

[电缆接头]

基于电磁-热耦合场的10 kV T型电缆接头受潮缺陷仿真研究

文/李永旭 白玉庆 宋纯伟 修俊瑞 周强

1. 国网山东省电力公司聊城供电公司; 2. 山东理工大学

建立JB-10/630型10 kV T型电缆接头电磁-热耦合场有限元仿真模型, 研究在T型电缆接头双通套管/硅橡胶绝缘层交界面、硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面、应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面存在受潮缺陷下的电场及温度场特性; 分别分析在不同交界面、不同程度缺陷、不同电压下的电场的轴向和径向分布特性及温度场特性。研究结果表明, T型电缆终端接头在受潮缺陷下, 周围绝缘材料会产生电场畸变, 在顶点处会临近空气的击穿场强。由于T型电缆接头热源主要为线芯部分, 受潮缺陷对于周围绝缘材料的温升影响几乎可以不计。

在现代城市电力配电网中, 环网柜起着配电网的分支于汇聚、连接、分流和保护的作用, 扮演着至关重要的角色。而T型电缆接头作为环网柜电缆连接的关键部件, 其运行的可靠性直接影响到城市电力配电网的稳定运行。

目前, 10 kV环网柜电缆室内由于阴雨天气等原因可能会使下方电缆沟道内产生积水, 导致处于潮湿的运行恶劣环境中, 若T型电缆接头在安装过程中未能充分考虑防水措施或防水性能较差, 水分可能会向T型电缆接头内部渗入, 这种情况T型电缆接头内部构成潜在威胁。在长期运行的情况下, 水分的入侵可能会导致T型电缆接头各绝缘层的绝缘性能下降, 进而引发界面击穿或者其他故障的发生。

针对电缆受潮缺陷问题, 引起学者关注。文献[1]通过对T型电缆接头在双通套管界面的空气间隙缺陷下的电场及温度场分布特性进行了分析, 当空气间隙受潮时, 有缺陷的空气间隙进入临界破坏状态, 法兰基座和箱体上表面的场强增加幅度可达

20%, 最高温度可达15℃左右。文献[2]利用极化/去极化电流测试系统, 在未受潮、受潮后2, 4, 6和8周的中间节点, 测试其极化/退极化电流, 计算得到各分支的时间常数, 实验结果证明此时间常数可以作为一个特性参量, 用来判别电缆接头的受潮程度。文献[3]利用有限元计算的方法, 在电缆接头的设置空气间隙、受潮、半导体尖端和铜杂质缺陷, 对电缆芯施加不同等级的电压进行分析, 空气间隙和铜杂质的起始放电电压大于受潮和半导体尖端。文献[4]通过有限元仿真和实验的方法, 针对XLPE试品进行的研究表明, 当电缆中间接头受潮时, 平均击穿电压下降至正常情况下的85%~94%。

上述研究对于T型电缆接头受潮缺陷研究提供了参考, 但是对于受潮缺陷在不同界面的电场, 温度场研究较少。根据运行经验与文献调研, 发现双通套管/硅橡胶绝缘层交界面; 硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面; 应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面最容易发生受潮缺陷, 本文分析T型电缆接头

基金项目: 国网山东省电力有限公司科技项目 (520611230003); 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2022ME156)。

在3种交界面发生不同程度受潮缺陷的电场、温度场的分布特性,为10 kV环网柜T型电缆接头的模型改进和运维检修提供参考。

模型建立

1. T型电缆接头结构及参数

选取10 kV环网柜配套的JB-10/630型号的T型电缆接头作为研究对象,运用有限元软件中电磁场模块与热场模块耦合计算,建立三维T型电缆接头模型,模型剖视图如图1所示,主要材料仿真参数见表1。

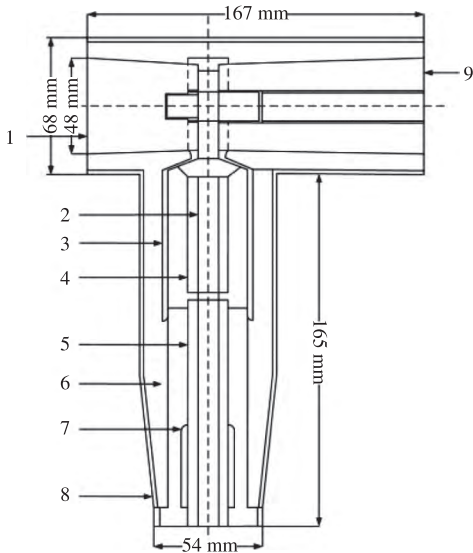


图1 T型电缆接头(JB-10/630)剖视图

1—后堵头 2—导线 3—内高压屏蔽层 4—压接端子
5—绝缘层 6—硅橡胶绝缘层 7—应力锥 8—外屏蔽层
9—双通套管(前半段)

表1 主要材料仿真参数

结构部位	介质材料	导热系数/[W/(m·K)]	电导率/(S/m)	相对介电常数
导体	铜	400	5.8×10^7	1×10^4
绝缘层	XLPE	0.33	3.92×10^{-15}	2.09
应力锥	半导体	0.35	2	30
双通套管	硅树脂	0.8	3.92×10^{-15}	3.5

研究的10 kV环网柜T型电缆接头的运行工况为50 Hz的工频交流电,在实际运行状态中,由于电流密度为位移电流密度的 10^7 倍,电场的变化率很小,因此位移电流的影响在计算模型中忽略不计。当水分入侵发生时电性能下降,导致电场分布不均匀,因此,在研究中选取准静电场计算模型。

2. 各物理场控制方程

电磁场的控制方程为

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla B = 0 \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla D = \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中, ∇ 为矢量微分算子; H 为磁场强度; ρ 为电荷密度; B 为磁感应强度; E 为电场强度; J 为电流密度; D 为电位移矢量。

当介电质为各向同性时,电磁场控制方程为

$$\begin{cases} J = \gamma E \\ D = \varepsilon E \end{cases} \quad (2)$$

式中, γ 为电导率; E 为电场强度; ε 为相对介电常数。

温度场的控制方程为

$$\rho C_p u \nabla T + \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (3)$$

式中, Q 为热源; ρ 为材料密度; T 为温度; C_p 为常压热容; u 为位移; k 为热导系数。

T型电缆接头的电磁-热场耦合关系如图2所示。

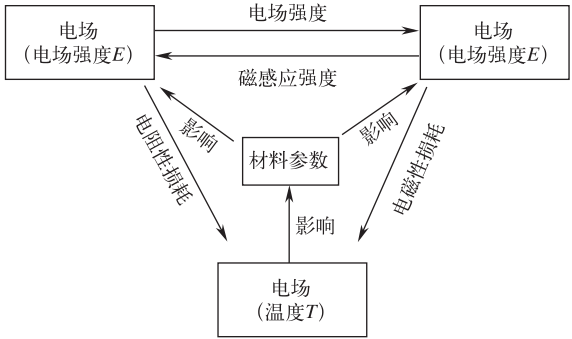


图2 电磁-热耦合关系图

在温度场计算中,T型电缆终端热源产生方式主要考虑导体的焦耳热和绝缘材料的损耗产热。

导体产热率为

$$Q = I^2 R / S \quad (4)$$

式中, Q 为导体产热率; I 为T型电缆接头的负荷电流; R 为单位长度导体的交流电阻; S 为线芯的截面积。

绝缘材料的损耗发热功率为

$$P = \phi^2 \omega C \tan \delta \quad (5)$$

式中, P 为绝缘材料的损耗发热功率; ω 为角频率; C 为电介质电容; $\tan \delta$ 为介质损耗因数; ϕ 为电介质

的电位。

3. 网格划分

通过自由四面体网格对T型电缆接头三维模型进行网格划分。根据环网柜实际的运行经验,将导体端的电位设置为8.7 kV;电流设置为630 A;外壳接地点设置为接地面;环境温度设置为20 ℃;对于四周空气域设置空气自然对流传热系数 h 取5 W/(m·℃)。

4. 受潮缺陷设置方法

本模型通过设置半径分别为1.5 mm; 3 mm; 5.5 mm, 高度为1 mm的圆柱状水膜来模拟轻度、中度和重度受潮缺陷,将水膜分别设置双通套管/硅橡胶绝缘层界面;硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层界面;硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层

层界面;应力锥/交联聚乙烯绝缘层界面,探究不同界面发生受潮缺陷时的电场和温度场的分布影响。

仿真结果与分析

1. 电场分布特性仿真与分析

(1) 不同交界面的受潮缺陷电场分布特性分析
设置半径为3.5 mm, 高度为1 mm的圆柱状水膜,放置于T型电缆接头双通套管/硅橡胶绝缘层界面、硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层界面、应力锥/交联聚乙烯绝缘层界面,受潮缺陷的轴向和径向电场分布如图3、图4所示。

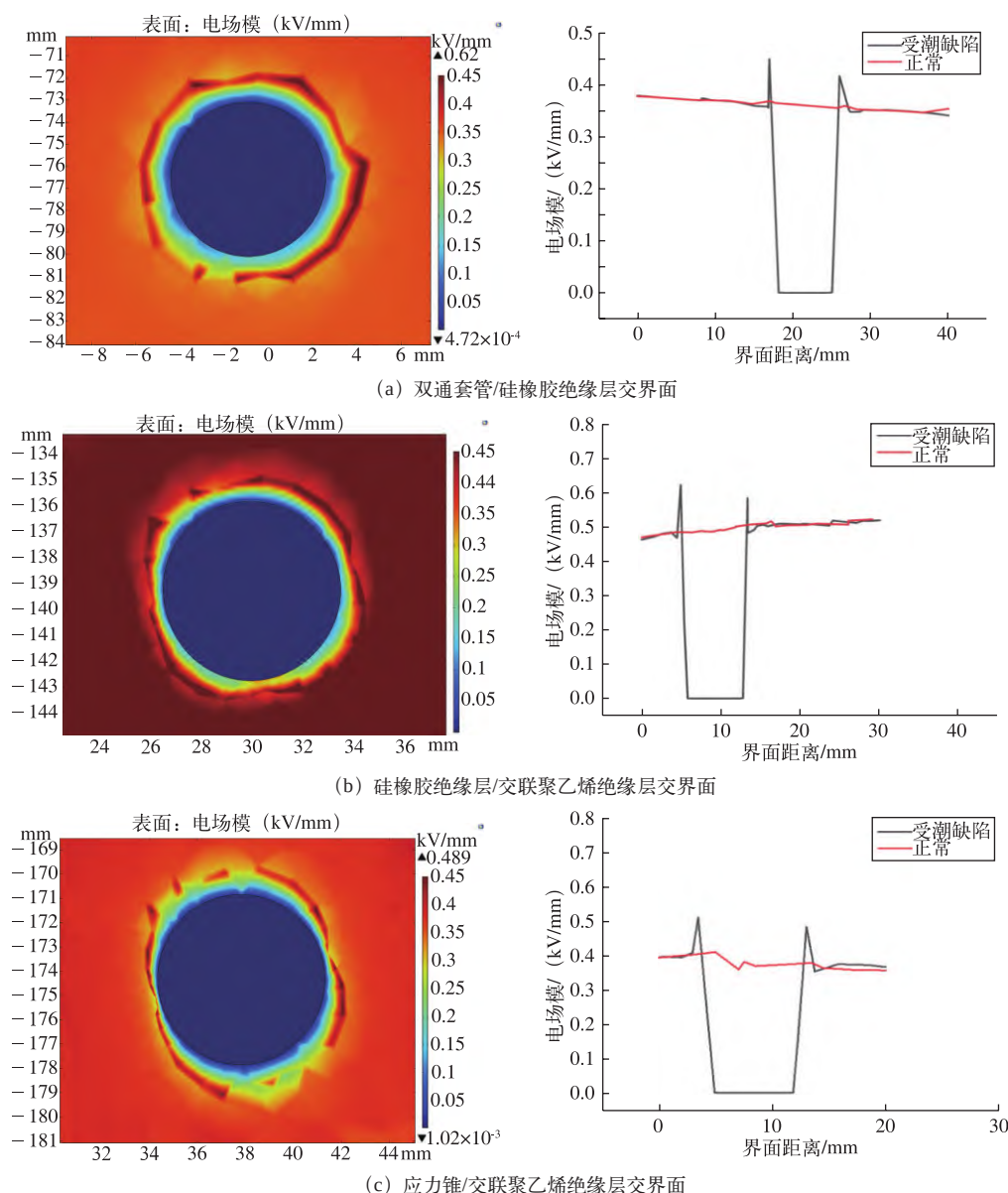


图3 不同界面受潮缺陷轴向电场分布图

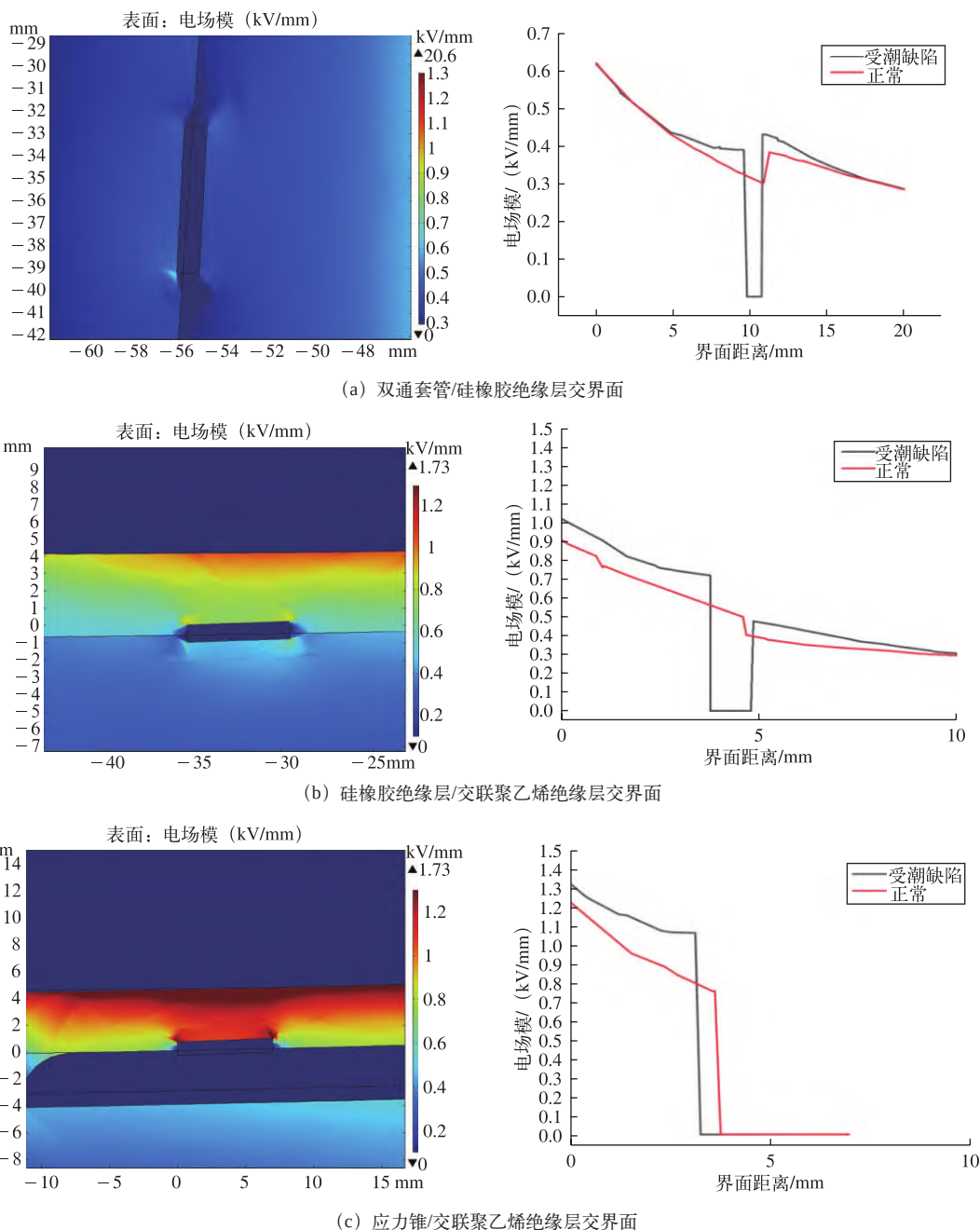


图4 不同交界面受潮缺陷径向电场分布图

从图3可以看出受潮缺陷引起了周边电场的畸变，但T型接头内的电场强度分布规律与正常情况下基本一致。硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面的电场模峰值达到0.62 kV/mm，电场强度为正常情况下的1.3倍；应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面的电场峰值达到0.51 kV/mm，电场强度为正常情况下的1.28倍；双通套管/硅橡胶绝缘层交界面的电场峰值达到0.48 kV/mm，电场强度为正常情况下的1.23倍。引起的电场畸变在轴向方向上比双通套管/硅橡胶

绝缘层交界面和应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面更加严重。三个界面上的受潮缺陷引起的电场畸变规律相似，即靠近水膜时电场强度逐渐增加，在内边界处达到最大值，然后急剧下降至水膜内部，在水膜内部的电场强度接近于0。

由图4可以看出，受潮缺陷引起的电场畸变主要由水膜与介电材料的接触面和顶点位置，在交联聚乙烯材料与水膜的接触面产生的电场畸变最高可达1.1 kV/mm，是正常情况下的1.4倍。这是因为水的

介电常数是高于周围材料的介电常数，这种介电常数的差异导致了电场强度在这些位置的明显增强，进而引起电场畸变。因此，水膜与介电材料之间的介电常数差异是导致电场异常的主要原因之一，也是受潮缺陷引起的绝缘材料击穿劣化问题的重要原因。对于这种情况，需要采取相应的措施来监测、识别和解决受潮缺陷可能带来的电场异常问题。

(2) 不同尺寸的受潮缺陷电场分布特性分析
设置半径为1.5 mm、3 mm、5.5 mm，高度为1 mm的圆柱状水膜，放置于T型电缆接头双通套管/硅橡胶绝缘层交界面；硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面；应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面，分析受潮缺陷的轴向和径向电场分布如图6~图8所示。

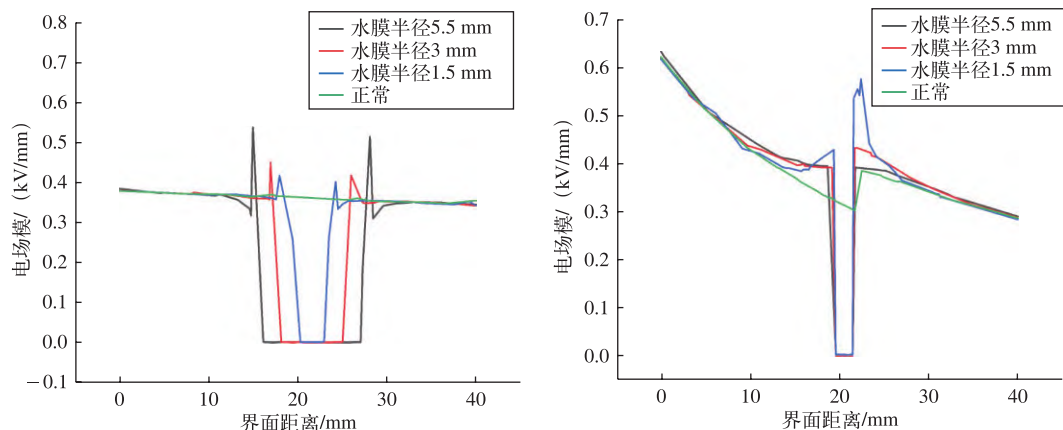


图6 双通套管/硅橡胶绝缘层交界面不同水膜半径轴向和径向的电场分布

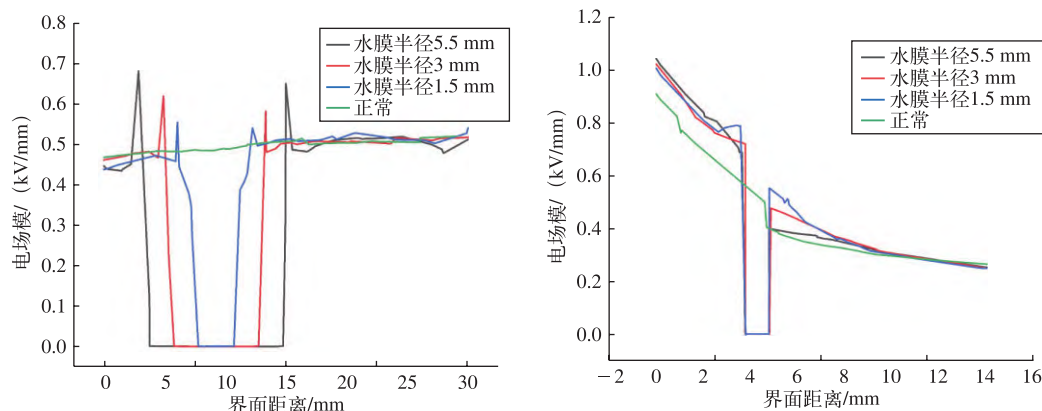


图7 硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面不同水膜半径轴向和径向的电场分布

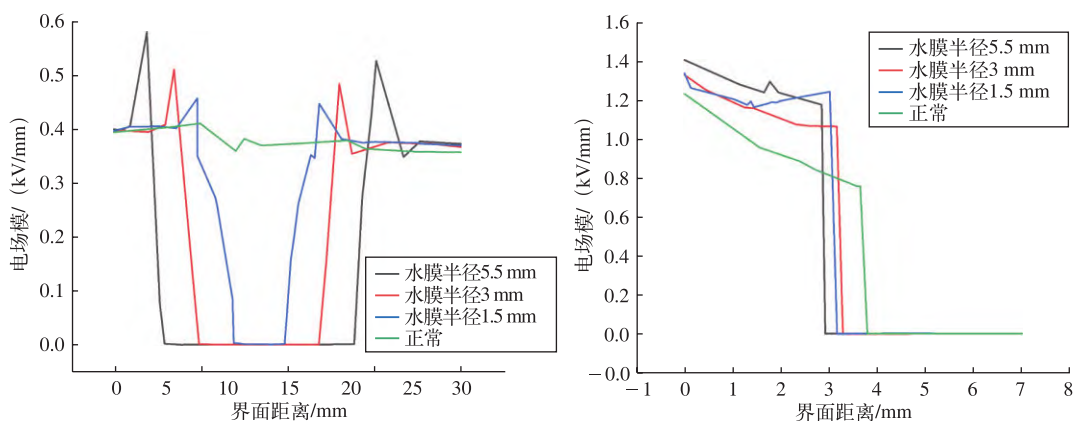


图8 应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面不同轴向和径向水膜半径的电场分布

根据图6~图8的数据,可以得到增加水膜的半径会导致缺陷处径向电场分布的电场强度峰值急剧升高。在改变水膜半径的情况下,对电场强度峰值的变化影响在轴向方向上较大,从轴向电场分布来看水膜半径从1.5 mm扩大至5.5 mm,水膜周围电场强度急剧上升。双通套管/硅橡胶绝缘层交界面;硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面;应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面的电场场强增大程度分别由13.8%上升至41%;10%上升至47%;10%上升至50%。

从径向来,三个交界面在发生受潮缺陷时,都对周边绝缘材料产生了巨大电场畸变,应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面最高电场场强上升42%。此外,随着水膜半径增加,电场强度峰值逐渐减小。可见水膜的半径对电场畸变的影响程度相当重要,是导致电场产生畸变的主要因素。如果含有水膜缺陷的电缆接头长时间在高场强条件下工作,局部放电可能会使电缆绝缘开裂,导致水分渗入绝缘层内,加速绝缘劣化,降低绝缘性能,最终可能形成水树枝,导致绝缘击穿,从而引发电缆故障。

(3) 不同电压的受潮缺陷电场分布特性分析

设置半径为5.5 mm,高度为1 mm的圆柱状水膜,放置于T型电缆接头双通套管/硅橡胶绝缘层交界面、硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面、应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面,通过在T型电缆接头线芯处分别施加10 kV、12 kV和15 kV的电压,研究不同电压下受潮缺陷电缆接头的电场特性。通过仿真,得到在受潮缺陷下各交界面最大电场强度见表2。

表2 不同电压下各交界面受潮缺陷最大电场强度

施加电压/ kV	双通套管/硅橡胶 绝缘层交界面/ (kV/mm)	硅橡胶绝缘层/ 交联聚乙烯绝缘 层交界面/ (kV/mm)	应力锥/交联 聚乙烯绝缘层 交界面/ (kV/mm)
10	0.77	1.15	1.7
12	0.9	1.5	2.3
15	1.1	2	2.89

表2的数据显示,随着施加电压的增加,不同交界面的受潮缺陷周围的电场畸变程度逐渐增大,交联聚乙烯绝缘材料变化尤为明显。施加电压达到15 kV时,应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面的电场畸变已接近空气3 kV/mm的击穿场强,达到了2.89 kV/mm。结果表明在15 kV的电压下,T型电

缆电缆接头存在击穿的风险,需要进一步采取措施保证设备的安全运行。

2. 温度场分布特性仿真与分析

设置半径为3.5 mm,高度为1 mm的圆柱状水膜,放置于T型电缆接头双通套管/硅橡胶绝缘层交界面、硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面、应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面,分析受潮缺陷的温度场分布如图9所示。

由图9可以得出,硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面的水膜内最低温度比正常情况下降0.12℃;应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面的水膜内最低温度比正常情况下降0.1℃;双通套管/硅橡胶绝缘层交界面的水膜内最低温度比正常情况下降0.11℃。不同复合界面水膜附近的温度曲线和正常的温度曲线差距很小,在靠近水膜时,温度略有下降。原因在于,T型电缆接头的热源只有线芯部分,其他介质为热绝缘状态,水的导热率大于周围介质的其他材料,能够进行少量散热,导致水膜的温度略有下降。

结束语

研究仿真分析同一尺寸水膜在不同交界面、不同尺寸水膜在不同交界面、同一尺寸水膜不同电压下的电场分布特性和温度场分布特性。

1) 受潮缺陷在三种交界面下,均能使场强发生较大畸变,增大场强。当场强增大到临界值时,可能发生局部放电,从而损坏绝缘引发故障。仿真中,应力锥/交联聚乙烯绝缘层交界面是三种交界面中引起场强变化最大的,在半径为5.5 mm水膜时,电场强度提高50%,随着受潮缺陷的程度加深,所引起的电场强度畸变程度越大,电场强度也增大,交联聚乙烯绝缘层在工程实际中有可能发生击穿,从而损坏接头。

2) 受潮缺陷的尺寸对电场的影响程度相当,是使电场产生畸变的主要因素。当绝缘介电材料上出现了小范围受潮缺陷时,可能会导致电场发生较严重畸变。受潮缺陷的尺寸越大,引起周围绝缘介电材料的整体电场强度的提升。

3) 随着施加电压的增加,三种交界面的受潮缺陷周围的电场畸变程度逐渐增大,硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面和交联聚乙烯绝缘材料变化尤为明显。施加电压达到15 kV时,应力锥/交联聚

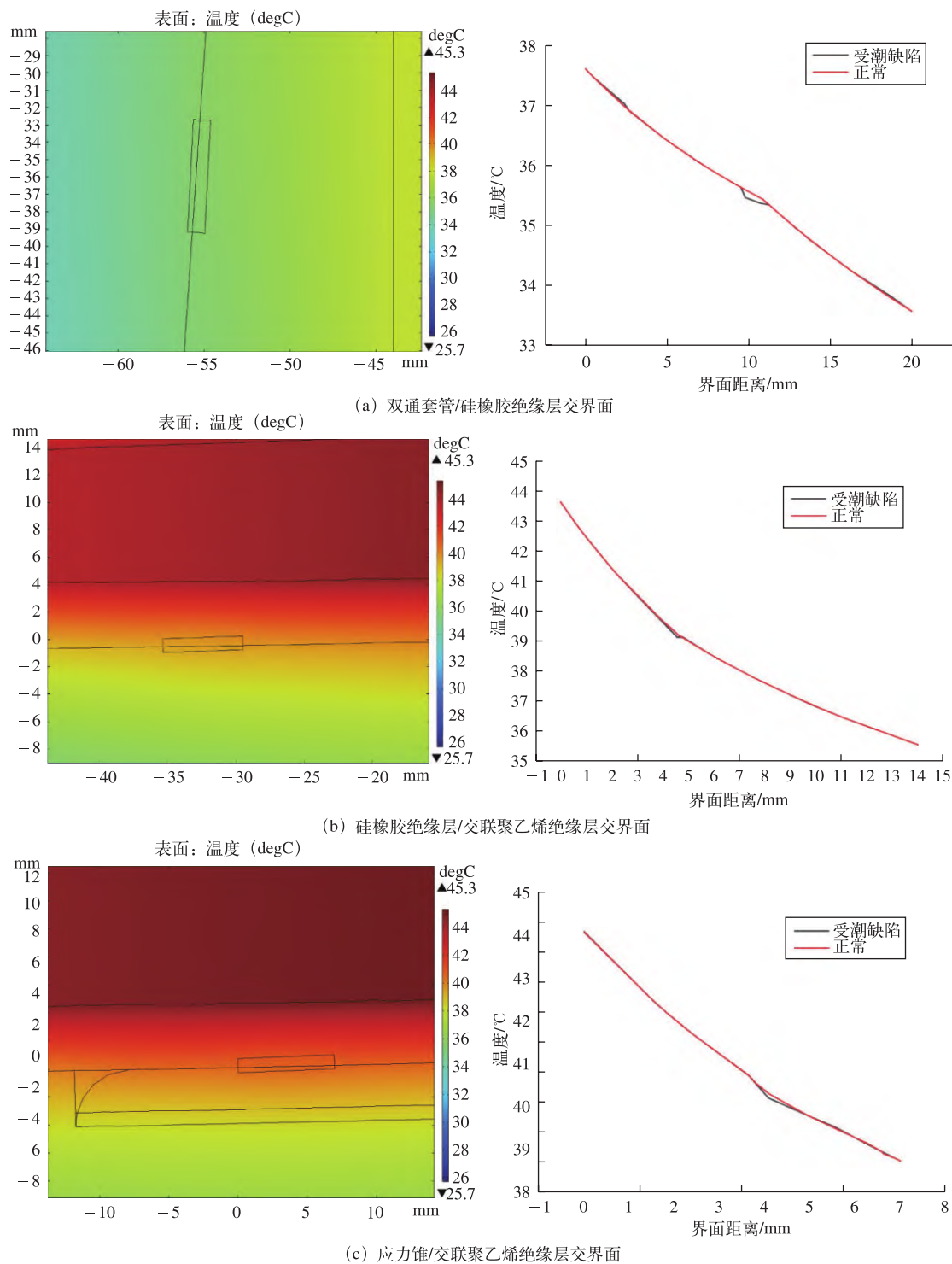


图9 不同交界面受潮缺陷径向温度场分布图

乙烯绝缘层交界面的电场畸变已接近3 kV/mm的击穿场强，达到了2.89 kV/mm。

(收稿日期：2024-07-16)

4) 由于T型电缆接头热源主要为线芯部分，水与绝缘材料皆为电绝缘材料，受潮缺陷对于周围绝缘材料的温升影响几乎可以不计。EA

参考文献

- [1] 全子靖. 环网柜T型连接头温度实时测量方法研究[D]. 北京：华北电力大学，2018.

- [2] 吕欢欢. 环网柜在线监测及状态评估方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [3] 邓繁盛, 高嫒, 李秀峰, 等. 基于电-热-力场的10 kV电缆终端典型缺陷仿真研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(3): 100-106.
- [4] 赵腾飞, 聂永杰, 孙成. 10 kV环网柜电缆肘型头故障分析[J]. 山西电力, 2022, (3): 26-29.
- [5] 杜伟, 汪超, 张帆, 等. 电缆中间接头受潮时界面放电试验研究[J]. 电工材料, 2022, (1): 63-68.
- [6] 刘刚, 徐庆, 石聪聪等. 绝缘交界面气隙缺陷及其受潮状态对T型电缆接头电热场的影响研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(9): 107-115.
- [7] 李巍巍, 张睿, 罗洋等. 配电电缆冷缩中间接头受潮特性研究[J/OL]. 绝缘材料, 1-6[2024-03-18].
- [8] 郝云倩. 含缺陷的XLPE电缆接头电磁-热特性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [9] 江天炎, 成守花, 毕茂强, 等. 基于ANSYS的电缆接头典型绝缘缺陷电-热场仿真研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(9): 151-158.
- [10] 卫世超, 孟晓凯, 芦竹茂. T型电缆接头温度场仿真分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(36): 7-10.
- [11] 杨鑫, 刘真, 梁振, 等. 电-热耦合作用下高压电缆接头运行中复合界面热应力分布的仿真计算[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 100-108.
- [12] 王景兵, 王家兴, 李国倡, 等. 动车组车顶高压电缆终端材料特性分析及电-热耦合场仿真研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(7): 64-70.
- [13] 于竞哲, 苏宜靖, 周浩, 等. 10 kV交流XLPE电缆改为直流运行的温度场和电场仿真分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 53-60.
- [14] 郭蕾, 李丽妮, 邢立勐, 等. 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[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 211-224.
- [15] 邓繁盛, 高嫒, 李秀峰, 等. 基于电-热-力场的10 kV电缆终端典型缺陷仿真研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(3): 100-106.
- [16] 程鹏. 电缆接头内部缺陷下的电磁-热-力特性及表征方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [17] 袁野, 陈剑, 贾志东, 等. 10 kV XLPE电缆受潮绝缘特性研究[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2875-2880.

