第 49 卷 第 6 期：2634-2643 高电压技术 Vol.49, No.6: 2634-2643
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220734

66 kV 交联聚乙烯海底电缆绝缘厚度设计

王泽瑞[1]，赵学童[1]，赵远涛[2]，单潜瑜[2]，杨丽君[1]，廖瑞金[1]
（1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室，重庆 400044;
2. 宁波东方电缆股份有限公司，宁波 315800）

摘　要：随着国内外海上风电工程的快速发展，66 kV 交联聚乙烯(XLPE)海底电缆以其较低的生产、运维成本受到各方青睐。然而，国内尚无针对 66 kV XLPE 海缆设计的结构标准。为规范 66 kV XLPE 海缆的技术要求，有必要对其绝缘厚度进行合理设计。为此选取了 66 kV 海缆用 XLPE 试样进行了工频击穿试验和冲击击穿试验，发现 XLPE 的击穿场强与其厚度的关系符合反幂定律。然后，基于步进应力试验计算得到 30 ℃和 90 ℃下 XLPE 的寿命指数 n 分别为 13.9 和 15.1，并进一步通过冲击和交流耐压试验的结果，综合得到 66 kV 海缆的推荐绝缘厚度为 8.9 mm。基于该方法得到的 66 kV 海缆绝缘厚度与传统依靠经验设计的绝缘厚度相比更薄，为轻型 66 kV 海缆的绝缘厚度设计提供了理论参考和试验依据。

关键词：XLPE；步进应力；温度系数；厚度指数；海底电缆

Insulation Thickness Design of 66 kV XLPE Submarine Cable

WANG Zerui[1], ZHAO Xuetong[1], ZHAO Yuantao[2], SHAN Qianyu[2], YANG Lijun[1], LIAO Ruijin[1]
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Ningbo Orient Wires & Cables Co., Ltd., Ningbo 315800, China)

Abstract: With the fast development of domestic and international offshore wind power, 66 kV submarine cable shows considerable advantages for its low costs in the processes of power transmission, operation and maintenance on offshore wind farm systems. At present, there are no standards for the structure design of 66 kV submarine cable. In order to specify the technical requirements of 66 kV submarine cables, it is necessary to design a reasonable XLPE insulation thickness for the 66 kV submarine cable. In this work, AC breakdown test and impulse breakdown test are carried out for the 66 kV submarine cable insulation. It is found that the variation of the breakdown strength of XLPE samples with the thickness follows the inverse power law. Then, the submarine cable life indexes (n=13.9 and n=15.1) are obtained based on the step-stress test at 30 ℃ and 90 ℃, respectively. Furthermore, the impulse and AC withstand strength of the 66 kV insulation are tested, and the insulation thickness of 8.9 mm are recommended. The insulation thickness of 66 kV submarine cable designed in this work is thinner compared with the conventional design scheme. The research can provide the theoretical reference and experimental gist for the light 66 kV submarine cable.

Key words: XLPE; step stress; temperature coefficient; thickness index; submarine cable

0　引言

随着绿色能源的快速发展，海上风力发电得到了国内外学者越来越多的关注。近年来，我国海上风电单机容量和规模不断扩大，海上风电已从 3~4 MW 时代发展到 6~7 MW 时代。2019 年 9 月，中国东方电气集团有限公司生产了国内首台 10 MW 海上风力发电机组，海上风电迎来 9 ~ 10 MW 时代。然而，我国近海浅水区的风电项目主要选用 35 kV 海底电缆进行电能传输，在离岸距离超过 10 km，风电容量达到 4 MW 时，选用 35 kV 海缆进行电能传输需要设置海上升压站，否则，海缆线路压降会大于 5%。相比而言，选用 66 kV 海缆则无需进行海上升压，并且可以减少线路损耗，降低投资成本，增大输电容量[1-2]。目前，国内对 66 kV 海缆的应用尚属空白，我国 2011 年编制发布的首个海底电缆产品标准：JB/T 11167—2011《额定电压 10 kV(U_m=12 kV)至 110 kV(U_m=126 kV)交联聚乙烯绝缘大长度交流海底电缆及附件》并没有关于 66 kV 海缆的技术要求[3]。因此，亟需对 66 kV 海缆进行结构设计和优化，开展相应的技术研究。

目前，66 kV 海缆的绝缘厚度是根据海缆在绝

缘寿命内能安全承受的工频电压、冲击电压要求来确定的。近年来，随着海缆制造工艺的不断改进，国外厂家对海缆的结构进行了优化，提高了绝缘的耐压水平。日本生产设计的 66 kV XLPE 海缆绝缘厚度逐渐减薄，20 世纪 60 年代，日本设计的 66 kV 海缆绝缘厚度为 15 mm，到了 90 年代，绝缘厚度减薄到 9~11 mm 之间[4-6]。2020 年，我国学者陈果等人研制的 66 kV 海缆绝缘厚度为 11 mm[7]，高于日本设计的绝缘厚度。在进行海缆绝缘厚度设计时通常要考虑其温度系数、寿命指数 n 和厚度效应的影响，其中，温度系数通常为海缆室温击穿场强和运行温度 90 ℃的击穿场强之比，对于 66 kV 海缆，其工频温度系数通常取 1.05~1.1，冲击温度系数通常取 1.25[4-7]。寿命指数 n 常被用作电力电缆绝缘的寿命评定参数，20 世纪 60 年代，Kreuger、Oudin 等人经过对 XLPE 电缆的长期试验提出 n=9 较为合适[8-9]。90 年代，随着电缆制造工艺的发展，日本学者提出在较低场强时 n 可以达到 20 左右，其电老化的寿命曲线如图 1 所示，图中横坐标表示击穿所需时间，纵坐标表示击穿电压，曲线斜率的负倒数为寿命指数 n，试验得到的 n 值越高对应 XLPE 的老化系数越低，对绝缘厚度的减薄越有利[10-11]。因此，日本对 500 kV 电缆进行设计时选取 n=15，而 66 kV 交流海缆的寿命指数通常取 9[12]。

XLPE 的厚度效应是指绝缘材料的击穿电场强度随绝缘厚度增大而减小，20 世纪 70 年代，Agarwal 等人发现软脂酸钡朗格缪尔膜的击穿强度与试样厚度之间的关系遵循反幂定律[13]。2020 年，李栋等人基于击穿场强与试样厚度的换算关系选用模型电缆进行试验并设计电缆绝缘厚度[14]。考虑到 XLPE 击穿的厚度效应及真型电缆绝缘难以击穿，在试验中通常选用较薄的样品进行击穿试验来分析电缆在较高电压下的绝缘特性并设计绝缘厚度。

目前，国内 66 kV XLPE 海底电缆的绝缘厚度设计相对保守，落后于海缆制造工艺的发展[15]。国内厂家已经着手设计轻型 66 kV 海缆，以提升国际竞争力，因此，迫切需要对 66 kV 海缆的绝缘厚度设计进行研究。

本文基于 66 kV 海缆用 XLPE 绝缘，进行了工频、冲击击穿试验，步进应力试验和工频、冲击耐压试验，对 66 kV XLPE 海缆的绝缘厚度进行了设计，提出了 66 kV 海缆的绝缘设计厚度，为轻型 66 kV 海缆设计及绝缘减薄提供了理论依据。

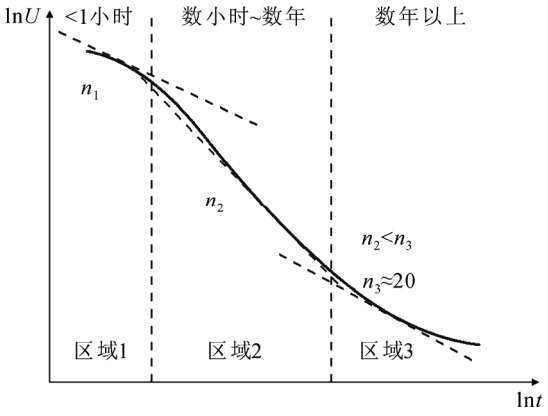


图 1 XLPE 在不同电压下的 U-t 曲线

Fig.1 U-t curve of XLPE under different voltage

1 绝缘厚度设计原理

在进行电缆绝缘厚度设计时，通常取工频试验获得的参考厚度和冲击试验获得的参考厚度中的较大值，相应的绝缘厚度计算如式(1)—式(3)所示[7,14,16-17]。

$$d_{\mathrm{ac}}=\frac{U_{\mathrm{m}}k_1k_2k_3k_4}{\sqrt{3}E_{\mathrm{Lac}}} \tag{1}$$

$$d_{\mathrm{imp}}=\frac{U_{\mathrm{BIL}}k_1'k_2'k_3'k_4'}{E_{\mathrm{Limp}}} \tag{2}$$

$$d=\max\left\{d_{\mathrm{ac}},d_{\mathrm{imp}}\right\} \tag{3}$$

式中：d_{ac}、d_{imp} 为在工频电压和冲击电压下计算的绝缘厚度；d 为海缆绝缘的设计厚度，取 d_{ac} 和 d_{imp} 的较大值；U_{m} 为 66 kV 海缆运行的最高线电压，取 72.5 kV；U_{BIL} 为 66 kV 海缆系统的雷电冲击耐压水平，取 325 kV；k_1、k_1' 分别为工频电压和冲击电压下的老化系数，其中 k_1 的大小与寿命指数有关，k_1' 的大小取 1.1；k_2、k_2' 分别为工频击穿试验和冲击击穿试验下的温度系数，取 30 ℃击穿场强和 90 ℃击穿场强的比值；k_3、k_3' 表示电缆的安全系数，均取 1.1；k_4、k_4' 分别为工频试验和冲击试验下的厚度系数；E_{Lac} 为试样在工频试验下的最低击穿场强；E_{Limp} 为试样在冲击试验下的最低击穿场强。

2 试验方法

2.1 试样制备

如图 2 所示为试样的制备过程，选用的 66 kV 海底电缆，绝缘层厚度为 11 mm，采用 J/Q sliver 电缆切片机沿电缆轴向环切制备厚度为 0.2、0.3、0.4 mm 的片状试样，然后在 70 ℃条件下进行 24 h 干燥处理以消除机械应力的影响，并将试样置于去离子水中进行超声波清洗以清除表面污染物。另外，

为了验证 66 kV 海缆绝缘内外层性能的一致性，本文从 XLPE 在电缆绝缘内外层的不同位置进行分布取样，并将试样命名为内侧与外侧。

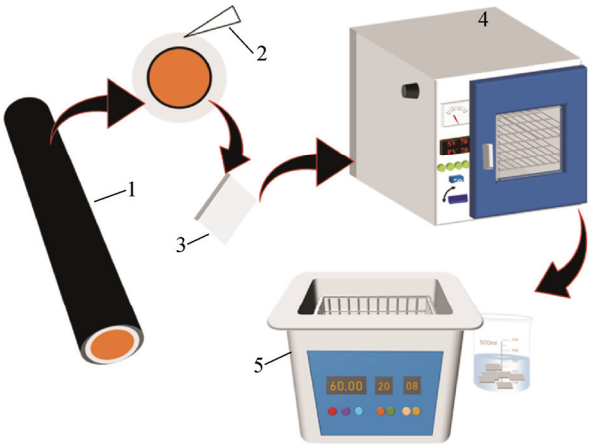
2.2 工频试验

2.2.1 工频击穿试验

图 3 为工频试验平台，采用电压击穿设备(HCDIC–100 kV)进行工频击穿试验，并通过 PC 端的“电压击穿仪控制系统”采集数据，通过程序控制可进行工频击穿试验、步进应力试验和耐压试验。根据 GB/T 11026 标准设计试验温度为 30、50、70、90 ℃[18]。根据 GB/T 1408 标准将厚度为 0.2、0.3、0.4 mm 的 XLPE 电缆绝缘内侧试样与外侧试样置于柱–柱电极进行击穿试验[19]。图 4 为电极示意图，电极设计标准参考 GB/T 1408，柱–柱试验电极的直径为 25 mm，电极边沿曲率半径为 3 mm 以削弱电极边沿的电场畸变程度，通过加热绝缘油控制试验温度。以 1 kV/s 的速度升压至样品击穿，考虑到样品击穿具有分散性，选取 10 个样品进行重复试验并根据 Weibull 分布计算等效击穿场强。

2.2.2 步进应力试验

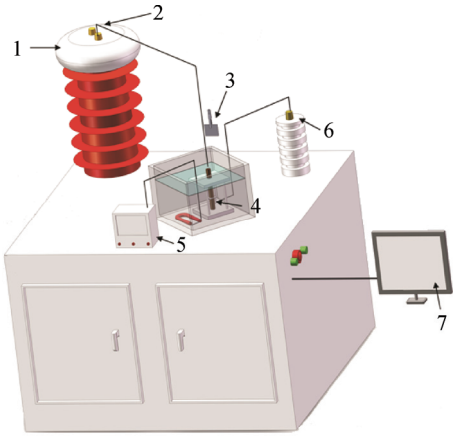
为获得 66 kV 海缆绝缘老化系数 k_1，需开展步进应力试验获取 XLPE 绝缘材料的寿命指数 n。研究表明，对于给定的 XLPE 绝缘材料，其电缆切片和电缆段的寿命指数 n 具有可比性[20]。因此，选取厚度 d 为 0.2 mm XLPE 样品进行不同温度下的电寿命特性测试。考虑到海缆稳态运行时电缆线芯温度为 90 ℃，试验温度选取典型的 30 ℃和 90 ℃ [21]。步进应力试验升压方式如图 5 所示，首先，电压快速升至起始电压 U_0，随后每隔时间 Δt 电压升高 ΔU。按照 XLPE 绝缘失效机理，其 U-t 特性按照绝缘失效时间可分为不同的区域，如图 1 所示[22]，其中区域 1 的失效时间通常小于 1 h，其失效机理以电击穿为主；区域 2 的失效时间从数小时到数年，其失效机理以电–热击穿为主；区域 3 为海缆的实际运行环境，电–热击穿和电化学击穿对该区域的影响都较大。从区域 2 到区域 3 时 n 值逐渐增大，在进行绝缘厚度设计时通常选取区域 2 进行 n 值的计算，这样既可以保证一定的安全裕度，又不至于使试验时间过长。因此，在进行步进应力试验时需对参数{U_0, ΔU, Δt}进行合理设计，其中 U_0 和 ΔU 的求取方法如式(4)—式(5)所示。经计算得到 30 ℃和 90 ℃时的 U_0 分别为 4 kV 和 3 kV，ΔU 均为 1 kV。Δt 选取 30、60、120 和 240 min，如表 1 所示。考虑到样品失效和试验环境的分散性，每组试验参数进行 5 次重复试验，每个温度下共记录 4×5 组数据。试验结



1—66 kV 海缆；2—J/Q 电缆切片机；3—XLPE 切片；4—真空干燥箱；5—超声清洗机

图 2 XLPE 电缆绝缘试样制备过程

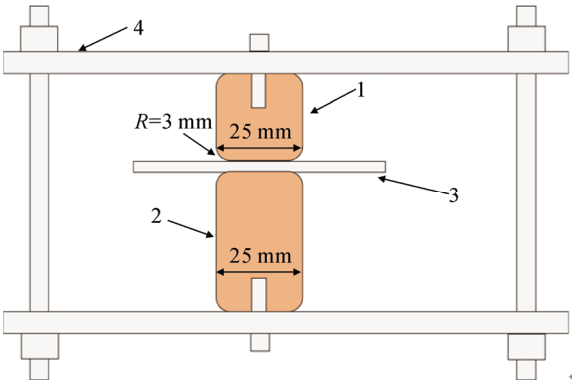
Fig. 2 Preparation of XLPE cable insulation samples



1—高压端；2—交直流转换旋钮；3—试样；4—柱–柱电极；5—温控设备；6—接地端；7—控制系统

图 3 工频电压击穿试验平台

Fig. 3 AC breakdown test platform



1—高压；2—地电极；3—XLPE 切片；4—紧固装置

图 4 试验电极

Fig.4 Test electrode

表 1 XLPE 的步进应力试验参数

Table 1 Parameters of step-stress test of XLPE

温度/℃	U_0/kV	ΔU/kV	Δt/min
30	4	1	30，60，120，240
90	3	1	

束后基于累计损伤等效性原理求解使累计损伤分散性最小时的 n 值，通过数据分析提取方差特征值，得到寿命指数。

$$U_0 = 20\%E_{63.2\%}d \tag{4}$$

$$\Delta U = 5\%E_{63.2\%}d \tag{5}$$

式中：U_0 为起始电压；ΔU 为升压梯度值；$E_{63.2\%}$为对应温度下的等效击穿场强，可通过 Weibull 分布计算。

2.2.3 工频耐压试验

在步进应力试验的基础上，进一步开展工频耐压试验，选取 5 片 0.2 mm XLPE 试样，试验温度为 30 ℃，起始试验电场强度为 40 kV/mm，如果试样耐受 1 h 后没有击穿，则试验电场强度升高 5 kV/mm 进行测试，记录试样击穿电场强度。根据 5 次实验中的最低击穿场强设计 E_{Lac}。

2.3 冲击试验

2.3.1 冲击击穿实验

图 6 为冲击试验平台，采用连续冲击电压发生器(CJDY–30/400)进行冲击击穿试验，根据 GB/T 1408 标准规定选取 1.2/50 μs 负极性雷电冲击波测试样品的冲击击穿场强[19,23]，试验波形如图 7 所示，其中 GF 段(T_1)和 GK 段(T_2)分别表示冲击电压的波前时间 1.2 μs 和波后时间 50 μs。起始试验场强为 90 kV/mm，电场梯度为 10 kV/mm；根据 GB/T 11026 设置试验温度为 30、50、70、90 ℃。每组参数选取 10 个样品进行重复试验并根据 Weibull 分布计算等效冲击击穿电场。

2.3.2 冲击耐压试验

选取 5 片 0.2 mm XLPE 试样进行冲击耐压试验，试验温度为 30 ℃，起始试验场强为 125 kV/mm 的负极性雷电冲击试验，如果 3 次重复测试试样没有击穿，则试样场强升高 10 kV/mm 继续进行测试，记录试样击穿电压。根据 5 次测试中的最低击穿场强设计 E_{Limp}。

3 试验结果与分析

3.1 击穿试验结果

XLPE 在不同温度下的工频击穿场强和冲击击穿场强均服从 Weibull 分布，因此可以选择 Weibull 分布模型用于分析 XLPE 绝缘介质击穿特性[24-25]，

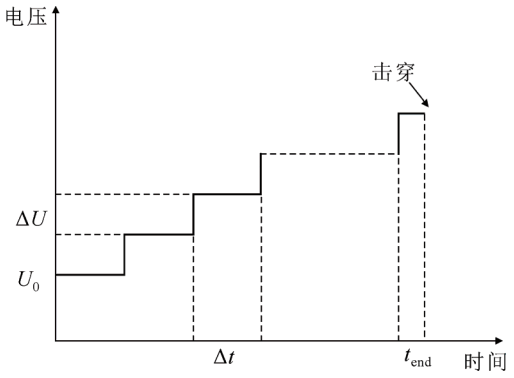
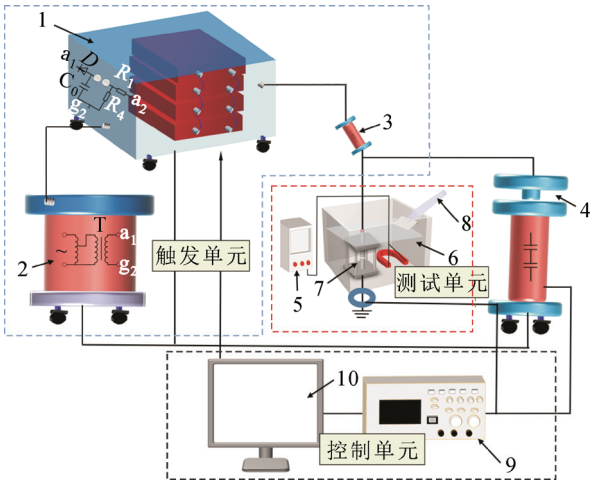


图 5 步进应力加压曲线

Fig.5 *U-t* curve in step-stress test



1—冲击电压发生器；2—充电变压器；3—保护电阻；4—高压分压器；5—温控设备；6—绝缘油；7—柱–柱试验电极；8—试样；9—示波器；10—控制系统

图 6 连续冲击电压发生器示意图

Fig.6 Schematic of consecutive impulse voltage generator

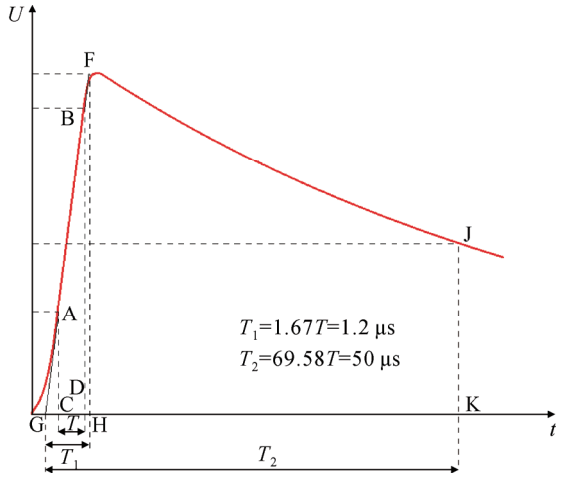


图 7 冲击电压波形

Fig.7 Waveform of impulse voltage

基于两参数 Weibull 分布模型的 XLPE 绝缘失效分布函数为

$$F\left(E_{\mathrm{b}};\alpha,\beta\right)=1-\exp\left(-\left(\frac{E_{\mathrm{b}}}{\alpha}\right)^{\beta}\right) \tag{6}$$

式中：E_{b} 为试样的击穿场强；α 为尺度参数，一般取击穿概率为 63.2%时的击穿场强；β 为形状参数，其大小与测试数据点的分散程度有关。通过击穿试验获得的数据样本对失效分布函数中的 α、β 进行估计，进而确定 Weibull 分布模型。经验分布函数 $F(i,n)$采用中位秩估计，表达式为

$$F\left(i,n\right)=\frac{i-0.3}{n+0.4}\times 100\% \tag{7}$$

式中：i 代表测试试样的序号；n 代表样本容量。

图 8 和图 9 分别为工频击穿试验和冲击击穿试验结果的 Weibull 统计分析，图中横坐标为电场强度，纵坐标为击穿概率，即通过经验分布函数获得击穿场强对应的击穿概率，图中虚线与拟合曲线的交点表示失效概率为 63.2%的电场强度。表 2 为计算得到的工频等效击穿场强和冲击等效击穿场强，从表中可以看出，冲击击穿场强随温度上升呈现下降的趋势。而工频击穿场强在 30~50 ℃时随温度升高而略微升高，大于 50 ℃时，随着温度的进一步升高而下降，在其它绝缘材料中也发现类似的变化规律[26]。在室温至 50 ℃范围内，温度变化对 XLPE 密度的影响相对较小，而温度的升高会使得电子的平均寿命降低进而导致电击穿场强升高[27]。当温度大于 50 ℃，XLPE 体积逐渐增大、密度降低对其击穿场强的影响占主导，材料击穿场强随温度升高而降低。

从表 2 中击穿场强与厚度的关系来看，击穿场强随着样品厚度增加而减小，这是因为 XLPE 绝缘的击穿具有尺寸效应，属于“弱点击穿”[28]，对于 XLPE 而言，其弱点为电缆绝缘中的微孔、杂质等。这些弱点处的场强较大，率先达到击穿场强并发展为贯穿两级的通道导致绝缘击穿。因此，越厚的 XLPE 包含的“弱点”就越多，其击穿场强就越低。

3.2 温度系数

对于 66 kV 海缆，其温度系数可以取 XLPE 在 30 ℃击穿场强和 90 ℃击穿场强的比值为

$$\begin{cases} k_2=\dfrac{E_{30\,℃}}{E_{90\,℃}} \\ k_2'=\dfrac{E'_{30\,℃}}{E'_{90\,℃}} \end{cases} \tag{8}$$

式中：k_2 和 k_2' 表示工频电压和冲击电压下的温度系数；$E_{30℃}$ 和 $E'_{30℃}$ 表示 30 ℃时 XLPE 工频击穿和冲击击穿的等效击穿场强；$E_{90℃}$ 和 $E'_{90℃}$ 表示 90 ℃时 XLPE 工频击穿和冲击击穿的等效击穿场强。经计

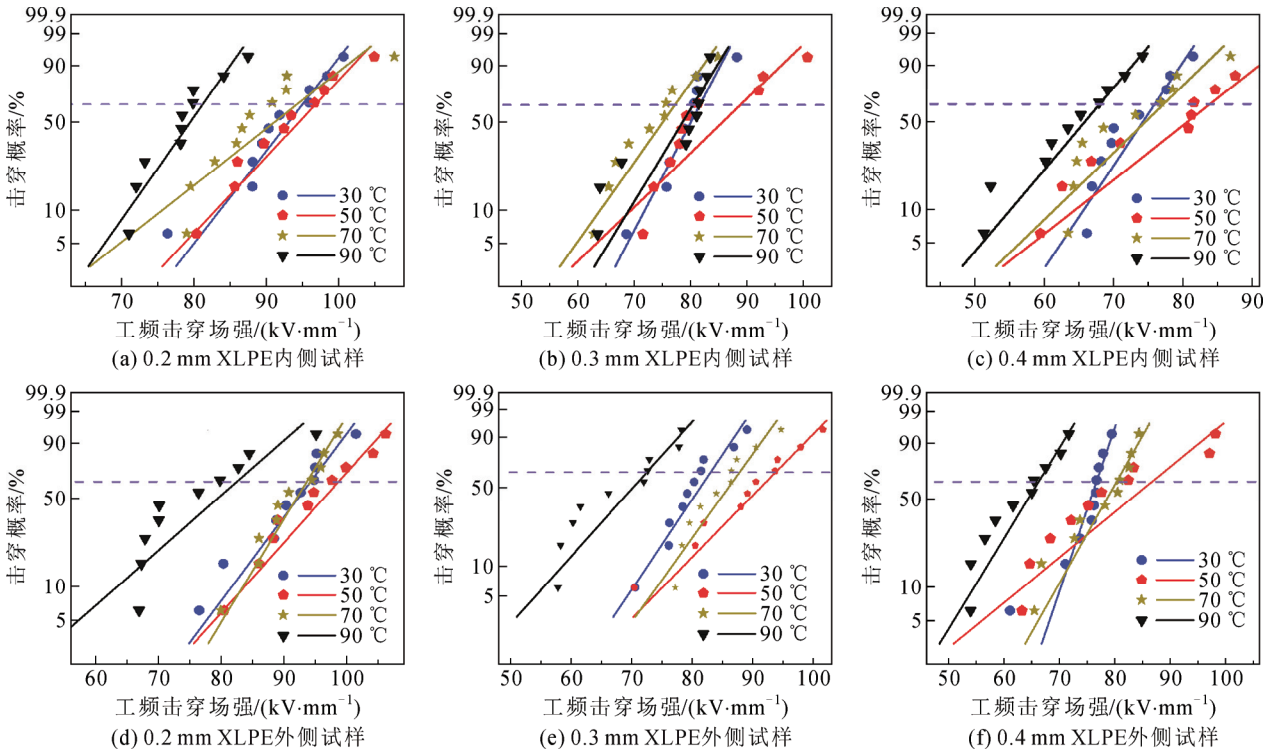


图 8 工频击穿强度的 Weibull 分布图

Fig.8 Weibull distribution of AC breakdown strength

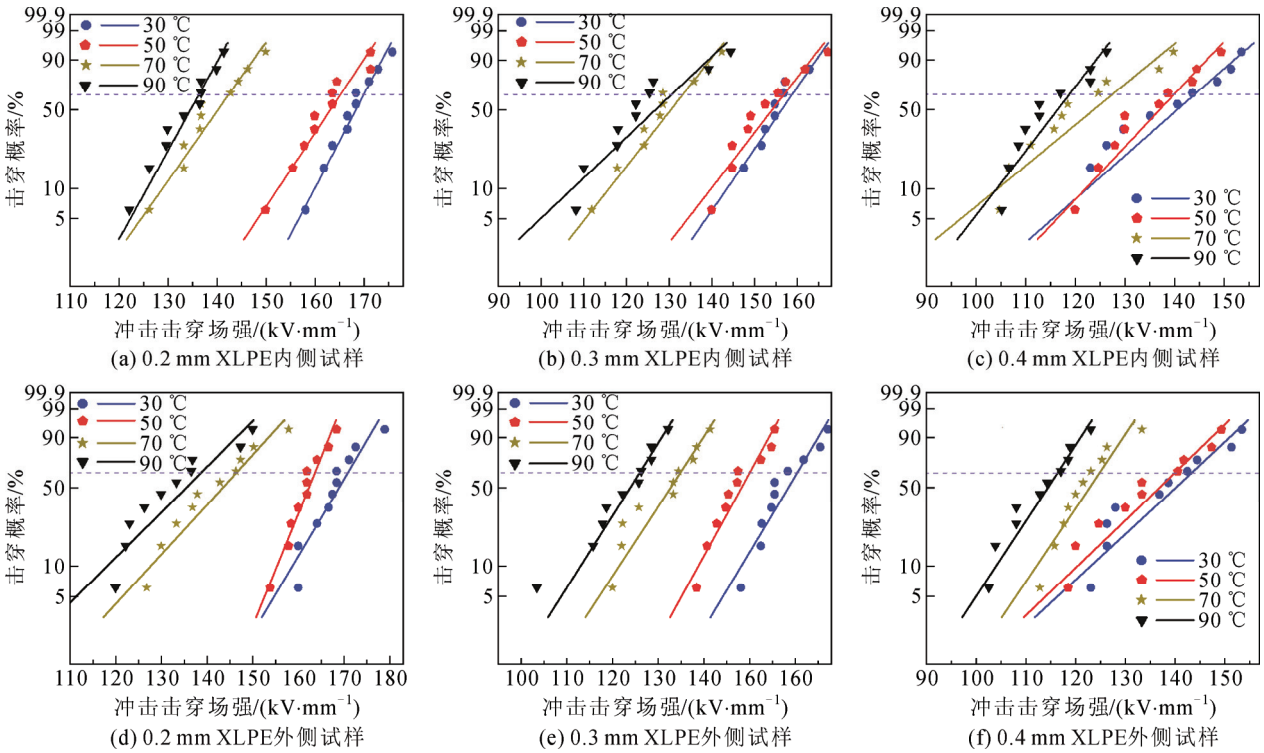


图 9 冲击击穿强度的 Weibull 分布

Fig.9 Weibull distribution of impulse breakdown strength

表 2 XLPE 在不同温度、厚度下的工频和冲击等效击穿场强

Table 2 AC and impulse breakdown strength of XLPE specimens at various temperature and thickness

厚度/mm	温度/℃	工频击穿场强/(kV·mm⁻¹)		冲击击穿场强/(kV·mm⁻¹)	
		内侧	外侧	内侧	外侧
0.2	30	94.39	93.42	169.77	170.48
	50	95.92	97.58	164.84	163.48
	70	92.44	93.09	141.92	145.35
	90	80.62	80.19	136.04	137.29
0.3	30	81.13	82.42	158.21	160.09
	50	86.72	92.6	156.1	149.71
	70	76.15	87.16	132.18	134.29
	90	79.91	71.14	128.57	125.37
0.4	30	75.35	76.44	142.45	141.95
	50	81.62	83.38	138.81	138.81
	70	75.64	79.63	125.43	124.22
	90	66.81	65.24	118	115.78

算得到不同位置和不同厚度试样的温度系数值如表 3 所示。考虑到表中温度系数的分散性，对不同厚度和不同位置的温度系数取平均值，得到 XLPE 的工频温度系数和冲击温度系数分别为 1.13 和 1.24。

3.3 厚度指数

XLPE 绝缘的击穿属于“弱点击穿”，越厚的 XLPE 包含的“弱点”就越多，其击穿场强就越低。

表 3 XLPE 温度系数

Table 3 Temperature coefficient of XLPE

厚度/mm	工频温度系数		冲击温度系数	
	内侧	外侧	内侧	外侧
0.2	1.17	1.17	1.25	1.24
0.3	1.02	1.16	1.23	1.28
0.4	1.10	1.17	1.21	1.23

工频试验和冲击试验的击穿场强与厚度关系均可表示为[13]

$$E = Cd_1^{-b} \text{ 或 } \ln E = \ln C - b\ln d_1 \tag{9}$$

式中：E 为等效击穿场强；d_1 为试样厚度；C 为与材料特性有关的常数；b 为厚度指数，根据“弱点击穿”理论，b 值的大小与绝缘“弱点”的多少有关，b 值越大说明材料的“弱点”(比如微孔、杂质)越多。基于式(9)，海缆设计厚度 d_{ac} 或 d_{imp} 下的击穿场强与试验样品厚度 d_1 下的击穿场强之间可以进行转化，转化关系可以用厚度系数 k_4、k_4' 进行表示，如下所示：

$$\begin{cases} k_4 = \left(\dfrac{d_{ac}}{d_1}\right)^{b} \\ k_4' = \left(\dfrac{d_{imp}}{d_1}\right)^{b'} \end{cases} \tag{10}$$

式中，b 和 b'分别为工频试验和冲击试验的厚度指数。根据式(9)，对不同温度下 XLPE 试样的工频特征击穿场强和冲击特征击穿场强进行拟合，如图 10 所示，得到如表 4 所示的厚度指数 b 和 b'，从表中数据来看，在高温 70、90 ℃下计算得到的厚度指数(内、外层)有一定的分散性，这是由于高温时，XLPE 的击穿场强分散性较大引起的。

3.4 老化系数

66 kV 海缆的设计使用寿命一般为 30 年，绝缘失效过程极为缓慢，如果采用恒定应力测试其寿命指数耗时较长，通常通过步进应力试验加速测试过程，将加速实验结果外推到恒定运行状态。固体绝缘材料的长期耐压特性可以用反幂函数电寿命模型(inverse power model, IPM)进行描述，其计算方式为

$$D_C = U^n t \tag{11}$$

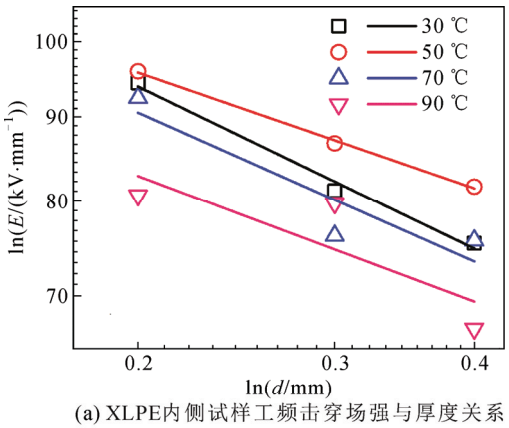
式中：D_C 为绝缘材料电击穿的累计损伤值，在一定的电压范围内为定值；U 为施加在材料上的电压；n 为材料的寿命指数；t 为材料击穿所需时间。

根据 Nelson 模型[29]，XLPE 绝缘损伤具有累计效应，其绝缘剩余寿命只取决于当前状态，在电老化过程中，调整施加电压可以使绝缘更快的达到一定的剩余寿命。考虑到多组电老化试验下 XLPE 的绝缘累计损伤理论上为定值，由此可以计算出 XLPE 绝缘的寿命指数 n，对于每一次步进应力试验，电压从 0 匀速升压至起始电压 U_0，每 Δt 时间内升压 ΔU 直至 $U_k=U_0+k\Delta U$ 并维持时间 t_{end} 后击穿，则样品的累计损伤为

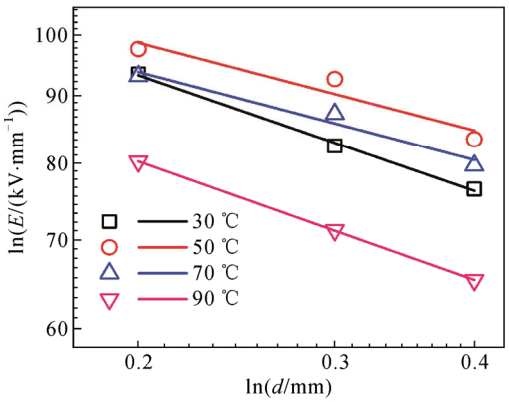
$$D_C = \sum_{i=0}^{k-1}(U_0 + i\Delta U)^n \Delta t + t_{end}(U_0 + k\Delta U)^n \tag{12}$$

经过 4 组不同时间步长的试验，每组试验重复 5 次获得 4×5 个累计损伤值，得到累计损伤矩阵如式(13)所示。根据电老化的基本过程和物理意义，XLPE 绝缘缺陷偏差、操作误差、环境影响等因素均会影响$[D]_{4\times5}$ 值的分散性，从而影响寿命指数 n 的大小。通过对$[D]_{4\times5}$ 的方差取平均，可以尽量消除材料偏差等因素引起的误差，并进一步通过枚举法找出$[D]_{4\times5}$ 方差 S^2 取最小值时对应的 n 值即为材料的寿命指数，如式(14)所示。根据获取的计算数据提取方差特征值如式(15)—式(16)所示，可以对 n 值的合理性进行分析[30-31]。

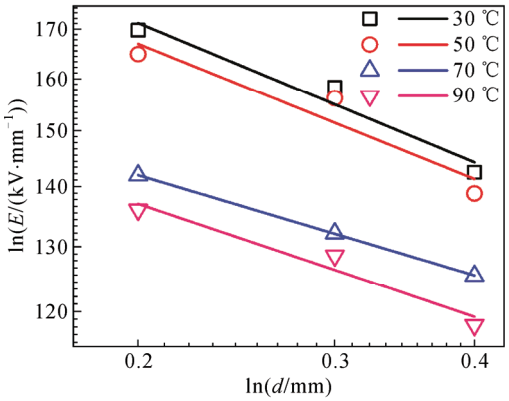
$$D = \begin{pmatrix} D_{11} & \cdots & D_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{41} & \cdots & D_{45} \end{pmatrix} \tag{13}$$



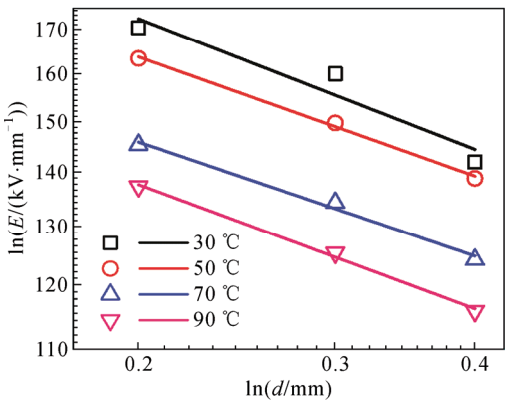
(a) XLPE内侧试样工频击穿场强与厚度关系



(b) XLPE外侧试样工频击穿场强与厚度关系



(c) XLPE内侧试样冲击击穿场强与厚度关系



(d) XLPE外侧试样冲击击穿场强与厚度关系

图 10 等效击穿场强与厚度关系

Fig.10 Relationship between equivalent breakdown field strength and insulation thickness

表 4 不同温度下的厚度指数值 b 和 b'

Table 4 Fitting parameter b and b' at different temperature

厚度指数	位置	温度/℃			
		30	50	70	90
b	内侧	0.328	0.234	0.302	0.255
	外侧	0.291	0.22	0.221	0.298
b'	内侧	0.248	0.241	0.178	0.201
	外侧	0.257	0.235	0.225	0.244

$$S^2=\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\bar{D}_i-\bar{D}}{\bar{D}}\right)^2/(m-1) \tag{14}$$

$$R^2=1-\sqrt{\frac{\min(S^2)\times(m-1)}{m}} \tag{15}$$

$$\lambda=-\frac{\mathrm{d}^2S^2(\min(S^2))}{\mathrm{d}n^2} \tag{16}$$

式中：$\bar{D}$ 表示矩阵$[D]_{4\times5}$的平均值；$\bar{D}_i$ 表示第 i 组的平均累计损伤；$S^2_{(n)}$表示给定 n 值时累计损伤的方差；R^2 表示 n 的拟合优度，其值越接近 1 表明计算得到的 n 值与理论值越接近，对应获得的 n 值可靠性越高；λ 为 n 的方差二阶导数，其值越大，则曲线在最小值处越尖锐，说明计算 n 的唯一性越好。

图 11 为 30 ℃和 90 ℃下的 S^2–n 曲线图，可以看出，方差随 n 的变化在 n=13.9 和 n=15.1 时分别在 30 ℃和 90 ℃时达到最小值 $\min S^2(n)$，此时的 R^2 分别为 0.708 和 0.551；λ 分别为 0.0067 和 0.0018。从曲线上来看 30 ℃时的 $\min S^2(n)$更低，$S^2(n)$极值峰更尖锐，R^2 和 λ 数值更大，从式(15)—式(16)和变化曲线来看寿命指数取 n=13.9 更为合理。基于获取的寿命指数，可计算工频老化系数为

$$k_1=\sqrt[n]{t_0/t_1}=\sqrt[13.9]{24\times365\times30}=2.45 \tag{17}$$

式中：t_0 为电缆设计寿命，取 30 a；t_1 为 XLPE 施加电场 E_{Lac} 时加压至击穿的时间，取 1 h。考虑到寿命指数 n 值应取 13.9，老化系数取 2.45。

3.5 绝缘厚度

表 5 为工频耐压试验和冲击耐压试验的结果，在 5 次耐压试验中 XLPE 试样的最低工频击穿场强为 65 kV/mm，最低冲击击穿场强为 155 kV/mm，说明试样在耐压实验中工频电场强度由 20 kV/mm 升压至 60 kV/mm 的过程中均未击穿，冲击电场强度由 125 kV/mm 升压至 145 kV/mm 的过程中均未击穿。因此，取 E_{Lac}=60 kV/mm, E_{Limp}=145 kV/mm。

由式(1)—式(2)和式(10)可以推导出工频冲击试验和冲击击穿试验下的绝缘厚度，计算方法如式(18)所示，由此得到各温度下的设计绝缘厚度。由

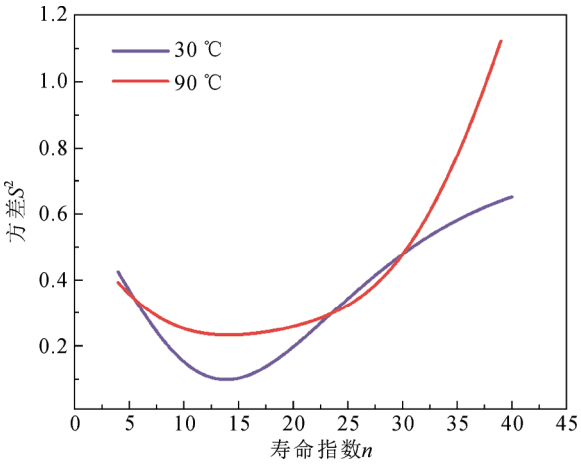


图 11 30 和 90 ℃各组试验 S^2-n 曲线

Fig.11 S^2-n curves of samples at 30 and 90 ℃

表 5 耐压试验结果

Table 5 Electrical test results of specimens

试验内容	5 次实验的击穿场强/(kV·mm^{-1})
工频耐压	65,65,70,70,75
冲击耐压	155,165,165,175,185

图 12 可知，在温度和绝缘位置相同时，d_{imp} 均大于 d_{ac}，说明 66 kV 海缆的绝缘厚度主要受冲击耐压水平制约。根据不同温度下的测试结果，并考虑到厚度系数的分散性，依据内侧和外侧 XLPE 击穿特性计算得到的绝缘厚度分别为 6.2~8.5 mm 和 7.6~8.9 mm，而考虑到电缆的运行可靠性和安全裕度，电缆绝缘厚度应选取最大值 8.9 mm。

$$\begin{cases} d_{\mathrm{ac}}=\left(\dfrac{U_{\mathrm{m}}k_1k_2k_3}{\sqrt{3}E_{\mathrm{Lac}}d_1^{b}}\right)^{\frac{1}{1-b}} \\ d_{\mathrm{imp}}=\left(\dfrac{U_{\mathrm{BIL}}k_1'k_2'k_3'}{E_{\mathrm{Limp}}d_1^{b'}}\right)^{\frac{1}{1-b'}} \end{cases} \tag{18}$$

4 结论

1）发现 66 kV 海缆绝缘的工频击穿场强和冲击击穿场强随厚度的变化符合反幂定律，其交流和冲击耐压场强分别为 60 kV/mm 和 145 kV/mm。

2）通过 30 ℃和 90 ℃步进应力试验计算得到 66 kV 海缆绝缘的寿命指数分别为 13.9 和 15.1，考虑到安全裕度确定寿命指数为 13.9，其对应的老化系数 k_1 为 2.45。

3）基于 66 kV 海缆绝缘在不同温度的击穿场强和不同位置的厚度指数进行计算，得到 66 kV 海

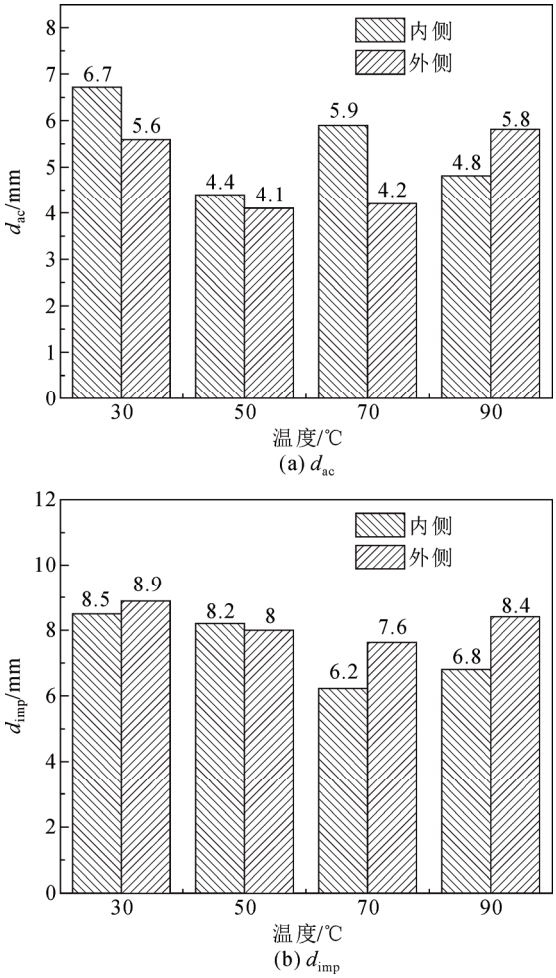


图 12 不同温度下的设计绝缘厚度值

Fig.12 Obtained thickness of XLPE at different temperature

缆绝缘的推荐厚度为 8.9 mm，低于以往依据经验设计的厚度，表明 66 kV 海缆的绝缘厚度存在减薄的空间。

参考文献 References

[1] 王 峰，芮守娟，王小合，等. 66 kV 海上风电交流集电方案的研究与发展前景[J]. 华电技术，2020，42(5)：61-65.
WANG Feng, RUI Shoujuan, WANG Xiaohe, et al. Research and prospects of 66 kV offshore wind power AC collection scheme[J]. Huadian Technology, 2020, 42(5): 61-65.

[2] 许新鑫，赵陆尧. 探究 66kV 集电海缆在我国大型海上风电项目中的应用[J]. 机电信息，2019(30)：23-24.
XU Xinxin, ZHAO Luyao. Application of 66 kV cable in large offshore wind power projects in China[J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(30): 23-24.

[3] 陈 果. 浅析我国海底电缆标准的修订方向[J]. 电线电缆，2020(3)：1-5.
CHEN Guo. A brief analysis of the revision direction of submarine cable standards in China[J]. Electric Wire & Cable, 2020(3): 1-5.

[4] NISHIMOTO T, MIYAHARA T, TAKEHANA H, et al. Development of 66 kV XLPE submarine cable using optical fiber as a mechanical-damage-detection-sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(4): 1711-1717.

[5] KATAKAI S. Design of XLPE cables and soundness confirmation methods to extra high voltage XLPE cables[C]//Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Yokohama, Japan: IEEE, 2002: 1411-1415.

[6] 石逸雯，周国伟，孟繁博，等. 热老化对交流配电 XLPE 电缆改为直流运行后电缆绝缘性能的影响[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4104-4112.
SHI Yiwen, ZHOU Guowei, MENG Fanbo, et al. Effect of thermal aging on the cable insulation properties of AC distribution XLPE cables under DC operation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4104-4112.

[7] 陈 果，蔡 剑，谢书鸿，等. 66kV 抗水树 XLPE 绝缘轻型海底电缆研制[J]. 中国电力，2020，53(7)：29-35，43.
CHEN Guo, CAI Jian, XIE Shuhong, et al. Research and development of 66 kV water tree retardant XLPE light insulated submarine cable[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 29-35, 43.

[8] OUDIN J M. The use of thermoplastic insulated materials in the manufacture of DC and AC Cables[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 1962.

[9] KREUGER F H. Endurance tests with polymeric insulated cables, materials and criteria[C]// CIGRE. Paris, France: CIGRE, 1968.

[10] KUBOTA T, TAKAHASHI Y, SAKUMA S, et al. Development of 500-kV XLPE cables and accessories for long distance underground transmission line-Part I: insulation design of cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1741-1749.

[11] 王若丞，贺云逸，康洪玮，等. 电缆接头绝缘用硅橡胶热老化及超声特性[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3181-3188.
WANG Ruocheng, HE Yunyi, KANG Hongwei, et al. Thermal aging and ultrasonic characteristics of silicone rubber for cable joint insulation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3181-3188.

[12] 刘毅刚，李熙谋. 关于高压 XLPE 电缆的绝缘厚度[J]. 电力设备，2003，4(3)：41-46.
LIU Yigang, LI Ximou. Insulation thickness of HV power cable XLPE[J]. Electrical Equipment, 2003, 4(3): 41-46.

[13] AGARWAL V K, SRIVASTAVA V K. Thickness dependent studies of dielectric breakdown in Langmuir thin molecular films[J]. Solid State Communications, 1973, 12(9): 829-834.

[14] 李 栋，朱智恩，杨黎明，等. ±535kV 直流电缆绝缘厚度理论设计与验证[J]. 电力工程技术，2020，39(1)：151-156.
LI Dong, ZHU Zhien, YANG Liming, et al. Theoretical design and verification of ±535 kV DC cable insulation thickness[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 151-156.

[15] 欧阳本红，刘松华，邓显波，等. 高压 XLPE 电缆绝缘厚度优化设计[J]. 高电压技术，2016，42(8)：2388-2393.
OUYANG Benhong, LIU Songhua, DENG Xianbo, et al. Optimization design for insulation thickness of high-voltage XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2388-2393.

[16] MAEKAWA Y, WATANABE K, MARUYAMA S, et al. Research and development of DC ±500 kV extruded cables[C]// CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2002.

[17] 陈铮铮，赵 鹏，李震宇，等. 评价直流电缆绝缘材料电性能的有效方法[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3558-3565.
CHEN Zhengzheng, ZHAO Peng, LI Zhenyu, et al. Effective method for evaluating the electrical properties of DC cable insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3558-3565.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电气绝缘材料 耐热性 第 1 部分：老化程序和试验结果的评定：GB/T 11026.1—2003[S]. 北京：中国标准出版社，2004.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Electrical insulating materials-properties of thermal endurance-part 1: ageing procedures and evaluation of test results: GB/T 11026.1—2003[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2003.

[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 绝缘材料 电气强度试验方法：GB/T 1408—2016[S]. 北京：中国标准出版，2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Insulating materials-test methods for electric strength: GB/T 1408—2016[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2016.

[20] MONTANARI G C, GHINELLO J, PERUZZOTTI F, et al. Endurance characteristics of XLPE compounds under DC voltage[C] // Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (Cat. No. 98CH36132). Vasteras, Sweden: IEEE, 1998: 439-442.

[21] 林 钰，胡意茹，李 茜，等. 复杂环境中海底电缆温度场及载流量模型研究[J]. 电子测量与仪器学报，2021，35(11)：39-46.
LIN Yu, HU Yiru, LI Qian, et al. Analysis of submarine cable temperature field and ampacity model in complex environment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 39-46.

[22] 边浩然，杨丽君，马志鹏，等. 基于累积损伤曲线的电寿命模型步进应力试验方法及在 XLPE 电缆中的应用[J]. 中国电力，2020，53(9)：125-132.
BIAN Hanran, YANG Lijun, MA Zhipeng, et al. Step-stress test method for electrical life model based on cumulative damage curve and its application in XLPE cable[J]. Electric Power, 2020, 53(9): 125-132.

[23] 孙魄韬. 雷电冲击电压作用下油纸绝缘的累积效应及其影响因素研究[D]. 重庆：重庆大学，2016.
SUN Potao. Study on accumulative effect of repeated lightning impulses on oil paper insulation and its influence factors[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2016.

[24] 蒋仁言. 威布尔模型族：特性、参数估计和应用[M]. 北京：科学出版社，1998.
JIANG Renyan. Weibull model family[M]. Beijing, China: Science Press, 1998.

[25] 汪正江. 植物油纸绝缘多参量电老化特性及寿命模型[D]. 重庆：重庆大学，2015.
WANG Zhengjiang. Study of multiparameter electrical aging characteristics and lifetime model for vegetable oil-paper insulation[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2015.

[26] JONSCHER A K, LACOSTE R. On a cumulative model of dielectric breakdown in solids[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984, EI-19(6): 567-577.

[27] 孙目珍. 电介质物理基础[M]. 广州：华南理工大学出版社，2016：182-190.
SUN Muzhen. Physical basis of dielectrics[M]. Guangzhou, China: South China University of Technology Press, 2016: 182-190.

[28] 华良伟. 220kV 交联聚乙烯绝缘电缆绝缘厚度的试验设计[J]. 上海电气技术，2008，1(1)：5-11.
HUA Liangwei. Thickness design for 220 kV XLPE insulation cable[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2008, 1(1): 5-11.

[29] 柯春俊，林春耀，欧小波，等. 步进电压下变压器匝间绝缘电压寿命指数新解法[J]. 哈尔滨理工大学学报，2016，21(5)：66-72.
KE Chunjun, LIN Chunyao, OU Xiaobo, et al. New solving method for voltage endurance coefficient *N* of transformer turn-to-turn insulation under step-voltage[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(5): 66-72.

[30] 杨丽君，李仲轩，姚人允，等. 获取 XLPE 绝缘直流电压耐受指数的步进应力试验参数选取方法研究[J]. 电工技术学报，2019，34(24)：5244-5251.
YANG Lijun, LI Zhongxuan, YAO Renyun, et al. Selection of step-stress test parameters for obtaining DC voltage endurance coefficient of XLPE insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5244-5251.

[31] BIAN H R, YANG L J, ZHANG J, et al. Understanding and predicting the DC voltage endurance coefficient of cross‐linked polyethylene insulation under thermal ageing[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(10): 985-991.



王泽瑞
1996—，男，硕士
主要从事 XLPE 电力电缆绝缘性能测试与评估。
E-mail: ouczerui@163.com

WANG Zerui



赵学童(通信作者)
1984—，男，博士(后)，教授，博导
主要从事新型电工材料、绝缘检测技术
E-mail: zxt201314@cqu.edu.cn

ZHAO Xuetong
Post-doctorate
Professor
Corresponding author

收稿日期 2022-05-18 修回日期 2022-10-18 编辑 曹昭君