110 kV 电缆全预制干式终端工艺缺陷仿真与评估

赵筱赫[1, 2]，张雅君[2]，李玉丽[2]，万留杰[1, 2]
1. 河南省线缆先进材料与智能制造重点实验室，新乡 453000 河南
2. 河南工学院，新乡 453000 河南

摘要
安装工艺缺陷已成为电缆附件故障的主要原因。本文以 110kV 全预制干式电缆终端为研究对象，搭建了 1:1 仿真计算模型，系统研究应力锥安装错位、绝缘划痕及绝缘屏蔽残留等三类工艺缺陷的局部电场分布特征。结果表明，当应力锥与绝缘屏蔽完全未搭接时，电场匀化功能彻底失效，绝缘屏蔽断口处电场异常集中，场强达 24.7kV/mm，较标准工况激增 7.82 倍，电场畸变严重；±5mm 以内小幅搭接误差对电场分布影响极小，场强偏差低于 3%。绝缘划痕在接头中引起局部空气间隙，引发电场集中，尤其是应力锥下的划痕，气隙峰值场强达 1.453kV/mm，是正常情况场强的 2.25 倍，极易诱发局部放电。绝缘屏蔽残留的影响具有位置差异性：处于应力锥覆盖区时场强仅增 2.46%，影响微弱；处于主绝缘下方时，会大幅改变电场空间分布，残留区域电场陷落，其边界上电场增强，畸变率超 23%。研究明确了三类高危缺陷的电场危害阈值，可为电缆终端施工质控与容错标准提供理论依据。

关键词：电缆终端；静电场；工艺缺陷；电场仿真；应力锥；绝缘屏蔽

简介
本研究针对电缆 110kV 全预制干式终端的工艺缺陷进行仿真计算，用于评估缺陷尺寸和位置对电场分布的影响，从而为电缆终端制作工艺管控提供参考。

1. 仿真基本原理
电场分布是评估绝缘强度的重要指标，工艺缺陷造成的电场分布异常是电缆终端在运行中发热、应力异常、加速老化的根本原因[9]。对于工频线路，电场交变周期远大于绝缘材料极化的松弛时间，因此可采用静电场分析方法研究其绝缘强度[16]。静电场控制方程为

$$\begin{cases}\nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho\\ \nabla\times\boldsymbol{E}=0\\ \boldsymbol{D}=\varepsilon_0\varepsilon_r\boldsymbol{E}\end{cases} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{D}$ 为绝缘材料中的电感应强度，C/m^2；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度，V/m；ε_0 为真空介电常数，$\varepsilon_0=8.85\times10^{12}$ F/m；ε_r 为绝缘材料的相对介电常数。

由于静电场是无旋场，可表示为标量电位的梯度，对于本文研究的问题，附件中空间电荷极化时间常数远大于工频电压周期，可不考虑绝缘材料中的空间电荷影响，标量电位满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2\varphi=0 \tag{2}$$

式中：φ为标量电位，V。

电缆及终端结构中，具有半导电性质的导体屏蔽、绝缘屏蔽和应力锥本身相对介电常数不大（$\varepsilon_r\approx3$），但在工频下，电导电流远大于位移电流，电场分布主要由电导率控制，为了在静电场仿真里等效这种“电导控场”效果，将电导率以等效介电常数进行代偿[10]。当材料的电导率为σ，频率为f时，静电场的等效介电常数为

$$\varepsilon_{r,\mathrm{eq}}=\frac{\sigma}{2\pi f\varepsilon_0} \tag{4}$$

式中：$\varepsilon_{r,\mathrm{eq}}$为电导率等效相对介电常数；σ为材料的电导率，S/m；f为电缆工作频率，Hz。

2 仿真模型搭建
主体由硅橡胶复合绝缘套管、预制应力锥、环氧套管、金属屏蔽电极、弹簧压紧组件及密封金具构成。终端外层为硅橡胶复合绝缘套管，伞裙结构有效增加了爬电距离，具备优异的防污闪、抗老化性能；内部核心为预制式应力锥，与电缆本体紧密贴合，均匀分散端部

电场，规避电场集中问题；内部搭配环氧支撑件与金属屏蔽电极，保障绝缘稳定性；端部设有弹簧压紧密封组件与连接金具，图片中可直观看到紧固结构，能提供恒定界面压力，实现全密封防水防尘。

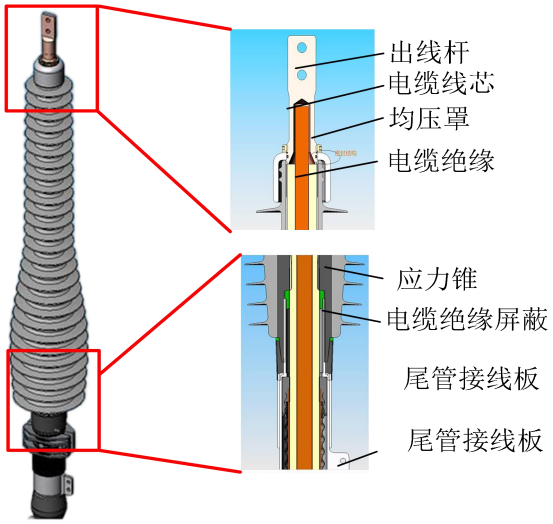


图 1 预制干式终端结构与内部结构

3 仿真结论

3.1 应力锥错位

为分析电缆终端错位缺陷对其运行的影响，仿真分析电缆终端未搭接与过搭接两种错位缺陷状态下电缆终端的电场分布情况。应力锥错位缺陷示意图见图 3，当绝缘屏蔽与应力锥完全错位时，应力锥无法包覆电缆绝缘屏蔽断口，其原有电场优化结构完全失效，绝缘屏蔽断口处电场极不均匀。

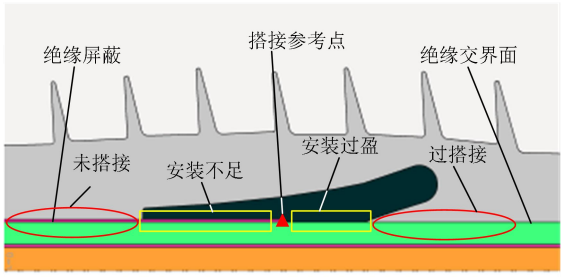
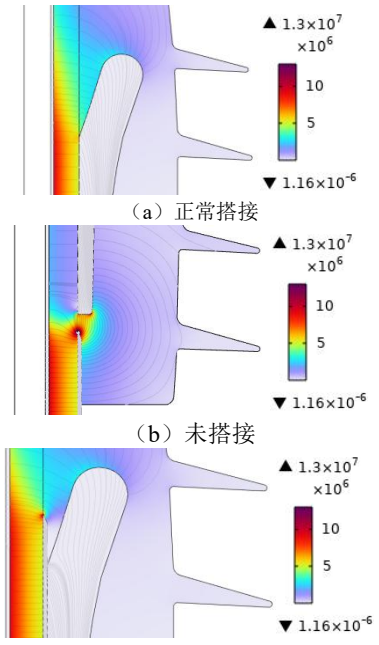


图 3 应力锥错位错位缺陷示意图

绝缘屏蔽断口与应力锥不同搭接状态时的局部电场分布如图 4 所示。由图 4（a）可知，当绝缘屏蔽断口被应力锥覆盖时，断口处的电场被应力锥分散，使整个电场平滑过渡，电场分布趋于均匀。绝缘屏蔽断口位于应力锥覆盖区之外时，应力锥匀化电场的作用完全失效，电场强度最高达到 24.7kV/mm（图 4（b）（c）），激增至较标准工况的 8.82 倍，电场畸变严重。尤其是欠搭接情况，更容易引起绝缘界面压力失效、密封能力下降，进一步增加绝缘击穿风险。



（a）正常搭接

（b）未搭接

（c）过搭接

图 4 应力锥不同搭接状态下的局部电场

为研究应力锥与绝缘屏蔽搭接状态对电场的影响，采用参数扫描法对比不同搭接关系下绝缘屏蔽断口处的电场强度，如图 5 所示，当绝缘屏蔽断口位于应力锥覆盖区之外时，断口处的电场强度远大于端口被应力锥覆盖的情况。当绝缘屏蔽断口被应力锥覆盖时，其局部电场最小，以在搭接参考点为基准，范围在±5mm 以内小幅搭接误差对电场分布影响极小，场强偏差低于 3%。

综上所述，应力锥与绝缘屏蔽断口搭接关系直接影响局部电场的分布，在终端安装时，应严格按照规范施工，做好搭接位置标记，保证应力锥安装到位。

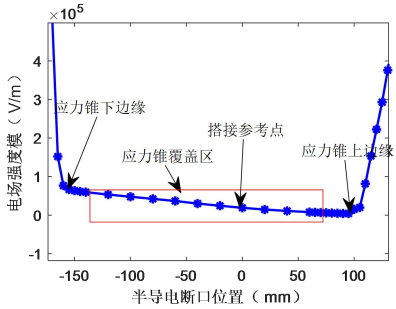


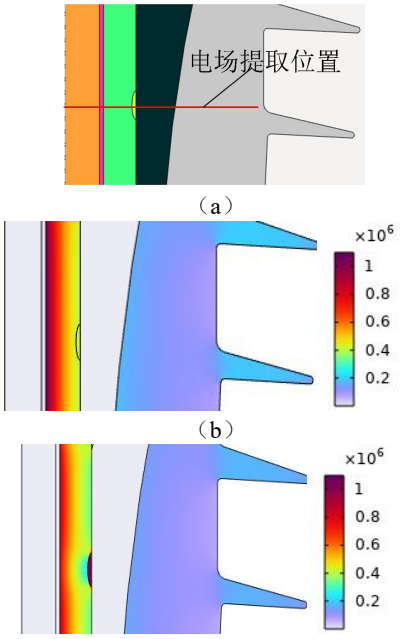
图 5 不同绝缘屏蔽断口位置下的局部电场

3.2 绝缘划痕处的电场分布

绝缘屏蔽去除时，操作不当易刮擦、划伤电缆主绝缘表面，形成深浅不一的划痕，在接头安装时，划痕位置会留下微小的空气间隙[17]，在电场的作用下，空气可能会首先产生局部放电，游离的带电粒子撞击其附近的绝缘表

面，加速绝缘材料的老化。将绝缘划痕区等效为 1/2 椭圆区域，短半轴尺寸表示划痕深度，长半轴尺寸为划痕长度，研究划痕分别位于接头绝缘覆盖区域和应力锥覆盖区域时的电场分布，如图 6（a）、图 7（b）所示。

分别提取相应位置正常情况的电场分布（图 6（b）、7（b）），与划痕缺陷下的电场（图 6（c）、7（c））。由图 6（b）7（b）可知，在无缺陷情况下，绝缘电缆主绝缘电场连续分布。在相同的激励条件下，划痕处气隙中的电场远大于周围电缆绝缘和应力锥中的电场（图 6（c）、7（c））。

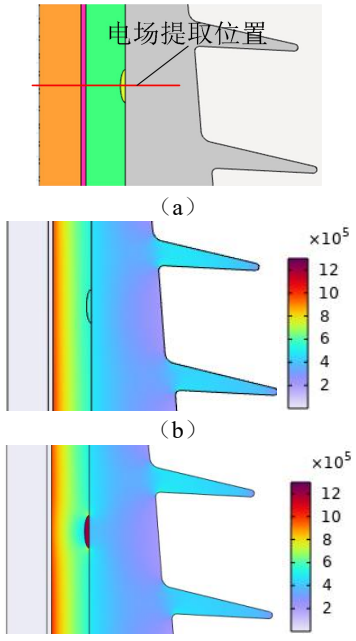


（a）

（b）

（c）

图 6 划痕位于应力锥下的电场计算



（a）

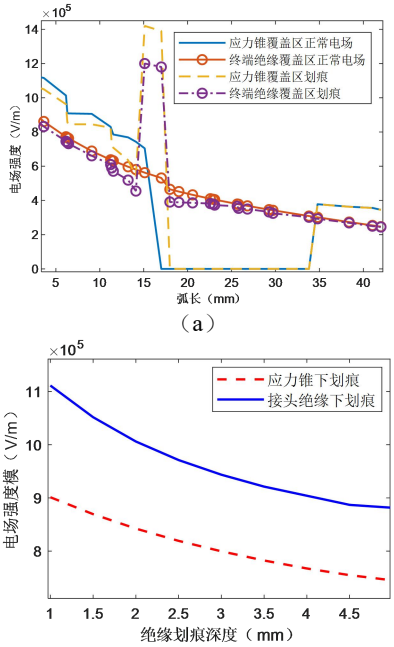
（b）

（c）

图 7 划痕位于终端绝缘下的电场计算

提取图 6（a）与 7（a）所示位置的电场，如图 8（a）所示，两种位置的绝缘划痕均造成局部电场异常集中，且划痕区域中内侧边界电场最强。终端绝缘下划痕中场强峰值达 1.21kV/mm，较完好绝缘增加 119%，应力锥下划痕中电场峰值为 1.453kV/mm，是正常情况的 2.25 倍，且划痕气隙中的场强接近空气的击穿场强，在电缆工作中，极易引起气隙中的局部放电。采用参数扫描方法，针对不同深度划痕引发的电场畸变效应进行计算，研究划痕深度在 1~5mm 范围内的电场。提取划痕底部最低点的电场强度，如图 8（b）所示，划痕底部的电场强度随划痕深度近似反比例减小，划痕越浅划痕区的电场畸变越显著。这是因为，浅划痕形成的空气域狭小，相当于在绝缘中内部嵌入一层薄而低介电常数的区域，极易引发剧烈的局部电场集中。而当划痕深度较深时，可能引起较大规模的局部放电。

仿真结果表明，电缆主绝缘上的微小的划痕易造成绝缘层间空气间隙，使局部电场畸变，短时间内电缆终端能够正常工作，长期运行中，由于空气间隙中局部放电的发展，易造成终端快速老化从而缩短电缆终端寿命。



（a）

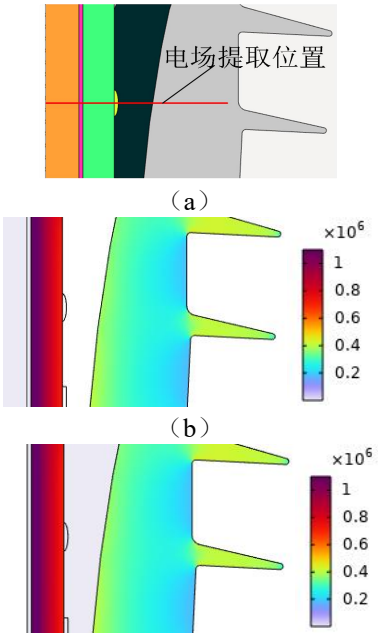
图 8 绝缘划痕缺陷的电场：a 划痕处电场；b 不同划痕深度的电场

3.3 残留绝缘屏蔽的电场分布

在电缆终端制作剥离外半导电绝缘屏蔽过程中，操作不当易造成部分半导电屏蔽附着在主绝缘表面，形成屏蔽残留缺陷，诱发电场畸变。

如图 9 所示，当绝缘屏蔽位于应力锥覆盖区域时，由于其与应力锥近似的导电性能，应力锥覆盖区域的绝缘屏蔽残留几乎不改变正常电场的分布。如图 10 所示，当绝缘屏蔽残留位于终端绝缘覆盖区域时，由于绝缘屏蔽的电导率大于绝缘，在残留物位置出现电场的陷落（如图 10（c）），同时使残留区域外侧绝缘中

的电场增加，且电场畸变与残留物外表面曲率半径有关。

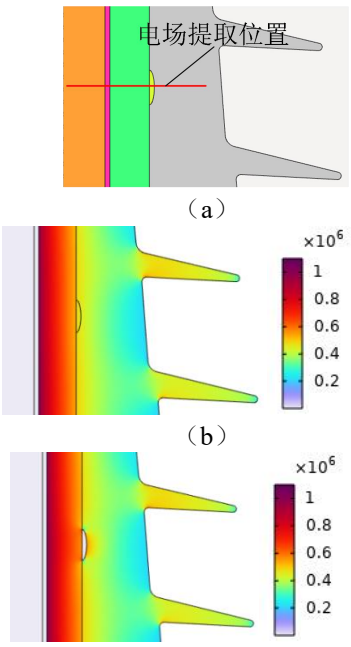


（a）

（b）

（c）

图 9 残留位于应力锥下: a 残留位置；b 正常电场；c 残留局部电场



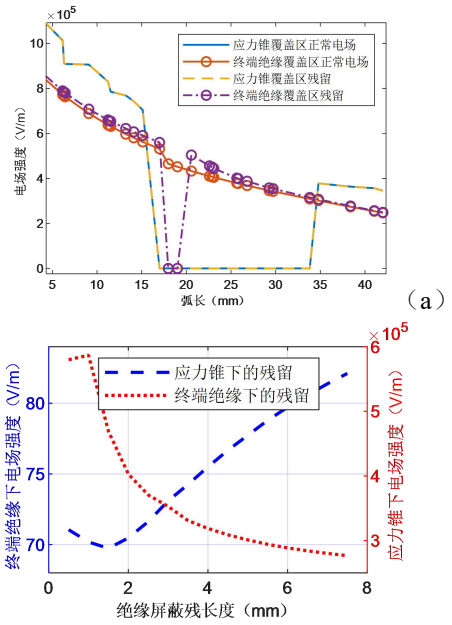
（a）

（b）

（c）

图 10 残留位于终端绝缘下:a 残留位置；b 正常电场；c 残留局部电场

提取图 9（a）10（a）中绝缘屏蔽残留处的电场，如图 11 所示，当绝缘屏蔽残留位于应力锥覆盖区时，横向截线位置的电场与正常情况下高度一致，这是因为绝缘屏蔽与应力锥均属于半导电材料，电场连续性良好。而当绝缘屏蔽残留位于终端绝缘覆盖区时，相当于在绝缘中引入了导电颗粒，改变局部电场分布。将绝缘屏蔽残留区等效为 1/2 椭圆区域，短半轴尺寸为绝缘屏蔽厚度（2mm），长半轴尺寸为残留长度，采用参数扫描的方法研究残留尺寸对电场的影响。提取残留外边界最高点的电场强度，如图 11（b）所示。当绝缘屏蔽残留位于应力锥下时，局部电场强度近似随残留尺寸正比例增加，由于绝缘屏蔽与应力锥均具有导电性能，其电场强度幅值较小。位于终端绝缘覆盖下的绝缘屏蔽残留，其局部电场随残留尺寸增加近似反比例减小，这是因为，在同样的厚度尺寸下，残留长度越小，其局部等效曲率越大，导体的“尖端效应”越显著。



（a）

（b）

图 11 绝缘屏蔽残留的电场: a 绝缘屏蔽残留处的电场；b 不同残留尺寸的电场

4. 结论与展望

工艺缺陷的类型与位置直接决定了 110kV 全预制干式电缆终端局部电场的畸变程度，其中应力锥与绝缘屏蔽的搭接状态影响最为显著。当应力锥与绝缘屏蔽断口完全无搭接时，应力锥作为终端内部关键的电场匀化部件，其原有作用完全失效，绝缘屏蔽断口电场集中，远超绝缘材料的耐受阈值，极易引发局部绝缘击穿。搭接错位误差控制在合理范围内时，电场分布均匀，为实际安装施工提供了重要的误差允许范围参考。绝缘划痕作为另一种常见工艺缺陷，其对电场分布的影响主要源于划痕引发的局部空气间隙。当终端覆盖区域存在绝缘划痕时，电场会在气隙区域发生显著集中，局部电场强度明显升高，长期运行下可能导致气隙击穿，进而引发终端绝缘故障。绝缘屏蔽残留的分布位置对电场分布的影响存在明显差异。应力锥覆盖下的残留对整体电场分布的干扰较小，位于终端绝缘覆盖区的绝缘屏蔽残留会严重破坏局部电场的正常分布，降低绝缘可靠性。综上所述，电缆终端安装时，需重点控

制搭接质量、绝缘完整性及残留清理，以保障终端安全运行。

未来的研究将聚焦于工艺缺陷的精准控制、电场畸变的量化评估与终端运行的智能化保障，不断完善 110kV 及以上全预制干式电缆终端的设计、施工与运维技术体系，推动电力电缆终端技术的持续升级，为电力系统的安全稳定运行提供更可靠的支撑。

参考文献

[1] 李国倡, 梁箫剑, 魏艳慧, 等. 配电电缆附件复合绝缘界面缺陷类型和位置对电场分布的影响研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2707-2715.
2715.

[2] 黄韬, 郝艳捧, 肖佳朋, 等. 10kV XLPE 电缆终端典型安装缺陷的工频局部放电特征对比研究[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2420-2428.

[3] 李长明, 伍国方, 李春阳, 等. XLPE 绝缘高压直流电缆终端内缺陷对电场分布的影响[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(12): 62-67.

[4] Ciuba M, Wojciechowski M, Owsiński M, et al. Excitation type and results of simulated electric field distribution in MV cable termination[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2020, 96(4): 119-122.

[5] 周弋扬,张周胜,张凌瑄,等.电磁-热耦合下电缆接头缺陷对电场分布及区域温度的影响[J].电力系统及其自动化学报,2025,37(12):66-74.

[6] 祝贺,何峻旭,郑亚松,等 .电缆终端应力锥错位缺陷对界面温度及应力分布的影响[J].电工技术学报,2024,39(01):65-75.

[7] 张瑞敏，张沛红，宋淑伟，等 . 界面空间电荷对高压直流电缆终端电场分布的影响[J]. 高电压技术，2019，45（6）：1762- 1766.

[8] 赵洋，魏思芸，马宪伟，等 . ±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[J]. 绝缘材料，2023，56 (3):61-69.

[9] 周凯，李旭涛，黄华勇，等．电缆终端安装刀痕缺陷的局部放电特性分析[J]．电力系统保护与控制，2013，41(10)：104-110.

[10] 项恩新, 王科, 李丽妮, 等. 导电杂质影响下 35kV 电缆终端绝缘特性研究[J]．绝缘材料，2020，53(5)：70-75.

[11] 徐龙，赵艾萱，李嘉明，等．多次操作冲击对含刀痕缺陷 10kV 电缆终端局部放电特性的影响[J]．高电压技术，2020，46(2)： 673-681.

[12] 黄博,杨铭远,聂永杰,等.不同杂质缺陷对电缆中间接头电气性能的影响研究[J].电工电能新技术,2025,44(09):42-54.

[13] 郭卫,孙致远,门业堃,等.基于 COMSOL 电-热-流场分布仿真的高压电缆终端缺陷分析[J]. 电测与仪表,2025,62(09):100-106.

[14] EL BAGES M,ABD-ALLAH M. Flectric field distribution within underground power cables in presence of mi-cro cracks[J]. International Journal of Scientific and Research Publications,2016,6(1):160-165

[15] 王永强,黄泓贸,张伟,等.全预制式电缆户外终端硅橡胶绝缘的老化分析[J].南昌大学学报(理科版),2022,46(02):232-238.

[16] Deinega A, et al. Computation of Static Effective Permittivity for a Multiphase Lattice of Cylinders[J]. Physical Review E, 2011, 84(2): 026603.

[17] YANG H S，LIU L，SUN K，et al. Impacts of different defects on electrical field distribution in cable joint[J]. The journal of engineering, 2019, 2019(16): 3184-3187.
孙欣宇,吴铮,伍铭妍,等.基于小缺陷扰动模型中压电缆附件综合绝缘性能评价方法[J].南方电网技术,2022,16(08):142-149

[18] 皮昊书,韦盈释,陈金锋,等.基于光纤传感技术的电缆接头局部放电监测[J].深圳大学学报(理工版),2020,37(01):57-62.

[19] ANDREI L,IRINA V,FLORIN C. Electric field distribution in power cable insulation affected by various defects[C]//2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering. Bucharest, Romunia : lEEE,2014:1-5.

[20] 曹珍崇, 杨学昌, 郅 啸, 等. 电缆配电网操作过电压的计算与分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007，47(4): 466-469.