

综述

## 高压直流电缆聚丙烯绝缘电场调控\*

俞葆青<sup>1)2)</sup> 夏兵<sup>1)2)</sup> 杨晓砚<sup>1)2)</sup> 万宝全<sup>3)</sup> 查俊伟<sup>3)†</sup>

1) (北京国电富通科技发展有限责任公司, 北京 100071)

2) (南瑞集团有限公司 (国网电力科学研究院有限公司), 南京 211106)

3) (北京科技大学化学与生物工程学院, 北京 100083)

(2022年12月5日收到; 2022年12月30日收到修改稿)

高压电缆是决定电力输送质量和容量的关键要素。聚丙烯由于自身优良的耐热性、绝缘性和绿色环保性被广泛关注, 并应用于电缆绝缘材料开发。高压电缆聚丙烯绝缘材料需要承受脉冲电压和直流额定电压, 容易引起电场畸变从而引发空间电荷积累。此外, 电缆运行过程中, 温度会急剧升高, 严重影响电缆的绝缘性能, 导致电树枝的引发和生长。因此需要对高压电缆进行电场调控从而抑制电场畸变、局部放电、电树枝化等劣化现象的出现。本文重点介绍了高压直流电缆聚丙烯绝缘材料电场调控的理论与方法, 分析了当前电场调控的重点, 最后展望了聚丙烯电缆绝缘的应用前景。

**关键词:** 高压电缆, 聚丙烯, 电场调控, 绿色环保**PACS:** 84.70.+p, 77.84.Jd, 72.20.-i**DOI:** 10.7498/aps.72.20222320

## 1 引言

“碳达峰、碳中和”战略目标的提出, 为推动我国能源结构转型提供了明确的指导方向, 并将进一步助力社会经济的发展。“西电东送”、“南北互供”是目前电力系统建设所面临的一大难题, 且随着海上风电并网和城市地下能源综合通道建设的迅猛发展, 需要高质量、大容量的电力输送通道作为“血管”完成可再生能源接纳和远距离大范围电能输送<sup>[1]</sup>。作为输电工程中的核心部件, 高压电缆成为决定电力输送质量和容量的决定要素。高压直流输电技术 (HVDC) 是大容量远距离输电的关键解决方案之一, 正逐渐成为电网规划领域的关键技术<sup>[2]</sup>。HVDC 与纯交流电力系统相比, 高压直流电网能够抵抗更大的干扰。HVDC 允许连接的电力系统以不同的频率运行, 通过优化电力交换可提高

电网的经济性。

高压电缆在直流电场作用下的电场分布主要由材料的电导率决定, 且介质长期承受单极性电压的作用, 空间电荷不断积累导致材料内部局部电场畸变, 严重影响高压直流电缆的绝缘性能, 进一步导致绝缘材料的部分放电甚至击穿<sup>[3-9]</sup>。因此, 需要改善电导温度梯度稳定性, 抑制空间电荷积累, 从而优化电缆直流电场, 延长其可靠性和使用寿命<sup>[10]</sup>。电力输送向高电压、大传输容量和维护成本低的方向发展, 聚合物塑料绝缘电缆以其优异的高绝缘强度和低的使用成本正逐步取代油纸电缆<sup>[11]</sup>。目前塑料绝缘电缆中以聚烯烃作为主绝缘介质材料, 其中交联聚乙烯 (XLPE) 具有较高的电气强度、物理机械性能、耐腐蚀性、耐应力开裂和优良的热稳定性, 在直流高压电缆中得到了广泛应用, 并且以 XLPE 为主绝缘电缆的电场调控理论和方法也逐渐出现。张洪宇<sup>[12]</sup>通过在 XLPE 分子链上

\* 中央高校基本科研业务费 (批准号: FRF-TP-20-02B2) 资助的课题。

† 通信作者。E-mail: zhajw@ustb.edu.cn

接枝带有双键的抗氧化剂 (AMD) 的设计策略, 研究发现 AMD 接枝改性的 XLPE 电导电流减小, 电导率降低, 击穿场强略有提升. 从机理上分析, AMD 引入到 XLPE 的主链中形成了较高能级的深陷阱, 载流子在移动过程中被陷阱俘获, 材料中的自由电荷数目减少, 从而起到抑制空间电荷积累的作用. 郑元浩<sup>[13]</sup>研究了在不同老化时间下 XLPE 的空间电荷分布情况, 结果表明, 随着绝缘径向距离的增大, 样品中的空间电荷含量呈递减趋势, 但会随着老化时间的延长而增大. XLPE 在热老化时会产生热氧反应, 导致 XLPE 内部微孔、裂缝等缺陷增多, 使绝缘性能劣化, 从而加快了空间电荷的积累.

目前, 高压直流输电工程在全球范围内广泛开展, XLPE 作为电缆绝缘材料应用了近 60 年. 然而, XLPE 也逐渐暴露出一系列问题, 如在生产过程中使用的添加剂和反应过程中产生的副产物使空间电荷积累, 严重影响材料的绝缘性能<sup>[14,15]</sup>, 加入的过氧化物交联剂会造成严重的环境污染. 从分子结构方面考虑, 基于 XLPE 分子链之间的化学键, XLPE 是由线性低密度聚乙烯 (LDPE) 的线性分子转变为交联结构形成的, XLPE 成为一种热固性聚合物, 难以回收利用. 随着对环境保护需求不断增加, 开发绿色绝缘材料以减少环境污染十分必要.

常用的热塑性聚合物中, 聚丙烯 (PP) 因其优异的综合性能在直流高压绝缘电缆中有着更广泛的应用. PP 属于非极性材料, 具有较高的熔点、电场强度和体积电阻率, 对于提高电缆运行电压以及降低输送损耗有着重大意义<sup>[16]</sup>. PP 的工作温度远高于 XLPE, 可长时间在温度为 90 °C 的环境下工作, 能够满足大容量输电的要求. PP 一般不需要交联剂就可获得较好的力学性能, 电场频率基本不受温度的影响, 可满足在实际应用场景中的需要. 许多学者致力于改进 PP 的性能使其成为更优质的电缆绝缘材料, PP 作为电力电缆绝缘的潜在研究引起了极大兴趣.

虽然国内外已有部分研究者开展对 PP 电缆绝缘的研究, 但是通过电场调控抑制电缆在运行过程中出现的多种劣化现象的理论方法总结较少. 因此, 总结和归纳电场调控的理论方法对 PP 电缆材料的开发具有重要意义. 本文通过介绍 PP 的结构和性能以及在直流电缆中的应用, 着重强调了电场调控的几种理论和方法, 最后展望了 PP 电缆绝缘的发展前景.

## 2 聚丙烯绝缘材料

### 2.1 聚丙烯的结构特征

PP 由丙烯单体聚合而成, 系白色蜡状材料, 外观透明而轻, 化学式为  $(C_3H_6)_n$ . 在 PP 的分子结构中, 甲基 ( $-CH_3$ ) 相对于主链有 3 种空间排列方式, 甲基沿着主链同一侧排列的是等规聚丙烯 (i-PP), 甲基有规则交互分布在平面两侧的是间规聚丙烯 (s-PP), 甲基无规则排列在主链两侧的是无规聚丙烯 (a-PP), 三种结构如图 1 所示. a-PP 是生成 i-PP 时的一种副产物, 具有不规则的结构, 较好的分子链柔韧性和抗冲击性, 但结晶性较低, 耐热性较差, 常用于热封装材料中. s-PP 具有较大的分子链间距, 较低的结晶速率, 较高的冲击强度和良好的热封性, 是目前常用的包装材料. i-PP 的结构规整, 结晶度高, 具有优良的力学性能, 良好的耐热性和化学稳定性, 可作为高压直流绝缘电缆材料.

Diao 等<sup>[17]</sup>将无机纳米颗粒  $SiO_2$  与 i-PP 和乙烯-辛烯共聚物弹性体 (POE) 进行共混, 研究  $SiO_2$  对 i-PP/POE 纳米复合材料空间电荷行为的影响. 结果表明, 功能化的  $SiO_2$  纳米颗粒显著抑制了 i-PP/POE 中空间电荷的注入. Zhou 等<sup>[18]</sup>研究了马来酸

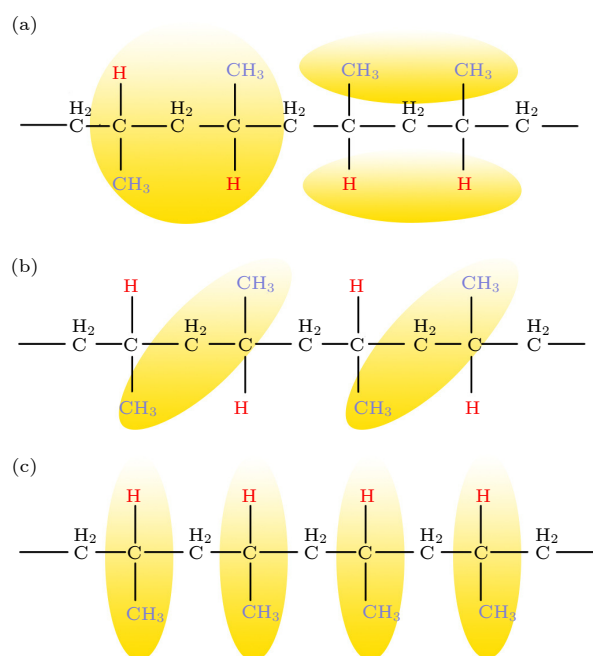


图 1 (a) a-PP 的分子结构; (b) s-PP 的分子结构; (c) i-PP 的分子结构

Fig. 1. (a) Molecular structure of a-PP; (b) molecular structure of s-PP; (c) molecular structure of i-PP.

酞 (MAH) 接枝改性 i-PP 的电荷俘获特性, 通过热刺激电流实验测量了 PP 在接枝 MAH 后引入的陷阱深度. 结果表明, 获得的高密度深陷阱能够有效限制载流子传输并抑制空间电荷的注入, 经 MAH 接枝改性后, i-PP 的直流介电性能有明显改善.

在 i-PP 中主要存在  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  等几种晶体形态, 但  $\alpha$  晶和  $\beta$  晶的稳定性更好. Wu 等<sup>[19]</sup> 通过诱导掺杂有成核剂 2, 6-苯二甲酸环己酰胺 (DCTH) 的  $\beta$  晶体生长显著抑制 i-PP 中的空间电荷. Zhang 等<sup>[20]</sup> 采用熔融共混法制备了含有  $\beta$  晶成核剂 (WBG) 的 i-PP, 研究了材料的力学性能、空间电荷分布、热刺激放电电流和直流击穿强度, 当 WBG 含量为 0.1%—0.5% 时可明显抑制空间电荷的积累.

## 2.2 聚丙烯电缆绝缘特性

PP 是一种极具竞争力和潜力的高压直流绝缘电缆材料, 是一种性能优良的热塑性通用塑料. PP 因其优异的电绝缘性、比重轻、耐化学腐蚀性、耐热等特性在医疗器具、机械设备零部件、化工容器、服装、汽车等生活的众多领域得到广泛的应用. PP 在高温下还表现出更好的热稳定性、足够的机械灵活性和优异的电气性能. 此外, PP 是石油化工的主要产品, 成本较低, 而且 PP 的热塑性特性使其更容易回收和再加工. 因此, PP 可认为是一种有前途的可循环利用的环保型直流电缆绝缘材料. 但 PP 仍存在着低温耐冲击性能差、耐老化性能差等缺点, 不能满足实际工作条件, 目前主要通过对其进行共混改性、纳米改性以及化学接枝改性, 再应用到电力电缆绝缘材料中.

尽管 PP 的高温性能有很大提升, 但当高压直流电缆的工作温度提高时, 在高温和高电场的工作条件下, PP 的电性能会下降, 特别是在高温高电场下的空间电荷积累仍然是 PP 基高压直流电缆绝缘材料开发的一项技术难题. PP 自身各种优越的特性也不能完全抵抗高温高压环境给予的劣化破坏, 需要研究人员通过电场调控或其他手段提升电缆的绝缘特性, 延长电缆的使用寿命. Zha 等<sup>[21]</sup> 采用熔融共混法制备了填充功能化氧化石墨烯 (f-GO) 和热塑性弹性体 (SEBS) 的 PP 复合材料, PP 和 SEBS 之间的界面产生了一定的界面极化, 导致在电极附近和样品内部都产生了大量的热电荷, f-GO 的引入可以有效地抑制空间电荷的积累.

Yan 等<sup>[22]</sup> 采用熔融共混法制备了负载量不同的 PP/LDPE 复合材料, LDPE 的添加显著改善了 PP 的微观结构, 增大了复合材料的陷阱密度和传导电流. 结果表明, 电性能的改善, 尤其是复合材料中的电荷传输和空间电荷抑制与陷阱能级密度密切相关.

## 3 聚丙烯电缆绝缘直流电场调控

随着高压直流输电技术的进一步发展, 直流输电在电力传输中所发挥的作用愈发重要. 因此, 需要强化 PP 直流电缆的绝缘性能以便满足在高压和超高压工作环境中的需要. 值得注意的是, 直流电场下绝缘材料的电阻率 (或电导率) 是影响介质内部电场分布的主要因素, 但电阻率对温度和电场的变化非常敏感. 此外, 由于电缆正常工作放热造成绝缘材料内部温度内高外低, 可能导致绝缘外径处的电场强度比内径电场强度高的现象. 周焱等<sup>[23]</sup> 研究了直流电缆绝缘中电场分布的变化规律, 对绝缘层温度梯度、绝缘材料的电阻率和电场强度等因素进行了分析. 结果表明, 内部和外部的温差对直流电场的电场分布具有很大影响. 无载荷时, 电场强度在内部最大, 载荷增大时, 电场强度向外层迁移, 通过减小电阻率温度系数能够有效抑制电场的分布不均匀性. Zhang 等<sup>[24]</sup> 将 4-甲基苯乙烯接枝到 PP 上, 研究了改性 PP 的体积电阻率、抑制空间电荷的能力和直流击穿强度, 接枝率为 0.88% 的改性 PP 具有最佳的空间电荷抑制效果, 体积电阻率和击穿强度达到最高. Zha 等<sup>[25]</sup> 选择苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物来优化 PP 的机械性能, 引入具有纳米结构的 MgO 以抑制空间电荷的积累, PP 复合材料的直流电导率达到了  $1.6 \times 10^{-15}$  S/m, 直流击穿强度高达 315 kV/mm. 此外, 在直流电场中也容易产生空间电荷积聚问题, 空间电荷的存在、迁移、扩散和累积都会直接影响绝缘材料中的电场分布, 从而诱发电场畸变, 造成绝缘老化破坏等关键问题. 同时, 在热耦合电场作用下, 电缆绝缘中也容易存在空间电荷积累和电场畸变等问题. 为了揭示陷阱特性如何在电热耦合场下调节和控制电缆中的电荷传输, 仿真模型引入了各种陷阱深度和陷阱密度. 除此之外, 电缆绝缘结构的匹配设计也会影响到电缆运行过程中的电场分布情况.

### 3.1 聚丙烯绝缘介质电导特性调控

目前广泛运用于数值仿真拟合的电导率模型大多随脉冲电场强度及温度变化, 具体如下 [26]:

$$\sigma(|E|, T) = \sigma_0 [1 + A \text{flc2hs}(|E| - E_{\text{del}}, E_{\text{range}}) + \alpha(T - T_0)], \quad (1)$$

式中,

$$E_{\text{del}} = (E_1 + E_0)/2, \quad E_{\text{range}} = (E_1 - E_0)/2,$$

其中,  $E$  为电场强度,  $E_0$  是电导率开始时的电场强度,  $E_1$  是电导率稳定时的电场强度;  $\sigma$  为电导率;  $\sigma_0$  为初始电导率;  $T_0$  为初始温度;  $T$  为组织温度;  $\alpha$  为温度升高对电导率的影响系数;  $A$  为电导率增长因子;  $E_{\text{del}}$  为初始电导率发展到稳定值这段区间的中间值;  $E_{\text{range}}$  为整个过渡区间变化范围的 1/2; flc2hs 函数如图 2 所示.

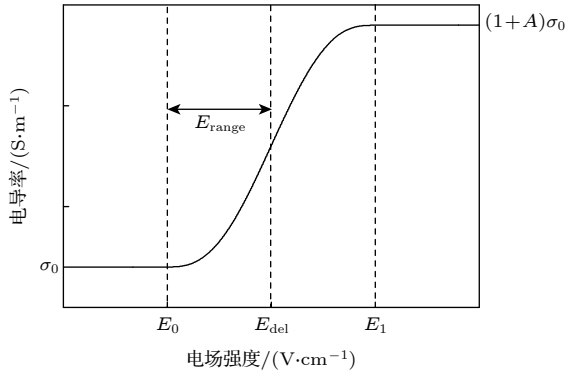


图 2 flc2hs 的函数图 [26]

Fig. 2. Function diagram of flc2hs [26].

在电缆实际运行过程中为了避免劣化现象的出现造成电缆的破坏, 需要调控绝缘材料的电导特性从而影响整体运行环境中的电场分布. 直流的电场分布与电阻率密切相关, 而体积电阻率受温度的影响较大. 我们团队从分子结构设计出发, 通过 MAH 接枝对 PP 进行改性, MAH 的存在可明显提高 PP 的耐热性能, 当对不同温度下的电阻率进行调控时, 获得了具有最佳电阻率稳定性的接枝体系 (PP-g-2%MAH (2% 为质量分数, 后同)), 而纯 PP 受热场影响较大, 如图 3 所示. 另外, 由于 MAH 的引入影响了 PP 分子链重排, 导致在晶界和非晶态区域易产生大量陷阱, 使得 PP-g-2%MAH 的空间电荷抑制效果也十分显著 [27].

刘畅等 [28] 在 PP 中引入两种不同硫代受阻酚类抗氧化剂建立了电导特性与空间电荷的关联, 抗氧化剂在 PP 中形成深陷阱中心, 减少空间电荷积聚, 提高极性反转后的直流击穿强度. 抗氧化剂可在高温下获得能量发生迁移和电离, 增加 PP 中的载流子数量. 此研究表明 PP 电导率与其温度梯度变化密切相关, 可通过抑制高温下电导率增幅实现对电场的有效调控. 李喆等 [29] 对 PP 的击穿特性、强场电导和空间电荷分布等性能进行测试, 结果表明, 在 PP 老化过程中, 需要足够高的加压场强才能使内部产生空间电荷. PP 的强场电导与温度有关, 其值随温度的升高而升高. 为了提高 PP 的绝缘性能和阻碍通过材料的泄漏电流, Zheng 等 [30] 采用考虑移动电子、俘获电子、空穴及离子种类的双极电荷传输模型, 研究了纳米填料在直流电场下对 PP 复合材料电荷传输特性的影响. 研究表明, 纳米填料的加入可以获得更均匀的空间电荷和电场分布, 通过降低电荷产生率和载流子迁移率来抑制体电流, 从而降低体积电导率.

剂在 PP 中形成深陷阱中心, 减少空间电荷积聚, 提高极性反转后的直流击穿强度. 抗氧化剂可在高温下获得能量发生迁移和电离, 增加 PP 中的载流子数量. 此研究表明 PP 电导率与其温度梯度变化密切相关, 可通过抑制高温下电导率增幅实现对电场的有效调控. 李喆等 [29] 对 PP 的击穿特性、强场电导和空间电荷分布等性能进行测试, 结果表明, 在 PP 老化过程中, 需要足够高的加压场强才能使内部产生空间电荷. PP 的强场电导与温度有关, 其值随温度的升高而升高. 为了提高 PP 的绝缘性能和阻碍通过材料的泄漏电流, Zheng 等 [30] 采用考虑移动电子、俘获电子、空穴及离子种类的双极电荷传输模型, 研究了纳米填料在直流电场下对 PP 复合材料电荷传输特性的影响. 研究表明, 纳米填料的加入可以获得更均匀的空间电荷和电场分布, 通过降低电荷产生率和载流子迁移率来抑制体电流, 从而降低体积电导率.

### 3.2 聚丙烯绝缘介质电场-空间电荷-热耦合调控

目前, 计算绝缘层电场分布的方法主要有两种, 解析算法需要考虑绝缘材料的绝缘层电场与电导率的关系, 而电导率又受温度的影响. 此外, 由于空间电荷产生和传输机制的复杂性, 该分析方法不能直接反映绝缘层电场分布. 研究者大多利用有限元仿真分析计算绝缘层电热耦合规律. 比如, 通过双极电荷传输方程 (BCT) 和热场模拟相结合的方法, 揭示在不同负载电流和电压下, 陷阱密度和深度对高压直流电缆绝缘中空间电荷和电场演化行为的影响.

图 4 给出了仿真中使用的 320 kV 高压直流电缆的几何形状 [31]. 为了简化计算, 更清晰地描述空间电荷和电热耦合场的时空演化, 电缆模型由七部分构成: 导体、导体屏蔽层、绝缘层、绝缘屏蔽层、纵向阻水层、金属护套和护套层. BCT 模型包括双极性电荷注入、输运、电荷俘获、复合和提取的过程, 系数  $S_i$  表示不同载流子的复合过程. 综合考虑电荷载流子注入、俘获、去俘获和复合的影响, 载流子迁移率  $\mu$  如等式所示:

$$\mu = \frac{2dv}{E(r, t)} \exp\left(-\frac{e\omega\mu}{kT}\right) \sinh\left(\frac{eE(r, t)d}{2kT}\right), \quad (2)$$

其中  $d$  是浅陷阱之间的距离,  $e$  是电子电荷,  $v$  是逃逸频率,  $r$  是径向位置,  $k$  是玻耳兹曼常数,  $T$  是温

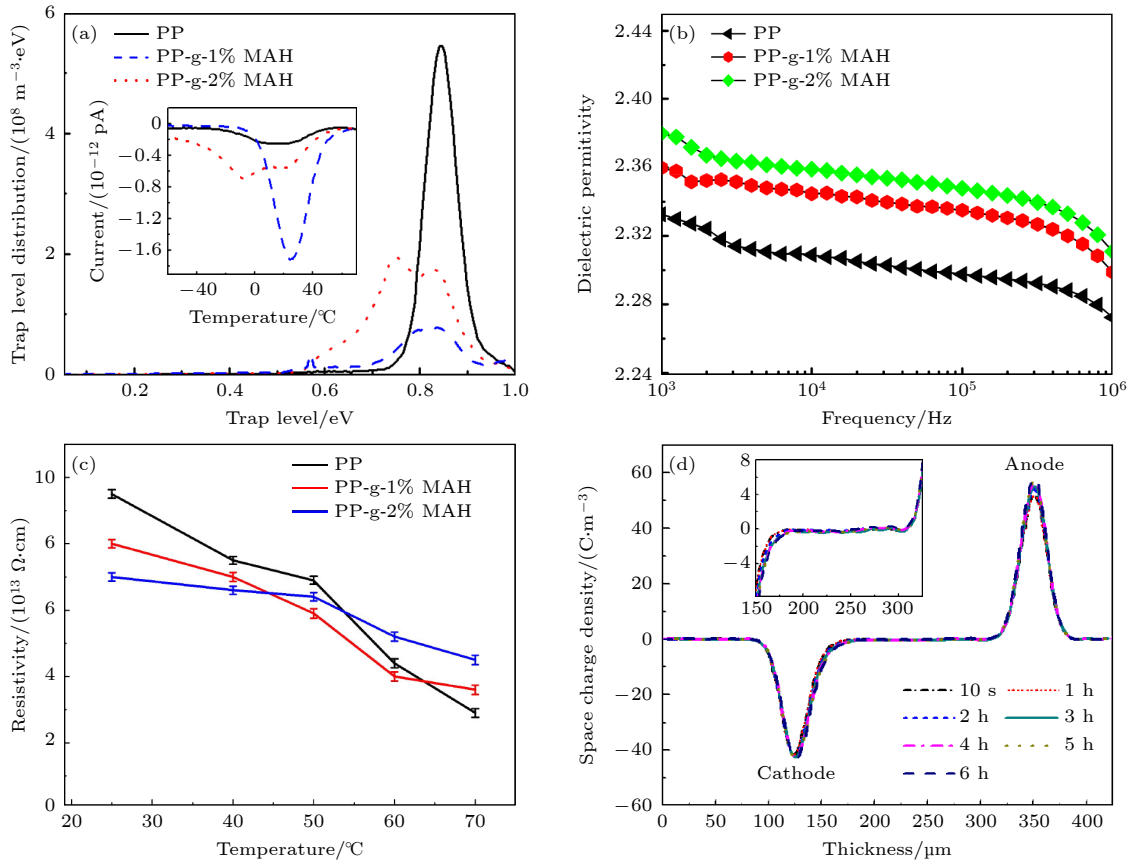


图3 (a) PP和PP-g-MAH的陷阱能级密度, 插图为热激电流谱; (b) 介电常数与频率关系; (c) 体积电阻率的温度依赖性; (d) PP-g-2%MAH空间电荷分布<sup>[27]</sup>

Fig. 3. (a) Trap level density of PP and PP-g-MAH; (b) relationship between dielectric constant and frequency; (c) temperature dependence of volume resistivity; (d) PP-g-2%MAH space charge distribution<sup>[27]</sup>.

度,  $\omega_{\mu}$ 是电子和空穴的跳跃势垒高度. 在电热耦合场作用下, 有负载电流的HVDC电缆中的电荷传输过程可用欧姆定律、高斯定理、电流连续性方程、泊松方程和传热方程等5个方程来描述. BCT和热场模拟相结合的方法可以研究不同负载电流和电压下陷阱密度和深度对空间电荷和电场演化行为的影响. 其中在电热应力作用下, 陷阱特性对高压直流电缆绝缘中空间电荷和电场演化的影响与恒温板试样中存在明显差异, 且在电流负载变化时更为复杂. 研究者可以通过减小陷阱深度和陷阱密度来提高本体传导电流, 进一步有效抑制本体空间电荷和导体绝缘界面空间电荷的积累. 此外, 增大陷阱密度和深度可以显著抑制电热耦合场作用下电缆绝缘中体积空间电荷积聚和电场畸变<sup>[31]</sup>.

随着时间、电场以及温度的改变, 传导电流是微观电荷传输特性的宏观表现, 但它却无法对电荷传输过程进行深入探究. 因此, 除了空间电荷的形成与演变以外, 陷阱密度和深度、温度、电荷注入

势垒、载流子迁移率以及其他微观参数对电荷传输性能也有较大的影响. 电荷传输模拟将有助于对变温特高电场下的材料进行研究. Dai等<sup>[32]</sup>研究了PP在电导和击穿过程中的电荷传输, 结果表明, 温度的升高有利于电荷的注入和传输, 热应力在电荷传输中起着非常重要的作用.

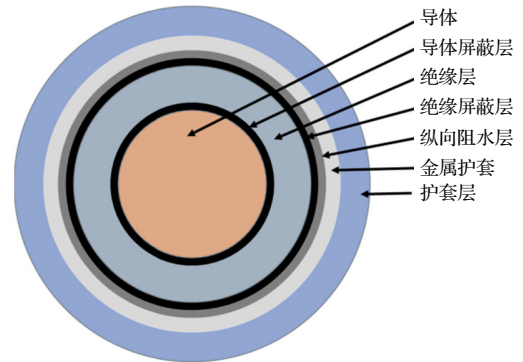


图4 320 kV高压直流电缆的几何形状<sup>[31]</sup>

Fig. 4. Geometry of 320 kV high voltage direct current cables<sup>[31]</sup>.

PP 是一种结晶相和非晶相共存的聚合物, 形成的是长程无序但短程有序的微观结构. 周期性排列形成的能带结构仅存在于局部有序区域中, 但局部有序区域之间并不连续, 因此会有势垒的形成. Zhou 等<sup>[33]</sup> 基于微观结构和陷阱特性, 研究了温度对 PP 电荷载流子产生、迁移和积累的影响, 聚合物中界面的存在不可避免改变陷阱特性, 增大深陷阱能级密度, 导致载流子传输过程的变化. 在高压直流电缆的实际运行中, 空间电荷在其绝缘中积累, 改变电场分布, 最终导致局部电场增强, 可能导致电树产生甚至完全击穿. 因此, 在电缆绝缘系统的设计中, 空间电荷的积累和电场的控制是非常重要的. 侯帅等<sup>[34]</sup> 研究了载流量对电缆径向温度和电场分布的影响, 结果表明随着载流量增大, 电缆本体温度梯度分布愈加明显, 同时电场的翻转现

象也愈加显著, 绝缘介质的温度由内向外递减, 影响绝缘层的电荷输运和电场分布. 因此, 如何减小电导率温度梯度效应, 是抑制电场翻转、增大线路载流量的关键. 李忠华等<sup>[35]</sup> 研究了不同温度梯度、不同加压方式以及绝缘材料非线性属性对电缆稳态和暂态电场分布的影响. 如图 5(a)—(d) 所示, 首先通过 320 kV 直流电缆典型结构定义材料属性, 建立电导率的函数模型, 再经过温度梯度的建立来确定绝缘层温度分布状况, 最后为仿真研究电缆刚投入运行和极性反转时的情况确定加压方式. 经过仿真得知, 要使电场分布更均匀, 可增大电场依赖系数或降低电导活化能, 如图 5(e) 和图 5(f) 所示. 由此可得出, 降低绝缘材料的活化能, 提高材料电导对电场强度的依赖性对于开发 PP 基高压直流电缆材料具有重要参考意义.

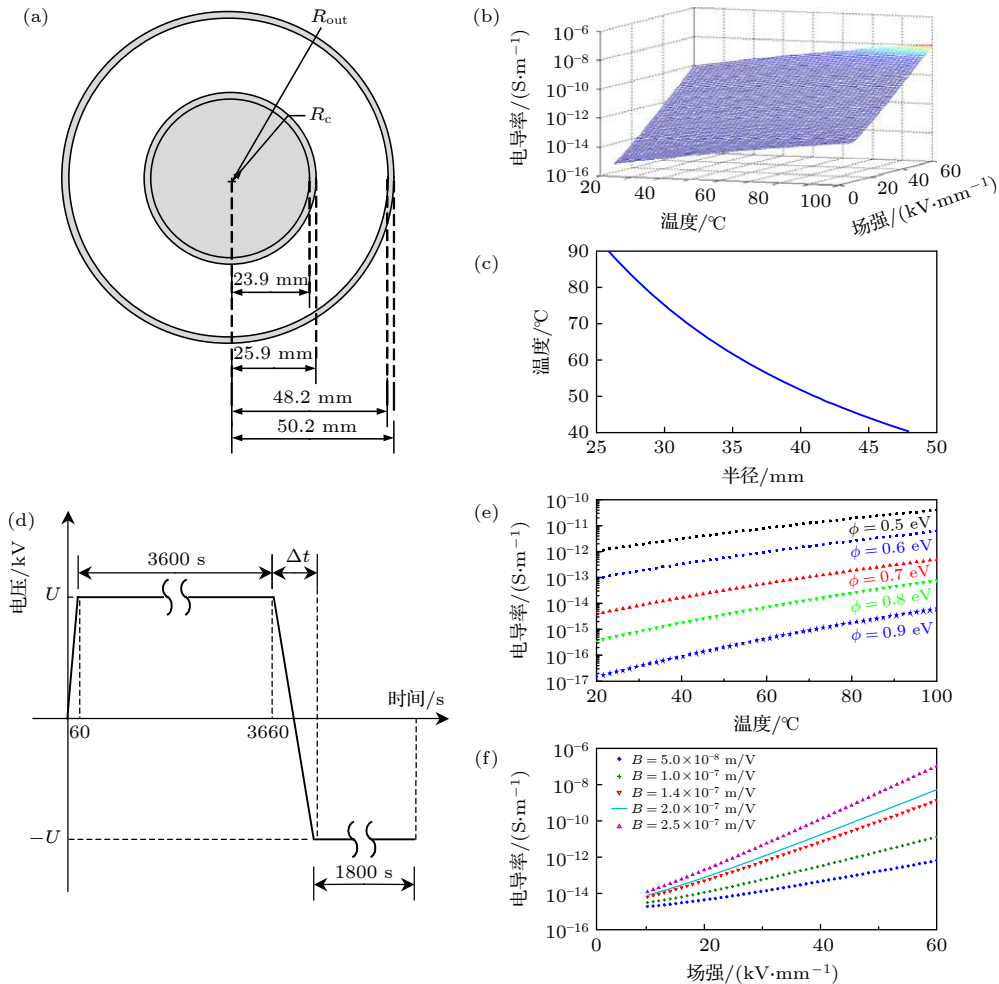


图 5 (a) 320 kV 直流电缆典型结构; (b) 电导率的函数模型; (c) 绝缘层温度分布; (d) 施加电压波形; (e) 电导率与活化能的关系; (f) 电导率与电场依赖系数的关系<sup>[35]</sup>

Fig. 5. (a) Typical structure of 320 kV DC cable; (b) functional model of conductivity; (c) insulation temperature distribution; (d) applied voltage waveform; (e) relationship between conductivity and activation energy; (f) relationship between conductivity and electric field dependence coefficient<sup>[35]</sup>.

### 3.3 聚丙烯高压电缆及附件的绝缘结构匹配设计

高压电缆包括电缆长度和附件设备, 后者实质上是相邻电缆长度之间的接头 (如图 6(a) 和图 6(b) 所示) 和电缆系统的终端 (如图 6(c) 所示) [36]. 电缆附件作为高压直流输电系统的重要组成部分, 其可靠性对整个电缆输电系统的安全性与稳定性有着很大的影响 [37]. 接头和终端是整个电缆系统最薄弱的地方, 主要有以下原因. 首先, 其中包括的组件就涉及了不同材料之间的界面问题, 因而在界面上可能会产生不利的物理化学现象 [38]. 其次, 如果附件的设计、制造以及安装的不合理, 那么其使

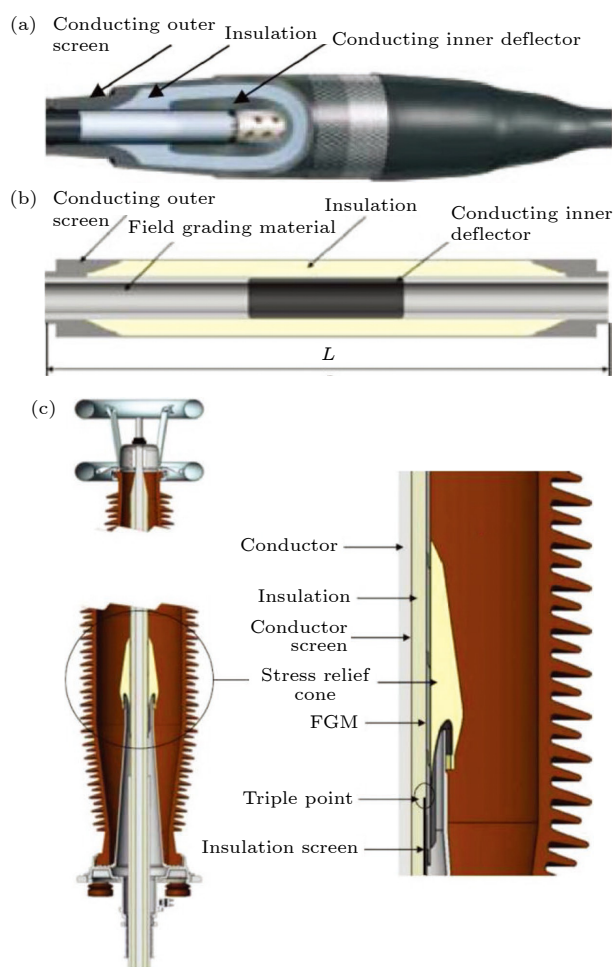


图 6 高压直流电缆系统附件 (a) 典型的高压直流预制接头设计, 没有现场分级材料 (FGM) 层; (b) 典型的带 FGM 层的高压直流预制接头设计; (c) 带 FGM 适配器的 HVDC 电缆终端的剖面图示意图 [36]

Fig. 6. HVDC cable system accessories: (a) Typical HVDC prefabricated joint design without a field grading material (FGM) layer; (b) typical HVDC prefabricated joint design with a FGM layer; (c) schematic cut-away view of a HVDC cable termination with FGM adapters [36].

用应力就会达到一个临界值. 此外, 配件的安装通常容易受到周围环境的污染. 因此, 开发合适的直流电缆附件是发展更高水平电压直流电缆传输系统的主要因素.

直流电缆终端或接头的电场分布比交流电缆更为复杂, 在直流电力系统中, 电缆终端或接头处的电场分布主要取决于绝缘材料的电导率, 但其导电性会受到环境的影响 [39]. 为了解决直流电缆终端中存在的问题, Zhao 等 [40] 将一种具有非线性导电材料用于制造直流电缆终端附件, 并采用有限元模拟方法计算不同温度梯度条件下直流电缆终端在电热耦合场下的内部电场分布. 结果表明, 使用具有非线性导电材料有助于高压直流电缆附件的开发. 由上可知, 基于电导率的温度梯度效应, 以及电场-空间电荷-热场耦合机制能够实现对电场分布的调控. 此外, 通过研究高压直流电缆用 PP 绝缘宏观界面与电导、空间电荷的关联机制, 辅以有限元仿真模型, 建立宏观界面设计抑制空间电荷、电场畸变、沿面放电等负面因素的理论与方法也是实现电场分布有效调控的关键. 电缆主绝缘与附件之间电导率、介电性能差异较大大会严重影响电场的均一化分布, 造成电场畸变出现劣化现象而降低电缆的使用寿命 [41].

对于高压电力设备来说, 绝缘是一个重要的问题. 采用非线性材料可以改善器件内的电场分布, 提高绝缘结构的绝缘利用率. Yang 等 [42] 以电缆终端为研究对象, 建立了电缆终端的均压管模型, 研究了非线性材料的长度和厚度对终端电场分布的影响, 利用多物理场仿真软件 (COMSOL) 建立直流 500 kV 电缆终端的仿真模型. 为了研究非线性材料的铺设长度对压力均衡效果的影响, 首先确定非线性材料的厚度为 8 mm, 改变非线性材料的铺设长度, 模拟结果如图 7(a) 所示. 可以看出, 随着非线性长度的增大, 非线性端场强随之减小, 从 6.2 kV/mm 减小到 3.8 kV/mm, 且非线性长度与外绝缘不相容. 空气接触面上的场强分布也有影响, 也是实践中需要考虑的问题. 现在读出几种条件下外表面的场强数据, 以距离地电极底部的距离为横坐标, 以各点的场强为纵坐标, 几种情况下场强随距离的变化曲线如图 7(b) 所示. 仿真结果表明, 在厚度相同的情况下, 增大非线性层的长度会使各处的电场强度降低, 说明均匀电场的效果更好. 如图 7(c) 和图 7(d) 所示, 经过同样过程的模

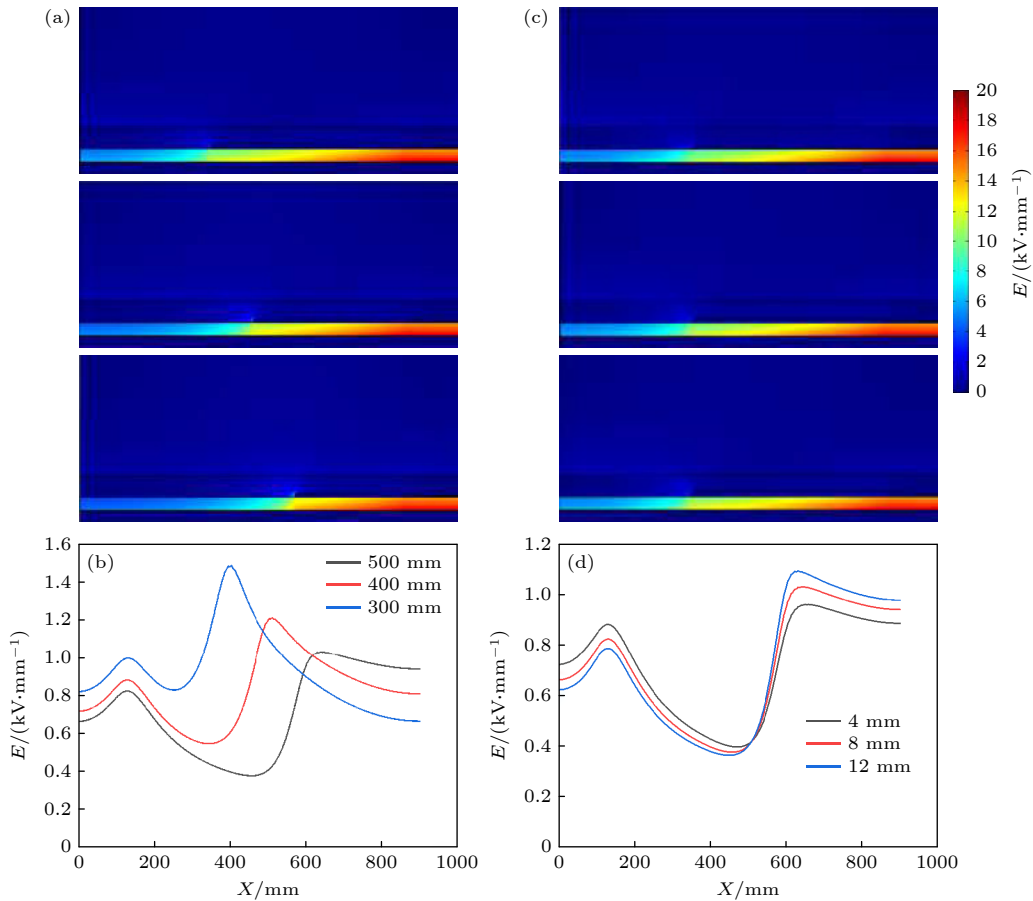


图 7 (a) 不同非线性材料长度的仿真结果; (b) 绝缘外表面的电场强度; (c) 不同厚度非线性材料的模拟结果; (d) 绝缘外表面的电场强度<sup>[42]</sup>

Fig. 7. (a) Simulation results of different nonlinear material lengths; (b) electric field strength on the outer surface of insulation; (c) simulation results of nonlinear materials with different thickness; (d) electric field strength on the outer surface of insulation<sup>[42]</sup>.

拟结果证实, 在相同的非线性长度下, 厚度越大, 电压均衡效果不一定越好, 因为虽然绝缘内的场强较低, 但外表面的场强较大. 对此, 经分析得知在电缆终端中, 对均匀电场使用非线性材料的效果不仅比半导体材料好得多. 在结构设计上, 可以将复杂的应力锥结构简化为简单的均压管结构, 既保证了均压效果, 又简化了工艺制造难度. 合理设计非线性层的长度和厚度, 并调整非线性材料的特性, 使电缆终端的均衡管结构具有广阔的应用前景.

综上所述, PP 微观理化性能上的不同, 会导致绝缘材料在宏观力学、热学乃至绝缘特性的差异. 从电缆生产与应用的角度看, 绝缘材料的制备与加工工艺直接决定了电缆的优劣. 为突破高压电缆强绝缘、高可靠、长寿命的技术瓶颈, 需要从高性能 PP 绝缘材料的结构设计出发研究不同温度梯度电导特性的变化规律, 揭示空间电荷积聚消散、电场均一化的影响机制, 建立直流电场调控理论与方法, 实现高压电缆用 PP 绝缘性能的强化.

## 4 结论与展望

聚丙烯作为高压直流电缆绝缘材料得到广泛关注, 但其空间电荷积聚仍是影响高压直流输电发展的关键所在, 而电场调控是改善电荷空间分布和抑制电场畸变的有效策略之一. 将添加剂引入到 PP 中、采用共混技术制备 PP 复合材料以及对 PP 的接枝改性等方法可调控电场微域结构, 从而有效抑制空间电荷的积累. 基于 PP 电缆绝缘目前的研究现状和发展趋势, 对 PP 电缆绝缘的应用前景展望如下:

1) PP 具有更高的工作温度且绝缘性能优异, 有助于进一步提高电缆运行电压、线路载流量和可靠性, 具备良好发展前景, 将突破高压电缆强绝缘、高可靠、长寿命的技术瓶颈, 支撑我国电力装备和电力工业的高质量发展.

2) 充分利用 PP 易改性的特征, 建立 PP 及其

改性材料在电-热场耦合作用下的劣化机制, 实现高场强和温度梯度作用下绝缘电场的调控, 为最终制备具有绝缘性能的 PP 电缆绝缘提供理论指导.

3) 基于 PP 及其改性材料的可塑性特征, 模拟设计电导率梯度分布的多层电缆主绝缘, 通过实验进一步验证制备出多层结构 PP 电缆, 实现电缆电场均一化, 从而抑制劣化现象的出现, 提升电缆的使用寿命.

## 参考文献

- [1] Wang Y, Lü Z P, Wu K, Wang X, Liu T, Li R H 2014 *Insul. Mater.* **47** 22 (in Chinese) [王亚, 吕泽鹏, 吴锴, 王霞, 刘通, 李锐海 2014 *绝缘材料* **47** 22]
- [2] Liang X M, Zhang P, Chang Y 2012 *Power Syst. Tech.* **36** 1 (in Chinese) [梁旭明, 张平, 常勇 2012 *电网技术* **36** 1]
- [3] Green C D, Vaughan A S, Stevens G C, Sutton S J, Geussens T, Fairhurst M J 2013 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **20** 1
- [4] Hosier I L, Vaughan A S, Swingle S G 2011 *J. Mater. Sci.* **46** 4058
- [5] Ma C, Min D M, Li S T, Zheng X, Li X Y, Min C, Zhan H Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 067701 (in Chinese) [马超, 闵道敏, 李盛涛, 郑旭, 李西育, 闵超, 湛海涯 2017 *物理学报* **66** 067701]
- [6] Liu M C, Liu Y P, Li Y D, Zheng P, Rui H R 2017 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **24** 2282
- [7] Zha J, Wang F 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 233601 (in Chinese) [查俊伟, 王帆 2022 *物理学报* **71** 233601]
- [8] Zhao X F, Ni H, Li X, Lin T, Ju Z L, Pu L, Fan M H, Deng J B, Zhang G J 2018 *High Volt. Appar.* **54** 165 (in Chinese) [赵学风, 倪辉, 李旭, 林涛, 琚泽立, 蒲路, 范明豪, 邓军波, 张冠军 2018 *高压电器* **54** 165]
- [9] Lan S, Li K, Gao X Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 136801 (in Chinese) [兰生, 李焜, 高新昀 2017 *物理学报* **66** 136801]
- [10] Liu Z Q, Gao Z, Hao J, Li H P, Ma Z P 2020 *Insul. Mater.* **53** 29 (in Chinese) [刘智谦, 高震, 郝建, 李捍平, 马志鹏 2020 *绝缘材料* **53** 29]
- [11] Wang Z Z, Qu B J, Fan W C, Xu Y H 2001 *Polym. Mater. Sci. Eng.* **1** 7 (in Chinese) [王正洲, 瞿保钧, 范维澄, 徐云华 2001 *高分子材料科学与工程* **1** 7]
- [12] Zhang H Y 2020 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin University of Science and Technology) (in Chinese) [张洪宇 2020 硕士学位论文(哈尔滨: 哈尔滨理工大学)]
- [13] Zheng Y H 2022 *M. S. Thesis* (Qingdao: Qingdao University of Science and Technology) (in Chinese) [郑元浩 2022 硕士学位论文(青岛: 青岛科技大学)]
- [14] Gouda O E, ElFarsoury A A, ElSinnary A R, Farag A A 2018 *IET Gener. Transm. Distrib.* **12** 1190
- [15] Gui Y, Wang Z H, Xu X Q, Wang Z Y, Ma G Y, Liu R X, Li Z R 2021 *Insul. Mater.* **54** 72 (in Chinese) [桂媛, 王智晖, 徐兴全, 王志勇, 马光耀, 刘若溪, 李泽瑞 2021 *绝缘材料* **54** 72]
- [16] Du B X, Hou Z H, Xu H, Li J, Li Z L 2017 *High Volt. Eng.* **43** 2769 (in Chinese) [杜伯学, 侯兆豪, 徐航, 李进, 李忠磊 2017 *高压电压技术* **43** 2769]
- [17] Diao J C, Huang X Y, Jia Q C, Liu F, Jiang P K 2017 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **24** 1416
- [18] Zhou Y, Yang J M, Zhao H, Sun W F, Gao M Z, Zhao X D, Hu M, Xie S H 2019 *Materials* **12** 1094
- [19] Wu Y H, Zha J W, Li W K, Wang S J, Dang Z M 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 112901
- [20] Zhang W, Xu M, Huang K W, Mu Q L, George C 2019 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **26** 714
- [21] Zha J W, Yan H D, Li W K, Dang Z M 2018 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **25** 1088
- [22] Yan H D, Zhang C, Li W K, Zha J W 2019 *Polym. Compos.* **41** 780
- [23] Zhou Y, Liu J P, Zhao X L, Fang S C, He J L 2020 *High Volt. Appar.* **56** 155 (in Chinese) [周焱, 刘继平, 赵孝磊, 房晟辰, 何金良 2020 *高压电器* **56** 155]
- [24] Zhang Y Y, Shi K S, Zang C Y, Wei W C, Xu C H, Zha J W 2022 *Materials* **15** 6289
- [25] Zha J W, Wang Y, Wang S J, Zheng M S, Bian X M, Dang Z M 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 252902
- [26] Zhao Y J, Bhonsle S, Dong S L, Lü Y P, Liu H M, Safaai J A, Davalos R V, Yao C G 2018 *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **65** 1810
- [27] Zha J W, Wu Y H, Wang S J, Wu D L, Yan H D, Dang Z M, 2016 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **23** 2337
- [28] Liu C, Li Z L, Zhou S F, Fan M S, Du B X 2021 *Elec. Manuf.* **16** 42 (in Chinese) [刘畅, 李忠磊, 周硕凡, 范铭升, 杜伯学 2021 *电气工程学报* **16** 42]
- [29] Li Z, Gong J, Cao W K, Sheng G H, Jiang X C 2015 *High Volt. Eng.* **41** 1451 (in Chinese) [李喆, 龚瑾, 操卫康, 盛戈皞, 江秀臣 2015 *高压电压技术* **41** 1451]
- [30] Zheng Y S, Huang H F, Zhong X Y, Serdyuk Y V 2021 *J. Phys. D Appl. Phys.* **54** 235501
- [31] Tian F Q, Zhang S T, Hou C Y 2021 *Energies* **14** 1313
- [32] Dai X Y, Tian F Q, Li F, Zhang S T, Xing Z L, Wu J B 2021 *Energies* **14** 4722
- [33] Zhou Y, Yuan C, Li C Y, Meng P F, Hu J, Li Q, He J L 2019 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **26** 1596
- [34] Hao Y P, Chen Y, Yang L, Qiu W H, Fu M L, Hou S 2017 *High Volt. Eng.* **43** 3534 (in Chinese) [郝艳捧, 陈云, 阳林, 邱伟豪, 傅明利, 侯帅 2017 *高压电压技术* **43** 3534]
- [35] Li Z H, Liu L L, Zheng H, Liang S T 2016 *Proc. CSEE* **36** 2563 (in Chinese) [李忠华, 刘乐乐, 郑欢, 梁斯婷 2016 *中国电机工程学报* **36** 2563]
- [36] Mazzanti G, Marzotto M 2017 *IEEE Electr. Insul. Mag.* **33** 17
- [37] Liu G, Chen Z Y 2012 *High Volt. Eng.* **38** 678 (in Chinese) [刘刚, 陈志娟 2012 *高压电压技术* **38** 678]
- [38] Hannan M A, Hussain I, Ker P J, Hoque M M, Hossain L M S, Hussain A, Rahman M S A, Faizal C W M, Blaabjerg F 2018 *IEEE Access* **6** 78352
- [39] Amaru L, Gaillardon P E, Micheli G D 2014 *IET Sci. Meas. Technol.* **13** 1074
- [40] Zhao X L, Meng P F, Hu J, Li Q, He J L 2020 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **27** 10
- [41] Yin Y, Wu J D, Hu J L, Zhang L, Sun L, Shen Y J 2018 *Elec. Manuf.* **13** 30 (in Chinese) [尹毅, 吴建东, 胡嘉磊, 张磊, 孙璐, 沈耀军 2018 *电气工程学报* **13** 30]
- [42] Yang Q H, Hu J, Yuan Z K, Li J Z, Yin Y, Tang H 2021 *International Conference on Electrical Materials and Power Equipment Chongqing, China, April 11–15, 2021* p978

REVIEW

# Electric field regulation of polypropylene insulation for high voltage DC cables\*

Yu Bao-Qing<sup>1)2)</sup> Xia Bing<sup>1)2)</sup> Yang Xiao-Yan<sup>1)2)</sup>  
Wan Bao-Quan<sup>3)</sup> Zha Jun-Wei<sup>3)†</sup>

1) (*Beijing Guodianfutong Science & Technology Development Co., Ltd., Beijing 100071, China*)

2) (*Nari Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China*)

3) (*School of Chemistry and Biological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

( Received 5 December 2022; revised manuscript received 30 December 2022 )

## Abstract

High voltage cable is the key factor to determine the quality and capacity of power transmission. Polypropylene has widely attracted more attention because of its excellent heat resistance, insulation and green environmental protection, and it is used as cable material. Polypropylene insulation material for high voltage cable needs to bear pulsed voltage and the DC rated voltage, which can easily cause electric field to be distorted and lead the space charge to be accumulated. Meanwhile, the change of cable temperature will also affect the conductivity of insulating material and promote the accumulation of space charge, resulting in the distortion of internal electric field of insulating material and the initiation and growth of electric tree. Therefore, it is necessary to regulate the electric field of high voltage cable so as to suppress the deterioration phenomena such as electric field distortion, partial discharge and electrical demoralization. In this work, the theory and method of regulating DC electric field of polypropylene insulation of high voltage cable is first introduced. Then the main direction of electric field regulation is presented. Finally, the application prospect of polypropylene cable insulation is also put forward.

**Keywords:** high voltage cable, polypropylene, electric field regulation, green environmental protection

**PACS:** 84.70.+p, 77.84.Jd, 72.20.-i

**DOI:** [10.7498/aps.72.20222320](https://doi.org/10.7498/aps.72.20222320)

---

\* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. FRF-TP-20-02B2).

† Corresponding author. E-mail: [zhajw@ustb.edu.cn](mailto:zhajw@ustb.edu.cn)

## 高压直流电缆聚丙烯绝缘电场调控

俞葆青 夏兵 杨晓砚 万宝全 查俊伟

### Electric field regulation of polypropylene insulation for high voltage DC cables

Yu Bao-Qing Xia Bing Yang Xiao-Yan Wan Bao-Quan Zha Jun-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 068402 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222320

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222320>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 电场对协流式微流控装置中乳液液滴生成行为的调控机理

Mechanism for regulation and control of emulsion droplet generation in co-flow microfluidic device via electric field

物理学报. 2018, 67(17): 176801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180616>

#### 绿色环保化学机械抛光液的研究进展

Research progress of green chemical mechanical polishing slurry

物理学报. 2021, 70(6): 068101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201917>

#### 高压纳秒脉冲电场的细胞器生物电效应综述

A review on bioelectrical effects of cellular organelles by high voltage nanosecond pulsed electric fields

物理学报. 2022, 71(6): 068701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211850>

#### 铌酸钾钠基无铅压电陶瓷的高压电活性研究进展

Research progress of high piezoelectric activity of potassium sodium niobate based lead-free ceramics

物理学报. 2020, 69(12): 127707 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200288>

#### 电场条件下氧化锌结晶特性及极化产物的拉曼光谱分析

Crystallization characteristics of zinc oxide under electric field and Raman spectrum analysis of polarized products

物理学报. 2019, 68(7): 070701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181961>

#### 基于密度泛函理论的外电场下盐交联聚乙烯分子的结构及其特性

Molecular structure and properties of salt cross-linked polyethylene under external electric field based on density functional theory

物理学报. 2018, 67(18): 183101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180808>