **极性电介质**：无外电场作用时，正负电荷中心不重合，有偶极矩，分子化学结构不对称。
    3. **离子型电介质**：基本单元为离子，介电常数大，变化范围也很大，有较高的机械强度。
- 电介质的极化及其分类、机理
  - 极化就是在外电场的作用下，电介质内部产生电偶极矩，表面出现束缚电荷的现象。
    1. **电子位移极化**：电子云和原子核在外电场作用下发生迁移，而当外电场关闭，原子会回复原来的情况。
    2. **离子位移极化**：正负离子在外电场作用下发生迁移的现象。
    3. **取向极化**：只出现于**极性分子**，由固与电偶极子的取向改变产生。
- 弹性模量
  - 定义：应力/应变
  - 宏观角度：衡量物体抵抗弹性变形能力大小的尺度
  - 微观角度：原子、离子和分子之间键合强度的反应
- 电介质的击穿
  - 电导率随着电场强度的提高到一个临界值时而迅速增加，伏安特性趋于无穷大时击穿，此时的临界电场强度称为电介质击穿强度或电气强度。
- 热导率
  - 当温度垂直梯度为1摄氏度/米时，单位时间内单位水平截面积所传递的热量。热导率是物质导热能力强弱的量度。
- 绝缘材料的耐热等级（温度系数）
  - 电介质的**最高允许工作温度**是指在此温度下介质的电学力学化学等性能能保证长期正常运行，而当超过这一温度，电介质的性能将显著下降。
  - 国际上根据绝缘材料的耐热程度，即最高允许温度，划分了绝缘材料的**耐热等级**。
    - 把绝缘材料划分成不同的耐热等级，是为了便于在运行电机电器等电力设备设计、制造和维修是能够合理选用材料。
- 绝缘材料老化
  - 电介质的老化是指绝缘材料在储存、使用过程中，受热、电、光、氧、潮气等因素长时间作用，其性能发生不可逆劣化的现象。老化着重于**长时间**和**不可逆**。

- 有交联或者降解反应：交联反应使分子量增大，并逐渐形成网状结构；降解反应使聚合度下降，甚至产生低分子挥发物
- 老化有：电老化、热老化、疲劳、光老化或光氧化老化、化学老化、生物老化和高能辐射老化
- 老化的内在原因在于绝缘材料的分子结构具有弱点、材料中的杂质、以及绝缘体系中不同材料之间兼容较差
- 提高耐久性 首先要消除结构上的弱点和杂质
  - 提高原材料纯度，例如干燥处理
  - 改进聚合方法，降低聚合反应温度
  - 改进加工工艺
  - 添加不同的防老剂，比如抗氧剂、热稳定剂等等
- 工程上对气体电介质的要求
  - 工作场强和电离起始场强高
  - 对人体无害 不污染环境
  - 化学稳定性好、惰性大、不腐蚀结构材料
  - 不燃不爆不老化不因放电而分解
  - 热稳定性、导热性好、热容量大
  - 沸点低、流动性好，不因环境温度下降而液化
  - 制备方便、来源广、成本低
- 电负性气体
  - 具有优良的绝缘性能和灭弧能力
  - 六氟化硫：无色无嗅无毒不燃、化学性能稳定。灭弧性能好：
    - 导热性能优异，使得电弧的弧心直径小，电压梯度低
    - 有很强的电负性，容易吸附自由电子形成活性较小的负离子，易与正离子复合
    - 在电弧作用下分解会吸收大量的热量
- 液体电解质的理化性质
  - 外观：颜色、透明度等
  - 粘度
  - 凝固点
  - 酸值：油中有机酸的含量，是衡量老化的重要指标（被氧化了容易生成酸）
  - 闪点：标准状态下加热，放出的蒸发气体遇火焰瞬间闪火的最低温度
- 液体电介质的介电性能
  - 相对电容率和体积电阻率：前者是极化造成的；后者就是电阻率
  - 介质损耗因数（介质损耗角）
  - 电气强度（击穿场强）
- 矿物绝缘油主要是由烷烃、环烷烃芳香烃组成；  
植物绝缘油主要是由油酸、亚油酸、芥酸棕榈酸等不饱和脂肪酸组成
- 聚乙烯交联之后结构从链状变成网状  
抗拉性能增强，耐环境应力开裂能力强，抗蠕变，工作温度升高、耐树枝化放电性能提高
- 纳米材料及其特殊效应
  - 纳米材料是组成相或者晶粒结构的尺寸控制在100nm以下的具有特殊功能的材料  
纳米材料的特殊效应（待补充）
    1. 表面效应
    2. 纳米微粒电子能级的不连续性
    3. 量子尺寸效应
    4. 小尺寸效应
    5. 量子隧道效应
    6. 库仑堵塞效应

## 7. 介电限域效应

- 环境友好材料
  - 环境友好材料是指材料在整个寿命周期内，具有满意的使用性能和优良的环境协调性，或者能够改善环境的材料。

## 导电材料

- 材料的导电性能表征
  - 材料的导电性能可以通过**体积电阻率（就是电阻率）**和**电导率**进行表征。
  - **体积电阻率**是微观水平上阻碍电流流动的度量；**电导率**是电阻率的倒数，表征电流流过材料的容易程度。
- **导电材料**：是指电场作用下能够导电的材料，包括良导体、不良导体和超导体。
  - **按照导电机理（载流子类型）**
    - **电子导电材料和离子导电材料**；此外两种载流子都有的叫做**混合型导电材料**
  - **按照化学成分**
    - 金属材料：电导率在 $10^7 - 10^8 S/m$ 之间
    - 合金材料：电导率在 $10^5 - 10^7 S/m$ 之间
    - 无机非金属材料：电导率在 $10^5 - 10^8 S/m$ 之间
    - 高分子导电材料：是指高分子经过掺杂之后具有导电性的一类高分子材料
- 金属材料的电导率（电阻率）被如下因素影响
  - 电导率依赖于**单位体积内载流子数目n**、**每个载流子携带电荷量q**和**每个载流子的迁移率u**
  - 材料的**微观结构、温度、合金元素和杂质**都会通过改变以上三个要素对金属材料的电导率产生影响
  - 空穴、位错、晶粒的界面，会让电阻率升高
    - 金属温度升高，原子振动增大，电阻率升高；半导体温度升高，载流子数目增加，电阻率降低
- 固体材料中的热导
  - 固体材料中热导主要有**声子热导**和**自由电子热导**两种方式。
  - 声子类似于气体原子，将固体晶格的振动以波的形式从高能区向低能区传播。。
  - 金属材料中既有声子热导也有自由电子热导；而固体介质材料（非金属）中只有声子热导。
  - **提高热导率**：
    - **提高温度**：声子以声速在材料内部运动，温度越高，相互碰撞越剧烈，所以热导率随温度升高而增大
    - **降低杂质**：金属中的杂原子、空穴、晶格缺陷都会使热导率降低
- 接触电位差和热电势
  - **接触电位差**是指在没有电流的情况下，两种不同的物质紧密接触，接触面两侧产生的电位差。两物体接触间距小于 $25 \times 10^{-8} cm$ 时，出现双电层和接触电位差
  - 如果接触点温度不相同，所产生的电位差是温度的函数，即**热电势**。**热电偶**就是通过利用热电势来测温的
- 材料的塑性和韧性
  - 塑性是变形加工的材料，塑性较好的材料才能进行变形加工，不易脆断
  - 韧性好的材料不易在服役过程中发生脆断破坏
- 常用的导电金属
  - **铜及铜合金、铁和铁合金、铝和铝合金**
- 铜合金



- 黄铜（铜锌合金）：机械强度高，电导率降低不大
  - 青铜（铜锡合金）：合金强度提高，硅青铜强度、硬度、耐腐蚀性提高，铝青铜硬度强度提高
  - 白铜（铜镍合金）：防腐蚀性能好，延展性好
  - 镍银（铜镍锌合金）：调整镍和锌的比例可以得到银的外观，用于装饰
- 铝合金和铝的性能差异
  - 铝合金的拉伸强度、屈服强度大幅提高；
  - 铝的中间产物一般硬而脆，会对机械性能产生不利影响
- 触头材料及其特性
  - 触头材料是用于开关、继电器、电气连接及电气接插元件等开关电器的核心材料，又称为电触头材料或电接触材料，有强电和弱电两大类。
    - 强电触头主要用于电力系统和电气装置，要求为低接触电阻、耐电蚀、耐磨损及具有较高的耐电压强度、灭弧能力和一定的机械强度。
    - 弱电触头主要用于仪器仪表、电信和电子装置。具有极好的导电性、极高的化学稳定性、良好的耐磨性及抗电火花烧损性。
- 开关电器对触头材料的要求
  - 良好的导电性和导热性
  - 抗熔焊性
  - 耐电弧烧蚀性
  - 大电流分断时不易发生电弧重燃
  - 低截流水平
  - 低的气体含量
  - 化学稳定性
  - 抗环境介质污染
- 电碳材料特性及用途
  - 电碳材料是以碳和石墨为基体的电工材料
    - 主要优良特性如下：
      - 具有良好的导电能力和各向异性
      - 较高的热导率
      - 耐高温且高温机械强度高
      - 密度小
      - 与液态金属不浸润
      - 化学稳定性好
      - 具有自润滑性
      - 热发射电流随温度的升高而增大
  - 电碳材料主要用于制造电工设备的固定电接触或转动电接触的零部件等电碳制品。如电机的电刷、电力开关和继电器的石墨触头等。此外，还可以用于弧光放电的石墨电极等。等等。
- 超导材料及其特性
  - 超导特性是指在**一定温度下**一些材料出现的特有电磁特性。通常导电材料的电阻随着温度降低而降低，某些材料当温度降低到一定程度时电阻会突然消失，这种情况叫超导现象。
  - 超导材料在超导状态时：
    - **完全导电性**：电阻率等于零
    - **完全抗磁性**：超导体将磁力线全部排斥到体外，体内的感应强度为零。这种现象叫迈斯纳效应
    - **临界电流 $I_c$ 和临界磁场 $U_c$** ：即使温度在临界温度下，若电流以及周围的次磁场强度超出某一值时，超导的状态被破坏，形成常导状态
- 超导现象的分类
  - 根据磁场中的磁化特性

- **第一类超导体**：只有一个临界磁场 $H_c$ ，超导态具有迈斯纳效应，表面层的超导电流维持体内完全抗磁性。
- **第二类超导体**：有两个临界磁场 $H_{c1}$ 和 $H_{c2}$  ( $1 < 2$ )，当外加磁场小于 $H_{c1}$ 时，同第一类超导体；当在 $H_{c1}$ 和 $H_{c2}$ 之间时，处于混合态，此时体内有磁感线穿过，形成很多小的圆柱形正常态，但是周围被联通的超导态连接，整个样品的周界仍有逆磁电流，没有电阻。

## 磁性材料

- 磁性材料的导磁能力
  - 用**磁化率**和**导磁率**表征
  - 磁化强度 ( $M$ ) 是单位体积磁体内具有的磁矩矢量和；磁极化强度 ( $J$ ) 是单位体积磁体内磁偶极子具有的磁偶矩矢量和
  - 磁化率是描述物质磁化性质的物理量。磁化强度 $M$ /磁场 $H$ 称为磁化率，表示单位磁场强度在磁体中感生的磁场强度，是表示磁体磁化难易程度的一个参量。
  - 磁导率是描述物质磁性的物理量。将 $B/H$ 定义为绝对磁导率，将 $B/\mu_0 H$ 称为相对磁导率，是表征磁体的导磁大小以及磁化难易程度的一个磁学物理量。
- 磁性材料的分类
  - 根据**磁化率的大小和种类**可分为抗磁性、顺磁性、铁磁性、反铁磁性、亚铁磁性和变磁性六种种类。
    - **抗磁性**是在外加磁场的情况下，物质获得一个对抗外加磁场的磁矩的现象( $M$ 与 $H$ 方向相反，磁化率为负)
    - **顺磁性**是物质在外磁场下呈现与外磁场方向相同的磁场的性质
    - **铁磁性**是以铁为代表的元素在外磁场的作用下表现的一种磁性，其特点有：
      1. 磁化率很大且随外磁场强度的变化而变化
      2. 有一个特征转变温度 $T_c$ ，称为居里温度。在该温度以上，材料的铁磁性转变为顺磁性
      3. 在磁化和去磁化过程中，磁化强度不仅依赖于外磁场强度，而且依赖于它所经历的磁状态的历史，即呈现磁滞现象
      4. 画磁滞曲线的时候矫顽力 $H_c$ ，最大磁化强度 $B_m$ ，剩余磁化强度 $B_r$ ，最大磁场强度 $H_m$ 得标在图上
    - **反铁磁性**是指在无外加磁场作用的情况下，邻近完全相同的原子或离子的磁矩，由于相互作用而处于相互抵消的状态，致使合成磁矩为零的现象。
    - **亚铁磁性**宏观磁性与铁磁性相同，但是磁化率要比铁磁性略低；内部磁结构与反铁磁性的相同，且相反排列的磁矩不等量
    - **变磁性**在低磁场下没有或者很少自发磁化，但是当外磁场增加到一定程度之后，磁体的自发磁化强度发生突变
  - 根据其**组成**可以分为**铁磁性材料**和**铁氧体**两类，前者为金属，后者为氧化铁和其他金属氧化物组成。
- 软磁材料的特点
  - 软磁材料是指具有高磁导率和低矫顽力的材料，容易磁化也容易退磁，在交变磁场下磁滞回线面积小且磁损耗低
  - 良好的软磁性能要求材料有尽可能低的磁各向异性和磁致伸缩，低的内应力，高的电阻率（电阻大可以减少涡流损耗，**功率小**）
- 软磁材料
  - 晶态软磁材料：纯铁、硅钢、铁镍合金、铁钴合金
  - 非晶态软磁合金（无结晶固体的长程有序）：铁基合金、钴基合金、镍铁基合金
  - 纳米晶软磁



- 软磁铁氧体
- 硬磁（永磁）材料的优点
  - 永磁材料又称为硬磁材料，是一类经过外加强磁场磁化再去掉外磁场后能**长期**保持其**较高**剩余磁性，并能经受不太强的外加磁场和其他环境因素干扰的强磁材料。因为能够长期保留其剩磁，因此称为永磁材料；同时因为它有好的矫顽力，能够经受不太强的外加磁场的干扰，因此称为硬磁材料。
  - 硬磁材料的基本特点
    - 高的最大磁能积  $(BH)_{\max}$
    - 高的矫顽力  $B_H$  和高的内禀矫顽力  $H_c$ （矫顽力是  $B=0$  的时候  $H$  的值，内禀矫顽力是  $M=0$  时  $H$  的值）
    - 高的剩余磁通密度  $B_r$  和高的剩余磁化强度  $M_r$
    - 高的稳定性，即对外加干扰磁场和温度、震动等非磁性环境因素变化的稳定性
- 硬磁材料
  - 根据**永磁材料的成分和磁性**等特点，可分为**金属永磁材料、铁氧体（铁的氧化物）永磁材料和稀土永磁材料**

## 电储能材料

- 高性能储能器件的开发是电能存储的**基础**，目前广泛研究的储能器件有：储能电容器、二次电池（可以重复充放电的电池）和电化学电容器
  - **储能电容器**是利用电介质在外电场下的极化储存能量的，具有功率密度大（能量密度小）、工作电压高、充放电速度快、效率高等特点
  - **电化学电容器**工作原理与传统电容器相同，由于包含了更大的有效比表面积和更薄的电介质，电容量和能量要比常规电容器高10000多倍。
  - **二次电池**中，电极材料的类型是影响电池电能储存能力的主要因素
- 介质的**储能密度**是指单位体积容纳的电能，主要取决于介电常数和击穿场强。
- 储能电容器介质材料的分类及特点
  - 根据**储能电容器的介质材料分类**，有聚合物薄膜、陶瓷材料、聚合物复合薄膜等
    1. **聚合物薄膜**（有机电介质）：介质击穿场强较高，然而其介电常数远低于陶瓷材料
      - 聚丙烯薄膜、液体浸渍剂和以聚偏氟乙烯为代表的新型聚合物储能介质
    2. **陶瓷材料**（无机电介质）：一般耐高温、耐腐蚀，具有较高的介电常数，击穿场强一般低于有机薄膜介质
      - 铁电体陶瓷和反铁电陶瓷
    3. **聚合物复合有机薄膜**：以陶瓷-聚合物复合薄膜为例，是在有机物基体中添加高介陶瓷（或者纳米颗粒填料），从而提升复合体系的介电常数
- 铁电体材料（无机电介质）
  - 铁电体晶体的晶胞因其自身正负电荷中心不重合而具有极性。极性的晶胞整齐排列，在无外加电场的情况下，自发的产生一个极化强度，称作自发极化。类比铁磁体的磁畴，引入“电畴”的概念来描述铁电体的磁化机理。在铁磁体中，由于偶极子之间的相互作用很强，即使无外电场作用，在一定体积范围内，电偶极子平行排列，这一具有平行偶极矩的单元就成为“电畴”。但是整体还是电中性的，相邻电畴的偶极矩方向相差  $90^\circ$ ，或者  $180^\circ$ ，在电场作用下电畴随着外电场发生极化定向。
  - 铁电体是具有强极性的电介质
    - 具有高的介电常数
    - 介电常数与电场强度大小有关（非线性）
    - 极化强度跟电场强度的关系为多值函数且呈回线，称为“电滞回线”的特点

- 电化学电容器（又称超级电容器）

- 工作原理与传统电容器相同，由于包含了更大的有效比表面积和更薄的电介质，电容量和能量要比常规电容器高10000多倍。
- **基于储能模型和构造**，可以分为：双层电容器、氧化还原型电化学电容器（也称赝电容器）、以及上面二者的混合体系

- 1. **双层电容器**：储能方式与传统电容器大致相同。高能量密度来源于：

- 1) 更多数量的电荷能够储存于高度拓展的电极表面上；
    - 2) 电极和电解液之间的双电层的厚度较薄。

双电层电容器的结构与电池类似，两个电极浸入电解液，中间用离子渗透膜隔开防止电接触。充电状态下，电解液中阴阳离子分别移向正极和负极，在电极-电解液界面形成两个双电层，每一个电极-电解液界面代表一个电容器，因此整个组件可以视作两个电容器的串联

- 2. **赝电容器**的储能原理有不同，它不是通过静电荷的存储，而是利用材料表面快速、可逆的氧化还原反应储存释放电荷。充放电过程中，电极上发生氧化还原反应，电解液中的离子与电极交换电子并形成吸附离子。吸附离子在电极表面发生电吸附或插层反应，**而没有发生氧化还原反应（氧化还原反应是在电极上发生，吸附反应无化学键生成）**，因此赝电容器中氧化还原反应速度远高于电池。

- 电化学电容器电极材料分类及特点

- **双电层电容器**电极主要是使用**纳米孔的碳材料**，因为其来源丰富、低成本、化学惰性、良好的导电性、结构和表面功能多样化的优点。**活性炭**是双电层电容器中应用最广泛的活性材料，包括活性炭粉末和活性炭纤维。活性炭粉末活化后比表面积大，但是孔径大小分布不理想；活性炭纤维电导率高，活化后比表面积与活性炭粉末相近。
- **赝电容器**的电极材料主要包括**导电聚合物、过渡金属氧化物、富含杂原子（O、N）的碳材料以及静电吸附H的纳米多孔碳**。
  - 导电聚合物是指能够导电的**有机**聚合物，能够提高氧化还原状态和聚合物的导电性能
  - 过渡金属氧化物表面经过快速可逆的氧化还原反应，显示出很强的赝电容行为，过渡金属氧化物电极的容量要远远大于双电层电容器中的碳材料。但是，由于电荷储存机制是基于氧化还原反应，也难以避免时间稳定性差和循环寿命短的缺点。

- 电化学容器和传统电容器的区别（前面已经提过）

工作原理与传统电容器相同，由于包含了更大的有效比表面积和更薄的电介质，电容量和能量要比常规电容器高10000多倍。

- 锂离子电池的原理

- 其实原理就跟普通电池一样，只不过是用电解质中的 $Li^+$ 导电而已。
- 由正极负极、电解质以及防止短路的隔膜组成，电极上发生氧化还原反应， $Li^+$ 在电解质中导电，外电路由电子导电

- 锂离子电池电极材料的分类和特点

- 正极材料

- **锂过渡金属氧化物**，能可逆地嵌入和脱出大量的锂离子，并具有充放电过程中的电势稳定性，轻而致密，具有电化学和热稳定性。
    - 通过混合、表面包覆和形成化合物等方法获得**复合材料**，可以结合不同的结构的不同性能

- 负极材料

- 金属锂：比容量高，但是存在短路等安全问题
    - 石墨碳材料：在石墨中，碳原子沿着六边形平面分层堆积，该各向异性的结构允许锂离子进行嵌入和脱出

- 无定形碳：由小六边形网络构成，晶粒之间相互交联，并与无定形相共存，表现出无序化结构。根据结构的无序化程度，又可以分为低结晶度碳（软碳）和非结晶碳（硬碳）。软碳材料的充放电曲线不存在平台，即电压波动幅度较大；容量低，但是具有高比表面积和稳定的结构。硬碳电极有非常稳定的寿命特性。
- 合金：可以进行连续的可逆充放电；金属锂的反应电位相当低，如果电池的电压降低，即使单位质量的容量很高，电池的能量密度也会减小，金属负极在充电过程中与锂形成合金，金属原子之间的填隙位置被填满，造成电极体积膨胀，造成容量损失。
- 燃料电池
  - 燃料电池是一种存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置，其基本原理使利用水电解的逆反应提供电力。它不通过燃烧或者热机过程产生电，而是直接将化学能转换成电能，同时产生水和热。
  - 燃料电池材料的分类及特点
    - 以电解质材料进行分类：
      - **碱性燃料电池**：能快速启动，但是其主要问题在于电解质对 $\text{CO}_2$ 非常敏感，同时电解质具有强碱性，使用寿命短
      - **质子交换膜燃料电池**：能快速启动，且质子交换膜为塑料薄膜，固体、没有腐蚀性，能量密度高。但是效率较低，同时电极材料中必须用铂作催化剂，成本昂贵，对工作气氛有严格要求
      - **磷酸盐燃料电池**：工作温度高，较高的温度使催化反应加快，因此对燃料气要求不高，也能容忍杂质。但是必须用铂作催化剂，不能作为移动电源，只能作为电站
      - **熔融碳酸盐燃料电池**：工作温度为中高范围，工作温度高，效率高，不需要贵金属作为催化剂，可以适用多种燃料气，但是不能作为移动电源
      - **固体氧化物燃料电池**：属于中高温燃料电池，可以采用多种燃料，对气体杂质容忍度高，利用燃料效率也高；不需要贵金属作为催化剂；全部组件为固态陶瓷材料，避免了高温环境的腐蚀问题；电解质材料具有良好的氧离子（ $\text{O}^{2-}$ ）传导率