

# ±320 kV 直流电缆终端界面气隙缺陷的 直流局放试验电压确定方法

赵 洋<sup>1</sup>, 魏思芸<sup>2</sup>, 马宪伟<sup>1</sup>, 程养春<sup>2</sup>, 夏 荣<sup>3</sup>

(1. 国网北京电力公司电缆分公司, 北京 100027; 2. 华北电力大学 高电压与电磁兼容北京市  
重点实验室, 北京 102206; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100092)

**摘 要:**局部放电试验作为交流系统中缺陷检测的有效手段得到了广泛使用,但是直流电缆的直流局放检测试验方法还处于初级阶段。为了确定直流局部放电检测的现场试验电压,本文研究了直流试验电压幅值与±320 kV 电缆预制式终端气隙缺陷检出率之间的关系。将±320 kV 电缆预制式终端复合界面上的气隙缺陷作为研究对象,通过多物理场仿真计算气隙缺陷内的最大电场强度,以电场强度超过阈值来判断该缺陷是否可能发生局部放电;基于概率统计分析,建立了考虑电缆运行温度和气隙位置等随机因素条件下电缆接头的局部放电概率密度函数,给出了缺陷检出率与环境温度和直流试验电压的函数关系式。结果表明:电缆界面的气隙缺陷检出率与环境温度和直流局放试验电压的函数关系式符合4次方幂函数关系式,且检出率水平随环境温度的升高而升高;若直流试验电压取 $1.85U_0$ ,20℃时的检出率为99.25%,30℃时的检出率可达99.85%。据此函数关系式可以确定直流试验电压幅值。

**关键词:**直流电缆;电缆终端;气隙缺陷;局部放电;试验电压;检出率

**中图分类号:** TM835 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.03.010

## Determination method of DC partial discharge test voltage for air gap defects at interface of ±320 kV DC cable termination

ZHAO Yang<sup>1</sup>, WEI Siyun<sup>2</sup>, MA Xianwei<sup>1</sup>, CHENG Yangchun<sup>2</sup>, XIA Rong<sup>3</sup>

(1. State Grid Beijing Cable Company, Beijing 100027, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Voltage and EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100092, China)

**Abstract:** Partial discharge test has been widely used as an effective means of defect detection in AC system, but the partial discharge detection test method of DC cable is still in its infancy. In order to determine the field test voltage of DC partial discharge detection, the relationship between DC test voltage amplitude and air gap defect detection rate of ±320 kV cable prefabricated terminal was studied in this paper. Taking the air gap defect commonly existing on the composite interface of ±320 kV cable prefabricated terminal as the research object, we calculated the maximum electric field intensity in the air gap through multi physical field simulation, and whether the defect may produce partial discharge was judged by the electric field intensity exceeding the threshold. Based on the probability and statistical analysis, the partial discharge probability density function of cable joints under the condition of considering random factors such as cable operating temperature and air gap position was established, and the function equation between defect detection rate and ambient temperature and DC test voltage was presented. The results show that the function equation between the detection rate of air gap defect at the cable interface and the ambient temperature and DC partial discharge test voltage conforms to the fourth power function, and the detection rate increases with the increase of ambient temperature. If the DC test voltage is  $1.85U_0$ , the detection rate is 99.25% at 20℃, and the detection rate can reach 99.85% at 30℃. The DC test voltage amplitude can be determined by the function equation.

**Key words:** DC cable; cable termination; air gap defect; partial discharge; test voltage; detection rate

## 0 引言

近年来随着电缆输电率的提高,高压直流交联

聚乙烯(crosslinked polyethylene, XLPE)电缆因其性能可靠稳定、效率高、输送容量大、能够远距离输电等优点成为高压直流输电系统中的重要组成部分<sup>[1]</sup>。尤其在长距离跨海输电及岛际间的输电工程中,高压直流电缆几乎是唯一选择。自我国自主研

制浙江舟山直流电缆输电工程至今,已建成投入运行的高压直流输电工程有广东南澳 $\pm 160$  kV 三端柔性直流输电工程、浙江舟山 $\pm 200$  kV 五端柔性直流输电工程以及厦门 $\pm 320$  kV 两端直流输电工程,这让我国的挤包绝缘高压直流电缆技术实现了跨越式发展<sup>[2]</sup>。

电缆的质量水平是保证电缆线路安全运行的前提。多项数据表明,电缆附件是电缆线路中最薄弱的环节,电缆附件的故障和损坏极易导致整条电缆线路的瘫痪。对于电缆故障的分析,主要集中于电缆的接头和终端部分<sup>[3]</sup>。根据统计,电缆早期失效的故障原因基本都是附件质量问题。由 CIGRE 825 技术手册<sup>[4]</sup>可知高压直流电缆附件的现场安装是一个高度人工的过程,这不仅涉及到工作步骤,还涉及到环境条件。因此,使用相应的检测手段可以在早期阶段检测到电缆的一些故障,对修复缺陷或故障的停机时间起到积极作用。除此之外,电缆附件的绝缘层由多层固体复合介质构成,结构较为复杂,故障主要出现在复合界面,包括界面的沿面闪络和材质的早期老化。直流电缆附件的电场分布由 XLPE 和硅橡胶(silicone rubber, SiR)材料的电导率决定,根据 Maxwell-Wagner 极化模型<sup>[5]</sup>可知, XLPE/SiR 界面两侧绝缘材料的电导率不匹配,且随温度和电场的变化规律不同,造成双层绝缘介质界面电荷积聚。电缆接头在制造安装和老化过程中极易在复合界面处留下空隙,这些空隙缺陷会造成电场集中,从而引发局部放电现象。因此,有效检出这些缺陷并替换掉有质量问题的电缆可以避免故障的发生,对提高电缆运行的可靠性具有重要意义。

现场电缆附件内出现次数较多的缺陷类型有主绝缘划伤形成气隙、应力锥内侧凹陷产生空腔、应力锥安装错位、复合界面上存在水汽以及主绝缘中含有杂质等。文献[6-9]针对上述缺陷类型进行了有限元仿真和结果分析。从目前的研究内容可以看出,人们对电缆缺陷的研究多集中于针对单个缺陷进行电场仿真,没有针对缺陷产生的随机性和不确定性开展系统分析,因此未能反映出多种影响因素作用下缺陷内场强的变化规律。

局部放电试验是交流电缆系统中检测缺陷的一种有效手段。但是直流电压下的局部放电信号相较于交流电压来说缺少相角特征、比较稀疏<sup>[10]</sup>,现场直流试验电压难以获得等,导致国内外对现场直流局部放电检测试验的研究还很不成熟,目前还没有针对高电压等级直流 XLPE 电缆的相关标准和技

术规范<sup>[11]</sup>。例如, GB/T 31489.1—2015《额定电压 500 kV 及以下直流输电用挤包绝缘电力电缆系统技术规范》中的第 1 部分试验方法和要求中对于现场直流局放电压建议值还未有明确规定。文献[12]提出可采用阻尼振荡波对直流电缆的局部放电进行检测,但是振荡波电压下的局部放电试验结果并不能完全等效于直流电压下的局放结果。同时,电缆在空载状态下进行局放试验时,同一缺陷的交流起始放电电压要低于直流起始放电电压,即某些会在交流电压下发生局放的微小缺陷可能在相同幅值的直流电压下并没有放电现象。因此,不能将交流局放试验结果直接应用于直流电缆系统质量评估。

除此之外,直流电缆内部的缺陷在不同环境温度下发生局部放电的可能性也有很大差异。决定这些缺陷能否发生局部放电的一个重要因素是放电阈值,即只有先达到起始放电电压才有可能发生放电。文献[13]研究了 XLPE 电缆内尖刺缺陷模型的局部放电特性,结果表明该放电模型的局部放电起始电压在温度升高时呈现下降趋势。因此,季节性的温度变化以及电缆所处环境温度的改变都会影响电缆内部缺陷的放电概率。此时对电缆施加不同的直流试验电压时,发生放电的缺陷数量也相应改变,最终影响对电缆缺陷的检出率。

本文为了促进高压直流电缆直流局部放电试验方法的发展,针对 $\pm 320$  kV 直流电缆终端,分析温度、外加电压和缺陷尺寸及位置对于气隙型缺陷内部最大电场强度的影响规律,总结直流试验电压幅值与缺陷检出率之间的对应关系。

## 1 整体方案

预制式直流电缆终端与交流电缆终端的结构相似,两者具有相似的缺陷形式,特别是界面气隙缺陷。交流电缆终端的主要缺陷是界面气隙,直流电缆终端的主要缺陷也是界面气隙。本文针对直流电缆预制式终端复合界面上的气隙缺陷进行分析研究,该类缺陷可能是电缆在制作过程中因应力锥压接不紧实或者热胀冷缩留下的,形状呈圆筒状,十分常见。除此之外,本文采用圆筒状气隙缺陷还有如下原因:①便于计算,圆筒状气隙缺陷为二维轴对称模型,可采用二维仿真进行计算,相对于三维模型可以提高计算速度;②实际气隙圆周方向的宽度不清楚,其尺寸可能大也可能小,用圆筒模型更接近实际情况。

在直流电压下,电缆终端的场强分布由电导率

决定,在绝缘层温度梯度较大时电场分布还会发生翻转,这对终端复合界面上气隙缺陷内的场强数值有很大影响,所以电缆的工作温度是需要考虑的一个重要变量。除此之外,缺陷在界面上位置分布的随机性也决定了它周围的场强分布。

电缆运行温度以及气隙缺陷在界面上所处位置作为影响气隙缺陷内部电场强度的随机因素,共同决定了气隙缺陷内场强值的概率统计分布特性,并且可从概率的角度分析计算电缆带不同负荷运行时气隙缺陷内最大场强值的概率密度函数,估计这类缺陷中可能发生放电的概率。需要注意的是,现场直流局放试验中,电缆全程保持空载状态,影响气隙缺陷内电场强度的随机因素是试验环境温度和气隙缺陷在界面的位置。

本文对随机因素影响下的仿真结果进行统计分析,将概率分析与MATLAB软件相结合进行函数拟合,求得不同试验环境下检测局放缺陷需要施加的直流试验电压,给出检出率与外施电压以及环境试验温度的对应关系。研究方案如图1所示。

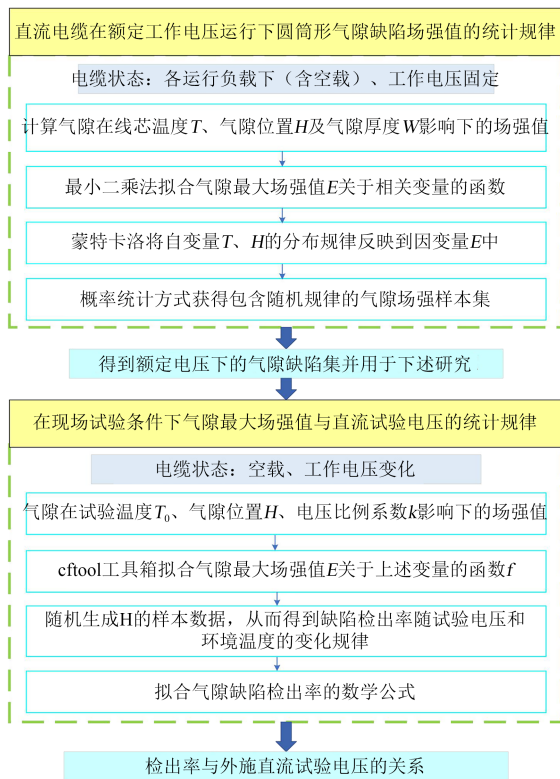


图1 研究内容流程图

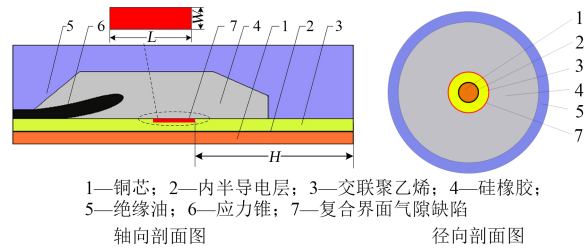
Fig.1 Research content flow chart

## 2 仿真模型的建立

### 2.1 电缆终端仿真模型

本文针对±320 kV电压等级的预制式直流电缆终端展开研究。将电缆终端复合界面上的气隙作

为典型缺陷进行分析,并在界面不同位置处设置长条气隙缺陷。为保证仿真对象与实际情况相符,查阅标准<sup>[14]</sup>可知,因加工失误或材料质量问题造成的绝缘界面缺陷尺寸应不大于0.125 mm,所以本文采用的气隙缺陷径向尺寸即厚度 $W$ 为0.1 mm,长度 $L$ 为50 mm,在这个尺寸下,界面上的部分气隙缺陷能够在电缆空载状态时保证不放电,符合实际情况。气隙缺陷在界面的位置用 $H$ 表示,仿真模型采用二维轴对称形式,如图2所示。电缆终端内各种材料的相关参数<sup>[15-17]</sup>和尺寸如表1所示。其中,终端内应力锥的设计方法可参照文献[16,18],通过求解应力锥曲线径向电场关于径向坐标的公式得到曲线上的具体坐标数值,并在COMSOL中采用三次贝塞尔曲线对全弧形的应力锥进行绘制。其轴向有效长度取200 mm,应力锥顶部的曲率半径约为10 mm。



1—铜芯; 2—内半导电层; 3—交联聚乙烯; 4—硅橡胶; 5—绝缘油; 6—应力锥; 7—复合界面气隙缺陷

图2 高压直流电缆终端仿真模型

Fig.2 Simulation model of HVDC cable terminal

表1 电缆各部分材料的参数

Tab.1 Parameters of cable material

材料	半径 /mm	电导率 /(S/m)	相对介电常数	恒压热容 /(J/(kg·K))	导热系数 /(W/(m·K))
铜芯	24	$5.8 \times 10^7$	—	385	400
导体屏蔽	26	2	30	2 182	0.29
交联聚乙烯	52	式(1)	2.3	2 250	0.32
外半导电层	53.2	2	30	2 182	0.29
应力锥	—	1	100	2 182	0.35
硅橡胶	130	式(1)	2.95	1 700	0.25
绝缘油	205	$2 \times 10^{-13}$	2.7	1 630	0.14
空气	—	$1 \times 10^{-14}$	1	1 000.4	0.025

由于气体电介质在低于气体击穿场强时可作为绝缘体,同时本文主要研究的是界面气隙缺陷在不同直流试验电压下达到击穿场强的数量,即确定统计范围内可能发生局部放电的气隙缺陷占比,所以只需计算气隙缺陷是绝缘体时其内部的电场强度数值,暂不考虑气体分子因不断碰撞发生电离而由绝缘体转变为导体后的介电特性;再结合关于气隙电导率设置的文献<sup>[16,19]</sup>,最终将电导率确定为 $10^{-14}$  S/m。

直流电压下,可以利用聚合物绝缘材料的非线性

性电导率实现对直流电缆终端增强绝缘中电场的调节<sup>[20]</sup>。终端内两种绝缘材料 XLPE 和硅橡胶的电导率是关于电场强度和温度的非线性函数,表达式为式(1)<sup>[21-22]</sup>。

$$\sigma(E, T) = A \exp\left(\frac{-\phi q}{k_b T}\right) \frac{\sinh(B \times |E|)}{|E|} \quad (1)$$

式(1)中: $\sigma$ 是绝缘材料的电导率, S/m;  $A$ 是与材料相关的常数,  $V/(\Omega \cdot m^2)$ ;  $B$ 为电场系数,  $m/V$ ;  $\phi$ 为材料的活化能, eV;  $q$ 为电子电荷量, 其值为  $1.602 \times 10^{-19}$  C;  $k_b$ 为玻尔兹曼常数, 其值为  $1.38 \times 10^{-23}$ ;  $T$ 为材料所处的环境温度, K;  $E$ 为电场强度, V/m。XLPE 和硅橡胶的电导率相关参数如表 2 所示。

表 2 绝缘材料的电导率相关参数

绝缘材料	$A/(V/(\Omega \cdot m^2))$	$\phi/eV$	$B/(m/V)$
交联聚乙烯	$2.69 \times 10^7$	0.916	$1.45 \times 10^{-7}$
硅橡胶	$2.03 \times 10^5$	0.760	$1.48 \times 10^{-7}$

基于式(1)和表 2 中的数值可通过 COMSOL 软件绘制出直流电缆绝缘层的电导率与电场强度和温度的关系, 如图 3 所示。

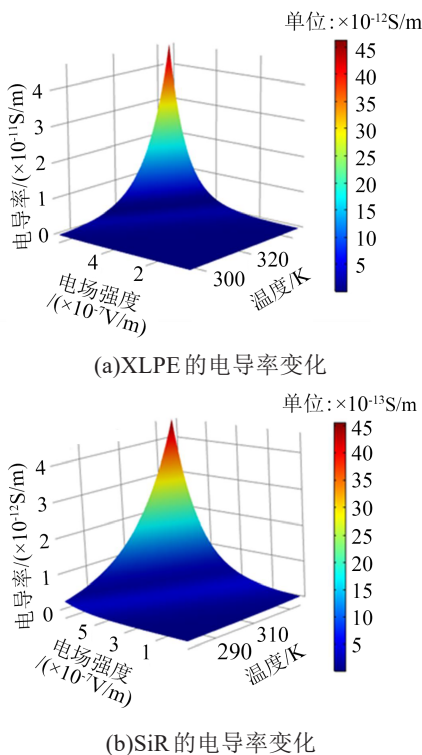


图 3 两种绝缘材料的电导率变化

Fig.3 Conductivity variation of two insulating materials

## 2.2 电、热场计算的基本原理

### 2.2.1 电场分布计算理论

直流电压下, 电缆终端中绝缘的电场分布由材

料的电导率决定, XLPE 与硅橡胶两种介质中会存在比较微弱的导电电流, 从而建立电流场, 其基本方程如式(2)~(4)所示。

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = 0 \quad (3)$$

$$E = -\nabla V \quad (4)$$

式(2)~(4)中: $J$ 为绝缘层内的电流密度,  $A/m^2$ ;  $E$ 为电场强度,  $V/m$ ;  $V$ 为电势,  $V$ 。  $J$ 和  $E$ 两者的关系可表示为式(5)。

$$J = \sigma E \quad (5)$$

直流电缆终端的绝缘层由两种介质构成, 存在式(6)所示关系。

$$\sigma_1 E_1 = \sigma_2 E_2 \quad (6)$$

式(6)中: $\sigma_1$ 和  $\sigma_2$ 分别为两种绝缘材料的电导率, S/m;  $E_1$ 和  $E_2$ 分别为两种材料承担的电场, V/m。

### 2.2.2 温度场分布计算理论

直流电缆终端的温度场分布采用热传导的泊松方程计算, 如式(7)所示。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\Phi}{\lambda} = 0 \quad (7)$$

式(7)中: $\lambda$ 为材料的导热系数;  $x, y$ 为终端内某一点的二维坐标;  $T$ 为终端内坐标  $(x, y)$  处的温度, K;  $\Phi$ 为线芯的发热功率,  $W/m^2$ 。

线芯发热功率可以通过式(8)转换成线芯的载流量。因此, 通过改变施加的热源即可改变线芯的温度, 从而模拟终端在不同工况下的工作情况。

$$I = \sqrt{\frac{\pi \cdot D \cdot P}{R_T}} \quad (8)$$

式(8)中: $I$ 为线芯的载流量, A;  $D$ 为线芯的直径, m;  $P$ 为导体上施加的热源,  $W/m^2$ ;  $R_T$ 为在温度为  $T$  °C 时导体的单位长度电阻,  $\Omega/m$ 。

## 3 运行电压下气隙缺陷电场强度仿真分析

为分析缺陷内最大场强值在不同尺寸、位置、温度和外加电压时的差异, 针对图 2 给出的直流电缆终端模型采用多物理场仿真软件 Comsol Multiphysics 进行计算。直流电缆绝缘内的电场强度因受到材料电导率即场强和温度的共同作用, 仿真时应将电流场和固体传热场进行相互耦合。XLPE 与 SiR 两种绝缘材料因电导率的差异而在界面上积累空间电荷, 根据式(1)可知  $\sigma_{XLPE}/\sigma_{SiR}$  的值会随电场强度发生变化, 从而影响界面处积累的电荷量。文献[23]指出空间电荷为电导率和相对介电常数的函数, 通过电导率的设置即可将电场、热场与空间电荷联系起来。因此, 界面处的空间电荷可由恒流场

和热场耦合得到。本文继续沿用这种仿真方法,仿真时,假设直流电缆运行在额定工作电压  $U_0=320$  kV 下;绝缘层温度差  $\Delta T$  分别设置为 0、10、30、40、60℃,终端外部温度恒定为 30℃ 不变,其中线芯的正常工作温度最高考虑到 90℃<sup>[24]</sup>;气隙位置  $H$  的设置范围为 [24 cm, 40 cm];气隙厚度  $W$  分别取 0.05 mm、0.1 mm。

### 3.1 线芯工作温度 $T$ 的影响规律

线芯的工作温度  $T$  决定了绝缘层内温度梯度的取值,并进一步影响着绝缘层中的电场分布。图 4 为电缆含有气隙缺陷并处于满载运行状态(线芯温度  $T$  为 90℃)时的温度分布;图 5 为气隙缺陷位于界面 40 cm 处,同时电缆满载运行时的电势和场强分布。

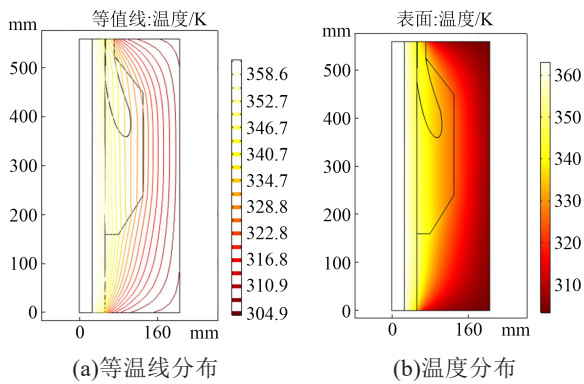


图 4  $T=90^\circ\text{C}$  时电缆终端内的温度分布

Fig.4 Temperature distribution in cable terminal at  $T=90^\circ\text{C}$

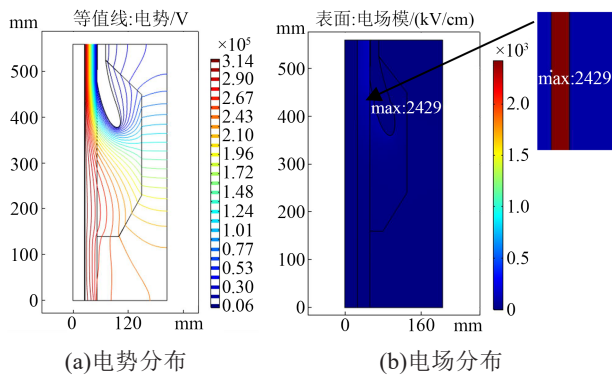


图 5  $T=90^\circ\text{C}$  时气隙缺陷周围的电场分布

Fig.5 Electric field distribution around air gap at  $T=90^\circ\text{C}$

为了更好地体现温度作为主变量时气隙缺陷最大场强值  $E$  的变化趋势,先将线芯温度  $T$  的取值固定,在界面上移动气隙缺陷位置,依次仿真各位置下气隙缺陷周围的电场分布并记录结果,然后改变线芯温度,重复上述计算过程,得到气隙缺陷最大场强值  $E$  的变化趋势如图 6 所示。从图 6 可以看出,气隙缺陷在复合界面范围内的各位置下,内部最大场强值都会随电缆运行所带负载量即线芯工

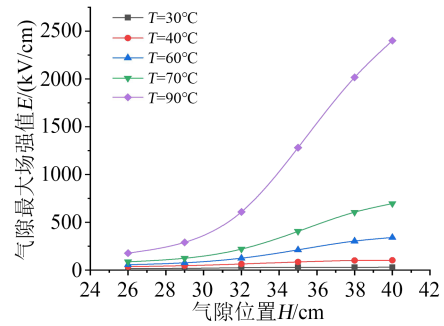


图 6 气隙缺陷最大场强值随线芯工作温度的变化趋势

Fig.6 Variation trend of maximum air gap field strength with core working temperature

作温度的升高而增大。通过以上仿真数据及规律,拟合出各运行工况下气隙缺陷最大场强值  $E$  关于气隙位置  $H$  的拟合函数形式,如式(9)所示。

$$E = k_0 + k_1 H + k_2 H^2 + k_3 H^3 \quad (9)$$

式(9)中,系数  $k_0, k_1, k_2, k_3$  在各个线芯工作温度下有不同的取值,如表 3 所示。

表 3 各系数在不同温度下的取值

Tab.3 Values of coefficients at different temperatures

系数	$T/^\circ\text{C}$				
	30	40	60	70	90
$k_0/(\text{kV}/\text{cm})$	705.60	962	2059	6044	$1.934 \times 10^4$
$k_1/(\text{kV}/\text{cm}^2)$	-67.61	-94.64	-186.90	-563.70	-1 776
$k_2/(\text{kV}/\text{cm}^3)$	2.17	3.09	5.34	16.71	51.06
$k_3/(\text{kV}/\text{cm}^4)$	-0.023	-0.032	-0.043	-0.149	-0.431

由于系数  $k_0 \sim k_3$  是线芯温度的函数,所以将其与表 3 中的各个温度再次进行拟合,得到最终的气隙缺陷场强值  $E(\text{kV}/\text{cm})$  关于  $T(^\circ\text{C})$  和  $H(\text{cm})$  的函数关系如式(10)所示,式中的系数在表 4 中列出。

$$E = \sum_{i=0}^3 (a_i T^{b_i} + c_i) H^i \quad (10)$$

表 4 公式(10)中的系数取值

Tab.4 Coefficient values of formula (10)

系数	$i$			
	0	1	2	3
$a_i$	$1.021 \times 10^{-6}$	$-1.016 \times 10^{-7}$	$3.427 \times 10^{-9}$	$-3.482 \times 10^{-11}$
$b_i$	5.253	5.235	5.199	5.156
$c_i/(\text{kV}/\text{cm}^2)$	531	-51.810	1.711	-0.018

### 3.2 气隙缺陷位置 $H$ 的影响规律

图 7 展示了电缆空载运行时气隙缺陷分别处于界面位置 25 cm 和 35 cm 处的电场分布,图中的数值表示气隙缺陷内的最大电场强度。气隙缺陷在界面不同位置时内部最大场强  $E$  值随电缆线芯温度  $T$  的变化趋势如图 8 所示。

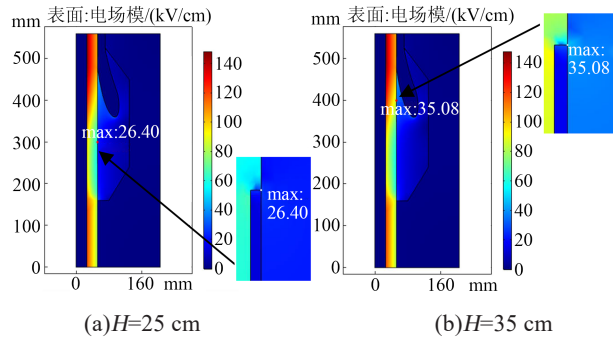


图7 空载下气隙缺陷处于不同界面位置时的电场分布

Fig.7 Electric field distribution of air gap at different interface positions under no-load

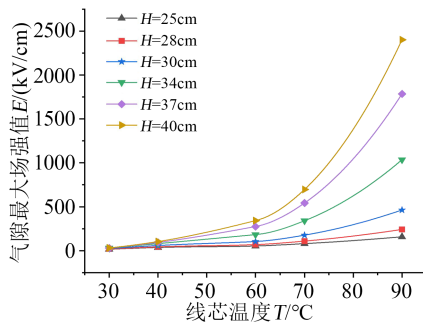


图8 气隙缺陷最大场强值随界面位置的变化趋势

Fig.8 Variation trend of maximum air gap field strength with interface position

电缆终端不含有缺陷时绝缘内部的最大场强集中在应力锥根部位置<sup>[25]</sup>。因此,复合界面上的气隙缺陷越靠近应力锥根部,受到的电场应力越大,周围场强的畸变也越严重,图8中曲线的变化趋势与该规律相符。

### 3.3 气隙缺陷厚度 $W$ 的影响规律

为了体现缺陷产生的随机性,仿真时改变气隙缺陷的厚度  $W$ 。在标准的规定范围内  $W$  分别取 0.05 mm 和 0.1 mm,将3组不同温度下的仿真数据绘制成曲线,如图9所示,实线和虚线分别表示缺陷厚度为 0.05 mm 和 0.10 mm。从图9明显看出每组温度下的两条曲线基本都重合,说明气隙缺陷的径向尺寸对其周围绝缘造成的电场畸变作用很小,基本不改变气隙缺陷内的最大场强值,因此本文对这种随机因素不列入考虑范围。

## 4 运行电压下气隙缺陷内最大场强概率分析

由3.1和3.2节可知,气隙缺陷位置  $H$  和线芯工作温度  $T$  对气隙场强值的影响较大,为了判断电缆正常运行(包含空载情况)时复合界面处气隙缺陷中发生局部放电的概率,对终端复合界面上可能出现的气隙缺陷样本进行统计并绘制场强值  $E$  的概率密度函数。

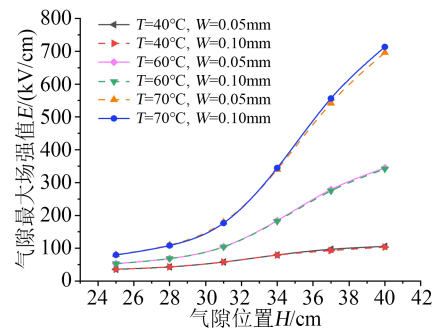


图9 气隙缺陷最大场强在不同尺寸下的变化趋势

Fig.9 Variation trend of maximum air gap field strength under different sizes

### 4.1 气隙缺陷位置 $H$ 的概率密度函数

根据交流电缆终端发生故障的现场实际工况可知,复合界面上产生的气隙缺陷符合以下3点<sup>[26]</sup>: ①发生在界面上的缺陷是独立存在的,各缺陷之间不存在依赖关系;②不同尺寸的缺陷可以在界面范围的任意位置上随机出现;③由于电缆终端中复合界面的位置是固定不变的,缺陷在界面上的产生概率  $P$  只与位置  $H$  有关。

鉴于直流电缆预制式终端与交流电缆预制式终端结构相似,根据上述条件可以将构建的圆筒形气隙缺陷在复合界面处的分布定义为均匀分布,同时只考虑位置  $H$  在 [24 cm, 40 cm] 以内的情况。因此,随机变量  $H$  的分布函数为式(11)。

$$F(H) = \begin{cases} 0, & H < 24 \\ \frac{H - 24}{16}, & 24 \leq H < 40 \\ 1, & H \geq 40 \end{cases} \quad (11)$$

### 4.2 线芯温度 $T$ 的概率密度函数

实际工作中,电缆负荷随时间和季节波动<sup>[26]</sup>,线芯温度也随之变动。直流电缆除了用在城市化供电之外还广泛应用在海上远距离风电系统中,并且直流电缆的负荷根据电缆在电网中的角色不同而有所差异。直流电缆对城市居民区进行供电时所带负荷主要受到居民用电量的影响,可用日负荷曲线反映;而工作在海上风力发电系统时其负荷波动很大程度上受到风速的影响。由于电力电缆的负荷具有随机特性,无法准确拟合函数,本文此处仅采用电缆的日负荷曲线进行描述,以某一电缆的线芯温度<sup>[27]</sup>为例,说明对该随机因素的处理方法。该电缆的线芯温度如图10所示。

图10的线芯温度样本在全年内具有代表性,春秋两季的线芯温度介于夏冬之间,从图10中可以看出,电缆在冬季正常运行的温度范围处于 50~75°C,而在夏季则处于 35~50°C 内。综合两条曲线的变化趋势可以得出在一天内的大部分时间中电

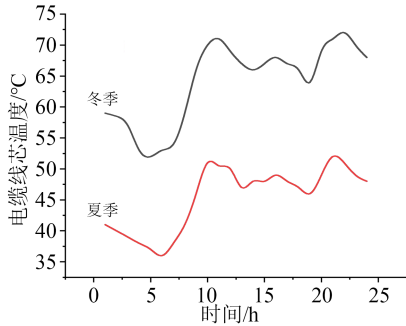


图 10 夏、冬季电缆线芯温度的日变化曲线

Fig.10 Diurnal variation curves of cable core temperature in summer and winter

缆线芯温度处于 50℃ 左右。因此,将图 10 中夏季和冬季的日负荷样本数据进行统计,得到线芯的温度变化符合正态分布  $N \sim (54.87^\circ\text{C}, 11.08^2)$ ,其分布函数如式(12)所示。

$$F(T) = \frac{1}{11.08 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^T \exp\left(-\frac{(x - 54.87)^2}{245.533}\right) dx \quad (12)$$

以上主要讨论了电缆线芯的工作温度变化规律,实际上电缆绝缘内的电场分布主要受到温度梯度的影响。由于前文已将电缆外护套的温度设定为 30℃,此处线芯温度  $T$  的改变也意味着电缆绝缘温差  $\Delta T$  在改变,两个变量的含义相同,统一用电缆线芯温度  $T$  作为气隙缺陷场强值的影响因素。

#### 4.3 气隙缺陷内最大场强 $E$ 的概率密度函数

为了得到气隙缺陷内最大电场强度值  $E$  的随机样本数据,需要结合蒙特卡洛法构造出气隙位置  $H$  和线芯温度  $T$  的随机样本集合。因此,本文通过 MATLAB 软件分别产生两次 1 000 个  $(0, 1)$  内的随机数集合,将其对应到气隙位置  $H$  和线芯温度  $T$  的概率分布函数上,利用逆累积分布函数求得两个变量的样本集合,并把所有的样本依次带入式(10),得到一个表示气隙缺陷最大场强值  $E$  的 1 000×1 000 的样本集合,统计这些数据并绘制频率直方图,根据频率直方图拟合出最大场强值  $E$  的概率密度函数,如图 11 所示。从图 11 可以看出,当场强值的范围大于 50 kV/cm 时,大致符合指数分布,拟合公式如式(13)所示。气隙缺陷内的最大场强值落在 0~50 kV/cm 这一区域的概率大约为 0.19,不符合指数规律。最大电场强度小于 50 kV/cm 的气隙缺陷大多数靠近绝缘油与硅橡胶分界面的位置,或是电缆状态处于空载时。

$$f(E) = 0.3222 \exp(-0.006095E) \quad (13)$$

#### 4.4 运行电压下放电气隙缺陷集合

由图 11 可知,直流电缆终端运行在不同温度梯

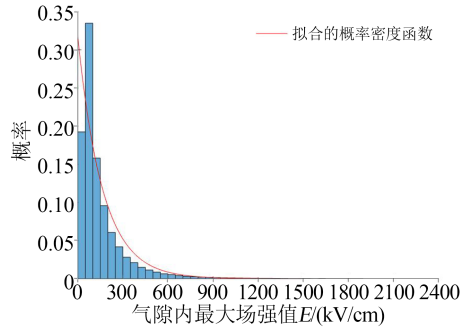


图 11 气隙缺陷场强值的频率直方图及概率密度曲线

Fig.11 Frequency histogram and probability density curve of air gap field strength

度的工况下,在设定的复合界面范围内可能产生的圆筒形气隙缺陷中大约有 1.279% 的缺陷其最大场强值小于空气的临界击穿场强  $E_{\max}$  (30 kV/cm),这部分缺陷在上述条件下不会发生局部放电。需要注意的是,沿面放电的起始放电场强远小于纯粹空气隙的起始放电场强。圆筒形缺陷处在两种绝缘材料的分界面上,场强畸变严重时可能会发生沿面放电。

考虑到气隙缺陷内发生沿面放电时,起始放电场强将远低于 30 kV/cm。与以 30 kV/cm 作为起始放电场强相比,在相同的试验电压下,沿面放电更容易被检测出来。为了重点分析难以被检测到的缺陷,下文统一将 30 kV/cm 作为气隙缺陷可能发生局放的临界场强。对可能发生局放的缺陷进行有效检测时,只需针对场强大于 30 kV/cm 的缺陷(占总缺陷的 98.721%)进行分析。

### 5 现场直流试验下缺陷检出率计算

直流局部放电检测试验能否有效检出电缆终端复合界面上可能会发生局部放电的缺陷,很大程度上取决于试验电压  $U$  的幅值。此外,根据前文仿真结果可知,气隙缺陷内最大场强值受到环境温度的显著影响。出厂试验或者交接试验中开展直流局部放电检测时,电缆处于空载状态,其内部温度分布与运行状态时的差异巨大。因此,可将影响现场试验中气隙缺陷场强值的因素分为外施电压  $U$ 、环境温度  $T_0$  以及气隙位置  $H$ 。

#### 5.1 直流试验电压与气隙缺陷最大电场的关系式

在现行直流电缆试验标准中,耐压试验为局部放电检测提供了契机,可在耐压试验中同时开展局部放电检测。外施电压  $U$  大于电缆额定工作电压  $U_0$ ,两者的关系可以通过  $U = kU_0$  来表示,  $k$  为电压比例系数。为了得到现场试验环境下气隙缺陷内最大电场强度  $E$  的拟合函数,分别仿真计算 3 个影响

因素在不同取值下的数值。 $k$ 分别取1.2、1.4、1.6、1.8、2.0;试验环境温度 $T_0$ 分别取5、15、25、35℃;气隙位置 $H$ 分别取26、30、34、38 cm,然后将求得的数据按变量分组进行拟合,得到气隙缺陷场强值的拟合函数如式(14)所示。虽然该公式与3.1中气隙缺陷场强函数的求法相同,但两者表达的含义有很大区别:式(10)描述的是电缆在不同运行温度下气隙缺陷的场强值分布,包含电缆空载及其他运行状态,而式(14)只针对电缆处于空载时不同电压下气隙缺陷内的电场强度。

$$E = \sum_{i=0}^3 \left( \sum_{j=0}^3 a_j H^{b_j} \cdot k^j + \sum_{j=0}^3 c_j H^{d_j} \cdot k^j + \sum_{j=0}^3 e_j H^{f_j} \cdot k^j + \sum_{j=0}^3 p_j H^{q_j} \cdot k^j \right) T^i \quad (14)$$

表5为式(14)中的系数取值,可以看出系数 $a_j$ 、 $c_j$ 、 $e_j$ 、 $p_j$ 的值很小,近似为0。虽然这些系数的数值很小,但与之相乘的变量取值都相对较大,所以两者的乘积并不近似于0。除此之外,最大场强值 $E$ 需要通过叠加求和得到,每次取值对于最终的结果都很重要,所以这些系数不能忽略。

表5 公式(14)中的系数取值  
Tab.5 Coefficient valuse in formula (14)

系列	$j$			
	0	1	2	3
$a_j$	$1.13 \times 10^{-35}$	$-5.942 \times 10^{-33}$	$3.977 \times 10^{-31}$	$-6.963 \times 10^{-30}$
$b_j$	21.18	19.87	18.81	17.82
$c_j$	$-3.174 \times 10^{-30}$	$2.396 \times 10^{-27}$	$-1.232 \times 10^{-25}$	$4.555 \times 10^{-24}$
$d_j$	18.82	17.40	16.41	15.22
$e_j$	$2.194 \times 10^{-24}$	$8.66 \times 10^{-22}$	$1.201 \times 10^{-19}$	$-5.237 \times 10^{-18}$
$f_j$	15.86	14.62	13.37	12.13
$p_j$	$-2.94 \times 10^{-18}$	$5.301 \times 10^{-15}$	$-1.204 \times 10^{-15}$	$8.213 \times 10^{-12}$
$q_j$	12.35	10.72	11.21	8.62

## 5.2 缺陷检出率随试验电压与环境温度的变化规律

在现场直流耐压试验条件下,试验温度由于受到环境和季节变化的影响而存在较大差异,标准GB/T 31489.1—2015中推荐的试验温度为20℃±15℃,所以只需讨论这一温度范围内的情况。

为计算电缆终端界面上可能发生局部放电的气隙缺陷在不同环境温度和外加电压下的缺陷检出率,采用蒙特卡洛法在MATLAB中生成关于变量 $H$ 的1000个随机样本数据,将其代入式(14)中获得气隙缺陷最大场强值的总样本。最后通过概率统计的方式模拟出试验温度分别在30、20、10℃3种情况下气隙缺陷检出率随直流试验电压 $U$ 增大的变化趋势曲线。其中,曲线上各试验电压下的缺陷

检出率是多次模拟计算之后根据统计结果得到的平均值,如图12所示。

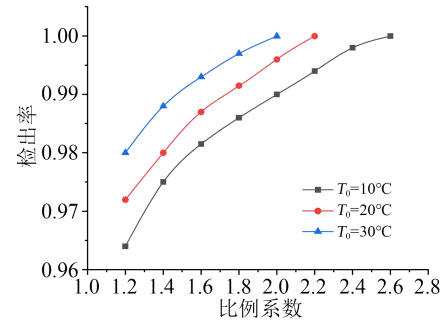


图12 缺陷检出率随外加电压增大的变化曲线

Fig.12 Variation curve of defect detection rate with the increase of applied voltage

由图12可知,试验温度越高,各外加电压作用下的检出率越高,说明即使电缆绝缘层内不存在温度梯度,外界环境的温度对复合界面处缺陷周围的电场分布仍起到主导作用。在外加电压 $U=1.85U_0$ 时,试验温度为10℃时的缺陷检出率为98.67%,试验温度为20℃时的缺陷检出率为99.25%,试验温度为30℃时的缺陷检出率为99.85%,接近100%,说明此时的检出能力已达到相对较高的水平。根据GB/T 31489.1—2015<sup>[14]</sup>的建议可知,直流电缆在进行型式试验和例行试验时推荐使用的直流试验电压值 $U_T$ 为1.85倍的电缆额定工作电压 $U_0$ ,表明此电压等级下缺陷的检出率较高,从这个角度能够反映出本文的计算结果与标准相一致。因此,对于气隙缺陷击穿场强为30 kV/cm的情况下,直流试验电压在 $1.85U_0$ 时能够检出绝大部分缺陷。在进行 $1.85U_0$ 的直流耐压试验时,可一并完成直流局部放电试验。

## 5.3 气隙缺陷检出率的拟合公式

为了更形象的表示复合界面上气隙缺陷的检出水平,可以构造检出率的数学表达式 $S$ 。同式(10)的函数拟合方法一样,先拟合出检出率与单变量比例系数 $k$ 的函数,再将函数中的各次系数与环境温度 $T_0$ 进行拟合,得到最终的检出率表达式。此处比例系数 $k$ 分别取值为1.2、1.4、1.6、1.8、2.0、2.2,试验环境温度 $T_0$ 分别取10、20、30℃,利用MATLAB软件中的cftool工具箱进行数学拟合,得到检出率的表达式为式(15),表6为式(15)中的系数取值。

$$S = \sum_{i=0}^4 (a_i T_0^{b_i} + c_i) k^i \quad (15)$$

在现场环境下试验或者出厂前的例行试验中,不同环境温度下的缺陷检出率是有差异的,因此该公式的提出能够对电缆终端中气隙缺陷的检测起到一个参考作用。

表6 式(15)中的系数取值

Tab.6 Coefficient value in formula (15)

系数	<i>i</i>				
	0	1	2	3	4
$a_i$	$1.021 \times 10^{-6}$	$-1.016 \times 10^{-7}$	$3.427 \times 10^{-9}$	$-3.482 \times 10^{-11}$	$1.303 \times 10^6$
$b_i$	5.253	5.235	5.199	5.156	-6.999
$c_i$	531	-51.810	1.711	-0.018	-0.079

## 6 结论

本文通过仿真分析电缆终端中的界面气隙缺陷,得到以下结论:

(1)提出了基于气隙缺陷内部最大电场强度随线芯温度、气隙位置、气隙厚度和外加电压的变化规律和蒙特卡洛法的气隙缺陷概率计算方法,实现了对直流试验电压下检出电缆正常工作电压下能够发生放电的气隙的检出率计算,建立了基于多重随机因素下放电气隙检出率的直流局放试验电压确定方法。

(2)气隙缺陷检出率与环境温度和直流局放试验电压的函数关系式符合4次方幂函数关系式,据此可以计算不同环境温度下不同检出率要求所对应的直流局放试验电压。以保守计算(取30 kV/cm作为气隙缺陷起始放电场强)为前提,直流试验电压取 $1.85U_0$ ,20℃时气隙缺陷的检出率为99.25%,30℃时气隙检出率可达99.85%。

(3)考虑电缆正常工作时线芯温度及气隙位置的概率分布特性,气隙缺陷内最大场强 $E$ 的概率分布基本符合指数函数分布。

现场试验中,若界面气隙的起始放电场强较低,则各温度下的缺陷检出率会相应提高。由于目前缺乏薄间隙圆筒气隙沿面放电的起始场强数据,后续工作需要深入研究薄间隙缺陷沿面起始放电场强,进而给出更准确的检出率关系式。

## 参考文献:

- [1] 邵森安,马颢,丰如男,等. 电力电缆国内外研究综述[J]. 电线电缆,2021(3):1-6,10.
- [2] 谢书鸿,傅明利,尹毅,等. 中国交联聚乙烯绝缘高压直流电缆发展的三级跳:从160kV到200kV再到320kV[J]. 南方电网技术,2015,9(10):5-12.
- [3] YE H, FECHNER T, LEI X, et al. Review on HVDC cable terminations[J]. High Voltage,2018,3(2):79-89.
- [4] MAMPAEY B, AHERN C, BOCHENSKI B, et al. Maintenance of HV Cable Systems[R]. CIGRE,2021:24-33.
- [5] BOGGS S, DAMON D H, HJERRILD J, et al. Effect of insulation properties on the field grading of solid dielectric DC cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(4):456-461.
- [6] 杨帆,杨旗,程鹏,等. 电缆接头内部气隙放电缺陷下的绝缘劣化程度表征方法[J]. 电工技术学报,2017,32(2):24-32.
- [7] 王超,刘毅刚,刘刚,等. 有限元法应用于电缆终端应力锥缺陷分

析[J]. 高电压技术,2007,33(5):152-155.

- [8] 古亮,赵阿琴,郝鸿凯,等. 缺陷对电缆中间接头温度分布影响的仿真研究[J]. 绝缘材料,2019,52(5):69-74.
- [9] 刘刚,陈志娟,陆国俊,等. 110kV交联聚乙烯电缆终端主绝缘含杂质的击穿特性分析[J]. 高电压技术,2010,36(10):2450-2453.
- [10] 康强,顾霄,徐阳,等. 直流局部放电检测综述[J]. 南方电网技术,2015,9(10):69-77.
- [11] 杨丰源,许勇鹏,郑新龙,等. 基于压缩感知的高压直流电缆局部放电模式识别[J]. 高电压技术,2017,43(2):446-452.
- [12] 陈连明. 基于阻尼振荡电压的直流电缆典型缺陷局部放电检测[D]. 北京:华北电力大学,2021.
- [13] 马鑫,张怀垠,吴继岩,等. 温度对交联聚乙烯电缆尖刺缺陷局部放电特性的影响[J]. 高压电器,2021,57(5):151-156.
- [14] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压500kV及以下直流输电用挤包绝缘电力电缆系统试验方法和要求 第1部分:试验方法和要求:GB/T 31489.1—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [15] 张洪亮,谢书鸿,尹毅,等. 厦门柔直工程±320kV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.
- [16] 高寒. 320kV XLPE高压直流电缆及终端仿真分析和优化设计[D]. 北京:华北电力大学,2017.
- [17] 刘禹成. XLPE绝缘直流电缆终端场强分布的仿真分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.
- [18] 朱智恩,陈龙啸,杨黎明,等. 柔性直流电缆附件应力锥设计研究[J]. 绝缘材料,2019,52(6):86-91.
- [19] 卢南剑. ±320kV柔性直流电缆终端绝缘缺陷的研究[D]. 厦门:厦门理工学院,2016.
- [20] 刘宗喜,欧阳本红,赵鹏,等. 基于增强绝缘材料非线性电导率的特高压直流电流接头优化设计研究[J]. 绝缘材料,2021,54(8):74-82.
- [21] REDDY C C, RAMU T S. On the computation of electric field and temperature distribution in HVDC cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Insulation,2006,13(6):1236-1244.
- [22] HJERRILD J, BOGGS S, HOLBOLL J T, et al. DC-field in solid dielectric cables under transient thermal conditions[C]// IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics. Eindhoven, Netherlands:IEEE,2001:58-61.
- [23] 严有祥,朱婷,王蕾. 基于有限元法对±320kV直流XLPE电缆中间接头电场与空间电荷的仿真计算[J]. 高电压技术,2017,43(11):3591-3598.
- [24] 电力行业电力电缆标准化技术委员会. 电力电缆线路运行规程:DL/T 1253—2013[S]. 北京:中国电力企业联合会,2014.
- [25] 尚康良,曹均正,赵志斌,等. 320kV 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):2018-2022.
- [26] 张永华,张天会,顾丽春. 焊接接头缺陷尺寸概率分布模型研究[J]. 云南农业大学学报,2013,28(2):264-269.
- [27] 杨鸿飞,田智,靖晓平等. 基于季节负荷和温度周期的电力电缆电热退化模拟方法:中国,201610051255.X[P].2016-06-29.

收稿日期:2022-02-24 修回日期:2022-04-10

作者简介:赵洋(1979-),男(汉族),河南开封人,高级工程师,博士,主要从事高压电缆运维检修的工作;通信作者:程养春(1974-),男(汉族),陕西彬县人,教授,博导,主要从事输变电装备绝缘检测、故障诊断与状态评估技术的研究。