

高压直流 XLPE 绝缘材料及电缆关键技术展望

陈 新¹, 李文鹏^{1,3}, 李震宇², 张 翀¹, 关健昕², 钟力生³

(1. 全球能源互联网研究院有限公司先进输电技术国家重点实验室, 北京 102211; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031; 3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 为推动高压直流电缆技术发展, 对目前交联聚乙烯高压直流电缆系统发展的关键技术进行了分析和展望, 指出了聚乙烯主绝缘材料、电缆工厂接头及附件是制约高压直流电缆发展的主要瓶颈。高压直流电缆绝缘料的研究需要聚焦到交联聚乙烯的微观结构和电气性能之间的关联关系, 如何从聚乙烯基料的分子链结构、结晶形态控制等角度出发并结合材料生产过程中的纯净化工艺来实现技术突破是目前面临的主要问题。高压直流电缆本体及工厂接头的电场、老化寿命设计理论要在传统经验设计参数的基础上, 同时要基于材料的基本性能、空间电荷以及尺寸和形状效应等进行优化发展。高压直流电缆附件要在附件与电缆本体的匹配技术、关键部件设计及安装工艺方面开展深入研究。该综述可为高压 XLPE 直流绝缘材料、电缆工厂接头及附件的研制及性能优化提供技术指导。

关键词: 高压直流; 交联聚乙烯; 电缆; 附件; 工厂接头

Prospect on Key Technology of the XLPE Insulation Materials and HVDC Cables

CHEN Xin¹, LI Wenpeng^{1,3}, LI Zhenyu², ZHANG Chong¹, GUAN Jianxin², ZHONG Lisheng³

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Corporation, Beijing 102211, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to accelerate the development of technique of HVDC cables, the key technologies in the development of XLPE HVDC cables were analyzed and prospected. It is pointed out that the insulation materials, cable design and accessories are the bottlenecks which will restrict the development of HVDC cables. The research direction of HVDC insulation materials should be extended from the attention on the electrical properties of XLPE insulations to the correlation between their microstructure and electrical properties as well as breakthroughs on the molecular chain structure and crystal morphology of polyethylene combined with their purification process. The design of electric field and aging lifetime of the HVDC cables should be directed not on the previous experience but the performance of different materials considering their space charge, size and shape effect. For the cable accessories, their matching technology between the cables, the design of their main parts and their installation process should be further studied. The reviewed contents in this paper can provide technical guidance for the development and performance optimization of the XLPE insulation materials, factory joints and accessories use for high-voltage DC cables.

Key words: HVDC; cross-linked polyethylene; cables; accessories; factory joints

0 引言

在交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)直流电缆研制成功之前, 投入运行的直流工程以传统或改进型油纸绝缘电缆为主。此后, XLPE 三层共挤电缆成为柔性直流输电技术首选, 因相对于油纸电缆, 在相同电压等级下, XLPE 电缆具有造价

低、输送容量高、维护简单等优点^[1-5]。目前世界范围新投运的柔直输电线路中绝大部分采用交联聚乙烯直流电缆。1999 年 ABB 首次将其研制的±80 kV 柔直 XLPE 电缆应用于工程^[6]; 2002 年±150 kV XLPE 电缆研制成功; 2009 年 ABB 成功研制±320 kV XLPE 直流电缆; 2013 年 J-Power 研制出了±400 kV XLPE 直流电缆; 2014 年 ABB 研制出±525 kV XLPE 直流电缆并通过型式试验; 2016 年 Prysmain 研制出±600 kV XLPE 和±525 kV P-Laser 挤出直流电缆^[7-8]; 2017 年初 NKT(ABB 电缆业务

基金资助项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900703); 国家电网公司科技项目(SGSHDK00SPJS1800273)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2016YFB0900703), Science and Technology Project of SGCC (SGSHDK00SPJS1800273).

并入)宣称研制出 ± 640 kV/3 100 MW XLPE 直流电缆。我国先后于 2013、2014 和 2015 年研制出 ± 160 、 ± 200 和 ± 320 kV XLPE 直流电缆,目前正在开发 ± 500 kV XLPE 直流电缆。在 XLPE 直流电缆研制领域,我国比国外起步晚,技术积累少,目前仍然是国外先进水平的追赶者。本文将从 XLPE 电缆材料的改进、电缆本体的设计以及附件的研制等方面,针对目前国内高压直流电缆发展存在的一些技术难点进行分析和展望。

1 XLPE 直流电缆材料技术难点

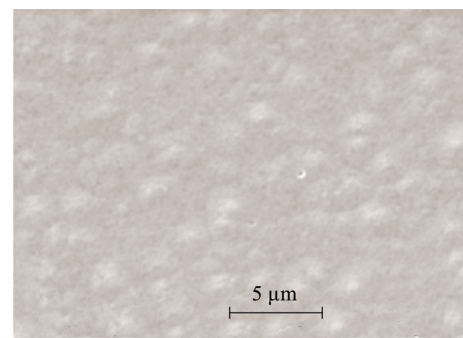
目前关于 XLPE 绝缘材料在直流场下的空间电荷、电导率、击穿以及电树、老化、热学性能甚至多种性能综合的研究文献十分丰富,大量学者为此开展了详细的研究^[9-13],但目前这些研究几乎全部基于确定的 XLPE 绝缘材料,针对 XLPE 的电气性能和低密度聚乙烯(low-density polyethylene, LDPE)基料自身微观结构及纯净度关联的研究鲜有报道。团队通过对国内外材料的对比研究发现,这 2 个因素可能是引起绝缘材料电气性能差异的主要根源。

1.1 LDPE 基料的微观结构影响研究

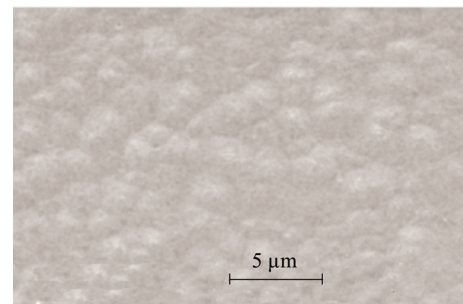
聚合物结晶是指组织中形成周期性规整有序的结构,聚合物高分子支链越少、越短,越容易结晶。结晶后聚合物的机械和击穿强度通常都会提升,但同时结晶度提高后塑性和韧性可能会降低^[14]。聚合物结晶后其晶粒内部、晶粒边界及晶粒间非晶态区域对载流子移动能力的影响不同,而空间电荷、电导及击穿等电性能均与载流子移动密切相关。低密度聚乙烯基料的微观结构是影响绝缘料空间电荷和电导及击穿性能的重要因素^[15]。LDPE 的微观结构不仅包括分子量分布、支化度以及双键含量等分子结构参数,还包括微观组织形貌。材料的绝缘性能、电荷聚集特性指标与基料的微观结构密切相关^[16]。与国外 LDPE 相比,国产 LDPE 的分子量分布较宽、温度敏感性高。但关于 LDPE 基料的微观结构对空间电荷、电导率、击穿的影响机理、影响程度目前还不清楚,这也是高压直流绝缘料研究的难点。针对这一问题开展研究,将有助于从根本上了解绝缘材料中空间电荷、电导率非线性问题。针对微观结构对空间电荷、电导率等电气性能的影响,可以通过研究直流电缆料的分子量分布、分子链结构、结晶形态等理化参数特性对空间电荷和电导率及击穿影响的规律,建立起基料微观结构和空间电荷、直

流电导率、直流击穿等性能间的定性和定量联系模型。图 1 中是 3 种低密度聚乙烯基料的扫描电镜微观组织图,可以看出 S1、S2 基料在微观形貌上比 S3 基料组织明显粗大、均匀性也相对差,实际测量基料在直流电导、空间电荷性能上 S3 材料也最好,但基料的分子结构和微观组织具体如何影响基料的电气性能目前还不清楚,有待更进一步分析研究。

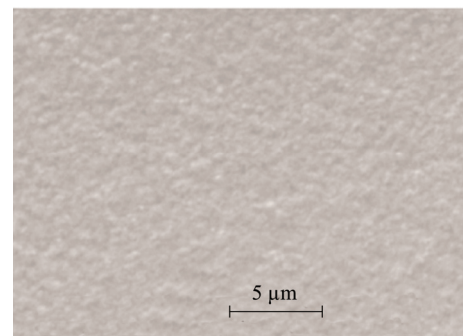
低密度聚乙烯基料的端基双键含量和支化度在很大程度上影响交联聚乙烯的交联特性。端基双键在聚乙烯交联过程中发挥的作用最大,对聚乙烯交联形成网状结构也最为有利。端基双键含量在总双键中的比例越高则对交联越有利,越能降低交联剂含量,同时减少副产物的生成。支化度也是高分子微观结构的重要性能指标,支化位置好,支化多,



(a) S1 微观组织形貌(放大 500 倍)



(b) S2 微观组织形貌(放大 500 倍)



(c) S3 微观组织形貌(放大 500 倍)

图 1 不同 LDPE 基料的微观组织扫描电镜照片
Fig.1 Scanning electron micrograph morphology of different kinds of LDPE

交联点就多, 交联剂用量就可以降低。虽然端基双键含量和支化度的提升可以有效降低交联剂的用量, 进而减少交联副产物, 但双键含量增加会提高基料的活性, 带来基料长期稳定性的降低; 而支化度增多会影响聚乙烯的结晶。因此, 如何在端基双键含量、支化度和材料的性能之间取得平衡需要深入研究。

1.2 XLPE 材料的纯净化研究

直流场下 XLPE 绝缘中的空间电荷积聚和非线性电导问题是目前绝缘材料开发面临的重大难题。空间电荷的存在不仅会引起绝缘料中电场畸变, 诱发微区局部击穿, 还会诱发电致发光效应加速电树发展加剧绝缘老化^[17], 而非线性电导则会引起电缆绝缘中电场极性翻转和绝缘损耗增加。相关研究表明, 在直流场作用下, 交联聚乙烯的纯净度对空间电荷和电导率^[18-22]及击穿性能影响较大^[23]。目前已知材料的纯净化有助于抑制材料中空间电荷聚集, 降低电导率非线性效应, 提升材料的耐压水平, 但杂质含量对电气性能(载流子迁移等)的影响机制仍不清楚。交联聚乙烯的制备流程包含基料的生产、助剂添加、水下冷却造粒、后吸收、成品包装等。生产过程链很长, 材料的纯净化涉及整个交联聚乙烯绝缘材料的生产过程, 目前尚不能确定杂质主要是哪个环节引入, 每个环节引入的杂质数量以及各环节杂质引入影响的主次也都不清楚。对材料纯净化的研究无论从配方还是从工艺上都比较缺乏, 因此, 掌握杂质对绝缘材料电导、空间电荷等电气性能的影响机制, 厘清绝缘材料中杂质引入过程, 研究杂质分析、表征手段, 研究通过配方和工艺降低杂质的方法, 是开展直流 XLPE 材料纯净化研究的关键, 是实现绝缘材料性能提升必须解决的关键问题。

LDPE 基料是 XLPE 绝缘材料研制的基础, 直流场下 LDPE 基料的纯净度对 XLPE 绝缘材料的空间电荷、电导性能影响显著^[24], 因此, 首先需要开展基料纯净化研究, 研究 LDPE 基料生产的乙烯气体纯度、引发剂的可能引入杂质造成的影响, 及 LDPE 基料生产造粒过程中接触相关冷却介质可能引入杂质造成的影响。目前北欧化工研制的 LDPE 基料经接枝、交联后能满足 525 kV 甚至 640 kV 直流电缆绝缘的需要。陶氏化学开发的 LDPE 基料经交联后也能满足 500 kV 直流电缆的需要。我国研究人员正在采用国产 LDPE 基料研制 500 kV 直流电缆绝缘料, 但在对基料性能进行对比过程中, 发现直

流场下电导、击穿及空间电荷性能与材料中的极性杂质的含量密切相关。针对 LDPE 基料杂质进行控制需对基料中的杂质类型、种类、特性进行研究。LDPE 生产工艺主要采用高压管式反应, 采用有机过氧化物催化剂诱发乙烯单体聚合^[25]。单体中杂质 CO、CO₂ 及催化剂的残留可能引入金属、无机和小分子杂质^[26], 需要深入研究这些杂质对 LDPE 直流场下空间电荷、电导等电气性能的影响。目前针对聚合物中杂质的测量通常采用燃烧法, 用荧光分析、气相色谱、红外分析等。由于杂质残留量很少(质量分数远不足 1%), 如何采用有效的分析手段对微量元素进行测量表征也是技术难点之一。基料中杂质的祛除通常采用溶剂、淋洗等物理化学手段, 在此过程中可能引入新的杂质, 需要对 LDPE 原料生产过程的工艺控制技术进行优化调整。

XLPE 绝缘材料配方中除 LDPE 基料外, 还需要加入交联剂、抗氧剂及纳米填充剂等, 这些助剂的加入可能引入新的杂质。交联剂通常为过氧化物类型, 主要通过产生自由基, 由自由基夺取聚乙烯链上的 H 原子, 引起聚乙烯间交联。目前使用的交联剂通常为过氧化二异丙苯(dicumyl peroxide, DCP), 是枯基醇在酸性盐催化剂存在下与过氧化氢异丙苯(cumyl hydroperoxide, CHP)缩合脱水而产生的。国产 DCP 的纯度(质量分数)通常一般<98%, 其内部的杂质会直接引入到 XLPE 绝缘料中。XLPE 配方中添加的抗氧剂通常为受阻酚类抗氧剂, 此类抗氧剂主要是通过提供自身 H 原子, H 原子与过氧化自由基 ROO 结合并生成过氧化氢物。抗氧化剂自身生成为稳定自由基的化合物, 抗氧化剂通过牺牲自身的 H 原子从而保护了聚乙烯链段的完整性。最常用的抗氧剂化学名称为 4,4'-硫代双(6-叔丁基-3-甲基苯酚), 分子式为 C₂₂H₃₀O₂S。抗氧剂主要通过多步法制备, 常用方法是通过叔丁醇经催化剂脱水后制取异丁烯, 异丁烯再与间甲酚聚合制 2-叔丁基-5-甲基苯酚, 2-叔丁基-5-甲基苯酚再与 SCl₂ 缩合即制得抗氧剂。在反应过程中几乎每一步骤中均需要催化剂, 这些催化剂通常为金属氧化物, 多步骤反应后得到的抗氧剂纯度最高通常不超过 98%, 其余的为杂质和灰分。这些杂质和灰分通常为金属离子或一些极性离子的化合物残留, 当抗氧剂加入聚乙烯中, 这些极性杂质不可避免地会带入绝缘材料中。目前研究主要集中于交联副产物种类^[27-29]、交联副产物对空间电荷和电导性能的影响

响^[30-34]以及交联副产物的去除^[35-36],但对交联剂、抗氧剂的品质引起的杂质影响鲜有报道。

2 电缆本体技术难点

电缆绝缘结构设计是电缆设计的核心。直流电缆绝缘结构与交流电缆相比存在显著差异,交流绝缘中的电场分布与绝缘介电常数成反比,而直流电缆却与电导率成反比^[37-38]。交流电缆绝缘中几乎不存在空间积聚问题,而直流电缆由于定向电场的持续作用,空间电荷积聚效应明显^[39-41]。目前直流电缆绝缘结构设计主要面临以下主要难题:1)片状厚尺度绝缘材料(几至几十毫米)的直流击穿、冲击等电气性能参数缺少;2)绝缘料的电导非线性变化叠加空间电荷引起电场畸变,绝缘中电场强度难以准确确定;3)绝缘设计时材料老化寿命指数 n 取值缺乏充分理论和实验支撑。要实现电缆设计理论和方法的突破,必须克服以上难点,纳入空间电荷及电导与温度和电场的定量关联关系,结合不同厚度下直流绝缘电压耐受指数、空间电荷与电导的尺寸效应系数,准确考虑老化性能,从而建立起科学合理的直流电缆绝缘结构设计方法。

2.1 绝缘材料场强设计

绝缘材料的电气特性参数是电缆绝缘设计的基础,其中最为关注的是绝缘材料的直流击穿和冲击强度。目前针对此方面的研究很多,但大部分对击穿的研究仅局限于平板试样,测试厚度从几十微米到几百微米不等,很少达到毫米尺度^[42-43]。在进行直流绝缘设计时,所需的绝缘击穿和冲击场强通常采用外推法确定。所谓的外推法^[44]是认为击穿场强 E_b 与绝缘厚度间存在着指数关系, $E_b = m_0 d^{-m_1}$, 其中, d 是材料的厚度, m_0 和 m_1 是 2 个与材料相关的系数。通过测试不同微米尺度的绝缘击穿场强计算出系数 m_0 和 m_1 , 然后利用场强与厚度间指数关系式外推出电缆绝缘的击穿场强。目前由薄片试样的耐受、击穿场强外推电缆绝缘的耐受、击穿场强方法与实际情况相差很大,主要是外推数值受到系数选取影响较大,且缺乏有效试验验证。针对不同的 XLPE 绝缘材料击穿场强与厚度间关系也可能并不完全符合指数关系。

为保证电缆设计的可靠性,需要对与电缆绝缘厚度尺度相当的样品的击穿参数开展研究:1)研究绝缘击穿特性与厚度指数关系有效性;研究电缆绝缘击穿场强与电缆厚度间关系,研究环境因素对绝

缘击穿影响;研究厚度尺寸形状对击穿场强的影响;分析击穿概率分布,以此为基础研究不同厚度下电缆的击穿概率。2)研究大厚度绝缘样品测量方法,直流场下大厚度试样击穿需要电源电压很高,同时要确保测试样品不发生沿面放电。针对大厚度绝缘试样的击穿场强,需要开展试验测试系统和专用电极的系统研究。

2.2 直流绝缘中实际电场确定

在直流场下绝缘材料的电导率通常会随温度和场强发生变化,而电导率的变化又引起电场变化,电导率、温度、电场三者之间存在相互耦合作用,从而使绝缘中最大场强的位置随着电缆中温度、场强的变化而不断变化。此外,直流场下 XLPE 绝缘料还存在空间电荷积聚,导致绝缘内局部电场畸变。由于绝缘中存在电导率随温度、场强耦合变化及空间电荷畸变等,因此,在进行直流电缆绝缘结构设计时,难以确定绝缘中准确的实际电场强度,从而为电缆绝缘结构设计带来困难^[45-46]。要准确确定绝缘中实际电场,须针对同轴电缆绝缘中的电导和空间电荷特性开展研究。需要研究厚绝缘高温梯度下电缆绝缘结构中空间电荷和电导对电场分布的影响,并在此基础上研究电场和热场耦合作用,及温度梯度下电缆绝缘中电场分布的仿真计算方法^[47-48]。

电导性能的尺寸形状效应研究为:目前针对电导率的测试通常采用平板电极,在此基础上建立了绝缘材料的电导-温度-场强关系模型。在电缆设计时通常直接采用此模型,但实际电缆绝缘是空心圆柱形,在运行工况下绝缘中温度内高外低,沿着径向绝缘材料中存在温度和电场梯度^[49-50],同时还存在着电导物理路径沿径向的尺寸形状效应^[51-52]。目前并不清楚现有平板试样在温度、电场梯度和电导路径尺寸形状效应共同作用下的电导模型等效性。为此,需开发能够模拟同轴电缆绝缘电、热场复合作用同轴电缆绝缘材料电导测试方法和系统;系统研究温度和电场梯度下,不同尺度同轴绝缘试样的电导特性,构建尺度效应模型,进而建立涵盖尺寸因素同轴试样绝缘材料电导率模型。

电缆绝缘空间电荷电荷效应研究为:基于电声脉冲法(pulsed electro-acoustic method, PEA)的空间电荷测量方法^[53],最早由日本科学家 T. Takada 提出,此方法应用最为广泛,适用于测试平板、模型电缆和真型电缆试样的空间电荷。目前针对平板薄片试样的空间电荷研究已比较充分,但由于薄片试

样与电缆绝缘的厚度和形状存在差异, 很难反映真实电缆内部的空间电荷特性, 为此需开展平板与同轴试样的空间电荷等效性及真型电缆的空间电荷特性研究。J-Power 等公司在开发直流电缆时即采用了真型电缆空间电荷测试系统^[54], 得到了真型电缆中空间电荷畸变引起的电场畸变, 有力推动了该公司 500 kV 直流电缆的开发。目前我国还处于平板试样阶段, 西安交通大学、上海交通大学等一些高校开始开展模型电缆空间电荷的研究; 南网科研院已经开展了真型电缆空间电荷测试方法和测试系统的搭建研究。在电缆绝缘的电场设计时采用真型空间电荷, 真实反映绝缘中空间电荷积聚引起的电场畸变, 同时从本质上更明确空间电荷形成机理将是未来空间电荷的研究方向。

为实现这一目标, 需要做到:

1) 研究真型电缆空间电荷测量系统及测试方法, 建立同轴真型电缆中空间电荷 PEA 测量系统, 提出适用于同轴结构的绝缘中空间电荷测量的高压脉冲耦合, 信号波形检出与校正、色散及恢复的方法。

2) 开展温度和电场梯度下真型电缆绝缘中空间电荷的产生、积聚、消散等特性研究, 揭示真型电缆绝缘中空间电荷特性, 建立空间电荷对电场畸变影响定量关系模型, 为 XLPE 直流电缆绝缘中电场设计提供理论依据和数据支撑。

3) 开展平板和同轴试样下空间电荷关联特性研究, 研究两者间的等效性和差异性, 建立空间电荷演变模型, 全面系统了解直流场下绝缘中空间电荷的产生和演变规律。

2.3 电缆绝缘老化寿命指数 n 值的确定

老化寿命指数是电缆绝缘结构设计、强度校核以及寿命预期的重要参数。目前 XLPE 直流电缆投运时间最长不超过 20 a, 对其寿命评估的研究甚少。国际大电网组织(CIGRE)推荐的 500 kV 挤出直流电缆系统的性能测试和试验方法 CIGRE TB 496 中, 设定老化寿命指数 $n=10$ ^[55-57], 是基于以往 XLPE 电缆测试经验确定的。但是目前对直流下 n 值的了解并不充分, 实际直流 XLPE 电缆的寿命指数在国内外并无精确的数据可依。对 XLPE 直流电缆绝缘的老化状态表征和寿命评价方法的研究还基本处于空白阶段。基于电、热老化下直流电缆绝缘料的老化寿命指数研究已成为关注的焦点。XLPE 老化的直观表现是交联网状结构和分子链的肢解断裂和氧化^[58]。

1) 开展直流场下 XLPE 的电、热及空间电荷

联合作用下老化机理研究。电缆运行过程中绝缘层内外存在温度梯度, 在温度梯度场下, 将存在大量电荷迁移和注入, 造成异极性电荷在电缆绝缘低温侧积聚, 从而引起严重的电场畸变。温度梯度越大, 外加场强越高, 绝缘体内低温侧场强畸变越严重, 诱发局部放电和电树枝放电, 加速绝缘材料的老化^[59-60], 局部空间电荷放电和电树枝对 XLPE 分子结构的破坏机制是也是一个重要议题。

2) 研究电缆绝缘在不同温度下的加速电老化试验, 监测老化过程中空间电荷、电导和局部放电参数, 建立绝缘耐受时间和电场及温度间电缆绝缘的老化寿命指数间关系模型。最后要对电缆绝缘材料进行不同电压形式和温度条件下的击穿测试, 并考虑空间电荷效应, 研究老化参数对寿命指数的影响规律及寿命模型。

2.4 直流电缆工厂接头

工厂接头是直流电缆本体制作的又一技术难点, 也是海缆制造的核心技术, 相关研究报道极少。工厂软接头用于连接两段电缆, 外径与电缆外径大致相当, 图 2 是 500 kV 直流电缆工厂接头结构示意图。工厂接头的增强绝缘材料通常采用与电缆本体相同的 XLPE 材料, 其制作过程涉及导体的连接以及绝缘和屏蔽新旧界面的恢复。经验表明, 在直流场下界面往往是薄弱环节, 界面的处理工艺也尤为重要^[61-62]。由于软接头电缆本体绝缘恢复后不可避免存在界面, 而界面两侧绝缘材料电导的性能差异容易造成界面处电荷积聚, 将成为击穿的诱发点。H. Fukagawa 等通过 ± 250 kV 直流工厂软接头试验, 发现 4 次击穿均发生在界面区域。近年来, 国内相关电缆公司开展 500 kV 直流电缆工厂软接头的研制, 也发现存在类似现象。工厂接头界面的电场应力控制是工厂接头设计的关键因素。研究发现, 在新旧界面两侧的材料电导率、空间电荷及击穿等性能上并无明显差异。实际经验却表明界面处容易成为故障的起始点, 表明在绝缘恢复过程中在界面处材料的电气性能降低。

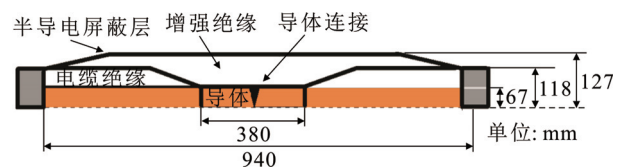


图 2 500 kV 直流电缆工厂接头^[63]

Fig.2 Factory joints of the 500 kV direct current cable^[63]

针对此发现, 需要: 1) 开展界面处材料的微观形态分析, 研究微观结构连续性; 2) 开展界面的恢复工艺研究, 包括工厂接头绝缘界面的锥度设计研究、界面绝缘恢复温度、工艺控制等。目前工厂接头的界面性能主要通过含工厂接头电缆的耐压和型式试验来验证。由于工厂接头在制造过程时, 手工操作环节较多, 质量分散大, 如何测试分析接头内部和界面质量也将是工厂接头技术的一个研究方向。

3 电缆附件技术难点

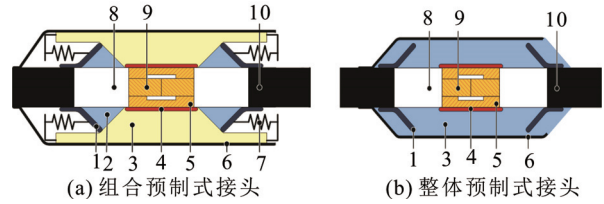
直流电缆附件包括中间接头和终端两部分, 中间接头有整体预制式和组合式预制式 2 种, 中间接头结构如图 3 所示, 终端和中间接头的应力锥在设计上并无明显差异。直流电缆附件在运行过程中承受电场、温度梯度场、机械应力场等场的复合作用, 直流电缆附件汇集了多层介质界面电导匹配、界面电荷抑制、电场优化控制等直流场下的几乎所有关键技术难点^[63-66]。在 500 kV 高压直流电缆系统的研制上, 附件是一大瓶颈, 也是电缆系统开发必须克服的难题。

3.1 附件与电缆本体匹配

相对于电缆本体, 电缆附件的界面效应更为显著, 直流电缆附件在设计过程中如何协同考虑直流电场、导芯发热引起的温度梯度及界面电荷现象, 以及合理匹配电缆与附件材料至关重要^[67-68], 必须要开展电缆本体与附件绝缘异种介质界面的匹配技术研究。电缆与附件绝缘异种介质界面的匹配主要包括电气性能和热机械性能的匹配, 其中电气性能的匹配要考虑界面两侧主绝缘材料电导率在不同的温度和电场下匹配性; 热机械性能要考虑附件与本体绝缘在热收缩膨胀过程中的界面压力匹配。要实现界面的合理匹配, 必须深入研究绝缘层状复合后的电导和热学特性, 以及附件和电缆本体绝缘在不同温度下收缩膨胀引起的界面错配及对附件界面电场和空间电荷的影响。研制性能更好的附件和电缆界面过渡材料, 既有利于空间电荷消散, 又能提高界面沿面闪络性能。

3.2 附件关键部位的结构设计

附件关键部件的结构形状和界面的压力对控制附件体内和界面电场至关重要^[69-70], 需要对附件结构和界面压力开展深入研究。附件的结构设计通常采用多物理场分析软件辅助设计, 通过仿真能方便地调整应力锥、高压屏蔽管等关键部件的形状和



1—应力锥半导电部分; 2—应力锥绝缘部分; 3—增强绝缘; 4—高压屏蔽管; 5—连接金具; 6—增强绝缘屏蔽; 7—弹簧装置; 8—电缆绝缘层; 9—电缆导体; 10—电缆绝缘层屏蔽

图3 附件中间接头结构示意图

Fig.3 Structure of accessory middle joints

尺寸, 实现电场的优化, 但软件仿真通常基于理想化边界条件, 实际在热场、电场及空间电荷共同作用下, 边界条件可能失真。需要对多物理场协同作用下附件材料的特性进行研究, 建立可靠的材料特性数学模型, 通过附件应力锥、高压屏蔽管等关键结构设计进行优化控制附件体内、界面电场。合理控制界面压力稳定性和持久性是电缆附件可靠运行的关键。大的界面压力可以抑制界面起始放电的发生、发展, 但界面压力大意味着扩张量大, 可能导致橡胶撕裂损伤, 须在界面压力和扩张量间取得平衡。因此, 附件扩张过程中绝缘从内到外的径向、切向应力和界面压力特性, 以及附件在扩张态绝缘层内应力对材料的电性能影响和影响机理是未来的研究方向之一。

3.3 附件安装工艺控制

高压直流电缆附件的安装也是影响附件质量的关键因素之一, 甚至直接决定附件运行可靠性, 但高压直流电缆附件的安装技术也是附件研究的难点。高压直流电缆附件安装工艺复杂, 且对工艺要求苛刻。附件安装过程中, 导体连接处理、电缆的校直、绝缘表面切削打磨、附件扩张等均靠手工操作, 工艺稳定性不易控制, 质量分散大。因此必须对附件制作安装工艺开展深入研究, 制定详细的质量控制流程才可能确保安装质量, 首先要研究不同工艺可能产生的质量缺陷, 比如收缩不均匀、硅脂涂覆不均、界面混入杂质微粒等可能缺陷, 采用仿真、试验手段分析评估各类附件缺陷尺寸、形状特性引起的材料损伤和电场畸变。研究安装工艺标准化流程的实现方法, 研究不同的工艺流程机械化或自动化安装的方法, 研究不同工艺流程的可靠性操作方法。

4 结论

1) 随着对高压直流电缆 XLPE 绝缘料研究的不断深入, 从材料的宏观电、机、热性能到其微观结构, 建立起分子链结构、结晶形态微结构和宏观电气性能的关系, 从而实现 XLPE 直流绝缘材料的性能调控, 满足不同电压等级直流电缆的绝缘要求。

2) 在电缆绝缘材料的击穿场强获取上, 由目前微米薄片试样向大厚度试样发展。针对大厚度试样的实验方法、实验系统, 需要在充分考虑同轴电缆温度、电场梯度、绝缘的厚度和形状效应的基础上开展绝缘中电导和空间电荷效应的研究。绝缘中空间电荷和电导的研究方法也将由目前的平板试样向同轴真型电缆试样发展, 电、热、空间电荷联合作用下 XLPE 直流电缆寿命指数 n 值模型也需开展深入研究。

3) 工厂接头和中间接头及终端都面临着直流下界面处理的难题, 针对直流下界面容易成为电缆部件故障起始位置的研究问题, 需要从界面故障产生的机理出发, 研究界面特性、界面处理工艺及接头锥度及长度设计。

4) 在电缆附件(中间接头和终端)研究方面, 需要在附件与电缆本体在电、热、机多物理场下异种绝缘介质材料的匹配技术、附件关键部件的结构设计、界面电场和压力等关键参数控制以及附件安装工艺标准化质量控制等方面开展深入研究。

参考文献 References

- [1] 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.
- [2] 杨勇. 高压直流输电技术发展与应用前景[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(9): 58-60.
YANG Yong. High voltage DC transmission technique and its future application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 58-60.
- [3] 赵健康, 赵鹏, 陈铮铮, 等. 高压直流电缆绝缘材料研究进展综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3490-3503.
ZHAO Jiankang, ZHAO Peng, CHEN Zhengzheng, et al. Review on progress of HVDC cables insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3490-3503.
- [4] LEE S B, LEE T H, JUNG E H, et al. Development of 250 kV HVDC XLPE cable system in Korea[C]//IEEE Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Niigata, Japan: IEEE, 2014: 334-337.
- [5] ENGLUND V, ANDERSSON J, BOSTROM J O, et al. Characteristics of candidate material systems for next generation extruded HVDC cables[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2014: D1-104.
- [6] LIU R S. Long-distance DC electrical power transmission[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(5): 38-46.
- [7] AMIRHOSSEIN A, HOANG A, BERGELIN P, et al. Performance evaluation of 525 kV and 640 kV extruded DC cable systems[C]//10th International Conference on Insulated Power Cables. Versailles, France: [s.n.], 2019: A9-4.
- [8] SEBASTIAN E, FLORIAN S, DIEDERICH S. Extruded XLPE DC underground-cable technology and experiences up to 525 kV[C]//VDE-Hoch Spannungstechnik. Berlin, Germany: [s.n.], 2016: 8-13.
- [9] 李国倡, 李盛涛, 闵道敏, 等. 陷阱密度对低密度聚乙烯空间电荷形成与积累特性的影响[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(4): 375-381.
LI Guochang, LI Shengtao, MIN Daomin, et al. The influence of space charge form and accumulation of low density polyethylene trap density[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2013, 43(4): 375-381.
- [10] 雷清泉, 范勇, 王瞳. 纳米高聚物复合材料的结构特性应用和发展趋势及其思考[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 1-7.
LEI Qingquan, FAN Yong, WANG Xuan. Structure property applications and developing trends of polymer nanocomposites[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 1-7.
- [11] GIAN C M, PETER H F M, ZHOU M Y, et al. Criteria influencing the selection and design of HV and UHV DC cables in new network applications[J]. High Voltage, 2018, 3(2): 90-95.
- [12] 曹晓珑, 徐曼, 刘春涛, 等. 纳米添加剂对聚合物击穿性能的影响[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 8-12.
CAO Xiaolong, XU Man, LIU Chuntao, et al. Influence on breakdown property of polymer with nano-additive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 8-12.
- [13] TEYSSEDRE G, LAURENT C. Charge transport modeling in insulating polymers: from molecular to macroscopic scale[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 857-870.
- [14] 曹晓珑, 钟力生. 电气绝缘技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 145-150.
CAO Xiaolong, ZHONG Lisheng. Technical basis of electrical insulation[M]. Beijing, China: Machinery Industry Press, 2009: 145-150.
- [15] MAZZANTI G, MARZINTOTTO M. Extruded cable for high voltage direct current transmission[M]. Hoboken, USA: IEEE Press, 2013: 49-95.
- [16] 李维康, 张翀, 闫轰达, 等. 高压直流电缆用交联聚乙烯绝缘材料交联特性及机理[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3599-3606.
LI Weikang, ZHANG Chong, YAN Hongda, et al. Crosslinking characteristic and mechanism of cross-linked polyethylene insulating materials used for high voltage direct current cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3599-3606.
- [17] 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.
- [18] FABIANI D, MONTANARI G, LAURENT C, et al. Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(6): 11-19.
- [19] 田付强, 马万里. 挤塑高压直流电缆绝缘中空间电荷问题研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2231-2239.
TIAN Fuqiang, MA Wanli. Research progress in space charge problems in extruded HVDC cable insulations[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2231-2239.
- [20] TANAKA A, TOSHIKATSU U. Advanced power cable technology[M]. Florida, USA: CRC Press, 1983: 45-64.
- [21] 江平开, 孙小金, 黄宇, 等. 纳米氧化镁聚丙烯复合绝缘材料的制备及其性能[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 355-366.
JIANG Pingkai, SUN Xiaojin, HUANG Yu, et al. Preparation of MgO/polypropylene insulation nanocomposites and their properties[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 355-366.

- [22] 陈曦, 王霞, 吴锴, 等. 聚乙烯绝缘中温度梯度效应对直流电场的畸变特性[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 62-65.
CHEN Xi, WANG Xia, WU Kai, et al. Temperature gradient effect on distortion of DC electrical field in poly ethylene[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(4): 62-65.
- [23] DISSADO L A, LAURENT C, MONTANARI G C. Demonstrating a threshold for trapped space charge accumulation in solid dielectrics under DC field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 3(12): 612-619.
- [24] BODEGA R, MONTANARI G. Conduction current measurements on XLPE and EPR insulation[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Boulder Colorado, USA: IEEE, 2004: 101-105.
- [25] 甄建. 我国XLPE电缆料及基础树脂的发展概况[J]. 合成树脂及塑料, 2003, 20(6): 43-48.
ZHEN Jian. The development of cable compounds of crosslinked polyethylene and its basic resin in China[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2003, 20(6): 43-48.
- [26] 鄢薇, 甄建, 薛志刚. 可交联PE电缆用半导体屏蔽料开发现状[J]. 合成树脂及塑料, 2012, 29(4): 75-79.
YAN Wei, ZHEN Jian, XUE Zhigang. Development situations of semiconducting XLPE cable shielding material[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2012, 29(4): 75-79.
- [27] 赵健康, 彭超, 蒙绍新. 110 kV XLPE 电缆绝缘杂质分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 56-57.
ZHAO Jiankang, PENG Chao, MENG Shaoxin. Impurity analysis in the 110 kV XLPE cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 56-57.
- [28] HAO M, FAZAL A, VAUGHAN A S, et al. The impacts of degassing on space charge characteristics and DC conductivity in semi-con-bonded XLPE for HVDC cable applications[C] // IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Toronto, Canada: IEEE, 2016: 97-100.
- [29] 王亚, 吕泽鹏, 吴锴, 等. 高压直流 XLPE 电缆研究现状[J]. 绝缘材料, 2014, 47(1): 22-25.
WANG Ya, LÜ Zepeng, WU Kai, et al. Research status of HVDC XLPE cable[J]. Insulating Material, 2014, 47(1): 22-25.
- [30] 高宇, 王小芳, 李楠, 等. 聚合物绝缘材料载流子陷阱的表征方法及陷阱对绝缘击穿影响的研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2219-2230.
GAO Yu, WANG Xiaofang, LI Nan, et al. Characterization method for carrier trap and the effect on insulation breakdown within polymer insulating materials[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2219-2230.
- [31] 田付强, 杨春, 何丽娟, 等. 聚合物/无机纳米复合电介质介电性能及其机理最新研究进展[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 2-12.
TIAN Fuqiang, YANG Chun, HE Lijuan, et al. Recent research advancement in dielectric properties and the corresponding mechanism of polymer/inorganic nanocomposite[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 2-12.
- [32] HO Y F F, CHEN H G, DAVIES A E, et al. Effect of semiconducting screen on the space charge dynamic in XLPE and polyolefin insulation under DC and 50 Hz AC electric stresses conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 393-403.
- [33] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. HVDC cable design and space charge accumulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(2): 6-13.
- [34] TERUYOSHI M. Behavior of charge carriers in organic insulating materials[C]//IEEE Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kansas, USA: IEEE, 2006: 393-403.
- [35] MONTANARI G C, MAZZANTI G, PALMIERI F, et al. Space-charge trapping and conduction in LDPE, HDPE and XLPE[J]. Journal of physics D: Applied Physics, 2001, 34(18): 2902-2911.
- [36] 李欢, 李建英, 王琦梦, 等. 热处理前后非脱气交联聚乙烯的介电性能和机械性能分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1237-1242.
LI Huan, LI Jianying, WANG Qimeng, et al. Investigation of dielectric and mechanical properties of undegassed XLPE cable with thermal treatment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1237-1242.
- [37] 屠德民, 阚林. 高氏聚合物击穿理论的验证及其在电缆上的应用[J]. 西安交通大学学报, 1989, 33(2): 7-26.
TU Demin, KAN Lin. Verification and application of KAO's theory of polymer dielectric breakdown[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1989, 33(2): 7-26.
- [38] 王雅群. 高压直流塑料电缆中空间电荷抑制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
WANG Yaqun. Research on the suppression method of space charge in HVDC plastic insulated cable[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [39] 应启良. 高压及超高压 XLPE 电缆附件的技术进展[J]. 电线电缆, 2000(1): 3-11.
YING Qiliang. Technical progress of the accessories for high and extra high voltage XLPE cables[J]. Electric Wire & Cable, 2000(1): 3-11.
- [40] 吴叶平, 顾金, 吴建东, 等. 挤包绝缘高压直流电缆及附件绝缘性能的研究[J]. 电线电缆, 2011(6): 24-27.
WU Yeping, GU Jin, WU Jiandong, et al. Investigation of electrical insulation properties of extruded high voltage DC cable and its accessory[J]. Electric Wire & Cable, 2011(6): 24-27.
- [41] 古亮. 交联聚乙烯-硅橡胶界面电荷破坏现象研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
GU Liang. Tracking failure at interface between XLPE and silicon-rubber[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2010.
- [42] CHAKRADHAR R C, RAMU T S. Polymer nanocomposites as insulation for HVDC cables investigations on the thermal breakdown[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(1): 221-227.
- [43] HESTAD O L, MAUSETH F, KYTE R H. Electrical conductivity of medium voltage XLPE insulated cables[C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation(ISEI). San Juan, USA: IEEE, 2012: 376-380.
- [44] LIU R S, GUSTAVO D, ANDREAS F. Impulse breakdown of extruded cable insulation materials[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2011: 518-521.
- [45] LAURENCEAU P, DREYFUS G, LEWINER J. New principle for the determination of potential distribution in dielectrics[J]. Physical Review Letters, 1977, 38(1): 46-49.
- [46] 李忠华, 刘乐乐, 郑欢, 等. HVDC 电缆电场分布影响因素的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2563-2571.
LI Zhonghua, LIU Lele, ZHENG Huan, et al. Simulation on the influence factors of electric field distribution in HVDC cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2563-2571.
- [47] WEEDY B M, CHU D. HVDC extruded cables parameters for determination of stresses[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1984, 1(3): 662-667.
- [48] VILLGOT E, VIRGINIE E, WENDY L, et al. The development route towards extra high voltage DC materials and testing[C]//HVDC17 International Symposium on HVDC Cable Systems. Dunkirk, France: [s.n.], 2017: 1-6.
- [49] ZHANG Y W, ALQUI C, LEWRNER J. Effect of the thickness of insulators on the build up of a space charge distribution[C]//IEEE International Symposium on Electrets. Paris, France: IEEE, 1994: 928-933.
- [50] WINTLE H J. Charge motion and trapping in insulators surface and bulk effects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1999, 6(1): 1-10.
- [51] MAENO T, FUTAMI T, KUSHIBE H, et al. Measurement of spatial charge distribution in thick dielectrics using the pulsed electroacoustic method[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1988, 23(3): 433-439.
- [52] TERASHIMA K, SUZUKI H, HARA M, et al. Research and devel-

- opment of +250 kV DC XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 7-15.
- [53] MURATA Y, KANAOKA M. Development history of HVDC extruded cable with nanocomposite material[C]//8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Bali, Indonesia: IEEE, 2006: 460-463.
- [54] FOTHERGILL J C. The coming of age of HVDC extruded power cables[C]//Electrical Insulation Conference. Philadelphia Pennsylvania, USA: IEEE, 2014: 124-136.
- [55] CIGRE Working Group B1.32. Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV[R]. Paris, France: CIGRE, 2012.
- [56] 李志伟, 金海云, 张涛, 等. 脱气时间对 XLPE 电缆绝缘材料聚集态结构与链结构的影响[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(4): 3-9.
LI Zhiwei, JIN Haiyun, ZHANG Tao, et al. Effect of degassing time on aggregation structure and chain structure of XLPE cable insulation on material[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(4): 3-9.
- [57] ALGHOFALI H, METWALLY A. Standardization and optimization of high voltage cables design[C]//10th International Conference on Insulated Power Cables. Versailles, France: [s.n.], 2019: A2-1.
- [58] WEI Y H, HAN W, LI G C, et al. Research progress of semiconductive shielding layer of HVDC cable[J]. High Voltage, 2020, 5(1): 1-6.
- [59] YAMANAKA T, KUNURA T, MURATA Y, et al. Development of coaxial integrated return conductor DC extruded insulation cable and factory joint[C]//Transmission & Distribution Conference & Exhibition. Yokohama, Japan: IEEE/PES, 2002: 1284-1289.
- [60] 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): 3175-3183.
- [61] MARUYAMA T, ISHII N, SHIMADA M. Development of a 500 kV DC XLPE cable system[J]. Furukawa Review, 2004(25): 47-52.
- [62] CHU D, WEEDY B M, DAVIES A E. Electric stresses in an HVDC cable through joint[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(2): 383-388.
- [63] KUBOTA T, TAKAHASHI Y. Development of 500 kV XLPE cables and accessories for long distance under ground transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1741-1749.
- [64] STANCU C, NOTINGHER P V, NOTINGHER P. Space charge and electric field in thermally aged multilayer joints model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 633-644.
- [65] 柳松, 彭佳康, 王霞. 高压电缆附件界面压力的影响因素分析[J]. 绝缘材料, 2013, 46(6): 66-69.
LIU Song, PENG Jiakang, WANG Xia. Influence factors analysis of interface pressure in high voltage cable accessories[J]. Insulating Material, 2013, 46(6): 66-69.
- [66] 王佩龙. 高压电缆附件的电场及界面压力设计[J]. 电线电缆, 2011(5): 1-4.
WANG Peilong. Electrical field and interface pressure control in HV cable accessories design[J]. Electric Wire & Cable, 2011(5): 1-4.
- [67] 尚康良, 曹均正, 赵志斌, 等. 320 kV XLPE 高压直流电缆接头附件仿真分析和结构优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 2018-2024.
SHANG Kangliang, CAO Junzheng, ZHAO Zhibin, et al. Simulation analysis and design optimization of 320 kV HVDC cable joint[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 2018-2024.
- [68] HAN P, ZHA J W, WANG S J, et al. Theoretical analysis and application of polymer-matrix field grading materials in HVDC cable terminals[J]. High Voltage, 2017, 2(1): 39-46.
- [69] YE H Y, FECHNER T, LEI X Z. Review on HVDC cable terminations[J]. High Voltage, 2018, 3(2): 79-88.
- [70] LI G J, KUWAKI A, SUMIMOTO T, et al. Development of 500 kV XLPE cable accessories[C]//9th International Conference on Insulated Power Cables. Versailles, France: [s.n.], 2015: A4.4.



CHEN Xin
Ph.D., Professor
Corresponding author

陈新(通信作者)
1973—, 男, 博士, 教授级高工
主要从事电工新材料技术、高压电气绝缘材料及工艺研究
E-mail: seasung1973@163.com



LI Wenpeng
Ph.D. candidate
Senior engineer

李文鹏
1984—, 男, 博士生, 高工
主要从事高压电缆及附件相关研究
E-mail: lwp1017@126.com



LI Zhenyu
Ph.D., Professor

李震宇
1979—, 男, 博士, 教授级高工
主要从事电网电力装备技术研究工作
E-mail: zhenyu-li@sgcc.com.cn



ZHANG Chong
Ph.D.
Senior engineer

张翀
1982—, 男, 博士, 高工
主要从事高压电气绝缘材料相关研究
E-mail: zhangc_sgri@163.com



GUAN Jianxin
Senior engineer

关键昕
1988—, 男, 高工
主要从事高压电缆及变压器电气绝缘研究
E-mail: shenyanggj.2008@163.com



ZHONG Lisheng
Ph.D., Professor

钟力生
1961—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事电介质与电气绝缘方向研究
E-mail: lszhong@mail.xjtu.edu.cn