

挤包绝缘高压直流电缆制造与应用中的径向梯度效应

李飞1, 钟力生1, 李文鹏1.2, 高景晖1, 任海洋1, 张翀2

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室,陕西西安 710049; 2. 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)

摘 要:挤包绝缘高压直流电缆在直流输电工程中应用广泛,但制造与应用中的梯度效应显著影响其直流 电气性能。以500 kV 交联聚乙烯直流电缆为研究对象,首先,通过仿真计算理想均匀绝缘电缆中的场强分 布;然后,计算交联和脱气过程中绝缘层的温度分布,并对电缆绝缘切片取样,测量不同径向位置绝缘的 相态结构和直流电气性能;最后,根据实测电导率对电缆绝缘中场强分布进行仿真。结果显示:电缆绝缘 在交联和脱气过程中存在温度梯度,绝缘的相态结构和直流电气性能在径向上分布不均匀,绝缘电导率在 径向上的梯度分布导致电缆绝缘中场强均呈现出内低外高的分布规律,且最外侧绝缘的场强大于均匀绝缘 中的最高场强。

关键词:高压直流电缆;挤包绝缘;梯度效应;直流电气性能;场强分布 DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202006208

0 引言

高压直流电缆相比高压交流电缆具有传输容 量大、线路损耗低的优点,在长距离输电、新能 源并网、非同步系统互联等方面具有优势^[1]。随 着电力系统发展和新能源并网需求的增加,高压 直流电缆得到了广泛应用。高压直流电缆按绝缘 类型可分为绕包绝缘电缆和挤包绝缘电缆。其 中,绕包绝缘电缆包括全浸渍不滴流(MIND) 绝缘电缆和聚丙烯层压纸(PPLP)绝缘电缆等; 挤包绝缘电缆包括交联聚乙烯(XLPE)绝缘电 缆、纳米复合交联聚乙烯电缆和热塑性弹性体 (HPTE)绝缘电缆等^[2-4]。

自 1954 年高压直流电缆出现以来,绕包绝缘 电缆一直被广泛使用,目前绕包绝缘高压直流电 缆工程应用最高电压等级已达到 600 kV,输送容 量达 2200 MW,然而其导体工作温度较低,接头 安装不便,运行维护困难,限制了其在长距离陆 地电缆工程中的应用^[5]。挤包绝缘高压直流电缆

由于其制造工艺简单、传输容量大等优点在工程 中的应用迅速推广。1999年, 首条 80 kV XLPE 绝 缘直流电缆问世[6]。目前投运的挤包绝缘直流电 缆最高电压等级和传输容量达到 400 kV/1000 MW, 电压等级超过 600 kV 的挤包绝缘直流电缆正在开 发中。挤包绝缘电缆中应用最为广泛的是 XLPE 绝缘电缆, 在高压直流 XLPE 电缆制造过程 中,通常采用过氧化二异丙苯 (DCP) 作为交联 剂在高温硫化管道中引发交联反应, 交联过程中 DCP 会分解产生枯基醇、α-甲基苯乙烯、苯乙 酮、甲烷和水等副产物[2]。为了降低交联副产物 对电缆绝缘性能的影响,完成交联的电缆线芯还 需要在高温下进行脱气处理。由于高压直流电缆 绝缘层厚度较大且导热性差,因此在交联和脱气 过程中绝缘层中存在明显的温度梯度, 使得绝缘 层的交联度、结晶度和交联副产物含量亦出现梯 度分布^[7-10]。由于 XLPE 绝缘的直流电导率受载流 子浓度[11-12](如副产物含量)和迁移率[13-14] (如晶相结构)影响较大,其直流电导率也出现 梯度分布,导致 直流 XLPE 电缆中出现电场畸变 问题[15-17],而其相对介电常数受影响不大,因此 直流电缆的电场畸变问题比交流电缆更突出。 HPTE 绝缘电缆虽然不需要进行高温交联, 但其 在高温挤塑后的冷却过程中也存在温度梯度,从

收稿日期: 2020-06-23; 修回日期: 2020-08-14。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB 0900702);国家电网有限公司科技项目(SGZJ0000KXJ 1900243)。

中国电力



而导致其绝缘层的结晶度出现梯度分布,影响其 直流电气性能。

本文以 500 kV 直流 XLPE 电缆为研究对象, 对电缆在交联和脱气过程中温度梯度分布进行仿 真分析,将电缆绝缘环切成薄片试样,并研究不 同径向位置绝缘试样的相态结构及其直流电气性 能的变化特征,分析绝缘结构与性能分布的非均 匀性对电缆运行的影响。

1 电缆运行中温度梯度对均匀绝缘电场 分布的影响

以 500 kV 直流 XLPE 电缆为研究对象,其材 料参数如表1所示,通常在工程设计中认为电缆 绝缘层为均匀介质,其电导率与温度、场强的函 数可以表示为

$$\sigma(T,E) = \mu \mathrm{e}^{\alpha T} E^{\beta} \tag{1}$$

式中: σ 为实际温度及场强下的绝缘电导率, S/m; μ 为与材料有关的常数; α 为温度系数, K⁻¹;*T*为温度,K;*E*为电场强度,kV/mm; β 为 场强系数。

表 1 500 kV 直流 XLPE 电缆材料参数 Table 1 The materials parameter of 500 kV DC XLPE cable

4士林1	导热系数/	密度/	恒压热容/	电导率/
与中心	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	(kg·m ⁻³)	$(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$(S \cdot m^{-1})$
铜导体	401	8 940	385	—
导体屏蔽	0.28	1 120	2 700	0.1
XLPE绝缘	0.29	980	2 200	$\sigma(T, E)$
绝缘屏蔽	0.28	1 120	2 700	0.1
阻水层	0.08	200	60	_
金属护套	250	8 940	385	—
外护套	0.29	968	2 532	_

使用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 对 电缆进行温度场和电场仿真。设置环境温度为30℃, 外护套对空气的传热系数为10 W/(m²·K), 电缆满载情况下导体温度为70℃,获得电缆满载 时温度分布云如图1所示,最内层绝缘温度为 68.03℃,最外层绝缘温度为49.38℃,电缆绝缘 层中温度呈梯度分布。

将电缆绝缘层视为均匀介质,计算出均匀绝



图 1 电缆满载时温度分布 Fig. 1 Temperature distribution of the cable under fullload condition

缘的电缆空载(30 ℃)和满载(70 ℃)时在 1.0 U_0 、1.45 U_0 和1.85 U_0 电压下绝缘层的场强分 布,如图2所示,最内层和最外层绝缘的场强如 表2所示。当绝缘层的电导率与温度、场强的函 数关系发生变化时,电场分布略有差异,但变化 趋势基本一致。

从图 2 和表 2 可知,电缆绝缘层中场强分布 受温度梯度影响很大。当电缆空载时,绝缘层中 的温度分布均匀,内层绝缘场强高于外层绝缘场 强;当电缆满载时,绝缘层中的温度分布出现梯 度,绝缘层中的场强分布出现反转,外层绝缘场 强高于内层绝缘场强,与其他研究者的结论基本 一致^[18-19]。





表 2 最内层和最外层绝缘的场强

Table 2 Electric field strength at the inner and outer layer of the insulation

位置	空载时	寸场强/(k₩	∕∙mm ⁻¹)	满载时场强/(kV·mm ⁻¹)		
	$1.0U_{0}$	$1.45U_{0}$	$1.85U_{0}$	$1.0U_{0}$	$1.45U_{0}$	$1.85U_{0}$
最内层绝缘	19.17	27.81	35.50	13.40	19.50	24.77
最外层绝缘	14.84	21.49	27.43	19.68	28.49	36.41



XLPE 绝缘层电导率与温度的指数关系产生了 电场翻转现象:电缆空载时,绝缘层基本不存在 温差,绝缘层电导率只受电场影响,绝缘层场强 分布符合均匀介质绝缘同轴电缆的场强分布,呈 内高外低;电缆满载时,绝缘层内形成温度梯 度,由式(1)可知,内层绝缘温度更高,其电 导率上升幅度显著高于外层绝缘电导率的上升幅 度,因此内层绝缘场强下降,外层绝缘场强上 升,电缆绝缘层的场强分布出现翻转。

2 电缆制造过程中温度梯度对绝缘材料 径向相态结构的影响

实际生产出来的电缆绝缘层并不是理想均匀介 质,由于绝缘材料导热性较差,电缆线芯在交联过 程以及脱气过程中绝缘层存在明显的温度梯度,导 致不同径向位置绝缘的交联、结晶和脱气过程并不 一致,因此XLPE绝缘的交联度、结晶度以及交联 副产物分布在径向上存在不均匀的分布现象。随着 直流电缆的电压等级不断提高,其绝缘厚度不断 增大,绝缘材料的径向不均匀现象也更加明显。

2.1 电缆制造过程中绝缘层温度梯度

根据 500 kV 直流 XLPE 电缆生产工艺,使用 有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 对电缆线芯 交联过程及脱气过程中绝缘层的温度变化进行仿 真,得到不同径向位置绝缘的温度变化规律,如 图 3 和图 4 所示。

从图 3 可以看出, 在电缆线芯交联过程中, 不同径向位置绝缘的温度变化规律并不一致。在 交联段,外绝缘的升温速度最快,内绝缘的升温 速度最慢,而且外绝缘达到的最高温度也显著高 于中绝缘和内绝缘; 在冷却段,外绝缘降温速度 最快,中绝缘次之,内绝缘降温速度最慢。从 图 4 可以看出,在脱气过程起始阶段外绝缘的升 温速度最快,中绝缘次之,内绝缘升温速度最 慢,脱气结束后外绝缘的降温速度最快,中绝缘 次之,内绝缘的降温速度最慢。

2.2 电缆径向相态结构的梯度分布

取2种不同基料的500 kV 直流 XLPE 电缆试 样A和B,环切成薄片试样,测量不同径向位置 绝缘试样的交联度、结晶度和副产物含量,结果 如表3~5 所示。



图 3 电缆线芯绝缘层温度随交联过程(时间)的变化 Fig. 3 Temperature change of cable insulation under crosslinking process





从表 3 可以看出,由于电缆 A 的绝缘基料中 DCP 添加量较少,其绝缘的交联度只有 65% 左 右,电缆 B 的绝缘基料中 DCP 含量更高,其绝缘 交联度达到了 84% 左右,电缆 A 和电缆 B 绝缘的 交联度从内到外逐渐降低,脱气后绝缘的交联度 均略有上升。在交联过程中,虽然内绝缘达到的 最高温度只有 185 ℃,但其在冷却段降温缓慢,

表 3 不同径向位置绝缘的交联度

Table 3 Gel content of insulation at different radial positions

	交联度/%								
状态		电缆A		电缆B					
	内绝缘	中绝缘	外绝缘	内绝缘	中绝缘	外绝缘			
脱气前	66.01	65.44	62.24	85.27	84.51	83.86			
脱气后	66.58	65.93	63.14	85.82	84.63	83.88			



表 4 不同径向位置绝缘的结晶度 Table 4 Crystallinity of insulation at different radial posi-

tions

	结晶度/%								
状态		电缆A		电缆B					
	内绝缘	中绝缘	外绝缘	内绝缘	中绝缘	外绝缘			
脱气前	40.07	39.25	38.77	28.01	30.41	27.50			
脱气后	40.97	40.21	40.18	36.70	33.37	36.64			

表 5 不同径向位置绝缘中副产物相对含量 Table 5 Relative content of the by-products in insulation at different radial positions

		副产物相对全量							
10- 1 -	副文帖								
次念	副产物		电缆A	-		电缆B			
		内	中	外	内	中	外		
脱气前	枯基醇	0.33	0.34	0.33	0.44	0.46	0.43		
	苯乙酮	0.75	0.97	0.42	1.60	2.42	2.25		
	α-甲基苯乙烯	0.66	0.68	0.66	0.87	0.96	0.93		
脱气后	枯基醇	0.30	0.30	0.31	0.32	0.40	0.31		
	苯乙酮	0.57	0.56	0.43	1.13	1.55	1.06		
	α-甲基苯乙烯	0.00	0.00	0.00	0.79	0.87	0.77		

能维持较长时间的高温,交联反应更为充分,因 此内绝缘的交联程度略高于外绝缘。经过脱气处 理后电缆 A 和电缆 B 绝缘的交联度均略有上升, 说明在脱气过程中绝缘发生了再次交联。在电缆 交联的冷却过程中,绝缘中高分子链被冻结失去 活性,交联过程停止;在脱气过程中绝缘温度升 高,高分子链获得活性,剩余的可交联自由基可 能相互结合而发生一定程度的二次交联反应,使 得脱气后绝缘交联度上升。

从表 4 可以看出,电缆 A 脱气前绝缘的结晶 度为 39% 左右,绝缘从内至外结晶度逐渐降低, 脱气后绝缘的结晶度略有上升;电缆 B 脱气前绝 缘的结晶度为 28% 左右,且中绝缘的结晶度最 高,脱气后绝缘的结晶度大幅上升至 36% 左右, 但中绝缘的结晶度反而最低。交联反应产生的网 状结构使得分子链规整性变差,柔顺性降低,抑 制了大尺寸晶粒的生长,电缆 A 绝缘的交联度较 低,因此电缆 A 绝缘的结晶度高于电缆 B 绝缘的 结晶度。脱气过程中,晶区的片晶厚度增加生长 成球晶,无定形区的分子链在苯乙酮的成核作用 下生成新的晶核,使得绝缘的结晶度增加^[9]。随 着绝缘内结晶逐渐生长完善,电缆内、中、外绝 缘的结晶度趋于一致,但是由于脱气结束后电缆 内绝缘的降温速度更慢,其结晶生长更完善,内 绝缘的结晶度略高于外绝缘。

从表 5 可以看出,脱气前电缆 A 和电缆 B 中 层绝缘的副产物相对含量最高,脱气后电缆 A 绝 缘中α-甲基苯乙烯已经完全脱出,枯基醇和苯乙 酮的相对含量降低,且分布不均匀性减小;脱气 后电缆 B 绝缘中 3 种副产物的相对含量降低,副 产物分布不均匀性略有减小。交联过程中 DCP 的 分解反应与温度有关,温度低于 160 ℃ 时主要分 解产物为枯基醇、α-甲基苯乙烯和水,温度超过 160 ℃ 时分解产物中苯乙酮和甲烷的含量开始逐 渐增加^[20]。交联过程中不同位置绝缘的温度变化 规律不同,因此交联产生的副产物也不同。脱气 过程中部分交联副产物在热场作用下从绝缘中脱 出,绝缘中剩余交联副产物的径向分布不均匀性 得到一定程度的改善。

3 相态结构径向分布对直流电气性能的影响

XLPE 绝缘的直流电气性能与其相态结构密切 相关。为研究绝缘的相态结构分布对其直流特性 的影响,将脱气后的电缆 A 环切成薄片试样,取 不同径向位置 XLPE 绝缘试样并按其距离导体屏 蔽的距离分别标记为 R₀₁、R₀₈、R₁₅、R₂₂、R₂₉, 测量试样的直流电导率、空间电荷特性和直流击 穿场强等直流电气性能,结果如图 5~7 和表 6 所示。

脱气后电缆 A 绝缘试样在不同温度和场强下 的直流电导率如图 5 所示,脱气后电缆 A 在不同 径向位置的绝缘试样的电导率呈梯度分布。在不 同的测试温度和场强下,绝缘电导率普遍表现出 从内至外不断降低的规律。这种绝缘电导率梯度 分布现象可能会改变直流电缆绝缘中的局部场 强,对电场分布产生明显影响。

脱气后电缆 A 绝缘试样在不同场强下的空间 电荷密度分布如图 6 所示,在 20 kV/mm 外施场强 下,电缆绝缘 R₀₁ 试样在电极附近存在明显的异 极性空间电荷积聚,其中靠近阴极处有大量正极 性电荷积聚,而靠近阳极处有少量负极性电荷积 聚,其他位置试样则没有明显电荷积聚;在 50 kV/mm 外施场强下, R₀₈ 试样在阴极附近存在少量正空







间电荷积聚。

脱气后电缆 A 绝缘在不同场强下的平均电荷 密度如图 7 所示,在 20 kV/mm 外施场强作用下, R₀₁ 处试样的平均电荷密度最大,其他位置试样 的平均电荷密度较小且大体相当;在 30 kV/mm 和 40 kV/mm 外施场强作用下,R₀₁ 处试样的平均 电荷密度最大,R₀₈、R₁₅和 R₂₂ 位置试样的平均电 荷密度较小且相当,R₂₉ 位置试样的平均电荷密 度略微增大;在 50 kV/mm 外施场强作用下, R₀₁ 处试样的平均电荷密度最大,R₀₈、R₁₅和 R₂₂ 位置试样的平均电荷密度最大,R₀₈、R₁₅和 R₂₂ 位置试样的平均电荷密度依次减小,R₂₉ 位置 试样的平均电荷密度略微增大。XLPE 绝缘试样 的空间电荷特性受温度和相态结构影响,呈现出 不均匀分布的现象,但还需要通过全尺寸电缆的 测试进一步明确其绝缘中的空间电荷分布特性。

脱气后电缆 A 绝缘试样在不同温度下的直流 击穿场强如表 6 所示,在 30 ℃时,绝缘的直流击 穿场强从内至外逐渐升高;在 70 ℃时,绝缘的 直流击穿场强在 R₀₁ 处最小,在 R₂₂ 处最大,其 余 3 处基本一致。总体来看,当温度升高时,电



图 6 脱气后电缆 A 绝缘的空间电荷密度 Fig. 6 Space charge density of the cable A insulation after degassing



图 7 脱气后电缆 A 绝缘不同径向位置的平均电荷密度 Fig. 7 Average charge density of different radial positions of the cable A insulation after degassing

缆绝缘的直流击穿场强下降,当温度从 30 ℃ 升 到 70 ℃ 时,击穿场强降幅较大。

4 直流电导率径向不均匀分布对电缆绝 缘电场分布的影响

电缆绝缘电导率在径向上的梯度分布会对电



表 6 脱气后电缆A 绝缘直流击穿场强 Table 6 DC breakdown strength of the cable A insulation after degassing

温度/℃	直流击穿场强/(kV·mm ⁻¹)							
	R ₀₁	R ₀₈	R ₁₅	R ₂₂	R ₂₉			
30	507.7	533.8	535.2	540.4	542.4			
70	207.2	213.1	212.3	231.4	214.8			

缆绝缘中的电场分布产生明显的影响。以电缆 A为例,将脱气前和脱气后的电缆A环切成薄片 试样,取不同径向位置XLPE绝缘试样并测量其 在不同温度和场强下的直流电导率。根据式 (1)对电导率数据进行最小二乘法拟合处理。 考虑到电缆空载时,绝缘温度与环境温度相同且 绝缘中不存在温度梯度,电缆满载时,绝缘温度 高于环境温度且绝缘中出现温度梯度,因此对 30°C下的绝缘电导率进行单独拟合,用于计算空 载条件下的电场分布;对50~90°C的绝缘电导率 进行拟合,用于计算电缆满载条件下的电场分 布。得到脱气前和脱气后电缆绝缘试样电导率拟 合参数如表7和表8所示。

根据电缆绝缘电导率的拟合结果,对脱气前 和脱气后电缆 A 空载和满载时在不同电压下的电 场分布进行仿真,设置电导率为分段函数得到电 缆绝缘中场强分布,然后通过拟合得到电缆 A 绝 缘中场强分布如图 8 和图 9 所示。

脱气前电缆 A 在空载和满载条件下的绝缘中 场强分布如图 8 所示。脱气前电缆 A 绝缘中场强 在空载和满载条件下均呈现内低外高的分布规 律,场强最大值出现在绝缘最外侧位置,而且满 载条件下外侧绝缘的场强比空载条件下更高。这 是由于电缆 A 绝缘电导率在径向上呈现由内向外 递减的梯度分布导致的。

脱气后电缆 A 在空载和满载条件下的绝缘中 的场强分布如图 9 所示,呈现出内低外高的分布 规律,场强最大值出现在绝缘最外侧位置,与脱 气前电缆 A 绝缘中场强分布规律类似。在空载条 件下,脱气后绝缘最外侧场强高于脱气前场强; 满载条件下,脱气后绝缘最外侧场强低于脱气前 场强。可能是由于脱气过程中电缆绝缘中副产物 脱出,同时交联度和结晶度略有升高,造成了绝 缘电导率发生变化,从而导致绝缘中场强分布发 生变化。

表	7	脱气前电缆A绝缘试样的电导率拟合结果
Table 7		Fitting results of the cable A insulation conduct
		ivity before degassing

绝缘位置		30 ℃		50~90 °C			
	и	а	b	и	а	b	
R ₀₁	2.14×10 ⁻³³	0.0274	2.1674	1.22×10 ⁻²⁶	0.0191	1.4245	
R ₀₈	1.96×10 ⁻³⁰	0.0100	1.9519	4.10×10 ⁻²⁸	0.0355	1.2904	
R ₁₅	7.73×10 ⁻³¹	0.0401	1.4354	6.55×10 ⁻²⁴	0.0481	0.4300	
R ₂₂	1.52×10 ⁻²³	0.0186	0.8384	5.87×10 ⁻²⁶	0.0663	0.3427	
R ₂₉	8.94×10 ⁻³⁷	0.1053	1.0031	8.94×10 ⁻³⁷	0.1053	1.0031	

表 8 脱气后电缆A 绝缘试样的电导率拟合结果 Table 8 Fitting results of the cable A insulation conductivity after degassing

绝缘位置	:	30 °C		50~90 ℃			
	и	а	b	и	а	b	
R ₀₁	3.53×10 ⁻²⁵	0.0022	1.4894	8.86×10 ⁻³³	0.0777	1.1552	
R ₀₈	2.34×10 ⁻²⁶	0.0095	1.4213	1.27×10 ⁻³⁰	0.0698	0.9658	
R ₁₅	1.59×10 ⁻²⁵	0.0067	1.3303	4.86×10 ⁻³⁶	0.0934	1.1739	
R ₂₂	4.43×10 ⁻²⁷	0.0028	1.5336	6.89×10 ⁻³²	0.0773	0.9265	
R ₂₉	1.13×10 ⁻²¹	0.0045	0.6967	1.16×10 ⁻⁴¹	0.0969	1.8248	



图 8 脱气前电缆 A 绝缘中场强分布 Fig. 8 Distribution of electric field in the cable A insulation before degassing

对比图 8、图 9 和图 2 可知,在不同负载条件 及电压下,电缆 A 绝缘中的场强分布与均匀绝缘 电缆中的场强分布存在明显差异。在空载条件 下,均匀绝缘的电场分布是典型的准电容性电 场,绝缘场强从内至外逐渐降低;满载条件下绝 缘中存在温度梯度,均匀绝缘的电场分布出现反 转,绝缘场强从内至外逐渐降升高。而脱气前和 脱气后电缆 A 的绝缘电导率在径向上均呈现出由 内向外递减的梯度分布,因此电缆 A 绝缘中场强







在空载和满载条件下均呈现内低外高的分布规律。

均匀绝缘电缆和电缆 A 中电场强度最大值如表9 所示,可以看出电缆 A 绝缘中场强最大值明显高于均匀绝缘电缆中场强最大值,说明电缆 A 绝缘电导率在径向上的梯度分布导致绝缘中电场分布的不均匀性显著增加。

由于 XLPE 绝缘材料导热性较差,在电缆交 联和脱气过程中绝缘层出现了明显的温度梯度, 外绝缘的升温和降温速度都明显高于内绝缘。电 缆制造过程中的温度梯度影响了 XLPE 的交联、 结晶和交联副产物脱气过程,从而导致其交联 度、结晶度和交联副产物浓度在径向上出现梯度 分布,因此 XLPE 的直流电气性能也出现明显的 梯度效应;内绝缘的直流电导率高于外绝缘而且 空间电荷积聚现象也比外绝缘更明显。考虑到绝 缘电导率的梯度分布,电缆绝缘中电场分布的不 均匀性会显著增加,不论在空载还是满载状态 下,外绝缘的电场强度始终高于内绝缘,而且最 外侧绝缘的场强远大于均匀绝缘电缆中的最高场 强。在 XLPE 高压直流电缆的设计、生产、试验 和运行过程中必须考虑到绝缘直流特性和场强分 布的梯度效应,以保证电缆运行的安全稳定。

表 9 电缆绝缘中场强最大值 Table 9 Maximumelectric strength in cable insulation

			-	-		
电缆状态	空载时	$D_{\text{max}}/(kV)$	/∙mm ⁻¹)	满载时E _{max} /(kV·mm ⁻¹)		
	$1.0U_0$	$1.45U_{0}$	$1.85U_{0}$	$1.0U_0$	$1.45U_{0}$	$1.85U_{0}$
均匀绝缘电缆	19.17	27.81	35.49	19.68	28.49	36.41
脱气前电缆A	26.88	40.55	52.80	34.55	46.80	56.45
脱气后电缆A	32.61	52.67	71.28	29.35	39.26	46.94

5 结论

本文以 500 kV XLPE 直流电缆为研究对象, 围绕挤包绝缘高压直流电缆中存在的梯度效应问 题展开研究,得到如下结论。

(1)均匀绝缘电缆在空载条件下场强分布内高外低,满载条件下绝缘中出现温度梯度时,电场发生翻转,场强分布内低外高。

(2)电缆的绝缘层在交联和脱气过程中存在 温度梯度,外侧绝缘升温和降温速度高于内侧绝 缘,这导致电缆绝缘的交联度、结晶度和副产物 含量在径向上存在不均匀分布的现象。

(3)电缆A绝缘的直流电导率总体上呈现出 从内至外逐渐降低的规律;最内侧绝缘的空间电 荷积聚现象最为明显;30℃下绝缘直流击穿场强 从内至外逐渐升高,70℃下中间绝缘的击穿场强 反而最高。

(4)电缆A绝缘电导率在径向上的梯度分布 使得空载和满载条件下电缆绝缘中场强均呈现出 内低外高的分布规律,而且最外侧绝缘的场强远 大于均匀绝缘中的最高场强;脱气后的电缆A绝 缘在满载条件下的电场不均匀程度下降。

参考文献:

- HU J. HVDC as enabling technology for electricity markets[C]. CIGRE Session 2016. Paris, France: CIGRE, 2016.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 何金良, 党斌, 周垚, 等. 挤压型高压直流电缆研究进展及关键技术 述评 [J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1417–1429.
 HE Jinliang, DANG Bin, ZHOU Yao, *et al.* Reviews on research progress and key technology in extruded cables for HVDC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1417–1429.
- [5] JEROENSE M. HVDC, the next generation of transmission:

highlights with focus on extruded cable systems[J]. IEEJ Transactions

on Electrical and Electronic Engineering, 2010, 5(4): 400-404.

- [6] 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.
- [7] 刘善秋, 公维光, 郑柏存. 过氧化物交联聚乙烯的非等温交联动力 学 [J]. 塑料, 2013, 42(4): 32-33, 31.
 LIU Shanqiu, GONG Weiguang, ZHENG Baicun. Non-isothermal kinetics of peroxide cross-linked polyethylene[J]. Plastics, 2013, 42(4): 32-33, 31.
- [8] 朱晓辉, 杜伯学, 高宇, 等. 交联工艺对交联聚乙烯结晶形态的影 响 [J]. 绝缘材料, 2010, 43(6): 44–47.
 ZHU Xiaohui, DU Boxue, GAO Yu, *et al.* Effects of cross-linking process on crystallinity of XLPE[J]. Insulating Materials, 2010, 43(6): 44–47.
- [9] 李志伟,金海云,张涛,等.脱气时间对交联聚乙烯电缆绝缘材料聚
 集态结构与链结构的影响 [J].西安交通大学学报,2018,52(4):
 15-23.

LI Zhiwei, JIN Haiyun, ZHANG Tao, *et al.* Effect of degassing time on aggregation structure and chain structure of XLPE cable insulation material[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(4): 15–23.

- [10] ZHAO W, ZHONG L S, YANG X Y, et al. Effects of degassing duration on crosslinking byproducts of HVDC cable insulation [C]//2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Xi'an, China. IEEE, 2018; 324–327.
- [11] OHKI Y, HIRAI N, KOBAYASHI K, et al. Effects of byproducts of crosslinking agent on space charge formation in polyethylenecomparison between acetophenone and /spl alpha/-methylstyrene [C]//2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No. 00CH37132). Victoria, BC, Canada. IEEE, 2000: 535–538.
- [12] HIRAI N, MINAMI R, TANAKA T, et al. Chemical group in crosslinking byproducts responsible for charge trapping in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(2): 320–330.
- [13] SERRA S, TOSATTI E, IARLORI S, et al. Interchain states and the negative electron affinity of polyethylene[C]//1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No. 98CH36257). Atlanta, GA, USA. IEEE, 1998: 19–22.
- [14] SERRA S, TOSATTI E, IARLORI S, et al. Interchain electron states

in polyethylene[J]. Physical Review B, 2000, 62(7): 4389.

第 54 卷

- [15] 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.
- [16] REN H Y, ZHONG L S, LIU M H, et al. Effects of degassing duration on space charge and DC conductivity in HVDC XLPE cable insulation[C]//2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Xi'an, China. IEEE, 2018: 124–127.
- [17] REN H Y, ZHONG L S, ZHAO W, et al. Influence of crosslinking byproducts on DC conductivity of HVDC XLPE cable insulation[C]//2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Cancun, Mexico. IEEE, 2018: 90–93.
- [18] 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.
- [19] 王雅妮, 张洪亮, 吴建东, 等. 不同敷设方式下高压直流电缆温度场 与电场仿真计算研究 [J]. 绝缘材料, 2017, 50(7): 71–78.
 WANG Yani, ZHANG Hongliang, WU Jiandong, *et al.* Simulation and calculation of temperature field and electric field distribution of HVDC cable under different laying modes[J]. Insulating Materials, 2017, 50(7): 71–78.
- [20] 朱晓辉, 杜伯学, 高宇, 等. 交联温度对 XLPE 累积电荷衰减特性的 影响 [J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3154–3158.
 ZHU Xiaohui, DU Boxue, GAO Yu, *et al.* Effects of cross-linking temperature on decay behavior of XLPE charge accumulation[J].
 High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3154–3158.

作者简介:

李飞 (1992—), 男, 博士研究生, 从事高压直流电缆 方面的研究工作, E-mail: lifei.01@stu.xjtu.edu.cn;

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





The Radial Gradient Effect of HVDC Extruded Cables in Manufacturing and Application

LI Fei¹, ZHONG Lisheng¹, LI Wenpeng^{1,2}, GAO Jinghui¹, REN Haiyang¹, ZHANG Chong²

 State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
 State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: Extruded cables are widely used in HVDC projects, but the gradient effect in manufacturing and application affects their DC electrical performance significantly. The 500 kV XLPE DC cable was studied in this paper. Firstly, the field strength distribution in the uniformly insulated cable was simulated. Secondly, the temperature distribution of the insulation in the process of cross-linking and degassing was calculated, and the phase structure, by-product content and DC electrical performance of the insulation of cable at different radial positions were also measured. Finally, the field strength distribution of the insulation was simulated. The results show that there is a temperature gradient of cable insulation in the process of cross-linking and degassing, and the phase structure, and DC electrical properties of the insulation are non-uniformly distributed in the radial direction. The gradient distribution of the insulation is greater than that of inner layer, and the field strength of the outer layer of insulation is greater than that the maximum electric strength in the uniform insulation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0900702), Science and Technology Project of SGCC (No.SGZJ0000KXJ1900243).

Keywords: HVDC cable; extruded insulation; gradient effect; DC electrical properties; field strength distribution

(上接第62页)

Effect of DC Pre-stress on Space Charge and Electrical Tree in XLPE with Needle-Plate Electrodes

XU Xiaobin¹, LIU Aijing¹, LE Yanjie², LIU Hechen¹, GUO Zhanpeng¹, LIU Yunpeng¹

(1. North China Electric Power University, Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, Baoding 071003, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Zhoushan Power Supply Company, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Space charge is one of the main factors that affect the electrical tree characteristics of HVDC cable insulation. Based on the bipolar charge transport model, this paper simulates the space charge distribution characteristics of the two-dimensional needle plate electrode model under $\pm 20 \text{ kV}$, $\pm 22.5 \text{ kV}$ and $\pm 25 \text{ kV}$ DC pre-stress with a duration of 3 600s, and makes a comparative analysis between the space charge distribution characteristics and the DC grounded electrical tree initiation characteristics. The results show that the space charge density and injection depth increase with the increase of the pre-stress and time, and the initiation length of DC grounded electrical tree increases with the increase of pre-stress duration and amplitude. There is a high similarity between space charge distribution characteristics and electrical tree initiation characteristics. The space charge distribution characteristics and electrical tree initiation and amplitude. There is a high similarity between space charge distribution characteristics of the grounded electrical tree.

This work is supported by Open Fund of State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection (No.GYW51201901087), Natural Science Foundation of Hebei Province (No.E2018502133), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2018MS079), National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0900705).

Keywords: space charge; DC pre-stress; XLPE; bipolar charge transport model; COMSOL; polarity effect