

基于电-热场联合分析的EPR中压电缆终端 异常热点仿真分析及优化

郭 蕾¹,李丽妮¹,邢立勤¹,曹伟东¹,白龙雷¹,项恩新²,周利军¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756;2. 云南电网有限责任公司 电力科学研究院,云南 昆明 650217)

摘要:25 kV 乙丙橡胶(EPR)中压电缆终端因其自身的结构特性,内部电-热场分布不均,局部易出现异常畸变热点问题,而在安装电缆终端时出现的划伤缺陷加大了问题的严重程度,加速缺陷周围绝缘材料的老化,大幅降低了绝缘性能。为解决该问题,提出了一种电导率与电场、温度相关的非线性应力管材料,采用COMSOL仿真方法对比研究了使用高介质材料与非线性材料制作应力管时电缆终端内部的电-热场分布。结果表明,经优化后电缆终端的电-热场分布畸变程度能得到有效缓解;对于存在划伤缺陷的情况,优化后的电缆终端的电-热场畸变程度低于其出现击穿现象的阈值,表明其能够在缺陷情况下相对安全运行。同时采用热成像仪现场测试电缆终端温度分布,结果验证了经优化后电缆终端表面异常发热情况的改善效果。

关键词:EPR中压电缆终端;异常热点;电-热场分布;优化;温度检测

中图分类号:TM 247

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005025

0 引言

25 kV 乙丙橡胶EPR(Ethylene-Propylene Rubber)中压电缆是保障高速铁路列车可靠运行的核心设备,同时也是牵引供电系统重要的附属装置,起到将电能从供电系统传输至牵引电机、实现车载高压电器系统与外部电气网络的连接以及传输母线与其他高压设备外壳间的绝缘^[1-3]的作用。EPR电缆终端作为25 kV中压电缆的关键部位和绝缘薄弱环节,故障发生率较高^[2-3],对电缆设备的稳定性有直接影响。相关文献^[4]显示,EPR电缆终端内部为多层绝缘结构,主绝缘采用EPR材料,应力管采用高介电导材料,因不同绝缘层材料参数的差异,终端内部电场畸变严重,介质损耗偏大;而在列车运行过程中,由于额定电流可达500 A以上,短路电流则可能高达5 kA,再加上终端内部畸变电场的存在,将导致内部热场分布极度不均,造成主绝缘与应力管间的材料参数差异增大,进一步加深电场畸变程度^[4-6]。另外,因现场终端安装过程中需划切部分半导体层,极易在电缆终端EPR绝缘表面造成划伤缺陷,进一步加剧上述电-热场分布不均的状况,严重影响电缆终端的绝缘性能。

目前,国内外学者针对电缆故障缺陷及内部电-热场分布进行了一些研究。ILLIAS H A等通过有

限元分析软件模拟中压电缆接头内包含不同尺寸、位置的缺陷以及不同绝缘厚度的情况,研究影响电缆接头内电场强度分布的主要因素^[7];程子华等通过对天津CX供电公司近8年电缆事故数据的统计分析,发现半导体层断口刀痕过深、热缩不到位、电缆头安装密封不严等问题将严重降低电缆绝缘性能,影响电缆运行质量^[8];刘刚等研究了电缆终端主绝缘在含有空气气隙缺陷时的放电特性,结果表明气隙缺陷处易发生局部放电现象,随着气隙放电通道逐渐贯穿,局部放电表现出明显的阶段特征,其特征量为电缆终端提供故障诊断基础^[9];徐涛等对瓷套式电缆终端受潮缺陷进行了状态检测试验,结果显示终端应力锥附近区域出现了不同程度的异常温升,长时间运行将可能导致缺陷附近出现碳化甚至热击穿^[10]。

学者根据电缆终端内电、热场的研究结果,针对终端异常热点问题提出了不同的措施。刘刚等建立了电缆接头的二维轴向仿真模型,验证了二维模型的可行性,研究了环境温度、对流换热系数、主绝缘件和保护壳填充胶导热系数变化对温度场分布的影响,探究了提高电缆运行状态的方法^[11];BOETTCHER B、DONZEL L和DANIEL W等研究发现,在电缆终端中添加压敏型氧化锌(ZnO)的硅橡胶应控体能均匀绝缘屏蔽端部的电场畸变,提高绝缘性能^[12-14];韩宝忠等研究发现,通过合理选择应力锥绝缘材料,可达到均匀终端内部电场分布的效果^[15];王霞等研究后指出,纳米ZnO/低密度聚乙烯复合成分的加入能有效降低绝缘材料的电导率,提高设备的交流击穿强度^[16]。由于25 kV EPR中压电缆终端特殊的材料和结构,在研究中还需要考虑不同绝缘层间以及划

收稿日期:2019-06-27;修回日期:2020-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877183);高寒高铁套管骤变温度场下微水相变对绝缘破坏的机理研究

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877183) and Study on Insulation Failure Mechanism of Micro-water Phase Change in Alpine High-speed Rail Casing under Sudden Temperature Field

伤缺陷间的电-热耦合关系,因此有必要通过提升材料性能,改善电-热场分布等方式,提高其绝缘性能,并利用实验探究其存在缺陷时上述措施的优化效果。

为此,本文提出并设计了一种加入 ZnO 的非线性材料用作增强型绝缘应力管,通过有限元仿真研究非线性材料型应力管对电缆终端内部畸变电-热场的均匀效果,并通过实验验证存在缺陷时该材料对电缆终端内部电-热场畸变情况的优化效果。

1 模型搭建

1.1 有限元仿真模型搭建

电缆终端可采用热缩式或冷缩式方式进行安装,本文涉及的 25 kV EPR 中压电缆终端使用多层绝缘材料热缩而成,为建立与实际电缆终端 1:1 的等效仿真模型,首先对该类型终端进行了解剖分析,解剖结果见附录 A 中的图 A1。由图可知,该类型终端由外至内主要由伞裙、热缩管、应力管、EPR 绝缘层、半导体屏蔽层、电缆缆芯这 6 层结构组成。通过解剖实验,获得电缆终端内部结构参数,按照 1:1 的比例搭建三维电缆终端模型见附录 A 中的图 A2。

1.2 非线性应力管材料特性

本文使用的应力管样品如附录 A 中的图 A3 所示,样品分为 2 组。

(1) A 组为利用从解剖后的实际 25 kV EPR 中压电缆终端高介质材料型应力管上所截取的材料,制成 3 个直径为 50 mm、厚度为 2 mm 的圆形高介质型应力管样品,记为 A₁—A₃。

(2) B 组为非线性材料型应力管样品。首先按照比例配方,依次取出 ZnO 材料、树脂基复合材料置于烧杯中,加入无水乙醇,使用搅拌棒搅拌均匀,制成粘稠状的非线性材料,然后使用毛刷在高介质材料表面均匀涂抹该非线性材料,在室温条件下干燥 24 h,得到 3 组直径为 50 mm、厚度为 2 mm 的圆形非线性材料型应力管样品,记为 B₁—B₃。

同时,基于三电极原理搭建了样品电导率测试平台,如附录 A 中的图 A4 中所示。恒温干燥箱可控制测试温度,实验中测试温度分别取为 20、30、40、50、60、70 ℃。在上述某一温度下,将样品放置于测试系统中,电导率测试仪的调压范围为 0~5 kV,在温度不变的情况下,保持相同的时间间隔逐步升高电压,以得到该温度下测试样品在各电压等级下的电导率数值。为减少实验数据的随机误差,在各温度、电压等级下对 3 个样品重复测试 3 次后取测试结果的平均值。2 组样品的电导率测试结果如附录 A 中的图 A5 所示。

由图 A5(a)可知,在任意一个温度点上,非线性材料的电导率呈现出明显的指数函数形式,特别是

由 1 kV/mm 的电场强度作用开始,该特征更为明显;同一温度作用下,在 0.1~3 kV/mm 的电场强度范围内,电导率最大增长了 5 个数量级;在任意电压等级下,测试温度的变化也影响着非线性材料的电导率变化,同一电压等级作用下,在 20~70 ℃ 的温度范围内,电导率最大增长了 20 倍。根据图中的曲线,通过软件拟合出的非线性材料型应力管的电导率随温度、电场强度呈指数型变化的公式为:

$$\sigma_i = \frac{T_{\text{test}}}{15} \times 2.423 \times 10^{-9} \times e^{(3.796 \times 10^{-6} E) + 1.5} \quad (1)$$

其中, σ_i 为非线性材料型应力管的电导率; T_{test} 为测试温度; E 为电场强度。

由图 A5(b)可知,高介质材料型应力管的电导率随温度、电场强度的变化缓慢,经过曲线拟合,得到其拟合公式如式(2)所示。

$$\sigma_g = 10^{-8} \text{ S/m} \quad (2)$$

其中, σ_g 为高介质材料型应力管的电导率。

1.3 电热场耦合数值模型搭建

EPR 电缆终端的额定电压为 25 kV,终端内部的电场畸变将造成内部温度升高,内部温度的变化又会导致绝缘材料的电导率变化,进而对电场分布产生影响。因此工频电压下电缆终端的电场分布应满足如下本构关系:

$$D = \varepsilon E \quad (3)$$

$$J = (\sigma + j\omega\varepsilon)E \quad (4)$$

其中, D 为电感应强度; ε 为相对介电常数; J 为全电流密度; σ 为电导率。 ε 在工频电压下变化缓慢,因此 σ 的变化将明显影响电场分布。

电缆终端的传热过程满足能量守恒定律,其散热方式包括热传递、热对流和热辐射。本文中的电缆终端为轴对称均匀各向同性的导热体,而所求的热场为达到热平衡时的温度场,因此当电缆终端内部存在热源时,根据传热学原理,其导热方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\Phi}{\lambda} = 0 \quad (5)$$

其中, (r, θ, z) 为柱坐标单位微元; T 为电缆终端内部温度; Φ 为单位体积内热源的热量; λ 为导热系数。该方程需要满足 3 类边界条件:距离终端一定距离处环境温度恒定,终端两端法向热流密度恒定,需考虑环境的对流换热系数及环境温度。

本文中,电缆终端温度场的计算属于含有内热源的稳态导热计算,电缆终端使用固体绝缘,电场作用下绝缘介质的极化方向将会不断发生变化,其产热方式包括焦耳热、绝缘介质损耗产热等,根据 IEC60287 标准^[17],电缆终端缆芯的焦耳热发热计算公式如下:

$$Q_c = I^2 R_c / (\pi r_c^2) \quad (6)$$

$$R_c = R(1 + Y_s) \quad (7)$$

$$R = R_0 [1 + \alpha_{20}(T - 20)] \quad (8)$$

其中, Q_c 为缆芯焦耳热损耗; I 为流过的电流; R_c 为缆芯单位长度交流电阻; r_c 为缆芯半径; R 为不同温度下缆芯单位长度电阻; Y_s 为肌肤效应系数; R_0 为 20 °C 时铜导体单位长度的直流电阻; α_{20} 为直流电阻温度系数。由式(7)、(8)可知 R_c 随温度发生变化, 不仅影响焦耳热的产生, 还影响终端电场强度的分布。

除上述电-热场分布外, 本文还考虑了电缆终端运行过程中 EPR 绝缘的介质损耗现象, 具体计算如下:

$$P_c = \omega C U^2 \tan \delta \quad (9)$$

$$C = Q/U \quad (10)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \int D_i dS_i = \int \epsilon E_i dS_i \quad (11)$$

其中, P_c 为绝缘介质损耗; ω 为电压角频率; U 为电压; $\tan \delta$ 为介质损耗正切值; C 为绝缘介质等值电容, 其电荷量可进行有限元划分计算, 将绝缘交界面划分为 n 个单元, 每个单元的电量可由电磁场理论计算得到; Q 为界面电荷量; Q_i 为单位元的电荷量; D_i 为单位元的电通量; S_i 为单位元区域; E_i 为单位元电场强度。由上述计算公式可知, 电场强度的畸变将会影响绝缘的介质损耗水平, 并促进其发热过程。

2 仿真结果与分析

设置运行电压为 25 kV 工频电压, 环境温度为 25 °C; 电缆终端金属屏蔽层接地, 使用电场和固体传热模块; 分别根据式(5)和式(9)设置焦耳产热和绝缘介质损耗产热; 伞裙及外护套表面与空气的对流换热系数设置为 8 W/(m²·°C), 终端的运行电流设置为 330 A; 使用四面体进行网格划分, 对于尺寸比较小的结构, 如应力管、胶等进行局部网格细化, 以保证仿真的精确度。材料参数是多物理场有限元仿真的必备参数, 根据实验测试结果, 本文的材料参数设置如表 1 所示。表中, σ_{EPR} 的公式为:

$$\sigma_{EPR} = 4.76 \times 10^{-9} \times \exp[1.32 \times 10^{-4} / (T_{EPR} + 273.15)] \times \sinh(1.3 \times 10^{-7} |E|) / |E| \quad (12)$$

其中, T_{EPR} 为绝缘层温度。

表 1 材料参数

材料	ϵ	$\sigma / (S \cdot m^{-1})$	$\lambda / [W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$
缆芯	1	5.71×10^7	401
半导体层	100	2	0.286
高介质材料型应力管	30	σ_g	0.27
非线性材料型应力管	30	σ_f	0.29
绝缘层	3.5	σ_{EPR}	0.25
热缩管	3.3	2.5×10^{-11}	0.36
护套	3.6	3.3×10^{-12}	0.4
伞裙	5.7	5×10^{-12}	0.51
胶	7	5×10^{-9}	0.6

2.1 正常运行状态下的电缆终端电-热场仿真结果

正常运行状态下高介质材料型电缆终端和非线性材料型电缆终端的电场分布如附录 B 中的图 B1 所示, 两者沿轴向的分布如图 1 所示。

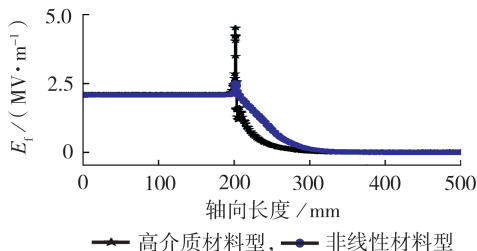


图 1 正常运行状态下 2 类电缆终端沿轴向的电场分布

Fig.1 Electric field distribution in axial direction between two types of cable terminals under normal condition

由图 B1 和图 1 可看出, 2 种电缆终端的外半导体层截断处电场畸变均比较严重, 但严重程度存在明显差异: 高介质材料型电缆终端的电场强度最大值达到了 4.85 MV/m, 位于外半导体层截断处, 而使用非线性材料型应力管后, 电缆终端的电场强度最大值降低为 3.87 MV/m, 位于电缆绝缘层, 此时外半导体层截断处的电场强度最大值为 2.41 MV/m。综合对比图 B1 和图 1 可知, 非线性材料的引入能有效地解决外半导体层截断处的电场畸变问题, 在使用该材料后, 截断处的电场强度最大值下降幅度可达 50.3%。

正常运行状态下高介质材料型电缆终端和非线性材料型电缆终端的温度分布如附录 B 中的图 B2 所示。从图 B2(a) 中可知, 终端内的温度最大值出现在缆芯位置, 但缆芯区域温度分布较为均匀; 与之形成对比的是, 在半导体层截断处附近, 绝缘层和应力管层周围的温度虽未达到最大值水平, 但温度梯度较大, 热场分布畸变严重。使用非线性材料型应力管后, 如图 B2(b) 所示, 终端内部温度最大值变化不大, 约为 49.7 °C, 而在半导体层截断处温度由 42 °C 降低至 40.4 °C, EPR 绝缘层与应力管接触部位的热场分布畸变状况得到了有效缓解。

图 2 为与半导体层截断处对应的由缆芯至伞裙位置随径向长度变化的温度分布图。由图可见, 截断处所对应的表面位置也是整根电缆终端表面温度最大值所在的位置, 位于左起第 2 个伞裙与第 3 个伞裙间, 使用非线性材料后表面最高温度从 25.54 °C 下降为 25.29 °C, 所以非线性材料对电缆终端内部的温度分布也具有一定的削减作用, 其增加了内部的热量分散。

2.2 划伤缺陷情况下的电缆终端电-热场仿真结果

EPR 电缆终端在安装过程中, 需将外半导体层以外的材料截断, 由半导体与绝缘层经挤出制成,

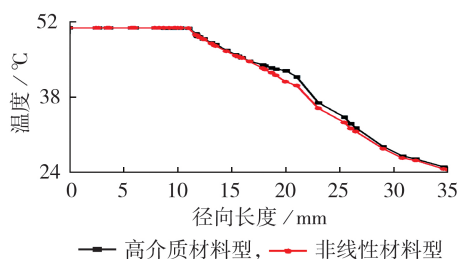


图2 正常运行状态下2类电缆终端沿径向的温度分布

Fig.2 Temperature distribution in radial direction between two types of cable terminals under normal condition

且半导体层厚度较薄,因此在进行截断操作时,易使主绝缘划伤,导致划伤处出现气隙缺陷。本文为模拟电缆终端内划伤缺陷,在半导体层截断处的主绝缘表面设置了长5 mm、宽1 mm、深0.5 mm的长方体气隙;同时考虑热缩时由于截断处的结构特性,应力管不易完全贴合导致易存在气隙的问题,在截断处与应力管之间设置了长5 mm、宽1 mm、高0.5 mm的三角形气隙,按照式(12)计算缺陷处的产热^[18]。

$$Q = 0.24 U^2 \sigma_d S / d \quad (13)$$

其中, σ_d 为缺陷处电导率; S 为缺陷处截面积; d 为缺陷处长度。

主绝缘划伤状态下高介质材料型电缆终端和非线性材料型电缆终端的电场分布如附录B中的图B3所示。由图B3(a)可见,在主绝缘被划伤的情况下,高介质材料型电缆终端在划伤处的电场畸变十分严重,电场强度最大值由正常运行状态下的4.85 MV/m增大至8.28 MV/m,该最大值出现在划伤缺陷的起始位置(即划伤缺陷造成的气隙的起始部位),此时该缺陷处的电场强度最大值已经超过空气击穿场强3 MV/m,缺陷附近将出现放电击穿,造成缺陷周围的绝缘劣化,缺陷处击穿概率增大。由图B3(b)可见,使用非线性材料型应力管之后,电缆终端内部的电场强度整体降低,电场强度最大值位于绝缘层处,远离缺陷位置,而缺陷附近的电场强度降低趋势极为明显,其幅值由8.28 MV/m降低至2.89 MV/m,未达到气隙的击穿场强,因此划伤缺陷处的击穿概率较小。

主绝缘划伤状态下2类电缆终端沿截断处轴向变化的电场分布如图3所示。由图可知,使用高介质材料型和非线性材料型应力管时,该划伤缺陷附近单位长度的电场强度最大畸变程度分别增加了74.63%和27.33%,所以非线性材料型应力管有效地均匀了终端内缺陷处的电场分布,增强了电缆终端内含缺陷情况下的绝缘性能。

主绝缘划伤状态下高介质材料型电缆终端和非线性材料型电缆终端的温度分布见附录B中的图

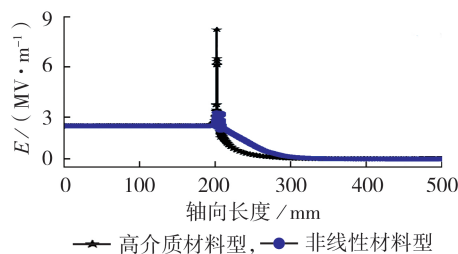


图3 主绝缘划伤状态下2类电缆终端沿轴向的电场分布

Fig.3 Electric field distribution in axial direction between two types of cable terminals under scratch defect of main insulation

B4。由图B4(a)可见:电缆终端内部含划伤缺陷时,划伤缺陷处内部最高温度可达47.81 °C;缺陷温度提高了5 °C,缆芯温度提高了0.1 °C;划伤缺陷处的温度分布如图B4(a)中的局部放大图所示,在划伤缺陷附近,电缆终端内部的平均温度为47 °C,在高温、高场强的作用下,绝缘材料的碳化速度加快,导致缺陷程度进一步加深,最终造成电缆终端的击穿灼烧。由图B4(b)可见:使用非线性材料型应力管后,缺陷处的温度由47.81 °C降低至43.83 °C,这说明非线性材料型应力管可有效降低电缆终端内部,特别是缺陷处的温度。另外,由图B4可知,不管使用何种材料,含缺陷情况下电缆终端表面温度的最大值均出现在划伤缺陷所对应的表面位置。

作轴向坐标 $x=202$ mm、径向坐标 $y \in [0, 35]$ mm的截线,绘制该截线上温度随径向长度变化的分布曲线如图4所示。由图可知,主绝缘划伤情况下,高介质材料型电缆终端表面的最高温度为26.19 °C,比正常情况下的电缆终端表面的最高温度25.54 °C高出了0.65 °C,相差超过0.5 °C^[19],这说明已形成严重的绝缘缺陷;使用非线性材料型应力管后,电缆终端表面的最高温度为25.66 °C,比正常情况下非线性材料型电缆终端表面的最高温度高0.37 °C,温度差未超过0.5 °C,这说明异常热点现象得到显著改善后,电缆终端能在含划伤缺陷的情况下相对安全地运行。

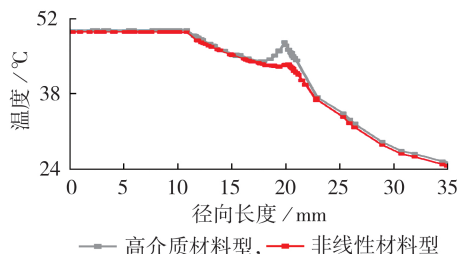


图4 主绝缘划伤状态下2类电缆终端沿径向的温度分布

Fig.4 Temperature distribution in radial direction between two types of cable terminals under scratch defect of main insulation

3 实验验证与分析

3.1 温度检测实验分析

25 kV EPR中压电缆终端因结构问题易出现畸变电场,而畸变电场的存在将严重影响内部热量的产生与分布,造成电缆终端内材料老化加剧,电场畸变程度加深,因此在现场监测和研究中,温度分布成为判断电缆终端内部绝缘性的重要指标。利用红外诊断技术等非接触方式可有效验证非线性材料型电缆终端的优化效果^[19],本文采用Fotric 226s型热成像仪设备对2类电缆终端的温度分布进行测量。

为研究划伤缺陷情况下2类电缆终端的温度分布,依据仿真设计,从外半导体层截断处开始,在EPR主绝缘上制作长5 mm、宽1 mm、深0.5 mm的划伤缺陷,如附录B中的图B5所示。实验过程中,电缆试样恒流工作于330 A,以5 kV/min的速度均匀增加外施电压,当外施电压升高至25 kV后维持120 min,测试此时的温度分布,记录热成像图。正常运行状态和主绝缘划伤状态下的结果分别见附录B中的图B6和图B7。

由图B6可知,在正常运行状态下,高介质材料型和非线性材料型电缆终端的表面最高温度均出现在第2个伞裙与第3个伞裙间(与外半导体层截断处相对应),如图中红色三角形区域所示,整根电缆终端温度分布较为均匀;高介质材料型电缆终端的表面最高温度为25.7℃,而非线性材料型电缆终端表面最高温度仅为25.3℃。

由图B7可知,当电缆终端内部含划伤缺陷时,在运行电压下,缺陷处所对应的表面温度明显升高,在该处异常热场分布区域呈不规则的扩展;高介质材料型电缆终端的表面最高温度达27.7℃,比仿真计算所得的表面最高温度高出0.13℃,考虑到外部环境的影响,该偏差在合理的范围内;使用非线性材料型应力管后,电缆终端的表面最高温度仅为26.5℃,异常温升区域减小。

相对温差 δ 的计算公式如式(14)所示。

$$\delta = (T_2 - T_1) / (T_2 - T_0) \times 100\% \quad (14)$$

其中, T_1 、 T_2 分别为正常运行状态和主绝缘划伤状态下,电缆终端的表面最高温度; T_0 为环境温度。

根据式(14)可计算得到主绝缘划伤状态下,高介质材料型电缆终端的相对温差为81.48%,使用非线性材料型应力管进行优化后,相对温差降低为78.57%,低于DL/T 664—2016标准规定的内部出现严重缺陷的阈值(80%)^[19]。这说明使用非线性材料型应力管后,相对温差大幅降低,电缆终端的运行稳定性得到了有效的提高。

为了更好地分析电缆终端含缺陷情况下的温度特征及优化效果,绘制沿电缆终端表面温度最大值

处轴向延长线的温度分布曲线见附录B中的图B8。由图可知,在正常运行状态下,虽然外半导体层截断处对应的位置的表面温度最高,但是温度整体分布比较均匀,畸变程度小;在主绝缘划伤状态下,高介质材料型电缆终端在第2个和第3个伞裙间的温度畸变十分严重,呈现急剧上升的锐角三角形状分布,畸变处左右两边的温度变化缓慢,而其他位置的温度分布相对均匀;使用非线性材料型应力管进行优化后,虽然最高温度位置及温度分布特征与使用高介质材料型时相似,但电缆终端温度整体下降,这表明优化效果显著,绝缘性能得到了明显提升,且优化后电缆终端仍保留了划伤缺陷下的温度分布特征,温度分布仍然可作为缺陷检测的重要依据。

3.2 耐压实验分析

检测电气设备绝缘强度最直接有效的方法是进行工频交流耐压实验,该实验可用来判定电气设备能否继续运行,是防止绝缘事故的有效方法。为进一步探究含不同材料应力管的电缆终端的绝缘性能,对含缺陷的电缆终端进行了工频条件下60 min的交流耐压试验^[20],试验条件为:选取2条全新的EPR电缆,分别编号为1号和2号,1号样品为含划伤缺陷的高介质材料型电缆终端样品,2号样品为含划伤缺陷的非线性材料型电缆终端样品;测试电压为50 kV;测试时间为60 min。

1号样品在耐压试验的第35 min被击穿,击穿后的解剖图如附录B中的图B9(a)所示,由图可见,1号样品的应力管、热缩管被击穿,绝缘层表面的缺陷处有大量的炭黑;2号样品未发生明显的闪络或击穿现象,其解剖结果如图B9(b)所示,由图可见,2号样品的绝缘表面无长距离爬电现象,只有轻微的放电痕迹。上述耐压实验结果表明非线性材料型电缆终端在含缺陷情况下也能安全地运行。

4 结论

本文基于电-热场联合分析理论和模型,针对25 kV EPR中压电缆终端内部异常热点问题,开展了非线性材料型应力管电导特性以及电缆终端电-热场优化仿真研究,并使用热成像设备进行了电缆终端的温度检测和实验验证,得到如下结论。

(1)非线性材料型应力管的电导率受高场强和高温度影响大,特别是从1 kV/mm开始,呈现明显的指数函数形式增长。

(2)使用非线性材料型应力管材料后,划伤缺陷状态下的电缆终端内部的电-热场畸变程度可得到明显改善:电场强度最大降低了65.22%,电场强度最大值低于空气的击穿场强;同时内部异常热点温度降低了13.6%,表面异常热点温度差低于0.5℃。

(3)通过终端的温度检测和验证实验结果可知,电缆终端在含缺陷位置对应的表面温度急速上升,分

布区域呈不规则扩展的趋势;使用非线性材料型应力管后,异常热点相对温差由原来的81.48%降低为78.57%,相对温差值低于标准DL/T664—2016中规定的出现严重缺陷的阈值,表明含缺陷的电缆终端在使用非线性材料优化后也能相对安全地运行。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] ZUIDEMA C, KEGERISE W, FLEMING R, et al. A short history of rubber cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(4):45-50.
- [2] 周凯,熊庆,陶霁韬,等.工频叠加谐波电压下中压电缆终端绝缘过热点分析[J].电力自动化设备,2013,33(3):166-170. ZHOU Kai, XIONG Qing, TAO Santao, et al. Hot spots of medium-voltage cable termination under harmonic voltages superposed on fundamental voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 166-170.
- [3] 周婷,解绍锋.电气化铁路新型电缆供电方案[J].电力自动化设备,2018,38(7):189-195,206. ZHOU Ting, XIE Shaofeng. New-type cable traction power supply scheme of electric railroad[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 189-195, 206.
- [4] 王有元,陈仁刚,陈伟根,等.电缆敷设方式下电缆载流量计算及其影响因素分析[J].电力自动化设备,2010,30(11):24-29. WANG Youyuan, CHEN Rengang, CHEN Weigen, et al. Calculation of trench laying cable ampacity and its influencing factors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 24-29.
- [5] 周利军,朱少波,白龙雷,等.低温下应力管界面对车载电缆终端局部放电的影响[J].高电压技术,2019,45(4):1266-1273. ZHOU Lijun, ZHU Shaobo, BAI Longlei, et al. Influence of stress tubes interface on partial discharge of vehicle cable terminal at low temperatures[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1266-1273.
- [6] MENG Xiaokai, WANG Zhiqiang, GUO Fengli. Dynamic analysis of core temperature of low-voltage power cable based on thermal conductivity[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2006, 39(1):59-65.
- [7] ILLIAS H A, LEE Z H, BAKAR A H A, et al. Electric field distribution in 132 kV one piece premolded cable joint structures[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: IEEE, 2012: 643-646.
- [8] 程子华.天津CX供电公司35 kV电力电缆故障与防治措施[D].天津:天津大学,2016. CHENG Zihua. Faults and prevention measures of 35 kV power cable in Tianjin CX power supply company[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [9] 刘刚,陈志娟.10 kV交联聚乙烯电缆终端主绝缘含空气气隙缺陷试验[J].高电压技术,2012,38(3):678-683. LIU Gang, CHEN Zhijuan. Experiment of main insulation with air gap of 10 kV cross linked polyethylene cable terminal[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 678-683.
- [10] 徐涛.基于电-热场仿真和红外检测的瓷套式电缆终端局部异常发热研究[D].广州:华南理工大学,2016. XU Tao. Study on local over-heat of porcelain type cable terminal based on electric-thermal field simulation and infrared detection[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [11] 刘刚,王鹏宇,毛健琨,等.高压电缆接头温度场分布的仿真计算[J].高电压技术,2018,44(11):3688-3698. LIU Gang, WANG Pengyu, MAO Jiankun, et al. Simulation calculation of temperature field distribution in high voltage cable joints[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3688-3698.
- [12] BOETTCHER B, MALIN G, STROBL R. Stress control system for composite insulators based on ZnO technology[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE / PES, 2001: 776-780.
- [13] DONZEL L, CHRISTEN T, KESSLER R, et al. Silicone composites for HV applications based on microvaristors[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Toulouse, France: IEEE, 2004: 403-406.
- [14] DANIEL W, CHRISTIAN R, MARKUS C. Design of ZnO microvaristor material stress-cone for cable accessories[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(4):1262-1267.
- [15] 韩宝忠,傅明利,李春阳,等.硅橡胶电导特性对XLPE绝缘高压直流电缆终端电场分布的影响[J].高电压技术,2014,40(9):2627-2634. HAN Baozhong, FU Mingli, LI Chunyang, et al. Effect of silicone rubber's electric conductance characteristic on electric field distribution inside XLPE insulated HVDC cable termination[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2627-2634.
- [16] 王霞,成霞,陈少卿,等.纳米ZnO/低密度聚乙烯复合材料的介电特性[J].中国电机工程学报,2008,28(19):13-19. WANG Xia, CHENG Xia, CHEN Shaoqing, et al. Dielectric properties of the composites of nano-ZnO/low-density polyethylene[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 13-19.
- [17] IEC. Calculation of the current rating of electric cables, part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses, section 2: sheath eddy current loss factor for two circuits in flat formation: IEC60287-1993[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 1993.
- [18] 吴广宁.高电压技术[M].北京:机械工业出版社,2007:5.
- [19] 国网武汉高压研究所.带电设备红外诊断应用规范:DL/T 664—2016[S].北京:中国电力出版社,2016.
- [20] 国网北京电力设计研究所.电气装置安装工程电气设备交接试验标准:GB/T 50150—2006[S].北京:中国计划出版社,2006.

作者简介:



郭伟

郭 蕾(1981—),女,山东菏泽人,副教授,博士,主要研究方向为电气设备绝缘监测(E-mail: guolei_mail@swjtu.cn);

李丽妮(1994—),女,广西崇左人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备绝缘监测(E-mail: 475857275@qq.com);

邢立勤(1996—),男,辽宁大连人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备绝缘监测(E-mail: 2935080296@qq.com);

曹伟东(1996—),男,湖北荆门人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备绝缘监测(E-mail: 541046507@qq.com);

白龙雷(1991—),男,山东冠县人,博士研究生,主要研究方向为电气设备绝缘监测(E-mail: bailonglei0107@qq.com);

项恩新(1990—),男,工程师,主要研究方向为输配电电缆检测技术(E-mail: 419722987@qq.com);

周利军(1978—),男,四川成都人,教授,博士,主要研究方向为电气设备绝缘监测(E-mail: zhouljijun@swjtu.cn)。

(编辑 任思思)

Simulation analysis and optimization based on electric-thermal field for abnormal distortion hot spots of EPR medium voltage cable terminal

GUO Lei¹, LI Lini¹, XING Limeng¹, CAO Weidong¹, BAI Longlei¹, XIANG Enxin², ZHOU Lijun¹

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: Due to the structural characteristics of the 25 kV EPR (Ethylene-Propylene Rubber) medium voltage cable terminal, the distribution of electric-thermal field inside the cable terminal is uneven, and the cable terminal partially has abnormal distortion hot spots. The scratch defects in the installation process of cable terminal increase the severity of the problem, accelerate the aging of the insulating material around the scratch defects, and greatly reduce the insulation performance. In order to solve the above-mentioned problems, a nonlinear stress tube material with conductivity associated with electric field and temperature is proposed. The COMSOL simulation method is used to compare the internal electric-thermal field distribution of the cable terminal with control tubes using high dielectric material and nonlinear materials. The results show that the electric-thermal field distortion of the cable terminal can be effectively alleviated after optimization. In the case of scratch defect, the electric-thermal field distortion of the optimized cable terminal does not reach the breakdown threshold, indicating that its operation is relatively safe. The temperature distribution of cable terminal in field is tested by the thermal imager, and the results show that the abnormal heating of the cable terminal surface is relieved after optimization.

Key words: EPR medium voltage cable terminal; abnormal hot spot; electric-thermal field distribution; optimization; temperature detection

(上接第 180 页 continued from page 180)

Multi-area interconnected distributed power flow algorithm based on multi agent system

HUANG Kaiyi¹, AI Qian¹, ZHANG Yufan¹, ZHOU Jiakan²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the issue that the private information cannot be fully shared in a multi-area power flow calculation problem, a multi-area interconnected distributed power flow algorithm based on MAS (Multi Agent System) is proposed. Firstly, the framework of multi-area distributed power flow calculation based on MAS is introduced, and a coordinated interaction way of each agent at all levels considering data protection is given. Secondly, a two-level multi agent structure of the main grid and regional-area management that includes both outer and inner management agent is developed. Meanwhile, an improved iteration projection search approach is employed to establish a double-iteration algorithm for distributed power flow calculation, which can enable a very limited amount of non-important information in multi-area communication and achieve exponential fast convergence in each area. Finally, test results of the 6-bus, 30-bus and 118-bus systems verify the effectiveness and flexibility of the proposed algorithm by comparing with the centralized algorithm.

Key words: distributed algorithm; power flow calculation; multi agent systems; improved projection search method; privacy protection

附录 A

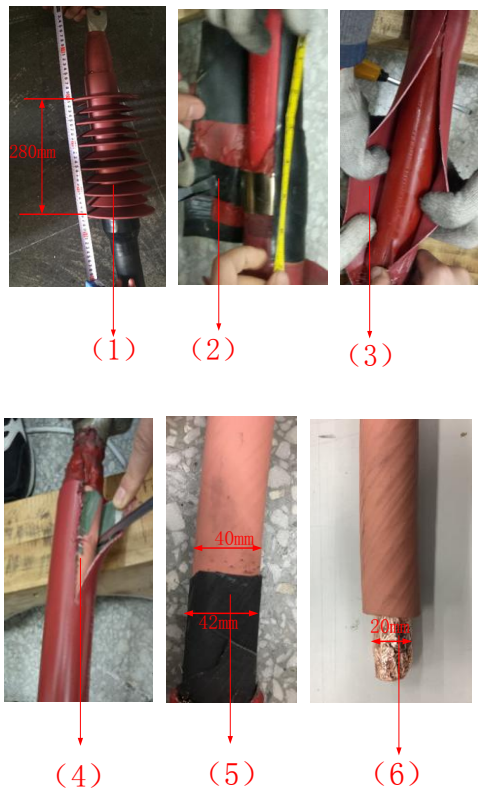
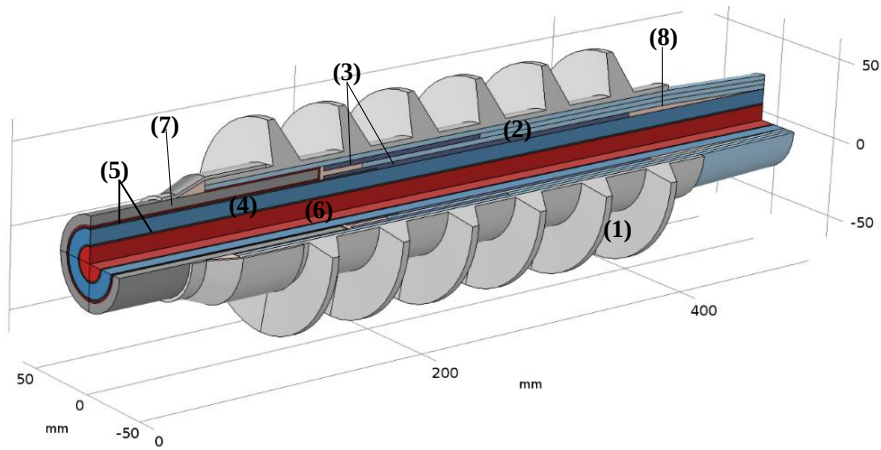


图 A1 电缆终端现场解剖图

Fig.A1 Field anatomy diagram of cable terminal



- (1) 伞裙, (2) 热缩管, (3) 应力管, (4) EPR 绝缘层
(5) 半导体屏蔽层, (6) 电缆缆芯, (7) 外护套, (8) 胶芯

图 A2 三维电缆终端模型图

Fig.A2 Schematic diagram of cable terminal model



(a) 高介质材料型应力
管样品图



(b) 非线性材料型应力
管样品图

图 A3 应力管样品图

Fig.A3 Schematic diagrams of stress tube samples

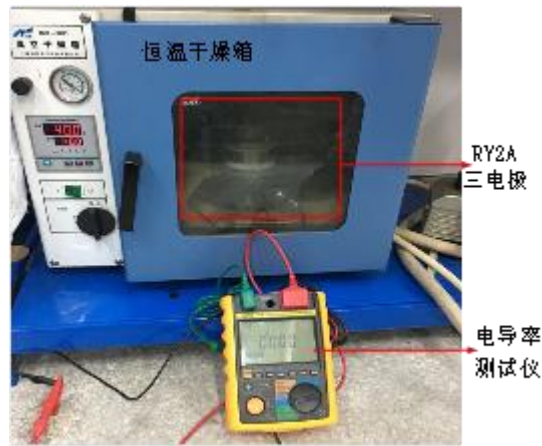
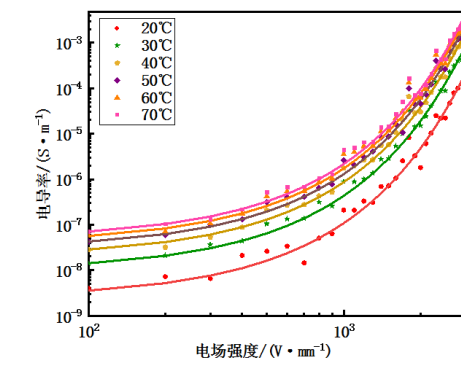
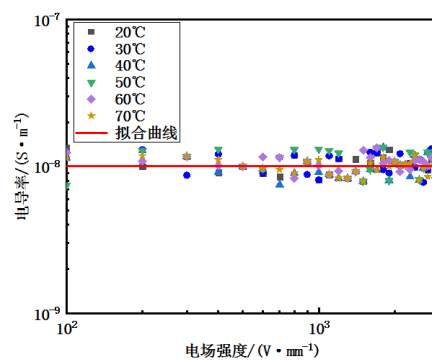


图 A4 样品电导率测试平台

Fig.A4 Testing platform of electrical conductivity for stress tubesamples



(a) 非线性材料应力管样品

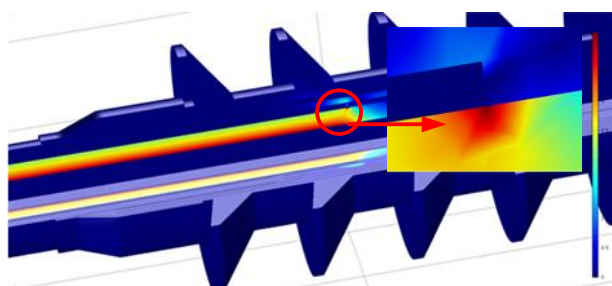


(b) 高介质材料型应力管样品

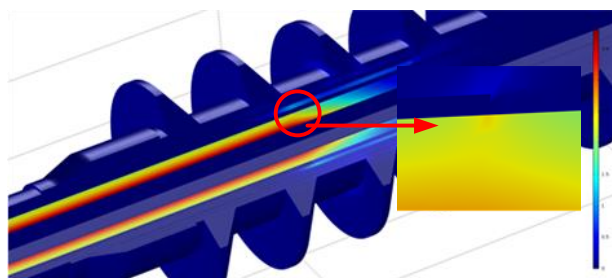
图 A5 不同温度和电场强度下的非线性材料和高介质材料型应力管样品的电导率分布

Fig.A5 Electrical conductivity distribution of nonlinear material and high dielectric material stress tube samples under different values of temperature and electric field intensity

附录 B



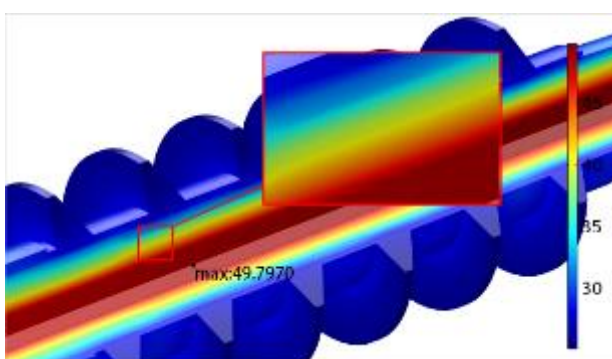
(a) 高介质材料型电缆终端



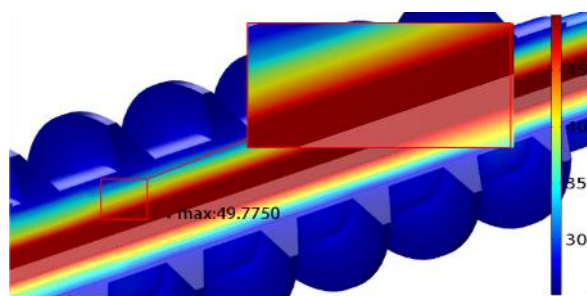
(b) 非线性材料型电缆终端

图 B1 正常运行状态下 2 种电缆终端电场分布

Fig.B1 Electric field distribution of two types of cable terminals under normal condition



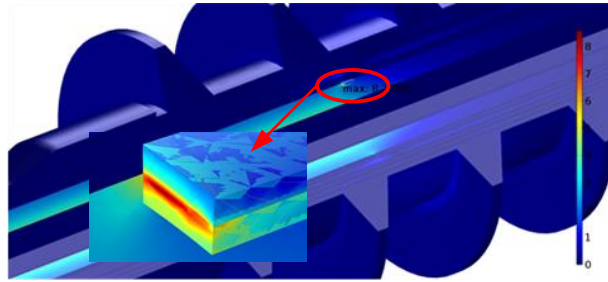
(a) 高介质材料型电缆终端



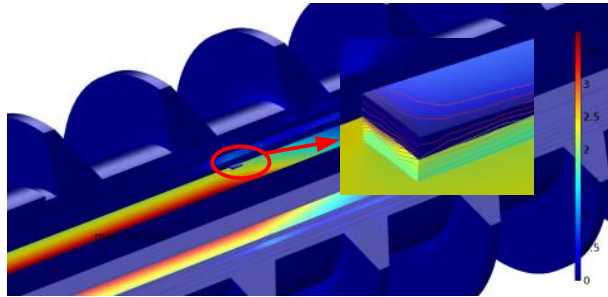
(b) 非线性材料型电缆终端

图 B2 正常运行状态下 2 种电缆终端温度分布

Fig.B2 Temperature distribution of two types of cable terminals under normal condition



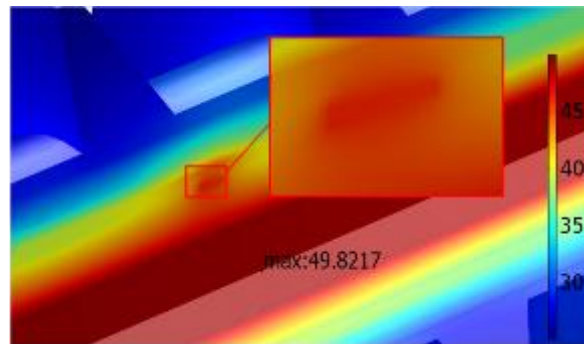
(a) 高介质材料型电缆终端



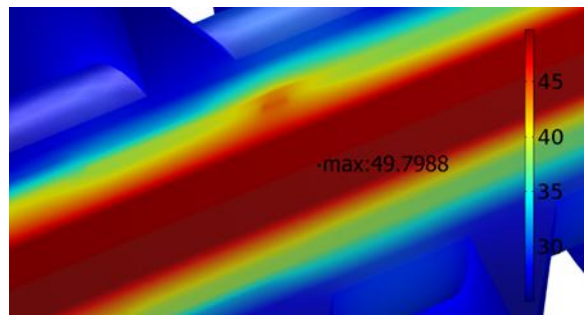
(b) 非线性材料型电缆终端

图 B3 主绝缘划伤状态下 2 种电缆终端的电场分布

Fig.B3 Electric field distribution of two types of cable terminals under scratch defect of main insulation



(a) 高介质材料型电缆终端



(b) 非线性材料型电缆终端

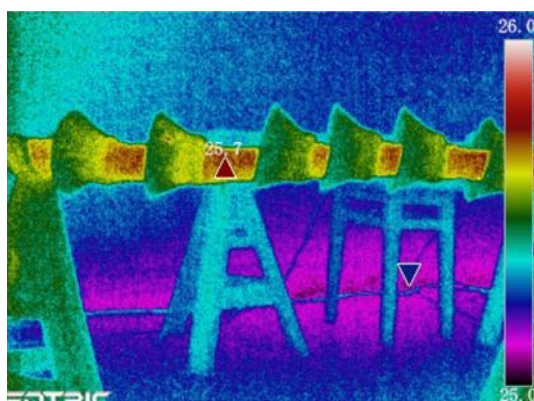
图 B4 主绝缘划伤状态下 2 种电缆终端的温度分布

Fig.B4 Temperature distribution of two types of cable terminals under scratch defect of main insulation

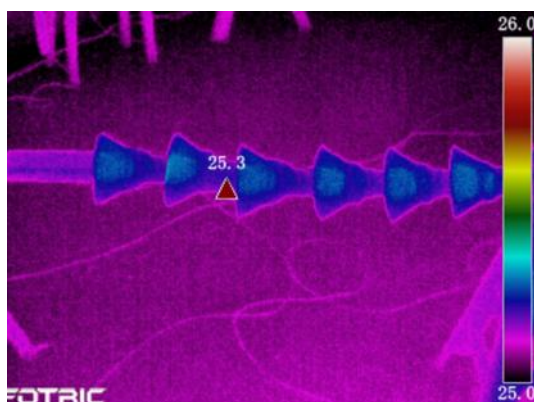


图 B5 划伤缺陷制作图

Fig.B5 Drawing of scratch defect



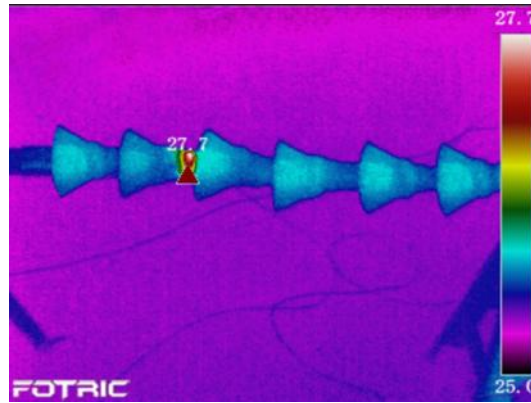
(a) 高介质材料型电缆样品



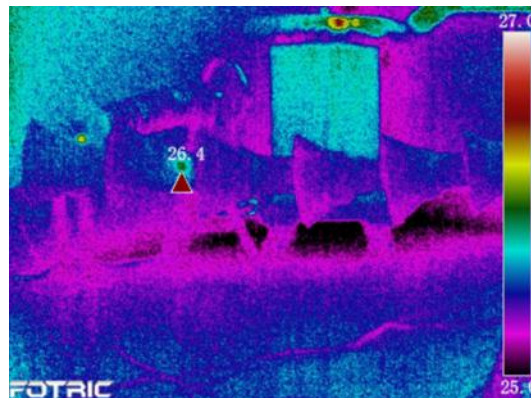
(b) 非线性材料型电缆样品

图 B6 正常运行状态下电缆样品热像图

Fig.B6 Thermography of cable samples under normal condition



(a) 高介质材料型电缆样品



(b) 非线性材料型电缆样品

图 B7 主绝缘划伤情况下电缆样品热像图

Fig.B7 Thermography of cable samples under scratch defect of main insulation

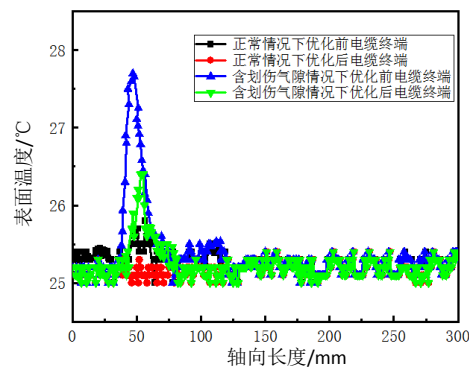


图 B8 正常运行状态和主绝缘划伤状态下，2 类电缆终端沿轴向的温度分布

FigB8 Temperature distribution in axial direction between two types of cable terminals under normal condition and scratch defect of main insulation



(a) 1 号样品

(b) 2 号样品

图 B9 样品解剖图

Fig.B9 Anatomy diagram of samples