第 52 卷 第 6 期：2508-2525 高电压技术 Vol.52, No.6: 2508-2525
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250354

超高压挤包直流电缆绝缘系统关键技术探讨

钟力生，睢　锐，高景晖，李　飞，马竹欣，张冬平
（电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049）

摘　要：随着新能源电力规模化利用和长距离输送的需求迅速增长，高压直流((high voltage direct current，HVDC)电缆向更高电压等级、更大传输容量的超高压直流(extra high voltage direct current，EHVDC)电缆方向发展，给电缆绝缘系统的电、热、力学等性能提出了更高的要求。EHVDC 电缆系统的开发面临着绝缘工作场强更高、厚绝缘交联副产物脱出更难、电缆热失稳风险更大等方面的挑战。该文从电缆绝缘材料、电缆系统、电缆试验方法等方面系统梳理了需要解决的关键技术难题及其产生原因。首先，分析了交联聚乙烯材料中残留副产物对其绝缘性能的影响，以及电缆绝缘中副产物的径向不均匀分布所导致的电场畸变现象，提出了大厚度交联聚乙烯电缆绝缘副产物的控制方法；而低交联、非交联绝缘材料可以减少副产物生成量、提高电气性能，但其抗热变形能力弱，因此要通过高温机械性能试验的考核来保证其电气性能与机械性能的平衡。然后，在电缆绝缘系统层面，分析了电缆绝缘挤出工艺中焦烧现象的危害以及研究现状，强调电缆绝缘长时挤出抗焦烧性能的重要性；针对电缆接头，阐明了绝缘界面处电气性能的下降原因，指出应关注多层绝缘匹配及界面电荷效应。最后，在试验方法方面，论述了 EHVDC 电缆中热稳定性下降、预鉴定试验周期过长、新型过电压冲击等问题，说明了引入热稳定性试验、扩展鉴定试验、特殊暂态过电压试验的必要性。该研究为后续开发高耐电强度、高温度稳定性、高机械承载力的超高压直流电缆提供了借鉴。

关键词：超高压直流电缆；交联副产物；绝缘界面；热稳定性；交联聚乙烯

Key Technology of Insulation System of Extruded Extra High Voltage DC Cable

ZHONG Lisheng, SUI Rui, GAO Jinghui, LI Fei, MA Zhuxin, ZHANG Dongping
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract：With the rapid growth in the demand for large-scale utilization and long-distance transmission of new energy power, high-voltage direct-current (HVDC) cables are developing towards extra-high-voltage direct-current (EHVDC) cables with higher voltage levels and larger transmission capacities. This trend imposes higher requirements on the electrical, thermal, and mechanical properties of cable insulation systems. The development of EHVDC cable system is facing challenges such as higher insulation field strength, more difficult removal of crosslinking byproducts, and higher risk of thermal instability. This article systematically sorts out the key technical challenges that need to be solved and their causes from aspects such as insulation materials, cable insulation systems, and cable test methods. Firstly, the influences of residual byproducts in crosslinked polyethylene (XLPE) on its insulation property and the electric field distortion caused by the radial uneven distribution of byproducts in cable insulation are analyzed, and the control method of byproducts in thick XLPE cable insulation is proposed. Low-crosslinking and non-crosslinked insulation materials can reduce byproduct generation and improve electrical properties, but their thermal deformation resistance is weak. Therefore, the balance between electrical and mechanical properties should be ensured through the examination of high temperature mechanical property tests. Then, at the level of cable insulation system, the hazards and research status of scorch during extrusion are analyzed, emphasizing the importance of the anti-scorch property in the long-term extrusion of cable insulation. For cable joints, the reasons for the decline of electrical property at the insulation interface are clarified, and it is pointed out that attention should be paid to the matching of multi-layer insulation and the interface charge effect. Finally, in terms of the test methods, the problems of thermal stability decline, long prequalification test cycle and new overvoltage impulse in EHVDC cable are discussed. The necessity of introducing thermal stability tests, extended qualification tests, and special temporary overvoltage tests is explained. This research can provide valuable insights for the future development of EHVDC cables with high electrical strength, temperature stability, and mechanical load-bearing capacity.

Key words：EHVDC cable; crosslinking byproducts; insulation interface; thermal stability; crosslinked polyethylene

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(500-202299487A-2-0-KJ)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (500-202299487A-2-0-KJ).

0　引言

高压直流电缆是新能源大规模利用和区域联网不可或缺的输电设备，已在直流输电工程中得到了广泛的应用。从 20 世纪 90 年代开始，随着新型交联聚乙烯(cross linked polyethylene，XLPE)电缆绝缘材料的开发和柔性直流输电技术的出现，挤包绝缘高压直流电缆开始投入工程应用。1999 年 ABB 公司采用 XLPE 直流电缆料制造并投运了世界首条±80 kV 挤包绝缘直流电缆线路[1]。近二十多年来，挤包绝缘高压直流电缆的发展已成为国际直流输电领域的研究热点，先后实现了二十余条高压直流电缆工程应用，线路总长度超过 5 000 km。目前，挤包绝缘 HVDC 电缆工程应用和试验验证的最高电压等级分别达到了 535 kV 和 640 kV。近年来，我国的挤包绝缘直流电缆技术发展迅速，已建成投运南澳(±160 kV)、舟山(±200 kV)、厦门(±320 kV)和如东(±400 kV)等直流电缆输电工程，±535 kV 直流电缆也在张北柔性直流输电工程开展示范应用[2-5]。随着深远海风电场的规模化开发，长距离、大容量的超高压直流输电电缆技术备受关注。国际大电网组织(CIGRE)于 2021 年发布的技术手册 TB 852“800 kV 及以下输电用直流挤出电缆系统试验推荐规范”，定义了超高压直流电缆的电压或场强范围，即电压等级高于 400 kV 或设计工作场强大于 20 kV/mm，这为超高压直流电缆系统的开发应用奠定了基础。

随着超高压直流电缆电压等级、传输容量和传输距离的不断提升，给电缆绝缘系统电、热、力学性能的提升带来了一系列科学问题。在电气性能方面，由于电气强度的厚度效应，绝缘层不能简单通过等比例放大来满足承受更高电压的需要，要求电缆绝缘材料能承受更高的工作场强，如±320 kV 直流电缆绝缘厚度为 26 mm，满载时最大场强为 13.8 kV/mm[6]，当电压等级升高至±535 kV，绝缘厚度增加至 30 mm，满载时最大场强接近 20 kV/mm[7]。此外，在电缆制造过程中会在大厚度绝缘内呈现径向不均匀性，具体表现为挤出硫化过程绝缘内外温差造成的径向结晶和交联结构不均匀以及副产物径向分布不均匀，继而影响电气性能的一致性，增大电缆绝缘中的场强畸变。在对 500 kV 直流电缆的研究中发现，其绝缘层内外交联度、结晶度、副产物含量均存在差异，以致绝缘内外层电导率的差异可高达两个数量级，绝缘最高场强远大于均匀绝缘中的最高场强[8-10]。在热学性能方面，传输容量的增大、绝缘损耗的增加、厚绝缘散热能力的减弱会带来更多的热应力，导致电缆绝缘系统热稳定性的下降，增加电缆热失稳的风险。北欧化工计划将±500 kV 直流海缆导体温度提升至 90 ℃，这将导致绝缘系统承受温度升高[11-12]，考虑残留副产物带来的绝缘损耗增加，也会使电缆热稳定性降低[13]。在力学性能方面，传输容量的提升需要采用大截面导体[6-7]，导体重量的增大易使电缆在敷设和运行过程中承受更大的力学载荷而导致电缆绝缘发生形变，影响电场分布。因此超高压直流电缆对电缆绝缘系统的电、热、机械性能提出了更高要求，急需全面认识在其开发中面临的技术难题和应对措施。

本文针对上述问题在技术层面产生的关键技术难题，从电缆绝缘材料、电缆系统和电缆试验方法 3 个层面展开分析研究，通过理论、仿真和实验等手段，结合 CIGRE TB 852 试验规范，凝练出发展更高电压等级、更大传输容量的 EHVDC 电缆系统面临的关键技术难题，并指出其产生的原因及后续的发展方向，为相关的研究和技术开发提供理论支撑和实验依据。

1　大厚度交联聚乙烯电缆绝缘交联副产物的控制

交联聚乙烯绝缘是目前挤包直流电缆普遍采用的绝缘形式[2]，其拥有优越的电气性能、机械性能和热学性能。该类材料由低密度聚乙烯(low-density polyethylene，LDPE)和抗氧剂、交联剂经高温交联反应得到，反应过程如图 1 所示。从交联反应过程可见，交联反应后会不可避免地产生多种副产物，根据反应路径和条件将分别产生枯基醇、α-甲基苯乙烯和水，或苯乙酮和甲烷。反应路径往往取决于交联反应温度，在实际电缆制造过程中交联反应在较宽温度范围内进行，故上述几种副产物均会产生，并残留在成型后的 XLPE 电缆绝缘中。

1.1　电缆绝缘中交联副产物含量表征方法

为了研究交联副产物对电缆绝缘电气性能的影响，首先要对电缆绝缘中交联副产物残留量进行检测表征。S.S.Bamji 等人对电缆预处理过程中交联副产物发出的热释光进行原位检测和分析，发现热释光强度可以指示副产物浓度[14]；M.S.Kempe 等人

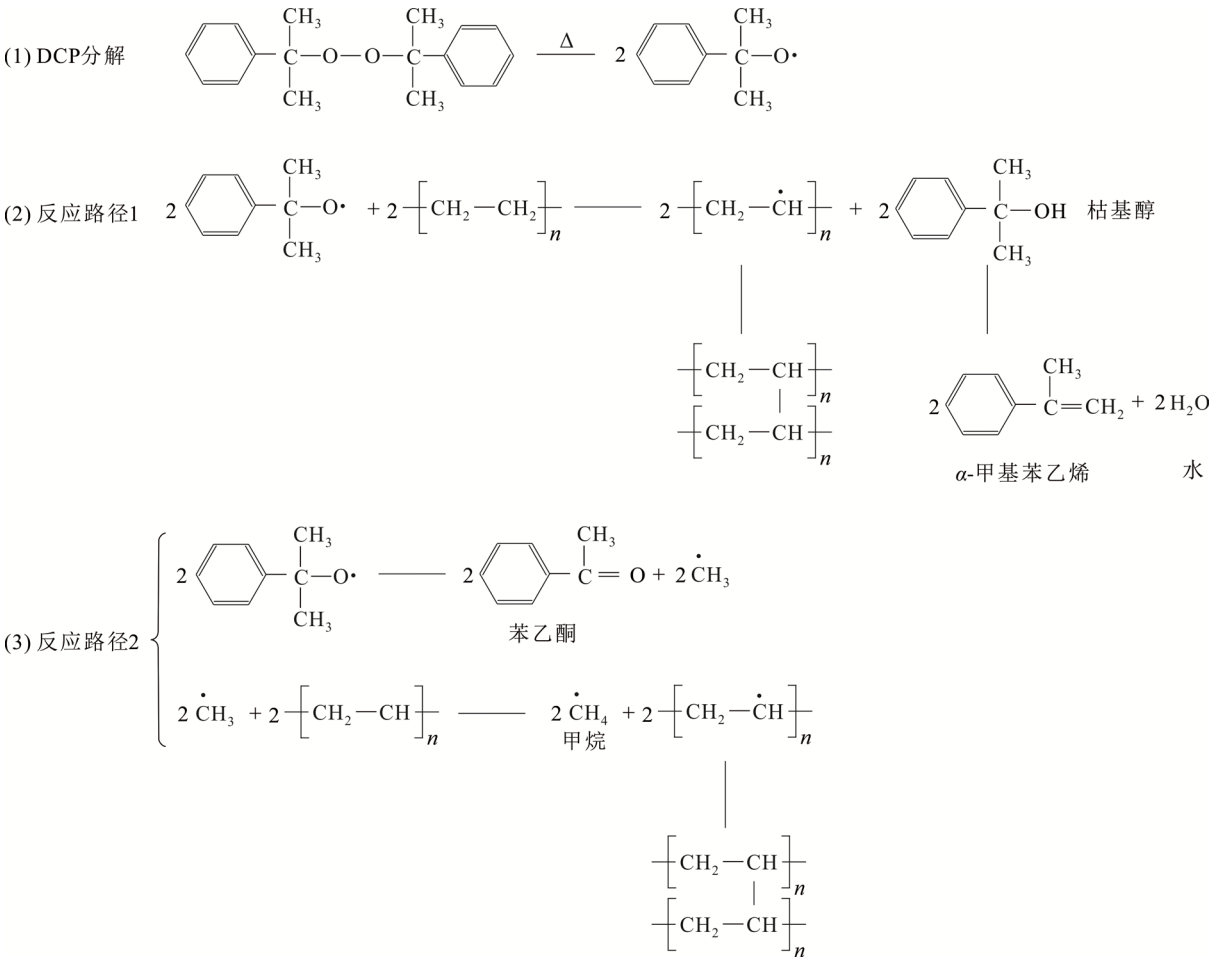


图 1 DCP 交联聚乙烯反应过程[18]

Fig.1 Crosslinking reaction of polyethylene initiated by DCP[18]

采用大光斑拉曼光谱量化苯乙酮、枯基醇含量，实现了电缆脱气过程中副产物的监测[15]；W.Li 等人报道了交联副产物在电缆绝缘材料中引起的极低频介电松弛现象，基于此可以监测副产物含量[16]。但目前最成熟、最普遍使用的表征方法仍是热重分析法、色谱分析法以及红外光谱分析法[17]。

CIGRE TB 852 推荐了热重分析法(TGA)以及色谱分析法。二者测试均要求在电缆绝缘的内、中、外层分别取样，如图 2 所示，这主要是考虑到电缆绝缘中交联副产物径向不均匀分布的特征。此外，CIGRE TB 852 中并未给出对副产物残留量的要求，只要求抽样试验与型式试验结果的差异不得超过 25%，副产物的绝对含量是否通过检测需要根据制造商的经验来确定。在 TGA 测试中仅能得到副产物残留总量，而当需要获得不同副产物含量及其分布特征时，可以采用色谱分析法。对于甲烷可采用气相色谱进行检测，而枯基醇、苯乙酮、α-甲基苯乙烯则采用液相色谱检测。

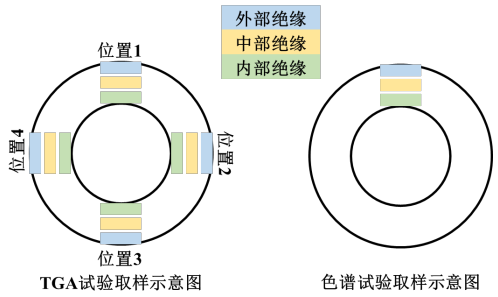


图 2 测试取样图

Fig.2 Sampling map for measurements

傅里叶红外光谱分析法可快速得到不同副产物含量及其分布特征[17]，目前多使用该方法对副产物进行半定量分析，即计算副产物的相对含量(特征峰吸光度与参照峰吸光度的比值)。对于交联聚乙烯，多选择 2 020 cm^{-1} 处[19]亚甲基的吸收峰为参照峰。而为了研究副产物含量及其影响，需要得到副产物的绝对含量。根据 Beer-Lambert 定律可推论出：在参照峰官能团含量一定的情况下，副产物的绝对

含量与相对含量成正比关系。本文中确定了副产物绝对、相对含量的比例系数：通过浸渍制备不同副产物含量的 XLPE 试样，使用精密天平、红外光谱分别测量副产物绝对、相对含量，如图 3 所示，计算得到比例系数。接着根据比例系数及红外光谱实测的相对含量，可计算出绝对含量。通过红外光谱以及本文中确定的比例系数可以快速、准确地获得不同副产物的绝对含量，为后续研究副产物含量对材料绝缘性能的影响奠定了基础。

1.2　交联副产物对电缆绝缘电场分布特性的影响

残留在电缆绝缘中的交联副产物会增大 XLPE 电导率，加剧空间电荷积聚，降低绝缘性能。白健等人分析了副产物含量与 XLPE 电气性能的相关关系，发现苯乙酮、枯基醇含量与材料电导率、平均电荷密度高度相关[20]。这主要由于副产物会在电场作用下解离成正负离子对，增加载流子浓度，并且副产物的存在会增加材料中陷阱密度，积聚空间电荷[21]。同时 N.Hussin 等人[22]、H.Zhang 等人[23]、陈萌[24]的研究均发现苯乙酮的解离对 XLPE 空间电荷的影响程度最大。实际电缆中，多种副产物同时存在，不同副产物之间会互相影响，H.Zhang 等人研究了浸渍不同副产物 XLPE 的空间电荷特性，发现苯乙酮和 α-甲基苯乙烯共存时表现为拮抗效应，而苯乙酮和枯基醇共存、枯基醇和 α-甲基苯乙烯共存时则为协同效应，当 3 种副产物共存时，在 3、5 和 7 kV/mm 时表现协同效应，而在 10 kV/mm 时为拮抗效应，并且提出了指数拟合公式以表征副产物之间的相互作用[23]。在击穿性能方面，刘金基于第一性原理计算了不同 XLPE 的能带结构，发现理论上 3 种副产物均会使 XLPE 击穿场强下降，其中苯乙酮影响最大，α-甲基苯乙烯次之[25]。W.Li 等人实测了不同脱气时间的电缆绝缘切片，发现随着副产物含量的增加，绝缘电导率增加、空间电荷积累加剧，导致电缆击穿场强降低[26]。上述研究多为半定量分析，研究对象多为片状试样，而实际电缆绝缘中多种副产物同时存在，并且绝缘交联和结晶结构径向不均匀、副产物分布径向不均匀，使得副产物对电缆绝缘性能的影响变得更为复杂。

本文以 500 kV 直流电缆 XLPE 绝缘中的电场分布情况为例，说明实际电缆绝缘中残留交联副产物对绝缘电导率、电场分布的影响。首先通过红外光谱分析、三电极电导率测试系统分别获得不同脱气时间、不同径向位置 XLPE 的副产物绝对含量、直流电导率，得到直流电导率随副产物含量的变化规律。图 4 为不同脱气时间中层绝缘的红外光谱，其中枯基醇的特征峰(3 370 cm^{-1})和苯乙酮的特征峰(1 690 cm^{-1})的吸光度变化显著；而 α-甲基苯乙烯的特征峰(1 630 cm^{-1})吸光度较低且随脱气时间变化不明显，表明残余 α-甲基苯乙烯含量较少。α-甲基苯乙烯在 25 ℃下的饱和蒸汽压为 400 Pa，远高于枯基醇的 2.7 Pa 和苯乙酮的 20 Pa，挥发性较强，残余量较少，因此后续重点讨论枯基醇、苯乙酮的影响。

试样的直流电导率随副产物含量的变化规律，如图 5 所示。结果表明，在各温度和场强条件下 XLPE 试样的直流电导率均呈现随苯乙酮、枯基醇浓度的增加而上升的趋势；直流电导率同时受温度、场强和副产物含量等因素的影响。为了得到电导率随各因素变化的关系，首先采用式(1)表征电导率随电场、温度的变化[27]：

$$\sigma(E,T)=a\exp\left(\frac{-b}{T}\right)\frac{\sinh(c\,|E|)}{E} \tag{1}$$

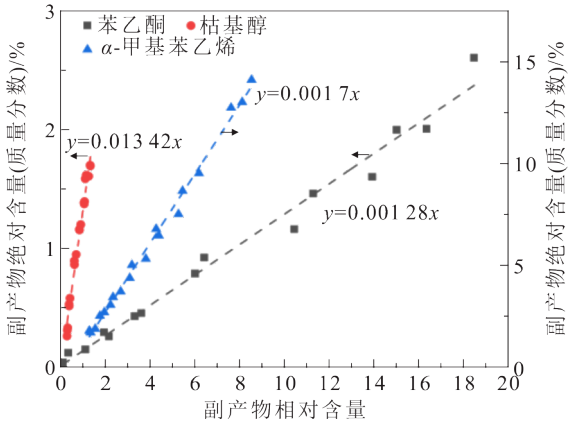


图 3　浸渍 XLPE 中副产物相对含量与绝对含量的关系

Fig.3　Relative content and absolute content of byproducts in immersed XLPE samples

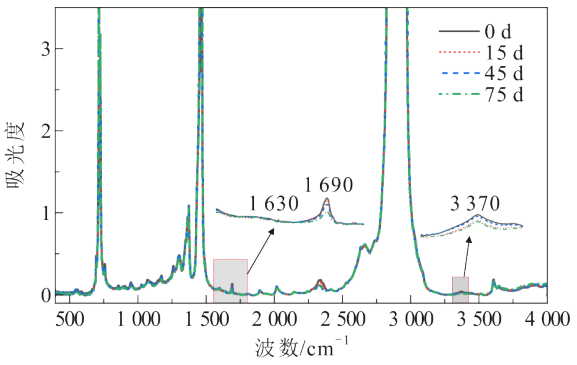


图 4　不同脱气时间电缆绝缘中层红外光谱图

Fig.4　Infrared spectrum of insulation middle layer of cable with different degassing time

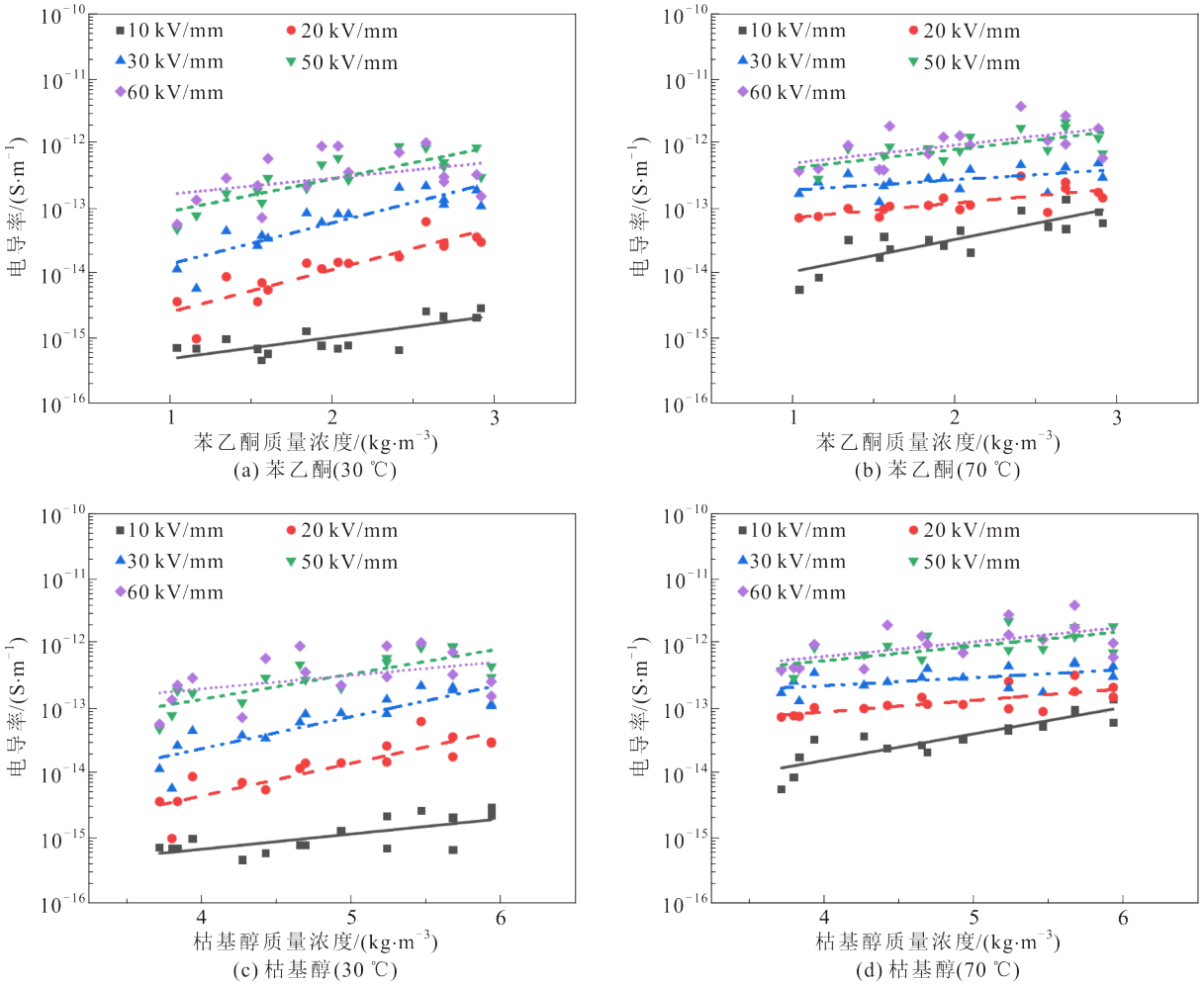


图 5 交联副产物对 XLPE 直流电导率的影响

Fig.5 Effect of crosslinking byproducts on DC conductivity of XLPE

式中：σ 为直流电导率；T 为温度；E 为电场强度；a 为与材料相关常数；b 为温度系数；c 为场强系数。而后考虑副产物对电导率的贡献，得到式(2)：

$$\sigma(E,T,M,N)=a\exp(\frac{-b}{T})\frac{\sinh(c\,|E|)}{E}f(M,N) \quad (2)$$

式中：M、N 分别为苯乙酮、枯基醇质量浓度。由于图 5 中单对数坐标下直流电导率随副产物质量浓度变化关系可用直线拟合，则式(2)中 $f(M,N)$可采用指数形式拟合，并且 XLPE 绝缘直流电导率随副产物浓度呈指数增大。

进一步地，为阐明副产物对电缆绝缘电场分布的影响，首先获得了 500 kV 直流电缆脱气前后绝缘不同径向位置副产物分布特征，如图 6 所示。从中可见，脱气前后，交联副产物在绝缘层中均呈现径向不均匀分布，这主要是由于在电缆挤出、交联工艺过程中绝缘层内外温度的差异，以及脱气工艺过程中副产物脱除难度的差异形成的不均匀分布特征。这种不均匀性会导致绝缘中材料电导率亦呈径向不均匀分布，进而影响电场分布。然后结合电导率受副产物含量影响的经验公式，仿真计算了脱气后电缆绝缘中的电场分布，如图 7 所示。与之对比的是绝缘中副产物均匀分布时的电场。结果发现，空载时，副产物均匀分布的绝缘中电场为 Laplace 电场，即内部绝缘场强高于外部绝缘场强，而副产物不均匀分布的绝缘中电场已经出现了“电场反转”现象；满载时(导体温度 70 ℃)，二者均出现“电场反转”，但副产物不均匀分布绝缘的电场畸变程度更显著，最大场强更高；两种情况下副产物不均匀分布的绝缘中最大电场均高于均匀分布的绝缘电场，这会加速绝缘老化，增大电缆失效风险。

对于 EHVDC 电缆，绝缘厚度的增加将导致交联副产物更难以脱出，并且受制于时间、经济成本，脱气时间不可能无限制延长，因此后续的研究中更需要关注 EHVDC 电缆绝缘中交联副产物的影响及

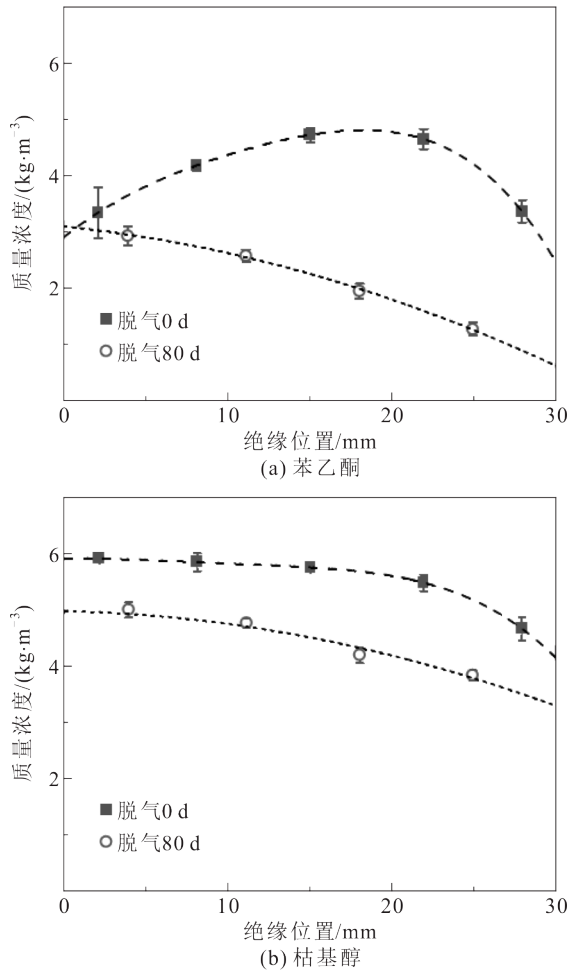


图 6　脱气前后电缆绝缘中交联副产物分布

Fig.6　Distribution of crosslinking byproducts in cable insulation before and after degassing

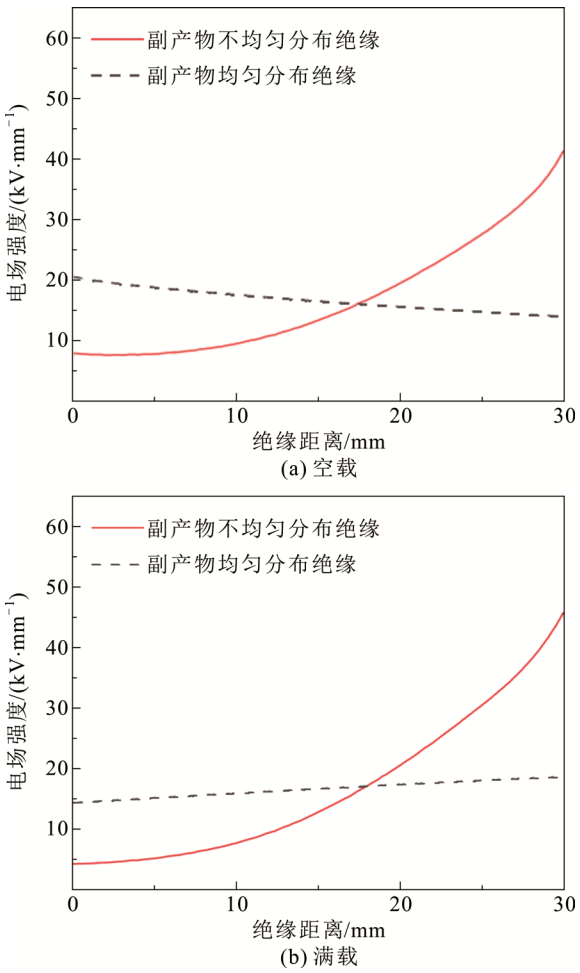


图 7　脱气后电缆绝缘中的电场分布(U_0)

Fig.7　Electric field distribution in cable insulation after degassing(U_0)

其控制方法。

除电缆本体之外，副产物的残留也会对电缆附件的性能造成影响。比如，甲烷气体的可燃性可能在安装过程中产生安全问题，并且在电缆服役后，残留的气体受金属护套的约束会沿着电缆到达附件(接头或者终端)，在绝缘界面处产生机械应力，影响界面的结合，甚至于产生局部放电[18]。在电气性能方面，附件与电缆本体绝缘界面需要电气参数匹配以尽可能降低空间电荷积聚，而副产物的残留会影响绝缘材料电气性能，增大了控制材料电气性能以及绝缘界面匹配的难度。

1.3　降低电缆绝缘中交联副产物含量的措施

上述讨论已经充分说明了大厚度 XLPE 电缆绝缘中交联副产物的控制对 EHVDC 电缆的性能起着至关重要的作用。为了有效降低残余副产物含量，首先需要关注电缆的脱气过程，研究交联副产物在绝缘中的扩散机制。使用分子动力学可以模拟小分子在聚乙烯中的渗透迁移，但计算结果局限于部分约束区域[28]；对于全尺寸电缆，通过菲克定律可以计算甲烷的扩散过程[29-30]，通过相场理论可以建立苯乙酮、枯基醇在电缆绝缘中的扩散模型[19]，均与测试结果有良好的一致性。

在明确交联副产物扩散机制后，需要优化脱气工艺、改进脱气设备以提高电缆线芯脱气效率。目前脱气温度多控制在 60~70 ℃，短段电缆脱气一般控制在 7~14 d，220 kV 及以上大长度海缆脱气周期为 1~2 个月，500 kV 直流电缆脱气时间长达数十天，这限制了电缆的生产效率和设备产能[31-32]。脱气设备方面，传统的去气室采用电加热方式，将加热后的空气吹入去气室，但容易造成热气流分布不均匀，形成热不足区、热聚集区，影响电缆脱气效果[33]，对于 500 kV 及以上绝缘厚度更大的电缆，传统去气室已经无法满足要求。针对此，有企业开发出“热对流”型烘房地转盘除气系统，通过专用传风孔道、

多风箱加热设备，形成对流渗透；此外分层垫高处理有利于热空气环流，最终实现了脱气效率的提升[34]。有学者使用热泵加热方式，结合废热回收、气流流道优化等手段，设计出了节能、环保、热量分布更均匀的去气室[33]。

另一方面，优化绝缘料配方，减少交联副产物生成量也是控制副产物残留量的重要手段。基料的选择与交联助剂的使用能够有效提升交联效率，实现高交联度、低副产物的绝缘材料[35-37]；也可在聚乙烯主链上引入发生无副产物化学反应的官能团，实现高交联、无副产物的 XLPE[38-39]；采用低交联聚乙烯、非交联热塑性材料能够降低(或不用)交联剂用量，有效减少因交联引入的材料化学杂质缺陷[27,40-42]。

上述控制方法能一定程度上缓解副产物残留的影响，但在副产物控制方面，仍存在诸多问题有待探索，如残留副产物的快速无损检测方法，不同副产物之间耦合作用对 XLPE 电气性能的影响，副产物扩散模型的泛化，电缆脱气终点的判定，剩余气体含量的测量，低副产物绝缘料配方开发等。

2 电缆绝缘材料的电气与机械性能的平衡

低交联、非交联热塑性绝缘料的使用是控制电缆中副产物含量的重要手段，但是该类材料内部交联网络密度较低或不存在交联网络。对于大截面导体电缆，在导体质量和高温的共同作用下容易产生绝缘形变以致电缆偏心等情况[41,43]。因此，该类电缆绝缘材料的应用面临着电气与机械性能的平衡问题，其高温机械性能必须通过相关试验考核。

2.1 低交联 XLPE 材料热延伸特性

低交联 XLPE 材料(low crosslinked polyethylene，LXLPE)指交联度低于传统 XLPE 的材料，目前商用的 LXLPE 交联度约为 60%~80%之间。由于 LXLPE 交联度下降，表征材料高温机械性能的热延伸伸长率快速增大，无法满足传统 XLPE 材料的热延伸试验要求。在 CIGRE TB 852 中增加了针对 LXLPE 的热延伸性能要求：200 ℃、5 N/cm^2 负载条件下延伸 15 min，最大延伸率<175%，永久变形率<15%。该要求将传统 XLPE 的 20 N/cm^2 应力降低至 5 N/cm^2，应变仍要求小于 175%，降低了对绝缘材料高温模量的要求，从大于 1.14×10^5 Pa 转变为大于 0.28×10^5 Pa。

为了研究弹性模量要求的下降对高温下电缆绝缘结构稳定性的影响，本文在设定 XLPE、LXLPE 模量为 200 ℃下恰好通过热延伸实验要求最低模量的情况下(分别为 1.14×10^5 Pa、0.28×10^5 Pa)，计算了 500 kV 直流电缆(导体截面为 3 000 mm^2，绝缘厚度为 30 mm)的偏心度的变化。在力场仿真中获得了导体、导体屏蔽、绝缘、绝缘屏蔽由于电缆线芯自重产生的位移，如图 8 所示。结果表明，XLPE 电缆中导体最大位移为 0.31 mm，LXLPE 电缆为 1.22 mm，对应偏心度分别为 0.020、0.078，满足 GB/T 31489、IEC 62067 中对于电缆偏心度的要求。实际电缆中由于绝缘层温度梯度的存在以及温度对模量的影响，材料模量高于设定值，偏心度小于该仿真计算结果，绝缘可以保持电缆结构的稳定性。因此认为通过热延伸试验的 LXLPE 高温机械性能可以满足电缆绝缘的要求。

进一步以商业化应用的直流 LXLPE 材料为例，说明其作为电缆绝缘材料的适用性。主要性能与传统 XLPE 相比如图 9 所示。在电气性能方面(见图

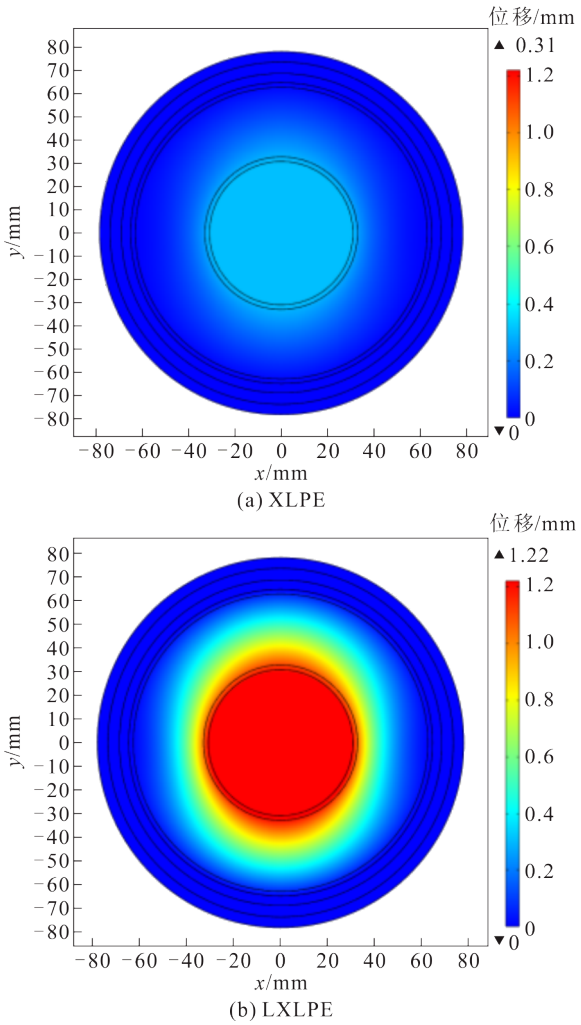


图 8 不同类型电缆形变情况

Fig.8 Deformation of different types of cables

9(a))，二者的体积电阻率、击穿场强满足 GB/T 31489 中对 500 kV 直流电缆绝缘材料的要求；在残留副产物方面(见图 9(b))，对于 0.2 mm 片状试样，脱气前 LXLPE 中残留量更少，经 70 ℃、24 h 脱气后二者副产物含量下降明显；在高温机械性能方面(见图 9(c))，LXLPE 交联度较低(60.65%)，无法通过 20 N/cm^2 负载热延伸测试，但能够通过 5 N/cm^2 负载的热延伸试验测试；在加工性能方面(见图 9(d))，不同转速下 LXLPE 焦烧时间均大于 XLPE，这主要归因于 LXLPE 中更低的交联剂含量。

未来如何提升 LXLPE 体系的高温机械性能，需要从高分子物理学角度进行分析。由交联橡胶状态方程可推导出：

$$\frac{1}{M_c}-\frac{2}{M_n}=\frac{\sigma}{\rho RT\left(\lambda-\frac{1}{\lambda^2}\right)} \tag{3}$$

式中：M_c为交联密度，即两个交联点之间的数均分子量；M_n为基料的数均分子量；σ为应力；λ为拉伸比；ρ为密度；R为气体常数，取值为 8.314 J/(mol·K)。若需要改善材料的高温机械性能，即相同应力作用下拉伸比下降，式(3)右侧增大，则需要 M_c下降或 M_n增大。M_c的下降意味着更加稠密的交联网络的形成，一方面可以使用助交联剂提高交联效率，在相同交联剂用量下形成更多的化学交联点；另一方面可以设计高分子链结构，形成分子链之间缠结更多的基料，提升物理缠结点的数目。而 M_n增大后，分子内部聚合度较低的短分子链减少，分子链端对材料整体弹性没有贡献的悬链减少，有利于材料高温机械性能的提升。

2.2　热塑性绝缘材料抗热变形特性

热塑性绝缘材料由于无需交联、脱气等工艺环节，并且电缆退役后绝缘材料易于回收利用，展现出广阔的应用前景[2,44]。目前用于电缆绝缘的热塑性材料主要包括：线性低密度聚乙烯(linear low density polyethylene，LLDPE)、高密度聚乙烯(high density polyethylene，HDPE)、聚丙烯(polypropylene，PP)等[40]。但是与 LXLPE 类似，热塑性材料抗热变形能力弱，在电缆长期运行过程中可能发生电缆绝缘形变从而引发电场畸变，甚至绝缘的击穿破坏[41,43]。此外，部分热塑性材料如 PE，要求电缆短路故障时导体最高温度为 130 ℃，低于 XLPE 绝缘要求的 250 ℃，当电缆绝缘使用该类热塑性材料时，需要电缆线路的保护系统动作更快，对运维提出了更高

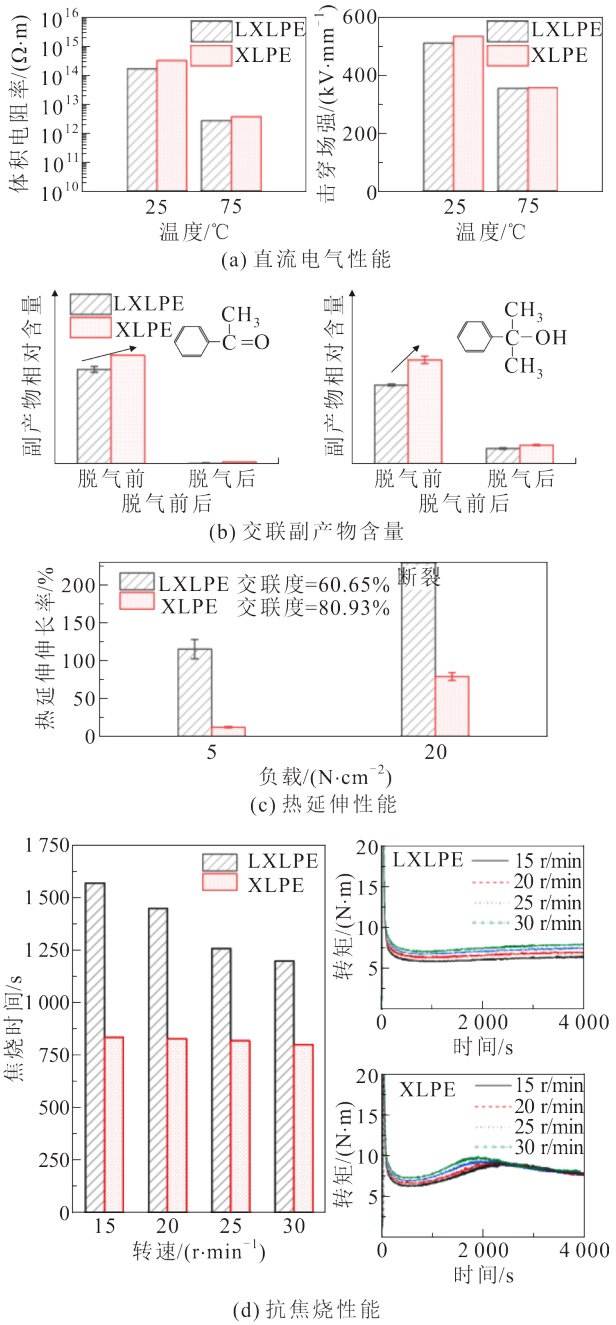


图 9　直流电缆绝缘料性能对比

Fig.9　Comparison of DC cable insulation materials properties

要求。因此必须考察热塑性材料的高温机械性能以确保满足系统运行需求。

在国内外各类标准中，如 UL 2556、IEC 60811、TB 852，多采用热压试验表征热塑性材料的抗热变形能力。常见的包括：圆柱体下的变形试验、方形刀片下的压痕测试。前者使用直径 6.4 mm 的黄铜杆，在 130 ℃下热压 1 mm 厚的试样 1 h，而后计算材料变形率；后者使用特制的方形压痕装置，在 130 ℃下热压 6 mm 厚的试样 6 h，而后计算压痕占比(压入深度占总体厚度的比例)。CIGRE TB 852 中

要求材料变形率或压痕占比小于 50%。

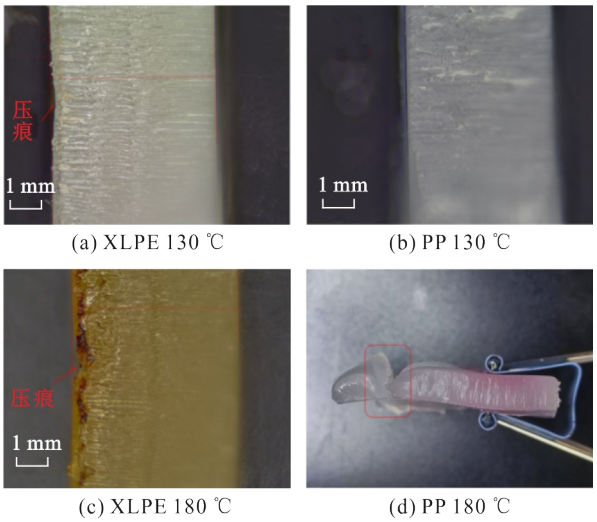
本文选择 XLPE、PP 两种电缆绝缘材料进行热压试验，对比其抗热变形能力。130 ℃时，XLPE、PP 在圆柱装置热压下的变形率分别为 3.10%、1.02%；在方形刀片装置热压下的试验结果如图 10(a)、(b)所示，其中 XLPE 压痕占比为 2.82%，PP 没有观察到明显变形。表明相较于 XLPE，PP 在 130 ℃下呈现出更优异的抗热变形能力，这主要归因于 PP 更高的熔点。随后在 180 ℃下进行热压试验，XLPE、PP 在圆柱装置下的变形率分别为 7.99%、89.25%；在方形刀片装置下，XLPE 压痕占比为 4.59%，而 PP 在热压过程中熔融，冷却后试样变形严重，如图 10(c)、(d)所示。温度升高后，XLPE 试样出现变形率或压痕占比的增大，而 PP 试样在温度高于熔点之后变形严重，无法保持原有形态。

热延伸试验也能用于表征热塑性绝缘材料的热机械性能。本文对比了 XLPE、LLDPE/HDPE 共混物在不同温度下，耐热 60 min 的热延伸伸长率[41,45]，结果如表 1 所示。结果可见，随着温度的升高，XLPE、LLDPE/HDPE 热延伸伸长率均有所升高，当温度达到 140 ℃时，LLDPE/HDPE 断裂，而 XLPE 并未出现断裂。这主要是由于温度逐渐升高至 140 ℃时，两类试样内部结晶均已完全融化，LLDPE/HDPE 材料中没有化学交联键的存在，分子链之间不存在“有效的连接”，在应力作用下发生断裂；而 XLPE 中存在交联网络，分子链之间的化学交联键使得材料仍能够保持形状，呈现仅伸长而不断裂的状态。类似地，H.Sui 等人研究了在 90~160 ℃范围内不同类型的聚丙烯材料在 20 N/cm^2、60 min 下的热延伸特性，通过对比变形量衡量材料的高温机械性能[41]。

上述讨论给出了目前针对 LXLPE、热塑性材料高温机械性能的要求。当该类材料应用于 EHVDC 电缆时，虽然减少了交联副产物生成量或者无副产物生成、保障了绝缘电气性能，但是高温下材料机械性能有所下降，尤其针对 EHVDC 电缆，面临绝缘层更厚、导体自重更大等挑战，LXLPE、热塑性材料将朝着兼顾电气性能与机械性能的方向发展。

3 电缆绝缘长时挤出抗焦烧性能

远距离跨海输电是海上新能源发展的趋势，海底电缆作为海上新能源至陆地使用的通道，是直流输电系统的关键装备。为了提升海缆系统的可靠性、减少海底电缆接头、提高单根海缆长度，关注电缆的加工挤出性能很有必要。



(a) XLPE 130 ℃ (b) PP 130 ℃

(c) XLPE 180 ℃ (d) PP 180 ℃

图 10 不同材料在方形刀片装置下的压痕

Fig.10 Indentation of different materials under the square blade device

表 1 不同材料的热延伸伸长率(负载：20 N/cm^2)[45]

Table 1 Hotset elongation rate of different materials (load:20 N/cm^2) [45]

温度/℃	热延伸伸长率/%	
	XLPE	LLDPE/HDPE
100	0	0
110	30	0
120	73.5	0.5
130	68.5	2.8
140	78.5	断裂

绝缘料的抗焦烧性能，是影响电缆长时间挤出的关键技术之一[46]。在 3 层共挤工艺中，长时间的挤出使得绝缘料不可避免地会出现局部挤压温度过高或时间过长，从而导致交联剂提前分解，发生预交联，工程上将这种现象称为焦烧。焦烧产物多为凝胶，一方面凝胶会堵塞挤出机滤网，使得绝缘料挤出压力增大，影响挤出工艺的稳定性；另一方面，部分焦烧产物经滤网进入流道，残留在电缆主绝缘中，造成绝缘层缺陷。

为了避免 XLPE 的焦烧现象，必须关注交联反应本身。通常认为 LDPE 和 DCP 的交联反应为 n 级反应[47]，即反应速率与反应物浓度相关，级数越大，相同浓度下反应速率越大，对应发生焦烧的时间就越短。因此可降低 DCP 含量以延缓焦烧时间，如部分进口绝缘料在较低的 DCP 含量下获得了更

优异的挤出性能[27]。此外，绝缘料中还存在抗氧剂，其在电缆料挤出过程中吸收部分交联剂分解形成的自由基，延缓焦烧时间[46,48]，但也会导致交联度的下降。J.Li 等人的研究发现 LDPE 的交联反应在级数反应之外，还存在自催化反应[49]，即反应产物对反应起催化作用。通过复配抗氧剂可以实现交联过程中级数和自催化反应的逆向调控，在低温下降低级数反应的级数，高温下增大自催化反应级数，实现了在保证交联度的前提下提高材料耐焦烧性能[47,50]。

聚乙烯分子链本身的黏度参数也会影响挤出过程。高压电缆绝缘料采用单螺杆挤出的方式加工，需要根据不同绝缘料特性调整挤出温度、转速、压力等参数。国内外学者通过本构方程建立了包括固体输送段、预熔化段、熔化段、熔体流动段的单螺杆挤出过程模型，并与实际挤出结果印证良好[51-53]。在该模型的基础上，通过绝缘料的黏度参数可以计算出特定挤出工艺中最高温度，评估焦烧发生概率，指导生产实践。另一方面，可以根据挤出工艺要求，得到合适的绝缘料黏度参数，甚至于设计材料分子链结构参数，定制化生产出有利于长时挤出的 LDPE 基料[53-54]。

EHVDC 电缆的挤出工艺难度上升，并且对绝缘洁净度、电气性能要求更高，在焦烧产物及其对电气性能的影响、抗氧剂与交联剂的复配、绝缘料分子结构与流变性能关联、基料分子结构设计与控制等方面仍有待深入探索。

4　电缆附件多层绝缘匹配及界面电荷效应

受制造工艺限制，XLPE 电缆的制造长度有限，电缆接头技术是电缆接续的关键，对于保证大长度电缆输电的安全稳定运行至关重要。但电缆接头往往是电缆系统中最为薄弱的环节之一，在不考虑外力破坏因素的电缆故障类型统计中，设备故障多发生在接头处[55]。因此，成熟可靠的电缆接头技术是 EHVDC 电缆发展必不可少的条件。

4.1　电缆接头中的多层绝缘界面

在电缆接头中存在电缆本体绝缘和接头绝缘形成的多层绝缘界面，如图 11 所示。根据 Maxwell-Wagner 理论，保持电气连续性的理想界面介电参数应满足[56]：

$$\frac{\varepsilon_{\text{cable}}}{\sigma_{\text{cable}}}=\frac{\varepsilon_{\text{joint}}}{\sigma_{\text{joint}}} \tag{4}$$

式中：$\varepsilon_{\text{cable}}$、$\varepsilon_{\text{joint}}$ 分别为电缆和接头绝缘的介电常数；σ_{cable}、σ_{joint} 分别为电缆和接头绝缘的直流电导率。当式(4)左右两侧不相等时，多层绝缘电气参数不匹配，介质界面将积聚空间电荷，且式(4)左右两侧差距越大，积聚的空间电荷就越多。这类界面空间电荷的存在将造成绝缘界面局部场强畸变，甚至在电缆运行较短时间内便引起绝缘界面放电导致电缆绝缘击穿[56]。

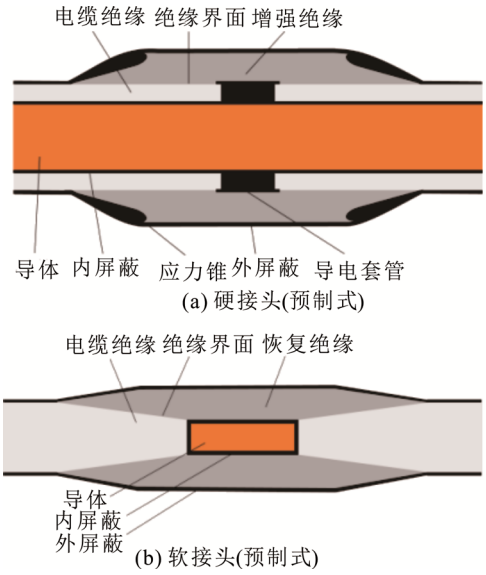


图 11　电缆接头结构示意图

Fig.11　Cable joint structure diagram

目前电力电缆的中间接头主要有硬接头(预制式)和软接头(模塑式)两种。通常，硬接头在敷设现场安装，接头主绝缘采用三元乙丙橡胶(EPR)或硅橡胶(SiR)；软接头在超净车间制造，主绝缘采用与电缆本体绝缘相同的 XLPE 材料[57]，其恢复绝缘工艺不同又分为挤塑式和绕包式。

根据 Maxwell-Wagner 理论，硬接头中 EPR/XLPE、SiR/XLPE 界面会不可避免地存在界面空间电荷；此外，被陷阱捕获的电荷、较高的界面势垒也会造成界面空间电荷密度的增大[58-59]。由于电导率、介电常数受温度、电场强度的影响，界面电荷积聚特性也会随温度、电场强度的变化而改变，甚至出现电荷极性反转[60]。目前多采用双极性电荷输运模型分析双层介质的空间电荷特性[58]，近年学者将空穴电导[61]、杂质分子的解离和输运[62]、分子链在库仑力作用下的位移[59]、二维数值模拟等引入该模型[63]，提升了计算的准确性，扩大了模型的适用范围。为了改善界面特性，多考虑调控材料电气参数，但目前常用的 XLPE 绝缘电导率基本稳定且

主绝缘调控成本较高，因此通常调控增强绝缘电气参数以减少界面电荷积聚，如通过掺杂氧化锌[64]、碳化硅[65-66]等填料形成具有非线性电导特性的增强绝缘，抑制界面电荷积聚。而软接头中的同质 XLPE/XLPE 界面理论上不存在界面匹配、空间电荷积聚的问题，但实际上由于制备工艺的差异，仍会在同质界面处积聚空间电荷[67]。

4.2 XLPE/XLPE 同质界面的电气性能

为了说明 XLPE/XLPE 同质界面对电气性能的影响，W.Zhao 等人以双层 XLPE 试样二次热压模拟同质界面，对比分析双层 XLPE 与单层 XLPE 绝缘性能[68]，结果如图 12 所示。在双层 XLPE 中能观察到电极处存在异极性电荷积聚，界面处存在明显的同极性电荷积聚；单层 XLPE 中仅在电极处存在异极性电荷积聚(见图 12(a))；对于击穿场强，常温下单层 XLPE 约为 440.9 kV/mm，双层 XLPE 约为 347.6 kV/mm(见图 12(b))。说明双层 XLPE 的电气强度明显低于单层 XLPE 试样。进一步分析认为这主要是由于双层 XLPE 中界面处结晶结构的不连续性(见图 12(c))，在界面处产生了深陷阱区，该区域会捕获电荷输运过程中的载流子，积累空间电荷，引发局部场强畸变，降低试样的击穿场强。研究还发现，XLPE/XLPE 界面处的粗糙度、脱气时间、附着力等均会影响界面的电气性能。张盟通过不同目数的砂纸打磨，制备了界面粗糙度介于 0.76~5.78 μm 之间的双层 XLPE 试样并研究试样电气性能的变化规律，发现当界面粗糙度为 1.41 μm 时，对应双层试样的电导率最大、平均电荷密度最小、击穿场强最低，仿真计算中接头处最大场强最小[56]。但孟繁博等人的研究发现粗糙度介于 141.67 nm~1.5 μm 时，表面越光滑越有利于界面处绝缘特性。可能原因是，粗糙度会影响恢复绝缘在界面处的接触面积、晶体生长形态，继而影响试样的电气性能[69]，目前尚无明确的实验验证。同时，在不同脱气时间的双层 XLPE 研究中发现，增大脱气时间不仅可以降低交联副产物浓度，而且可以促进界面处再结晶，改善分子链间的连接关系，继而降低绝缘中泄漏电流密度，提高击穿场强[69]。此外，

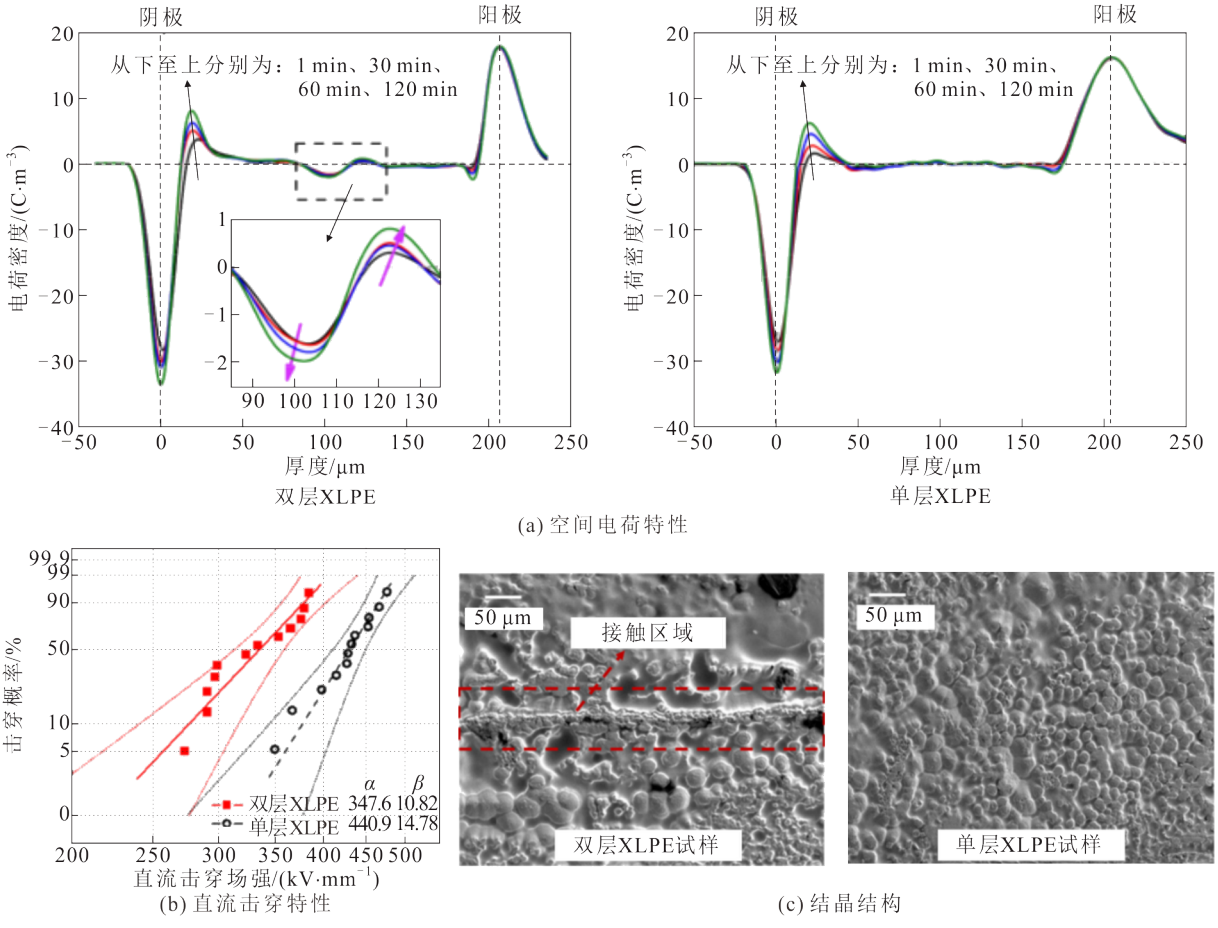


图 12 双层 XLPE 与 XLPE 性能对比[68]

Fig.12 Property comparison of double-layer XLPE and XLPE[68]

H.Fukagawa 等人在 250 kV 直流工厂接头的测试中发现，界面处附着力也与接头的击穿强度密切相关[70]。

另一方面，在实际挤塑恢复绝缘的软接头制作过程中，本体绝缘需要再次承受高温硫化过程，接头恢复绝缘仅经历一次，热历史的差异会造成两侧绝缘之间晶相结构的差异[71]。而电缆绝缘中接近接头部分的绝缘由于再加热、二次硫化过程，交联度高、结晶度低、击穿场强更低，进一步增大了界面处材料的不均匀性[72]。为了减少高温硫化的影响，一般建议采用低温、长时的硫化方式，尽可能保证接头绝缘与本体绝缘的一致性[73]。

目前软接头界面处易发生击穿仍是大长度海缆技术发展的瓶颈点。更高电压等级的 EHVDC 电缆中，界面绝缘工作场强更大，如何匹配多层绝缘、减少界面电荷积聚、实现可靠的接头连接是必须面临的挑战。

5　超高压直流电缆的热稳定性评估

固体绝缘材料的热失稳，即为由于绝缘损耗引起材料温度上升从而材料无法和周围环境达到热平衡的现象[74-75]。在超高压直流电缆中，热失稳风险增大，可能影响系统正常运行，甚至于导致绝缘击穿。因此，CIGRE TB 852 要求对 EHVDC 电缆进行热稳定性测试，以保障电缆运行的可靠性。

5.1　EHVDC 电缆的热失稳现象

造成 EHVDC 电缆热失稳风险增大的主要原因是材料、电缆结构及运行环境的改变。一方面，电缆绝缘厚度的增大阻碍了散热过程；另一方面绝缘泄漏电流产生的单位体积发热功率与绝缘的电导率和工作场强的平方成正比[76]：

$$Q=\sigma E^2 \tag{5}$$

式中：Q 为绝缘泄漏电流发热功率密度。当绝缘中电场强度增加时，电缆内发热功率快速增大。在 EHVDC 电缆中，厚绝缘与升高的场强同时存在，最大散热功率的下降与发热功率的增加同时出现，热失稳更容易发生。

在此以 320 kV HVDC 电缆、500 kV EHVDC 电缆满载时绝缘内部温度分布情况为例，阐明 EHVDC 电缆中热稳定性的下降。其中 320 kV 电缆导体截面为 1 800 mm^2，绝缘厚度为 26 mm[6]；500 kV 电缆导体截面为 3 000 mm^2，绝缘厚度为 30 mm，两种电缆各类材料性能均保持一致以控制变量。仿真计算结果如表 2 和图 13 所示。在电缆满载且不加压时，电缆内热源仅为导体焦耳热，无泄漏电流发热，320 kV 和 500 kV 电缆绝缘最高温度均出现在导体屏蔽处，分别为 67.76 ℃和 68.03 ℃，表明 EHVDC 电缆绝缘厚度增加后散热能力的下降导致温度略有上升。在电缆满载且施加 U_0 电压时，两种电缆绝缘最高温度较不加压分别升高 0.44 ℃、1.43 ℃，表明泄漏电流发热导致绝缘升温的现象。在电缆满载且施加 1.45 U_0 电压时，320 kV 电缆中最大场强较 U_0 时增大了 45.74%，最高温度增大了 1.03 ℃；而 500 kV 电缆中最大场强较 U_0 时增大了 49.27%，最高温度增大了 4.64 ℃，达 74.11 ℃。这表明泄漏电流发热随绝缘场强的增大而增大，并且在 EHVDC 电缆中，电场更大、材料温升更高，更容易出现电缆的热失稳导致绝缘的热击穿。

表 2　不同电缆绝缘状态(满载)

Table 2　Insulation state of different cables (full load)

电缆类型	施加电压	T_{max}/℃	ΔT/℃	E_{max}/(kV·mm^{-1})
320 kV 电缆	不加压	67.76	17.59	—
	U_0	68.20	17.71	14.19
	1.45 U_0	69.23	17.98	20.68
500 kV 电缆	不加压	68.03	18.65	—
	U_0	69.46	19.06	19.87
	1.45 U_0	74.11	20.37	29.66

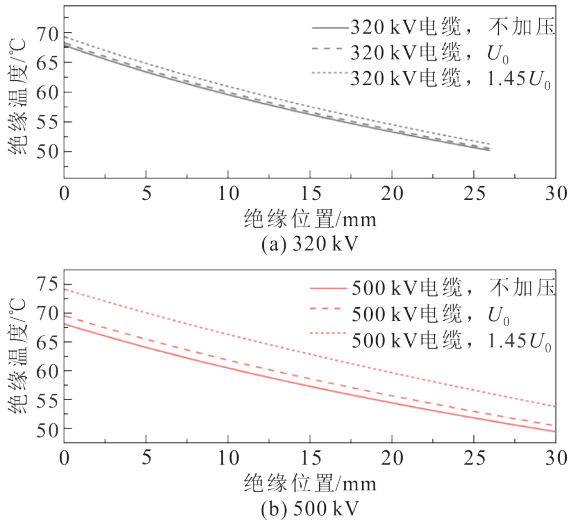


图 13　不同电缆绝缘温度分布(满载)

Fig.13　Insulation temperature of different cables (full load)

5.2　评估电缆热稳定性的试验方法

CIGRE TB 852 在鉴定试验中针对 EHVDC 电缆引入了热稳定性试验，如图 14 所示，具体测试方法如下。在不施加电压的情况下采用相同电流加热被测电缆回路和参考电缆回路，直至电缆导体温度

稳定在最大值 $T_{cond,max}$，绝缘层温差大于 ΔT_{min}，并且环境温度波动时护套温度变化小于 2 ℃；随后，对被测电缆回路施加 1.45U_0 电压，并保持至少 120 h；整个试验过程中，监测参考电缆回路的导体温度、护套温度以及被测电缆回路的护套温度。若被测电缆与参考电缆护套温度趋于稳定，二者温差在测试期间最后 96 h 内小于 4 ℃且最后 72 h 小于 2 ℃，则通过热稳定性试验。若不满足上述条件，则延长加热期 24 h，再次检验两电缆护套温差，若在 240 h 内无法达到温差要求，则认为被测电缆无法通过热稳定性试验。

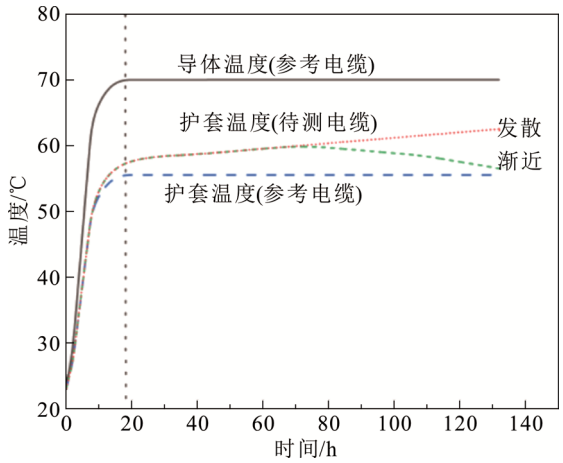


图 14 热稳定性试验各参数曲线

Fig.14 Parameter cures of thermal stability test

随着电压等级的提升，EHVDC 电缆绝缘的工作场强将不断升高，电缆的热稳定性下降将会成为制约电缆发展的重要问题。目前提升电缆系统热稳定性主要从设计合理的绝缘厚度，开发新型高导热绝缘材料、低损耗绝缘材料等角度出发，需要进行更多系统性深入研究。

6 扩展鉴定试验与特殊暂态过电压试验

在超高压挤包绝缘直流电缆系统试验验证方法方面，CIGRE TB 852 中除上述热稳定性试验外，还增加了扩展鉴定试验、特殊暂态过电压试验。前者针对目前预鉴定试验耗费时间过长的情况。后者主要考虑到电压等级提升后电网系统中出现的新型特殊暂态过电压的情况。该试验用于验证电缆系统能否耐受特殊工况以及测试电缆系统极限性能，试验结果仅用于技术论证，不作为设计参数。

6.1 扩展鉴定试验

针对已合格的电缆系统发生实质性变更的情况，CIGRE TB 852 中提出可根据情况用扩展鉴定试验来代替耗时过多的预鉴定试验，保证被测电缆系统的高可靠性。具体情况如表 3 所示，如当绝缘材料生产地发生变更或半导电材料供应商变更时，HVDC 电缆进行扩展鉴定试验，不需要进行预鉴定试验，而 EHVDC 电缆则需要进行完整的预鉴定试验。

表 3 高压/超高压电缆扩展鉴定试验的实质性变更

Table 3 The changes that require EQT in a qualified cable system

变更类型		扩展鉴定试验	
		HVDC	EHVDC
导体	更大的横截面积(>20%)，相同的金属，拉普拉斯导体，绝缘屏蔽电场更低或相等	√	√
	铜导体转换为铝导体		√
	分割导体或绞合导体变更为实心导体，相同的金属，相同或更小的横截面积	√	√
	—非阻水导体变更为使用固体化合物的阻水导体，或改变了固体化合物材料 —与绝缘接触的胶带 —使用可膨胀阻水带、阻水纱的阻水导体变更为使用固体化合物的阻水导体		√
半导电层	来源(供应商、相同化合物的填料生产厂)	√	
绝缘	绝缘材料生产地	√	
三层共挤生产线绝缘系统	相同工艺下挤出生产线加工参数改变	√	√
预制式接头	更高的最大计算场强(拉普拉斯场)设计、结构	√	√
	主绝缘复合材料或半导电层材料的改变(相同基体树脂)	√	
	将电缆端部固定在接头两侧，横截面相同(例如更换支撑架)	√[1]	√[1]
工厂接头导体尺寸	更大的横截面积	√	√
终端-室内-室外-金属封闭 SF_6 式或油浸式	更高的应力锥最大设计场强	√	√
	相同基体树脂情况下改变应力锥材料配方	√	
	GIS 终端绝缘子用环氧树脂配方		√
	户外终端用陶瓷、树脂		√
	GIS/变压器绝缘子的设计或制造商		√

注：√[1] 为仅进行热机械试验部分。

扩展鉴定试验与预鉴定试验的最大差异在于各类负载情况的施加电压与持续时间不同。表 4 和表 5 中分别列出 CIGRE TB 852 中 VSC 系统预鉴定试验和扩展鉴定试验程序，其中预鉴定试验过程中

的直流电压 U_{TP1}=1.45U_0，扩展鉴定试验过程中的直流电压 U_{EQ1}=1.68U_0。预鉴定试验、扩展鉴定试验过程中待测系统均需要经历多个负载循环(LC)、高负荷(HL)、零负荷(ZL)、叠加冲击电压(S/IMP)等状态，全面考察了电缆在不同工况下的可靠性。但是前者试验中电压等级较低，一次试验周期最少需要360 d；而扩展鉴定试验在更高的电压下进行，约82 d，可节约77%的用时。

表 4　VSC 预鉴定试验程序

Table 4　Prequalification test sequence for VSC systems

状态	循环数	施加电压极性	测试电压等级
LC	40	+	U_{TP1}
LC	40	−	U_{TP1}
HL	40	+	U_{TP1}
HL	40	−	U_{TP1}
ZL	120	−	U_{TP1}
LC	40	+	U_{TP1}
LC	40	−	U_{TP1}
S/IMP	不适用		U_{P1}=2.1U_0，$U_{P2,O}$=1.2U_0

注：U_{TP} 为预鉴定试验过程中的直流电压

表 5　VSC 扩展鉴定试验程序

Table 5　Extension of qualification test sequence for VSC systems

状态	循环数	施加电压极性	测试电压等级
LC	10	+	U_{EQ1}
LC	10	−	U_{EQ1}
HL	18	+	U_{EQ1}
HL	18	−	U_{EQ1}
ZL	6	−	U_{EQ1}
LC	10	+	U_{EQ1}
LC	10	−	U_{EQ1}
S/IMP	不适用		U_{P1}=2.1U_0，$U_{P2,O}$=1.2U_0

注：U_{EQ} 为扩展鉴定试验过程中的直流电压

预鉴定试验与扩展鉴定试验的电压等级、持续时间均符合绝缘材料 V-t 曲线特性[77]：

$$V^n t = C \tag{6}$$

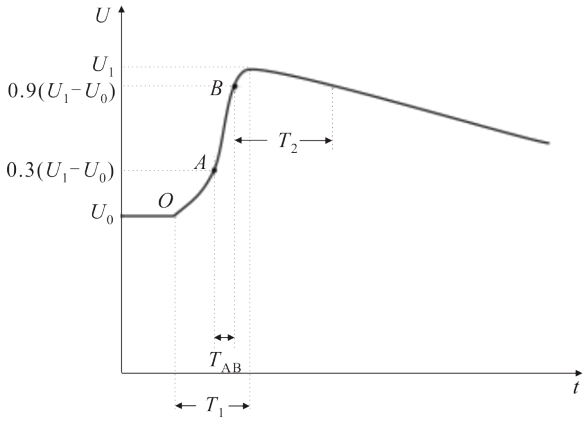
式中：V 为电压等级；t 为持续时间；n 为电寿命指数；C 为常数。根据电缆绝缘在 U_0 下预期寿命 40 年，n 取 10，可以计算出寿命 360 d、82 d 时对应耐受电压为 1.45 U_0、1.68 U_0，分别为预鉴定试验和扩展鉴定试验所施加电压。

在完成扩展鉴定试验后，室温下对被测电缆施加−U_T(−1.85 U_0)2 h 耐压试验。随后，若条件可行，解剖测试电缆本体、附件，观察其是否出现任何可能影响系统正常运行的劣化迹象(如绝缘劣化、沿面放电、有害收缩等)，若无上述迹象且所有测试成功通过，认为被测电缆系统通过扩展鉴定试验。

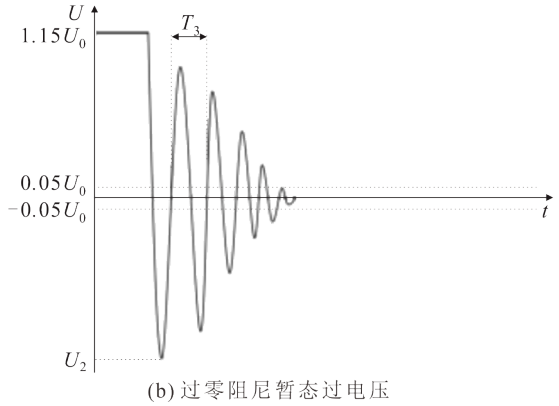
6.2　特殊暂态过电压试验

快速发展的大长度电网系统以及更高的额定工作电压，在传统雷电和操作过电压之外，引入了两种新的过电压形式：极缓波前暂态过电压(very slow front temporary overvoltage)、过零阻尼暂态过电压(zero crossing damped temporary overvoltage)。前者由于交流侧相对地故障或直流侧直流极对地故障引起，通常直流侧故障所引起的过电压幅值更高；后者通常在电缆放电过程中沿故障电缆传播。

CIGRE TB 852 中极缓波前暂态过电压波形如图 15(a)所示，其波前时间超过 250 μs。U_1 为记录到的与施加脉冲极性相同的最高电压，介于 1.8U_0~2.10U_0；T_1 为起始点 O 到 U_1 的时间间隔，介于 1~3 ms；T_2 为电压大于 90%最大电压的时间间隔，介于 10~150 ms。过零阻尼暂态过电压波形如图 15(b)所示，其中 U_2 为试样放电之后第一次振荡



(a) 极缓波前暂态过电压



(b) 过零阻尼暂态过电压

图 15　两种特殊暂态过电压

Fig.15　Two kinds of special temporary overvoltage

的峰值；T_3为两个阻尼振荡之间的时间间隔，据此可以计算出振荡频率f(频率介于1~40 kHz)；n为振荡峰值电压低于直流电压的5%时的振荡次数。

测试之前需要将被测电缆分别在$-U_T$($-1.85U_0$)、$+U_T$($1.85U_0$)下进行24 h×5的负荷循环，而后加热电缆至导体温度≥$T_{cond,max}$、绝缘层温差≥ΔT_{max}至少10 h，施加同极性U_0至少10 h。在此条件下，被测电缆经受10个同极性过电压作用，在$-U_0$的基础上连续经受10个同极性过电压作用。若所有测试均能成功通过且满足其他非电气要求，认为被测电缆系统通过特殊暂态过电压试验。

7 结论与展望

1）在电缆绝缘材料方面，残留在电缆绝缘中的交联副产物会增大XLPE材料电导率、加剧空间电荷积聚、降低电气强度。实际电缆中还会叠加电缆绝缘中的径向结晶和交联结构不均匀、副产物径向分布不均匀导致的电场畸变，因此后续的研究应关注副产物的扩散过程、副产物之间的相互作用、低副产物绝缘料开发、脱气工艺优化等问题，实现对大厚度绝缘交联副产物含量的控制。使用新型低交联、非交联绝缘材料能减少副产物生成量、改善绝缘性能，但其抗热变形能力弱，因此对于这类材料，未来应重点关注材料改性方法以实现电气性能与机械性能的平衡。

2）在电缆系统方面，电缆绝缘挤出过程中发生的“焦烧”现象会严重限制单根挤包绝缘电缆的长度并影响其绝缘性能，为解决这一难题，未来应重点研究焦烧现象的成因、过程与影响，聚乙烯分子结构与流变性能关联，抗焦烧绝缘料配方，电缆挤出过程的建模与控制等。电缆接头是接续两段电缆的关键部件，但是接头中存在多层绝缘界面电气参数匹配以及界面空间电荷积聚的问题，后续可以从增强绝缘的电气参数调控、非线性电导绝缘材料的开发、多层绝缘界面改性等方面出发，抑制界面电荷积聚，提升电缆接头可靠性。

3）在电缆测试方法方面，为应对EHVDC电缆开发和使用中面临的挑战，如热失稳风险的增高、预鉴定试验周期较长、绝缘层对新型暂态过电压的耐受能力等问题，CIGRE TB 852分别推荐了热稳定性试验、扩展鉴定试验和特殊暂态过电压试验。今后需要结合EHVDC电缆开发、运行中出现的新要求，进一步完善、补充现有试验方法，为电缆系统的安全稳定运行提供可靠的技术支持。

参考文献 References

[1] HANLEY T L, BURFORD R P, FLEMING R J, et al. A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(1): 13-24.

[2] 杜伯学，韩晨磊，李进，等. 高压直流电缆聚乙烯绝缘材料研究现状[J]. 电工技术学报，2019，34(1)：179-191.
DU Boxue, HAN Chenlei, LI Jin, et al. Research status of polyethylene insulation for high voltage direct current cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 179-191.

[3] 胡明，刘淑军，杨建军，等. 挤包绝缘高压直流电缆应用现状与研究展望[J]. 中国电力，2021，54(4)：42-55.
HU Ming, LIU Shujun, YANG Jianjun, et al. Application status and research prospects of HVDC extruded cables[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 42-55.

[4] 钟力生，任海洋，曹亮，等. 挤包绝缘高压直流电缆的发展[J]. 高电压技术，2017，43(11)：3473-3489.
ZHONG Lisheng, REN Haiyang, CAO Liang, et al. Development of high voltage direct current extruded cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3473-3489.

[5] 杜伯学，李忠磊，杨卓然，等. 高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J]. 高电压技术，2017，43(2)：344-354.
DU Boxue, LI Zhonglei, YANG Zhuoran, et al. Application and research progress of HVDC XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 344-354.

[6] 张洪亮，谢书鸿，尹毅，等. 厦门柔直工程±320 kV直流电缆绝缘及外护层结构选型与论证[J]. 高电压技术，2016，42(10)：3139-3146.
ZHANG Hongliang, XIE Shuhong, YIN Yi, et al. Selection and verification of insulation and sheath structure of ±320 kV DC cable for Xiamen flexible DC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3139-3146.

[7] 严彦，薛驰，胡明，等. ±535 kV交联聚乙烯绝缘直流电缆设计与试验验证[J]. 电线电缆，2021(6)：10-15.
YAN yan, XUE Chi, HU Ming, et al. Design and test verification of ±535 kV XLPE DC cable[J]. Wire & Cable, 2021(6): 10-15.

[8] LI F, ZHONG L S, GAO J H, et al. Electric field distribution considering the byproducts inhomogeneity of crosslinking insulation in HVDC cable[C]//2021 IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Johor Bahru, Malaysia: IEEE, 2021: 318-321.

[9] REN H Y, ZHONG L S, YANG X Y, et al. Electric field distribution based on radial nonuniform conductivity in HVDC XLPE cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 121-127.

[10] 李飞，钟力生，李文鹏，等. 挤包绝缘高压直流电缆制造与应用中的径向梯度效应[J]. 中国电力，2021，54(4)：63-71.
LI Fei, ZHONG Lisheng, LI Wenpeng, et al. The radial gradient effect of HVDC extruded cables in manufacturing and application[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 63-71.

[11] 李忠磊，吴优，郑重，等. 高压直流海缆XLPE绝缘空间电荷与电场分布特性研究进展及展望[J]. 高电压技术，2024，50(7)：3128-3144.
LI Zhonglei, WU You, ZHENG Zhong, et al. Advances and prospects of space charge and electric field distribution characterization of XLPE insulation for HVDC submarine cables[J]. High Voltage Engineering,

2024, 50(7): 3128-3144.

[12] CHEN G, HAO M, XU Z Q, et al. Review of high voltage direct current cables[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 9-21.

[13] LI F, JIANG L, WANG D, et al. Effect of residual crosslinking by-products on thermal stability of EHVDC cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(3): 1737-1744.

[14] BAMJI S S, BULINSKI A T. Thermoluminescence in XLPE cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 316-319.

[15] KEMPER M S, PHILIPPCZYK C, RAYZAK R J, et al. A new method for the detection and quantification of residual volatiles in XLPE electrical cable using large-spot raman spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 3-10.

[16] LI W P, LIU K H, LI F, et al. Extra-low frequency dielectric relaxation in HVDC cable insulation material caused by cross-linking byproduct[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(3): 1201-1207.

[17] SMEDBERG A, BOSTRÖM J O, WALD D, et al. Comparison of different analytical test methods to monitor crosslinking by-products in XLPE insulated cables[C]//7th International Conference on Power Insulated Cables (JICABLE'07). Versailles, France: [s.n.], 2007: 280-285.

[18] ANDREWS T, HAMPTON R N, SMEDBERG A, et al. The role of degassing in XLPE power cable manufacture[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2006, 22(6): 5-16.

[19] LI F, LI H Q, JIANG L, et al. Phase field modeling on by-product migration in crosslinking polymers for HVDC cable insulation applications[J]. Frontiers in Chemistry, 2022, 10: 882347.

[20] 白健，张亚，詹陶，等. 脱气时间对电缆绝缘中交联副产物含量和直流特性的影响[J/OL]. 高压电器，2024：1-11[2025-03-18]. https://link.cnki.net/urlid/61.1127. TM. 20240308.1051.002.
BAI Jian, ZHANG Ya, ZHAN Tao, et al. Effect of degassing time on byproducts content and DC characteristics of cable insulation[J/OL]. High Voltage Apparatus, 2024: 1-11[2025-03-18]. https://link.cnki.net/urlid/61.1127. TM. 20240308.1051.002.

[21] 高宇，杜伯学. 采用表面电位衰减法表征高压交联聚乙烯电缆绝缘中空间电荷的输运特性[J]. 高电压技术，2012，38(8)：2097-2103.
GAO Yu, DU Boxue. Characterizing space charge transportation in HV XLPE cable insulation based on surface potential decay measurement[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 2097-2103.

[22] HUSSIN N, CHEN G. Analysis of space charge formation in LDPE in the presence of crosslinking byproducts[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 126-133.

[23] ZHANG H L, CHEN M, WANG Y L, et al. Interaction effects of three major crosslinking byproducts on space charge accumulation in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(2): 710-718.

[24] 陈萌. XLPE 电缆中交联副产物对空间电荷影响的定量表征参数研究[D]. 上海：上海交通大学，2020.
CHEN Meng. Study on quatitative charaterization parameters for the effect of cross-linked byproducts on space charge in XLPE cables[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

[25] 刘金. 基于第一性原理的 XLPE 击穿影响因素研究[D]. 北京：华北电力大学，2023.
LIU Jin. Factors influencing XLPE breakdown: a first-principles study[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2023.

[26] LI W P, GAO J H, ZHONG L S, et al. Research on the correlation between DC electrical properties and by-product content of XLPE insulation for HVDC cable[C]//2022 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Denver, USA: IEEE, 2022: 1-6.

[27] 李盛涛，王诗航，李建英. 高压直流电缆料的研发进展与路径分析[J]. 高电压技术，2018，44(5)：1399-1411.
LI Shengtao, WANG Shihang, LI Jianying. Research progress and path analysis of insulating materials used in HVDC cable[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1399-1411.

[28] SMEDBERG A, BOREALIS A B, WALD D. Determination of diffusion constants for peroxide by-products formed during the crosslinking of polyethylene[C]//Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver, Canada: IEEE, 2008: 586-590.

[29] RUSLAN M F A C, YOUN D J, AARONS R, et al. Numerical study of CH_4 generation and transport in XLPE-insulated cables in continuous vulcanization[J]. Materials, 2020, 13(13): 2978.

[30] RUSLAN M F A C, YOUN D J, AARONS R, et al. Numerical analysis of a continuous vulcanization line to enhance CH_4 reduction in XLPE-insulated cables[J]. Materials, 2021, 14(4): 1018.

[31] 王文超，王海洋，赵囿林，等. 220kV XLPE 绝缘海缆脱气效率和低碳性研究[J]. 电线电缆，2023(3)：12-17.
WANG Wenchao, WANG Haiyang, ZHAO Youlin, et al. Study on degassing efficiency of green and low-carbon 220 kV XLPE insulated submarine cables[J]. Wire & Cable, 2023(3): 12-17.

[32] 王志胜，杨凯军，谢伟斌. 中高交联聚乙烯电力电缆生产中去气工序的分析[J]. 化工管理，2013(5)：232-233.
WANG Zhisheng, YANG Kaijun, XIE Weibin. Analysis of degassing process in production of medium and high crosslinked polyethylene power cable[J]. Chemical Engineering Management, 2013(5): 232-233.

[33] 王志辉. 应用于交联电缆的热泵去气室恒温节能系统[J]. 自动化与信息工程，2017，38(3)：6-11.
WANG Zhihui. Constant temperature and energy saving system for heat pump degassing chamber applied to cross-linked cable[J]. Automation & Information Engineering, 2017, 38(3): 6-11

[34] 赵囿林，张建民，胡明，等. 大长度 500 kV XLPE 超高压海底电缆关键技术研究[J]. 电线电缆，2020(2)：12-16，24.
ZHAO Youlin, ZHANG Jianmin, HU Ming, et al. Key technology research for large length 500 kV XLPE UHV submarine cable[J]. Wire & Cable, 2020(2): 12-16, 24.

[35] LI Y E, ZHONG L S, CAO L, et al. Temperature stability of DC conductivity and breakdown of crosslinked LLDPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 2064-2070.

[36] SUI R, XU N, AHMED M, et al. Enhanced DC breakdown strength of XLPE via denser cross-linking network formation with liquid polybutadiene[J]. Macromolecules, 2024, 57(12): 5971-5978.

[37] 袁宝，毛应涛，李维康，等. 助交联剂对过氧化物交联聚乙烯绝缘料性能的影响[J]. 绝缘材料，2020，53(5)：34-40.
YUAN Bao, MAO Yingtao, LI Weikang, et al. Effect of co-crosslinking agent on properties of peroxide crosslinked polyethylene insulating material[J]. Insulating Materials, 2020, 53(5): 34-40.

[38] MAURI M, PETERSON A, SENOL A, et al. Byproduct-free curing of a highly insulating polyethylene copolymer blend: an alternative to peroxide crosslinking[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(42): 11292-11302.

[39] MAURI M, HOFMANN A I, GÓMEZ-HEINCKE D, et al. Click chemistry-type crosslinking of a low-conductivity polyethylene copolymer ternary blend for power cable insulation[J]. Polymer

International, 2020, 69(4): 404-412.

[40] 黄兴溢，张军，江平开. 热塑性电力电缆绝缘材料：历史与发展[J]. 高电压技术，2018，44(5)：1377-1398.
HUANG Xingyi, ZHANG Jun, JIANG Pingkai. Thermoplastic insulation materials for power cables: history and progress[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1377-1398.

[41] SUI H R, WU K N, ZHAO G, et al. Greatly enhanced temperature stability of eco-friendly polypropylene for cable insulation by multi-fold long-chain branched structures[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 485: 149811.

[42] LI L Z, ZHANG K, ZHONG L S, et al. Treeing phenomenon of thermoplastic polyethylene blends for recyclable cable insulation materials[J]. AIP Advances, 2017, 7(2): 025116.

[43] WU K N, SUI H R, YANG Z C, et al. Largely improved creep resistance and thermal-aging stability of eco-friendly polypropylene high-voltage insulation by long-chain branch-induced interfacial constraints[J]. ACS Macro Letters, 2024, 13(5): 592-598.

[44] OUYANG Y W, POURRAHIMI A M, LUND A, et al. High-temperature creep resistant ternary blends based on polyethylene and polypropylene for thermoplastic power cable insulation[J]. Journal of Polymer Science, 2021, 59(11): 1084-1094.

[45] 李论之. 热塑性 LLDPE 基共混电缆绝缘材料的组成结构与性能关系研究[D]. 西安：西安交通大学，2018.
LI Lunzhi. Study on composition, structure and properties of thermoplastic LLDPE based blends for cable insulation materials[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2018.

[46] 闫轰达，李文鹏，李维康，等. 高压电缆用交联聚乙烯抗焦烧与绝缘特性研究[J]. 绝缘材料，2022，55(8)：22-27.
YAN Hongda, LI Wenpeng, LI Weikang, et al. Study on scorch resistance and insulating properties of cross-linked polyethylene for high voltage cables[J]. Insulating Materials, 2022, 55(8): 22-27.

[47] 李加才，尚 恺，司志成，等. 高压电缆绝缘低密度聚乙烯交联过程中级数和自催化反应的逆向调控[J]. 电工技术学报，2024，39(1)：13-22.
LI Jiacai, SHANG Kai, SI Zhicheng, et al. Reverse regulation of order and autocatalysis reactions during the cross-linking process of low-density polyethylene used in high-voltage cable insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 13-22.

[48] ZHANG X H, YANG H M, SONG Y H, et al. Assessment of hindered phenol antioxidants on processing stability of peroxide-cure LDPE by rheology and DSC analysis[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 126(3): 939-946.

[49] LI J C, SI Z C, SHANG K, et al. Kinetic and chemorheological evaluation on the crosslinking process of peroxide-initiated low-density polyethylene[J]. Polymer, 2023, 266: 125627.

[50] LI J C, SI Z C, SHANG K, et al. Kinetic and thermodynamic investigation on diffusion-limited crosslinking reaction behaviors of peroxide-induced low-density polyethylene[J]. Polymer Testing, 2023, 124: 108095.

[51] WILCZYŃSKI K, NASTAJ A, LEWANDOWSKI A, et al. Fundamentals of global modeling for polymer extrusion[J]. Polymers, 2019, 11(12): 2106.

[52] 陈佳兴，李子然. 单螺杆橡胶挤出机三维非等温流动数值模拟[J]. 材料科学与工艺，2018，26(1)：62-68.
CHEN Jiaxing, LI Ziran. Simulation of non-isothermal three-dimensional flow in the channel of a single-screw extruder for rubber material[J]. Materials Science and Technology, 2018, 26(1): 62-68.

[53] 尚恺，李加才，王诗航，等. 高压电缆交联聚乙烯绝缘料黏度参数对挤出特性影响的仿真研究[J]. 电工技术学报，2024，39(3)：810-819.
SHANG Kai, LI Jiacai, WANG Shihang, et al. Simulation study on the extrusion performances based on the viscosity parameters of cross-linked polyethylene insulating materials for high-voltage cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 810-819.

[54] 吴一帆，王诗航，李盛涛，等. 低密度聚乙烯基料链结构对黏弹特性的影响[J]. 电工技术学报，2024，39(1)：3-12，22.
WU Yifan, WANG Shihang, LI Shengtao, et al. Effect of molecular chain structure on viscoelasticity of low-density polyethylene[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 3-12, 22.

[55] 刘凤莲，邓元实，薛志航，等. 110 kV 高压电缆中间接头系列故障分析[J]. 电线电缆，2017(6)：36-40.
LIU Fenglian, DENG Yuanshi, XUE Zhihang, et al. Analysis on series fault of 110 kV high voltage cable joints[J]. Wire & Cable, 2017(6): 36-40.

[56] 张盟. 高压直流海缆工厂接头绝缘同质界面粗糙度对其电气性能影响规律研究[D]. 西安：西安交通大学，2024.
ZAHNG Meng. Research on the effect of roughness of homogeneous interfaces on the electrical performance of factory joint insulation of high-voltage direct current (HVDC) submarine cables[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2024.

[57] 赵薇. 海缆软接头同质双层交联聚乙烯绝缘界面特性及电荷输运机理研究[D]. 西安：西安交通大学，2023.
ZHAO Wei. Research on the insulation interface characteristics and charge transport mechanism of homo-crosslinked polyethylene bilayer in submarine cable factory joint[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2023.

[58] 胡巍，赵洪，牛越，等. 高压电缆附件用橡胶基增强绝缘电学性能研究进展[J]. 绝缘材料，2021，54(7)：1-9.
HU Wei, ZHAO Hong, NIU Yue, et al. Research progress on electrical properties of rubber-based reinforced insulation for high voltage cable accessories[J]. Insulating Materials, 2021, 54(7): 1-9.

[59] 王雅妮，孙远远，张帅，等. 基于分子链位移的 HVDC 电缆接头界面区域空间电荷分布研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(10)：3854-3863.
WANG Yani, SUN Yuanyuan, ZHANG Shuai, et al. Study on interface region space charge distribution of HVDC cable joints based on molecular chain dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3854-3863.

[60] VU T T N, TEYSSEDRE G, VISSOUVANADIN B, et al. Correlating conductivity and space charge measurements in multi-dielectrics under various electrical and thermal stresses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 117-127.

[61] ZHAO J, CHEN G, LEWIN P L. Investigation into the formation of positive charge packets in polyethylene[C]//2011-14th International Symposium on Electrets. Montpellier, France: IEEE, 2011: 123-124.

[62] 吴建东. 低密度聚乙烯纳米复合介质中电荷输运的实验研究和数值模拟[D]. 上海：上海交通大学，2012.
WU Jiandong. Charge transport investigation in low-density polyethylene/silica nanocomposite based on experiment and numerical simulation[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2012.

[63] 张昱. 高压直流电缆及附件空间电荷分布的二维动力学仿真与应用[D]. 上海：上海交通大学，2019.
ZHANG Yu. Simulation and application of the space cahrge dynamics in two dimension model for high voltage direct current cable and joint[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2019.

[64] 张汇洋. 直流电缆附件硅橡胶基复合介质的性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2024.
ZHANG Huiyang. Performance study of silicone rubber-based composite dielectrics for DC cable accessories[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2024.

[65] DU B X, YANG Z R, LI Z L, et al. Surface charge behavior of silicone rubber/SiC composites with field-dependent conductivity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1340-1348.

[66] LI J, DU B X, KONG X X, et al. Nonlinear conductivity and interface charge behaviors between LDPE and EPDM/SiC composite for HVDC cable accessory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1566-1573.

[67] MENG F B, CHEN X R, HONG Z L, et al. Insulation properties and interfacial quantum chemical analysis of cross-linked polyethylene under different degassing time for HVDC cable factory joint applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(1): 271-278.

[68] ZHAO W, LI H Q, LI W P, et al. Charge accumulation in the homo-crosslinked-polyethylene bilayer[J]. Materials, 2022, 15(9): 3024.

[69] 孟繁博，陈向荣，徐星，等. 不同粗糙度界面和脱气处理对 500 kV XLPE 直流电缆工厂接头的影响[J]. 中国电机工程学报，2022，42(17)：6499-6510.
MENG Fanbo, CHEN Xiangrong, XU Xing, et al. Effect of different roughness interface and degassing treatment on 500 kV XLPE DC cable factory joint[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6499-6510.

[70] FUKAGAWA H, MIYAUCHI H, YAMADA Y, et al. Insulation properties of 250 KV DC XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(7): 3175-3184.

[71] ZHANG Z P, ZHAO J K, ZHAO W, et al. Influence of morphological variations on the AC breakdown of XLPE insulation in submarine cable factory joints[J]. High Voltage, 2020, 5(1): 69-75.

[72] 张振鹏，胡列翔，赵健康，等. 500 kV 海缆工厂接头绝缘恢复过渡区形成过程及电树枝特性[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3413-3420.
ZHANG Zhenpeng, HU Liexiang, ZHAO Jiankang, et al. Formation process and electrical tree characteristics of insulation recovery transition zone of factory joints in 500 kV submarine cable[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3413-3420.

[73] 赵薇，张振鹏，胡列翔，等. 500 kV 海缆接头绝缘恢复对 XLPE 工频击穿和晶相结构的影响[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3437-3444.
ZHAO Wei, ZHANG Zhenpeng, HU Liexiang, et al. Effects of 500 kV submarine cable factory joint insulation recovery on power frequency breakdown and crystalline morphology of XLPE[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3437-3444.

[74] WHITEHEAD S. Dielectric breakdown of solids[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1953.

[75] O'DWYER J J. The theory of dielectric breakdown of solids[M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1964.

[76] JÖRGENS C, KASOLIS F, CLEMENS M. Numerical simulations of temperature stability limits in high-voltage direct current cable insulations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 8000904.

[77] 刘霞，于钦学，钟力生，等. 高压 XLPE 电缆绝缘 *V-t* 特性研究综述[J]. 南方电网技术，2015，9(10)：57-63.
LIU Xia, YU Qinxue, ZHONG Lisheng, et al. Review on research of *V-t* characteristics of HV XLPE cables[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(10): 57-63.



钟力生(通信作者)
1961—，男，博士，教授，博导
主要从事电介质与电气绝缘方面的研究工作
E-mail: lszhong@mail.xjtu.edu.cn

ZHONG Lisheng
Ph.D., Professor
Corresponding author



睢　锐
1997—，女，博士生
主要从事高压直流电缆绝缘材料方面的研究工作
E-mail: suirui_mail@qq.com

SUI Rui
Ph.D. candidate



高景晖
1984—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为电介质及其在电缆、电容器等电力设备中的应用
E-mail: gaojinghui@mail.xjtu.edu.cn

GAO Jinghui
Ph.D., Professor

收稿日期　2025-03-21　修回日期　2026-06-25　　编辑　曹昭君