



# 第1章

## 绪 论

---

### 1.1 绝缘封装技术与聚合物绝缘材料

在现代电力电子技术的快速进展中,绝缘封装技术在提高器件和装备运行可靠性及长期稳定性上扮演着举足轻重的角色。随着微型化和高功率密度成为器件设计的新趋势,对绝缘材料的要求也日益严苛。聚合物绝缘材料因其卓越的绝缘特性、轻质、易加工及成本效益等优点,在众多绝缘材料中脱颖而出,成为器件封装技术的核心要素<sup>[1-8]</sup>。绝缘封装材料不仅要确保阻止电流的非预期泄漏,维持电力电子元件功能的电气隔离,还需要在不利条件下保护器件或装置免受温度、湿度、化学物质和物理应力的损害<sup>[9-10]</sup>。本书将深入探讨绝缘封装技术与聚合物绝缘材料,阐述其在电力电子器件与装备制造领域中的应用现状、面临的挑战,以及前沿的科学研究和技术创新趋势,着重讨论如何通过材料科学和工程技术的进步,使绝缘封装在满足现代电力电子器件与装备需求的同时,更加环境友好、可持续,为未来高性能电力电子制造行业的发展提供动能。

#### 1.1.1 电力电子器件绝缘

电力电子器件又称功率半导体器件,是一类用于控制和转换电能的半导体器件。电力电子器件允许电能从一种形式高效地转换到另一种形式,如交流(alternating current, AC)到直流(direct current, DC),或者改变电压和电流的大小。作为电能转化的关键器件,电力电子器件被广泛应用在特高压输电、电动汽车、太阳能发电和风能转换系统等重要领域<sup>[5,11-13]</sup>。随着科技的不断发展和电力变换需求的逐步提升,电力电子器件从第一代可控整流器(silicon controlled



rectifiers, SCRs), 发展到各类晶体管(BJT、MOSFET、IGBT), 再到基于碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)等宽禁带半导体材料的电力电子器件, 正向着高功率、高频率、高电压、高温度和大电流的方向发展<sup>[14]</sup>。同时, 电力电子器件趋于复杂和微型化, 对绝缘材料的性能要求越来越高, 绝缘封装对电力电子器件的电气性能、热性能、效率和可靠性都有重要影响, 已成为电力电子器件领域除芯片本身之外的另一核心部分。图 1-1 概括了电力电子器件的发展历史, 有助于理解电力电子器件技术的发展脉络。

高压干式电力装备(如干式电力变压器、高压断路器、指气体绝缘开关设备和固态继电器等)是高压电力系统中用于控制、转换、传输和分配电能的设备, 它不使用液体(如变压器油)作为冷却和绝缘介质, 而是采用空气或固体作为绝缘介质<sup>[15-16]</sup>。干式装备被设计用于承受和运营在数千伏甚至更高电压的条件下, 通常设计为密封良好的结构, 用以防止潮湿和污染物影响其绝缘特性。因此高压干式电力装备的绝缘设计和绝缘材料选择至关重要, 将直接影响电力系统的性能、安全性及持续运行的能力。

电子器件绝缘的研究始于电子产业的早期, 随着科技的发展, 绝缘材料是防止电流在非预期路径上流动的关键因素, 其重要性不仅反映在保护设备运行安全上, 更在于它对提高设备的性能和稳定性有着直接的影响。在电子器件中, 无论是晶体管、芯片, 还是电路板, 适当的绝缘都有助于减少噪声, 提高信号完整性, 以及防止短路和电气故障。此外, 适当的绝缘可避免因绝缘层击穿导致的设备损毁或数据丢失, 这在高电压、高频率的应用场合尤为关键<sup>[17-18]</sup>。随着对更小、功能更多的电子器件的需求增加, 绝缘材料的研究也日趋复杂。这些材料需要在不同温度、湿度及化学环境下维持其性能, 而在某些医疗或军事应用中, 这些条件可达到极端。因此, 研究工作不仅聚焦于基础物性的改善, 如电气、热学和机械性能, 还在寻求更高的可靠性和长期稳定性。

早期的绝缘材料研究主要集中在传统的无机材料上, 如瓷器、玻璃和木材等。但是这些无机材料往往密度大且易脆断, 限制了其在电力电子器件中的广泛应用。随着合成聚合物的出现, 研究者开始将焦点转移到塑料和橡胶等有机绝缘材料上, 这些材料不仅成本更低, 还具有更好的韧性和更易加工的优点<sup>[19-20]</sup>。当前, 高分子聚合物绝缘材料是电力电子器件绝缘的重要工程材料, 也是该领域往更高端发展的

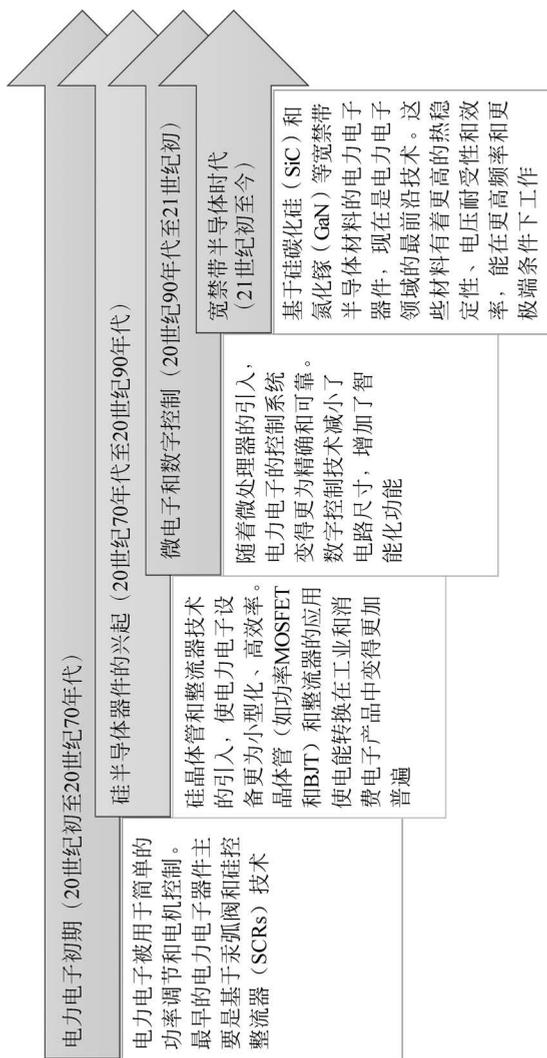


图 1-1 电力电子器件的发展历史



研究热点,许多研究人员针对高分子聚合物绝缘材料开发出不同结构和功能的聚合物及其复合材料,以改善他们的介电性能和热特性,通过纳米技术增强其机械强度和降低介电损耗。针对不同电力电子器件的应用环境,许多研究也关注于改进聚合物的耐化学性和热稳定性,使其更适合恶劣环境下的应用。此外,3D 打印技术的兴起为绝缘材料的研究和应用带来新方向。借助这项技术,研究人员可以设计和制造具有复杂结构和优化性能参数的定制绝缘组件,这不仅为原型设计和小批量生产提供便利,也为进一步研究提供了工具,以探索未来电力电子器件绝缘的可能性。近年来,随着可持续发展和环保意识的增强,生物基和可降解的聚合物也陆续被引入电子器件绝缘领域<sup>[21]</sup>。这些新型绿色聚合物绝缘材料能够在不牺牲电气性能的同时,减少对环境的影响,并提供新的循环利用和废物管理的可能性。

### 1.1.2 绝缘封装技术

作为电力电子器件绝缘的关键环节,绝缘封装技术占据了电力电子器件制造行业的重要地位,其应用涵盖了从日常用品中的小型电子设备,从手机和平板电脑,到大型的工业和电力系统,包括发电厂、输电线路及配电设施等。绝缘封装不仅为电子组件提供了物理保护,防止环境因素如灰尘、水分和化学物质的入侵,还具有保护电路免受电气噪声干扰的作用。此外,在汽车、航空航天、军事等领域,绝缘封装技术也扮演着保障设备可靠性的关键角色。

绝缘封装技术的研究历史与电子行业的起步几乎同步。它起初为防护固体电子元件而设计,随着集成电路(integrated circuit, IC)技术的发展,复杂的绝缘封装技术被用来保护和延长元件的使用寿命<sup>[22]</sup>。传统封装材料有时采用硬质如陶瓷和金属外壳,为器件提供坚固的保护。但这些材料重量大、成本高,难以适应便携式设备的轻量化需求,于是人们逐渐转向使用更轻便、更有成本效益的聚合物绝缘材料。

目前绝缘封装技术的研究和发展聚焦于三个关键领域:材料科学、封装设计和制造过程,如图 1-2 所示。在材料科学方面,研究者追求开发电性能、热性能和力学性能更优良的新型聚合物材料及其复合材料,以满足绝缘封装在不同操作条件下的性能要求,包括改善介电性能、增强导热性能及提升材料的机械强度等。在绝缘封装设计方面,需要考虑到装配的方便性和成本效益,以确保在大规模生产中的

可实施性。目前面向特定应用场景的绝缘封装策略正在被开发出来,例如用于高温环境的高绝缘强度材料,用于空间有限场合的小型化封装,或是针对高频信号的低介电常数封装等。制造过程则是对封装技术实现的关键环节。随着超精细封装技术的兴起,需要在极微小的空间内完成高精度封装,这就需要精确的制造工艺。先进的制造技术如微注塑成型、立体造型技术(3D 打印)及吸附技术等,已经被引入封装生产流程中,以提供更精确和灵活的封装选项。

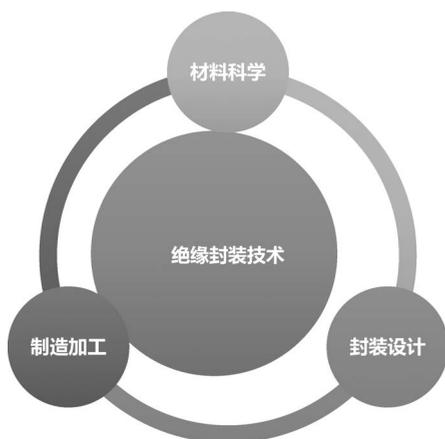


图 1-2 绝缘封装技术

除了以上技术的发展,在环保规制不断严格的背景下,绝缘封装技术的一个最新趋势是环境友好型材料和工艺。开发器件和设备弃用后的可回收、易分解的封装材料,以及降低制造过程对环境的影响,已成为该领域工作的重要组成部分。总体来说,绝缘封装技术涵盖材料科学、封装设计、制造工艺等多个领域,遵循着性能提升、重量减轻、成本降低、环境影响最小化的原则,正不断进步以满足当前与未来电力电子行业的发展需求。

### 1.1.3 绝缘封装材料

绝缘封装材料作为电力电子器件封装过程中关键的组成部分,从工业用的大型电力设备到家用电子产品应用广泛,如绝缘涂层、封装胶、固化型绝缘层和印刷线路板(printed circuit board, PCB)底板等。在微电子领域,包括智能手机、笔记本电脑等便携式设备也广泛采用这些绝缘材料来保护微型元件。它们使得电子器件得以从外部环境中得到有效的防护,也在不同电子组件间提供了必要的电气隔



离<sup>[23-25]</sup>。这些材料必须具备的特性包括优异的电气绝缘特性、良好的热稳定性、足够强的机械性能、耐化学性和加工工艺的兼容性。

绝缘封装材料的发展历史可以追溯到电子器件和电力设备的起源,其发展与技术进步紧密相连。在电气工程早期,绝缘材料的选择相对有限,常见材料包括天然橡胶、瓷器、云母及各种树脂和油。这些材料在早期的电机、变压器和电线绝缘中得到应用。随着第一次工业革命的推进,对更持久和稳定的绝缘材料的需求增加。这促使了包括石棉、玻璃纤维和改性天然树脂等新材料的出现。20世纪初,随着化学工业的发展,热固性塑料如酚醛树脂(bakelite)、环氧树脂(epoxy resins)是绝缘封装材料的重要进步。它们提供了更高的温度容忍度和电气稳定性。20世纪30—40年代,热塑性塑料如聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)和聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)的引入为电线和电缆绝缘带来了巨大变革,其被广泛用于低压电线和电缆的绝缘和护套制作。随着半导体和微电子工业的兴起,细致的结构控制、更好的散热和微尺寸兼容性变得至关重要。硅橡胶(silicone rubbers)、聚酰亚胺(polyimides, PI)和各种聚合物复合材料被用于高级集成电路和微型电子设备的封装和保护。进入21世纪,环保法规和可持续发展的需求成为发展新型绝缘封装材料的主要动力。在材料的合成和应用过程中越来越多地考虑生态影响和生物健康风险<sup>[26-30]</sup>。

随着现代电子技术的发展,电子产品趋向于更小型化、更薄型化,对绝缘封装材料的导热性能、绝缘性能和加工性能提出了更高的要求。为此,许多研究采用各种纳米填料(如氧化铝、氮化硼、碳纳米管)来增强传统聚合物绝缘材料的热传导性<sup>[31]</sup>。聚合物复合材料的开发也允许在不牺牲绝缘性的情况下提供更好的热稳定性和力学强度。进一步的研究则聚焦于发展具有自修复功能的聚合物绝缘封装材料,这些材料可以在出现微小裂纹或损伤时触发自动修复,从而恢复其原有性能,延长电子产品的使用寿命。同时,智能化封装材料也逐步成为研究的热点,其能在一定刺激下(如温度、压力、化学刺激等)改变其性质,此类材料的开发将为电子器件提供更加智能和适应性强的绝缘技术<sup>[32-33]</sup>。

总体来说,绝缘封装材料的发展反映了科技进步和社会需求的演变。现代材料不仅要满足电气性能要求,还要具备环保、可持续和高效的特点。随着技术的进步,未来的绝缘封装材料将更加多元化,满



足诸如电动汽车、可再生能源和小型化、智能化电子器件等领域的特定需求。

## 1.2 聚合物绝缘材料基础

由于聚合物材料优异的绝缘性能,面对高电压大电流的工业需求,国内外研究者致力于聚合物绝缘材料的结构和性能研究,从材料组成和制备工艺出发,探索出许多针对不同应用场景的不同结构和性能的聚合物绝缘材料。为了使读者对该领域的基础知识有更清晰的认识,本节将针对常见的聚合物绝缘材料、聚合物绝缘材料的性能参数、固体击穿过程与耐压实验、聚合物绝缘材料发展现状等做阐述。

### 1.2.1 聚合物绝缘材料

聚合物绝缘材料作为最主要的绝缘封装材料,因具有轻质、高绝缘性、易加工、适应性强等特点而被广泛应用于各种设备和组件的绝缘结构。聚合物绝缘材料可以大致分类为热固性聚合物、热塑性聚合物和弹性体三种,每种类型的材料具备独特的属性,并服务于特定的应用场景<sup>[34-37]</sup>。

#### 1. 热固性聚合物

热固性聚合物也称为热固性塑料,是一类在热或压力作用下固化成不可熔、不可溶的立体网络结构的材料。热固性聚合物具有优异的热稳定性、化学稳定性及高机械强度。

##### (1) 环氧树脂

环氧树脂(epoxy resins)由环氧原位聚合而成,其分子中含有大量的环氧基( $-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}-$ )。作为最被广泛使用的绝缘封装材料,环氧树脂具有以下优点:室温下流动性好、加工性能好,可通过浇注工艺通过模具固化成任意形状;化学结构中存在着许多羟基、醚基和环氧基,很容易与其他材料粘连,因而黏性好;内部分子结构紧密,机械强度优异,以环氧基制备的绝缘器件十分坚固;电气性能优异,体积电阻率在 $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ ,工频下介电常数约为3.5,介质损耗角正切值小于0.004;有很好的耐酸碱和化学腐蚀性能,耐热工作温度在 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ ;成本低,具有良好的经济效益。

##### (2) 不饱和聚酯树脂

不饱和聚酯树脂(unsaturated polyester resins)是由二元酸和二



元醇经缩聚反应而生成的,这种高分子化合物中含有不饱和双键。这类材料具有良好的弯曲、压缩和拉伸强度,通常用于制造高强度绝缘体,如电动机绝缘和变压器的冷却绕组等。它们因其良好的机械特性和价格合理而被广发使用。

### (3) 酚醛树脂

酚醛树脂(phenolic resins)主要由酚类(如苯酚、甲酚和双酚 A 等)和醛类(如甲醛、乙醛和糠醛等)经过缩合而来,是市场上性价比较高的绝缘材料之一。其具有极好的尺寸稳定性和热稳定性,经常用作开关、插座和其他电子元件的外壳材料。

## 2. 热塑性聚合物

与热固性聚合物相反,热塑性聚合物在加热时会变软,冷却时会硬化,可以重复加工成形。它们通常用于制造具有复杂形状的绝缘部件,更易于回收和重复使用。

### (1) 聚乙烯

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)是常见的高压电缆主绝缘材料,采用过氧化物交联的方法使聚乙烯分子由线型分子结构变为三维网状结构,由热塑性材料变成热固性材料。交联聚乙烯具有以下优点:耐热性能优异,采用 XLPE 作为绝缘的电缆,长期工作温度可提高到  $90^{\circ}\text{C}$ ,能承受的瞬时短路温度可达  $250^{\circ}\text{C}$ ;由于 XLPE 在大分子间生成网状结构,拉伸强度和抗蠕变性能均有提高,具有良好的耐环境应力开裂性能;保持了聚乙烯良好的绝缘性能;具有较强的耐酸碱和耐油性,其燃烧产物主要为水和二氧化碳,对环境的危害较小,满足安全环保要求。

### (2) 聚氯乙烯

聚氯乙烯成本低廉,被广泛用于低压电线和电缆的绝缘和护套。PVC 作为电线电缆的优点是不易燃烧、耐老化、耐油、耐化学药品、耐冲击、易着色。聚氯乙烯护套具有优良的耐磨性、能抵抗油、酸、碱、菌、潮气及日光照射等,最低工作温度为  $-40^{\circ}\text{C}$ ,耐高温可达  $105^{\circ}\text{C}$ 。

### (3) 聚酰胺

聚酰胺(polyamide, PA)俗称尼龙( nylon),是大分子主链重复单元中含有酰胺基团的高聚物的总称。聚酰胺可由内酰胺开环聚合制得,也可由二元胺与二元酸缩聚制得。因其良好的尺寸稳定性和抗冲击性,常用作端子和连接器的绝缘部分。



### 3. 弹性体

弹性体是常温下呈现橡胶状弹性的高分子材料(包括橡胶和类橡胶物质)的总称,包括各种天然胶和合成胶,能够在经受拉伸或压缩后恢复形状。这类材料显示出优异的柔韧性和延展性,适宜用于动态应力环境下。

硅橡胶是典型的弹性体材料,具有易成形、耐高低温、耐湿性的优势。其在绝缘性受潮、频率变化或温度升高时变化较小,并且耐电晕性和耐电弧性极好,是输电线路复合绝缘子的主要材料。

这些聚合物绝缘材料的选择取决于其所需的绝缘性能、力学性能、热稳定性、化学稳定性、加工工艺及成本等因素。在实际应用中,经常会根据特定的使用环境和技术要求,同时考虑到可持续性和环保标准,来选择合适类型的聚合物绝缘材料。随着新材料和高级加工技术的不断发展,未来的聚合物绝缘材料将表现出更优异的综合性能。

#### 1.2.2 聚合物绝缘材料性能基本参数

聚合物绝缘材料性能的基本参数对于其在各种电子设备中的应用至关重要。这些参数不仅定义了材料能否满足特定应用的基本需求,还决定了材料能够承受的外部条件和运行环境<sup>[38-41]</sup>。评估聚合物绝缘材料的关键性能指标主要包括:

##### 1. 介电常数 $\epsilon_r$

电极化是电介质的根本属性,它可用一对电极间有电介质时的电容  $C$  与无电介质(真空)时的电容  $C_0$  的比值来表示:

$$\epsilon_r = C/C_0 \quad (1-1)$$

$\epsilon_r$  称为相对介电常数(dielectric constant)。电极化存在多种形式,在电场中,电介质中被化学键所束缚的电荷(电子和正、负离子)将沿电场或反电场方向作有限位移,出现电子极化和离子极化;极性分子或基团也会在电场作用力矩作用下转动,出现偶极极化。多相复合电介质中由于各相电场分布不均匀而产生与界面电荷积累有关的极化,称为界面极化。极化的出现使电容器可以容纳更多的电荷,因而电容增大, $\epsilon_r \geq 1$ 。

电子极化和弹性离子极化的建立速率极快,而偶极极化、界面极化和离子松弛极化的建立较慢,因此  $\epsilon_r$  与电场频率有关。在恒定电场下, $\epsilon_r = \epsilon_s$ ,当频率很高时, $\epsilon_r = \epsilon_\infty$ ,显然  $\epsilon_s > \epsilon_\infty$ 。因此, $\Delta\epsilon_r = \epsilon_s -$



$\epsilon_{\infty}$  表示缓慢极化建立的程度。

库仑定律中用的介电常数  $\epsilon$  与  $\epsilon_r$  关系是： $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ， $\epsilon_0$  是空气介电常数 ( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m)，工程电介质中最常用的是相对介电常数  $\epsilon_r$ 。

## 2. 损耗因数 $\tan\delta$

极化建立过程中，缓慢极化所对应的电荷转移或偶极子转动，在时间上往往滞后于电场。在交变电场中的电介质，这种缓慢极化将消耗电能，因此其介电响应总是包括极化和损耗两部分，通常用复介电常数来描述：

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (1-2)$$

交变电场中若电场变化是时间的正弦函数，则表示为：

$$E = E_m e^{j\omega t} \quad (1-3)$$

由于存在缓慢极化，因此与极化有关的静电位移也应与时间有关，在相位上滞后电场角度  $\delta$ ，即  $D = D_m e^{j(\omega t - \delta)}$ 。

由于  $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$ ，因此  $\epsilon_0 \epsilon_r = D/E = (D_m/E_m) e^{-j\delta} = (D_m/E_m) \cos\delta - j(D_m/E_m) \sin\delta$ ，于是可得：

$$\epsilon_0 \epsilon'_r = (D_m/E_m) \cos\delta \quad (1-4)$$

$$\epsilon_0 \epsilon''_r = (D_m/E_m) \sin\delta \quad (1-5)$$

$$\tan\delta = \epsilon''_r / \epsilon'_r \quad (1-6)$$

$$\epsilon''_r = \epsilon'_r \tan\delta \quad (1-7)$$

$\delta$  称为损耗角， $\tan\delta$  称为介质损耗率或损耗因数 (dissipation factor or dielectric loss)， $\epsilon''_r$  称为损耗指数， $\tan\delta$  或  $\epsilon''_r$  与电介质在电场变化一周期内所消耗的能量成正比。

## 3. 电阻率

电阻率 (resistivity) 分为体积电阻率 (volume resistivity) 和表面电阻率 (surface resistivity)。电阻是施加的直流电压与流过的电流比值 (单位为  $\Omega$ )。若该电流是从材料体积内部通过的，则比值称为体积电阻  $R_v$ ；若是从表面流过的，则称为表面电阻  $R_s$ 。电阻与试样尺寸有关，若电极面积为  $A$ ，表面电极的宽度为  $b$ ，两电极间距离为  $d$ ，如图 1-3 所示，则  $R_v$  和  $R_s$  可表示为：

$$R_v = \rho_v d / A \quad (1-8)$$

$$R_s = \rho_s d / b \quad (1-9)$$

式中， $\rho_v$  为体积电阻率，单位为  $\Omega \cdot \text{m}$ ； $\rho_s$  为表面电阻率，单位为  $\Omega$ 。