

35 kV电力电缆快插接头关键内部结构设计研究

汪思念¹, 崔玉坤¹, 王继康¹, 秦懿¹, 冯阿敏², 何启飞², 蔡志国²

¹云南电网有限责任公司红河供电局, 云南 红河

²武汉华仪智能设备有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年9月21日; 录用日期: 2022年10月11日; 发布日期: 2022年10月24日

摘要

在35 kV电力电缆快插接头结构设计中, 接头内部电场主要靠两端应力锥结构和中间内屏蔽层结构进行处理, 避免接头内部出现局部电场强度高, 导致接头高压击穿。本文通过maxwell有限元分析方法, 仿真出应力锥和内屏蔽层在不同的设计参数下, 接头内部的电场大小及分布情况, 找出应力锥和内屏蔽层设计的最优解, 为将来此类产品提供设计选择。

关键词

35 kV, 电缆接头, 应力锥, 内屏蔽层, 电场, 有限元分析, 仿真

Research on Key Internal Structure Design of 35 kV Power Cable Quick-Connect Joint

Sinian Wang¹, Yukun Cui¹, Jikang Wang¹, Yi Qin¹, Amin Feng², Qifei He², Zhiguo Cai²

¹Honghe Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Honghe Yunnan

²Wuhan Huayi Intelligent Equipment Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Sep. 21st, 2022; accepted: Oct. 11th, 2022; published: Oct. 24th, 2022

Abstract

In the structural design of 35 kV power cable quick-plug joint, the internal electric field of the joint is mainly handled by the stress cone structure at both ends and the inner shielding layer structure in the middle to avoid local high electric field intensity inside the joint, resulting in high voltage breakdown of the joint. In this paper, the maxwell finite element analysis method is used to simu-

late the magnitude and distribution of the electric field inside the joint under different design parameters of the stress cone and the inner shielding layer, and find the optimal solution for the design of the stress cone and the inner shielding layer, which is the best solution for the future. Products offer design options.

Keywords

35 kV, Cable Joint, Stress Cone, Inner Shielding Layer, Electric Field, Finite Element Analysis, Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高压电力电缆接头是电缆与电缆相连的重要部件。高压电力电缆主要由导电线芯、内屏蔽层、绝缘层、外屏蔽层等结构组成，电缆连接技术主要是将这些结构重新恢复，但现有的技术无法完美的将这些结构恢复成电缆出厂状态，所以电缆连接处往往在高电压下出现电场畸变，造成电场局部场强过高，引发绝缘击穿事故。为了确保运行稳定性，在电缆接头设计过程中一个重要的设计目标就是降低接头内部电场场强，通常的做法是在接头屏蔽切断处设计应力锥结构及在金属导体连接处设计内屏蔽层[1]。

在实际设计过程中，受接头形式、电缆结构等因素影响，会导致其在应力锥及内屏蔽的形状、大小及边缘倒角等细节设计发生变化，这些不同之处决定着其改善电场的能力，如果应力锥和内屏蔽结构细节处理不到位，将会直接影响产品的性能[2]。

2. 应力锥的设计方法

2.1. 应力锥设计的要素

应力锥结构是电缆附件中用来处理电缆接头绝缘屏蔽层切断点处电场的经典结构，其应用在电缆绝缘屏蔽层切断点附近，将其延伸，使零电位形成喇叭状，改善电场分布。应力锥处理电场的能力受三个要素影响，分别为：材料电阻率、轴向长度和张开角度。

2.2. 应力锥的仿真

本文选择设计对象为 35 kV 电力电缆快插接头，其应力锥设计结构图见图 1 所示，通过设置应力锥不同的材料电阻率、轴向长度和张开角度，根据仿真的电场分布变化，探索应力锥处理电场最佳设计参数值。

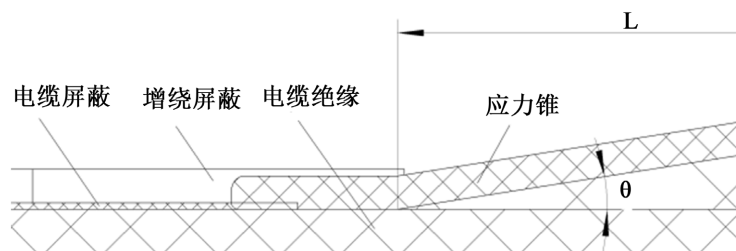


Figure 1. Structure diagram of stress cone of quick-plug joint of 35 kV power cable
图 1. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处结构图

根据一般设计经验, 应力锥材质为半导体材质, 其电阻率 ρ 取值范围为: $10^4 \sim 10^8 \Omega \cdot m$ [3], 轴向长度 L 范围为: 40~120 mm; 应力锥张开角度 θ 范围为: $5^\circ \sim 30^\circ$ 。应力锥处结构图见图 1。

1) 取应力锥电阻率 ρ 和长度 L 为固定最小值保持不变, 张开角度 θ 从 $5^\circ \sim 30^\circ$ 不断变化时, 仿真电力电缆快插终端头应力锥处的电场大小:

a) $\rho = 10^4 \Omega \cdot m$, $L = 40 \text{ mm}$, $\theta = 5^\circ$ 时, 应力锥处的电场最大值 $E_{\max} = 24.936 \text{ MV/m}$, 见图 2 所示。

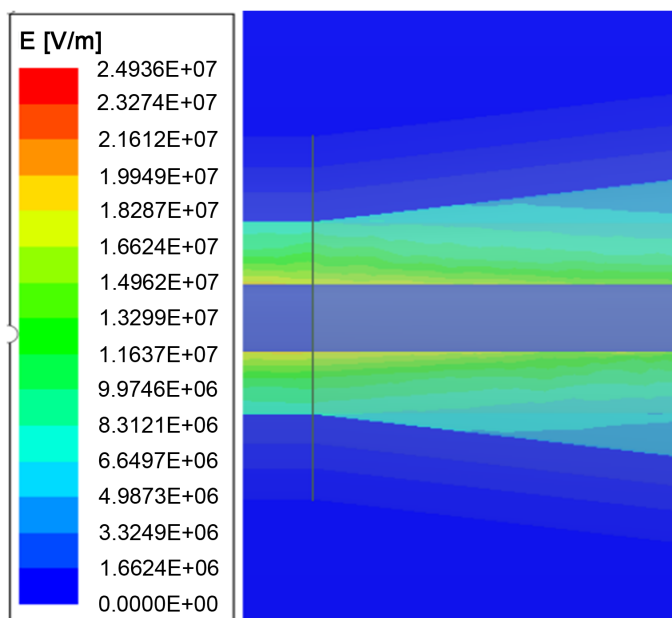


Figure 2. Electric field at the stress cone of 35 kV power cable push-in joint
图 2. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

b) $\rho = 10^4 \Omega \cdot m$, $L = 40 \text{ mm}$, $\theta = 10^\circ$ 时, 应力锥处的电场最大值 $E_{\max} = 24.161 \text{ MV/m}$, 见图 3 所示。

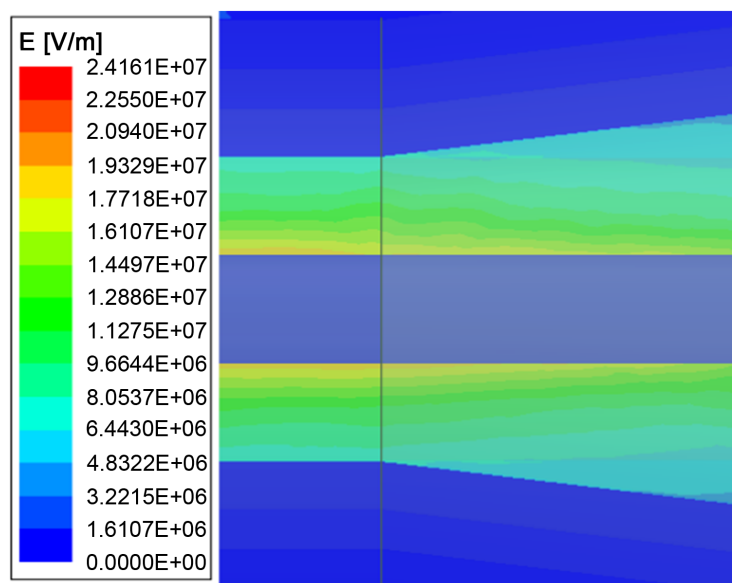


Figure 3. Electric field at the stress cone of the 35 kV power cable push-in connector
图 3. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

c) $\rho = 10^4 \Omega \cdot m$, $L = 40 \text{ mm}$, $\theta = 15^\circ$ 时, 应力锥处的电场最大值 $E_{\max} = 24.928 \text{ MV/m}$, 见图 4 所示。

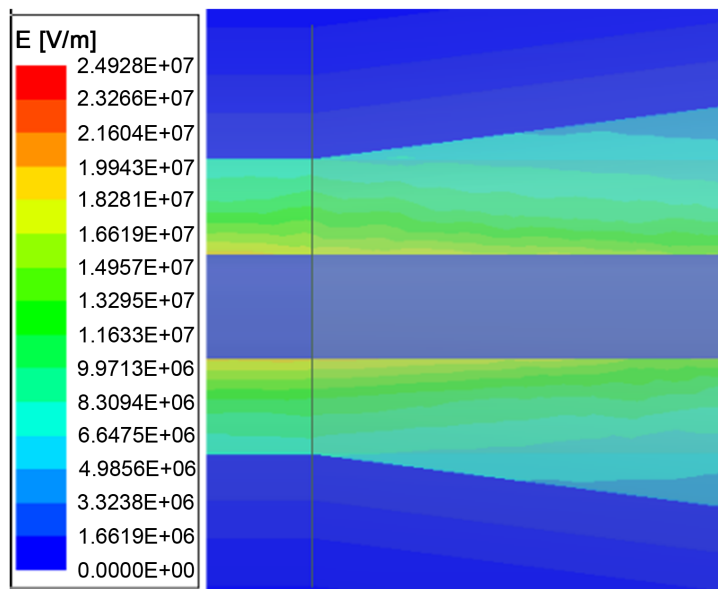


Figure 4. Electric field at the stress cone of the 35 kV power cable push-in connector
图 4. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

d) $\rho = 10^4 \Omega \cdot m$, $L = 40 \text{ mm}$, $\theta = 20^\circ$ 时, 应力锥处的电场最大值 $E_{\max} = 25.717 \text{ MV/m}$, 见图 5 所示。

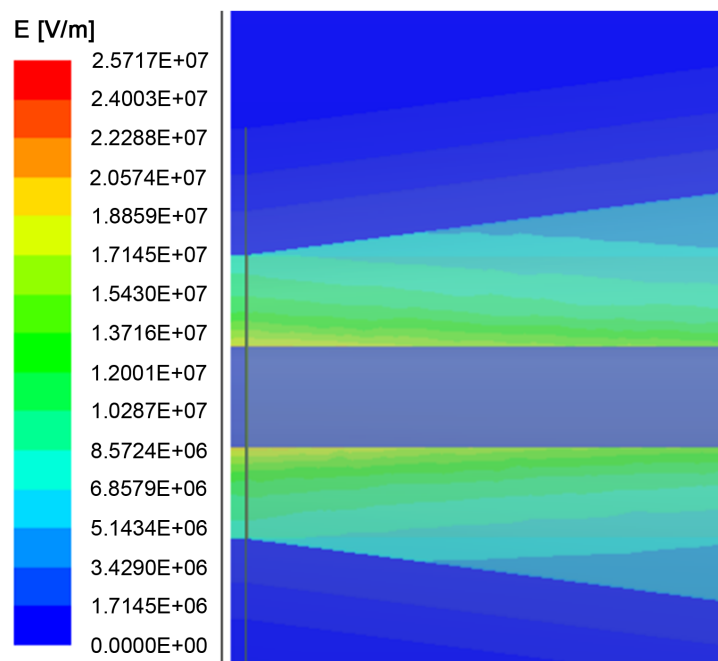


Figure 5. Electric field at stress cone of 35 kV power cable push-in joint
图 5. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

由上述 a)、b)、c)、d)仿真结果见图 6 所示可以得出: 应力锥的张开角度 $\theta = 10^\circ$ 时 E_{\max} 最小, 处理电场能力最强。

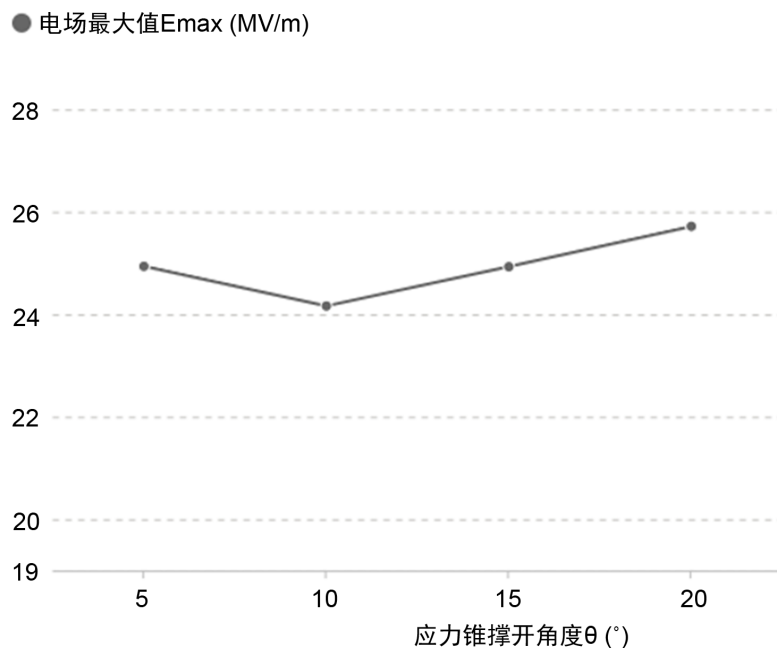


Figure 6. Influence of stress cone opening angle on the magnitude of electric field
图 6. 应力锥张开角度对电场大小的影响

2) 取应力锥电阻率 ρ 为固定最小值、张开角度 θ 为 10° 不变，而应力锥轴向长度 L 不断变化时，仿真电力电缆快插接头应力锥处的电场大小：

a) $\rho = 10^4 \Omega \cdot m$, $L = 60 \text{ mm}$, $\theta = 10^\circ$ 时，应力锥处的电场最大值 $E_{max} = 24.126 \text{ MV/m}$ ，见图 7 所示。

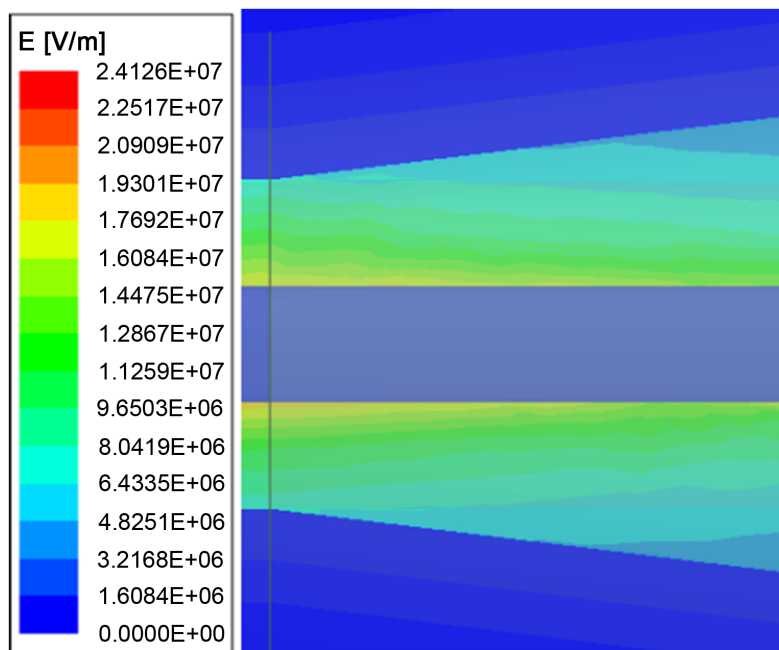


Figure 7. Electric field at the stress cone of 35 kV power cable push-in connector
图 7. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

b) $\rho = 10^4 \Omega \cdot m$, $L = 80 \text{ mm}$, $\theta = 10^\circ$ 时，应力锥处的电场最大值 $E_{max} = 21.692 \text{ MV/m}$ ，见图 8 所示。

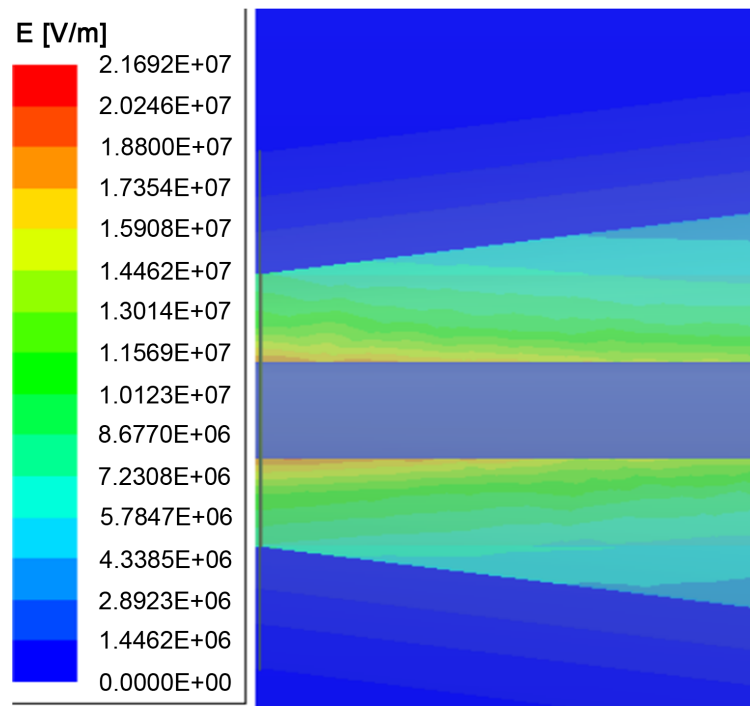


Figure 8. Electric field at the stress cone of the 35 kV power cable push-in connector
图 8. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

c) $\rho = 10^4 \Omega \cdot \text{m}$, $L = 100 \text{ mm}$, $\theta = 10^\circ$ 时, 应力锥处的电场最大值 $E_{\text{max}} = 21.575 \text{ MV/m}$, 见图 9 所示。

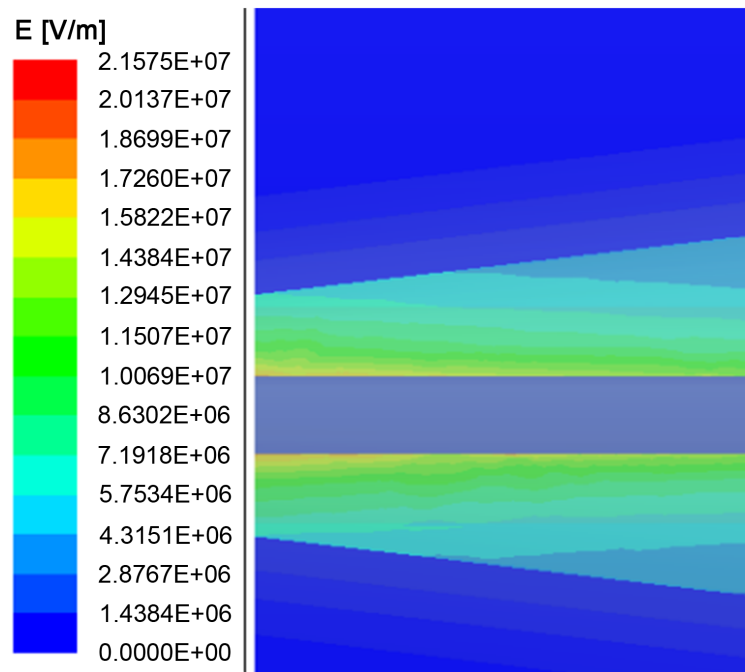


Figure 9. Electric field at the stress cone of the 35 kV power cable push-in connector
图 9. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

d) $\rho = 10^4 \Omega \cdot \text{m}$, $L = 120 \text{ mm}$, $\theta = 10^\circ$ 时, 应力锥处的电场最大值 $E_{\text{max}} = 21.169 \text{ MV/m}$, 见图 10 所示。

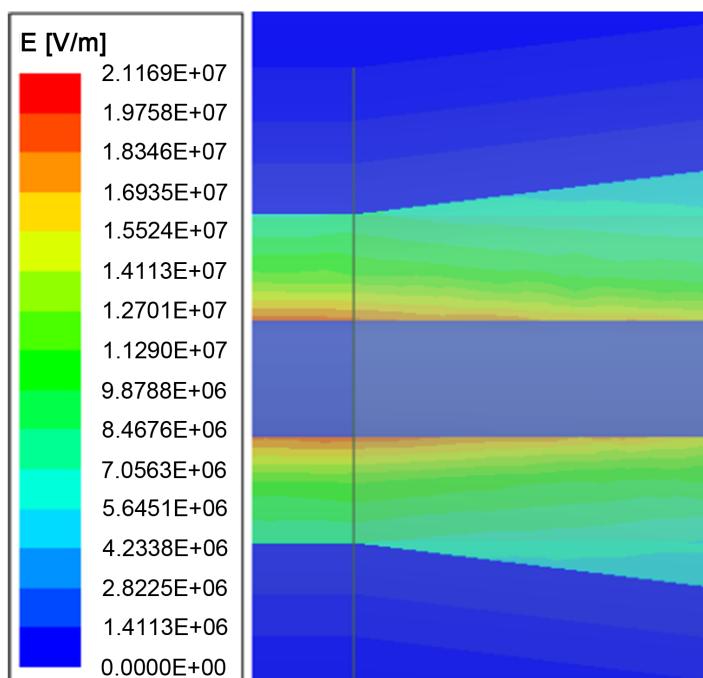


Figure 10. Electric field at the stress cone of the 35 kV power cable push-in connector
图 10. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

由上述 a)、b)、c)、d) 仿真结果见图 11 所示可以得出：应力锥长度 L 越大， E_{\max} 越小，处理电场能力越强。但 L 的长度在设计时不可能无限大(受到产品安装尺寸和内爬电距离双重制约)，而且 $L > 80$ mm 以后 E_{\max} 值变化不大，所以根据实际应用经验和仿真结果， $L = 80$ mm 是一个比较合适的设计数值。

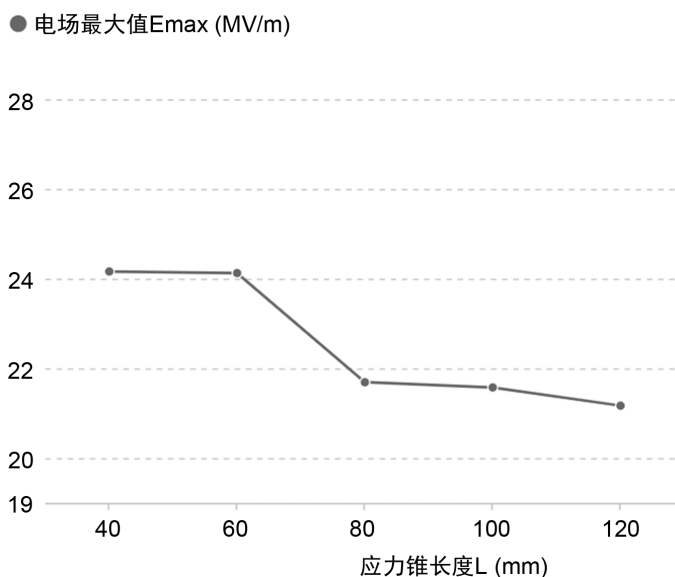


Figure 11. Influence of stress cone length on electric field magnitude
图 11. 应力锥长度对电场大小的影响

3) 取应力锥张开角度 θ 为 10° 、应力锥轴向长度 L 为 80 mm 不变，而应力锥电阻率 ρ 不断变化时，仿真电力电缆快插接头应力锥处的电场大小：

a) $\rho = 10^5 \Omega \cdot \text{m}$, $L = 80 \text{ mm}$, $\theta = 10^\circ$ 时, 应力锥处的电场最大值 $E_{\text{max}} = 21.107 \text{ MV/m}$, 见图 12 所示。

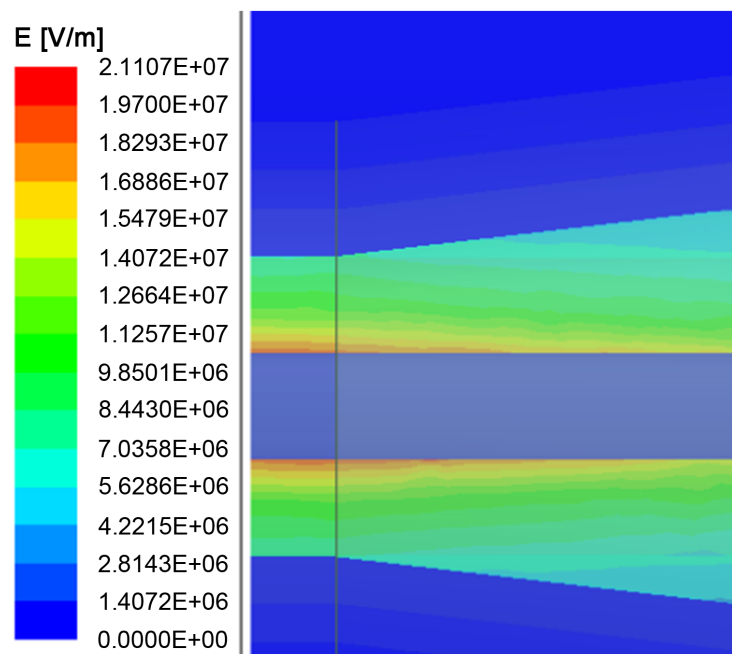


Figure 12. Electric field at the stress cone of the 35 kV power cable push-in connector
图 12. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

b) $\rho = 10^6 \Omega \cdot \text{m}$, $L = 80 \text{ mm}$, $\theta = 10^\circ$ 时, 应力锥处的电场最大值 $E_{\text{max}} = 21.077 \text{ MV/m}$, 见图 13 所示。

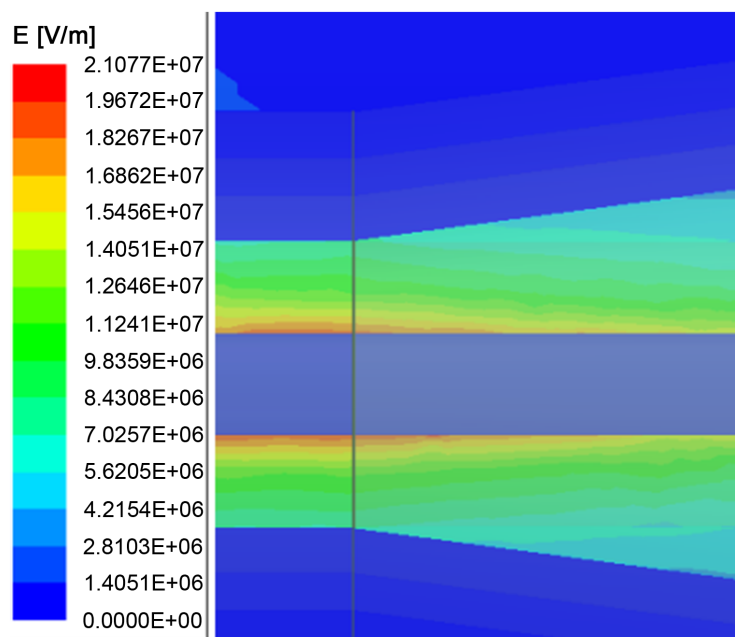


Figure 13. Electric field at the stress cone of the 35 kV power cable push-in connector
图 13. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

c) $\rho = 10^7 \Omega \cdot \text{m}$, $L = 80 \text{ mm}$, $\theta = 10^\circ$ 时, 应力锥处的电场最大值 $E_{\text{max}} = 26.664 \text{ MV/m}$, 见图 14 所示。

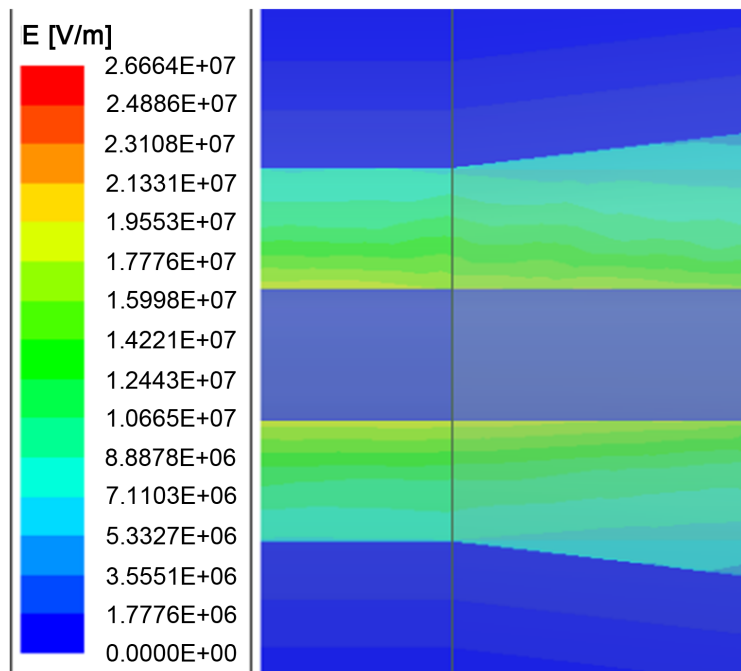


Figure 14. Electric field at the stress cone of the 35 kV power cable push-in connector
图 14. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

d) $\rho = 10^8 \Omega \cdot \text{m}$, $L = 80 \text{ mm}$, $\theta = 10^\circ$ 时, 应力锥处的电场最大值 $E_{\text{max}} = 28.753 \text{ MV/m}$, 见图 15 所示。

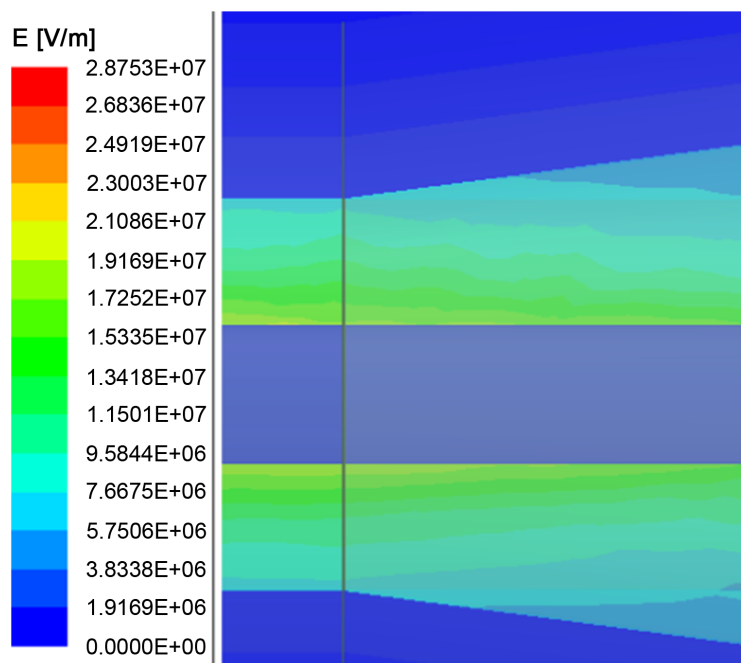


Figure 15. Electric field at the stress cone of the 35 kV power cable push-in connector
图 15. 35 kV 电力电缆快插接头应力锥处电场

由上述 a)、b)、c)、d) 仿真结果见图 16 所示可以得出: 当应力锥电阻率 ρ 大于 $10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 后, E_{max} 大大增加, 其处理电场能力会明显下降。

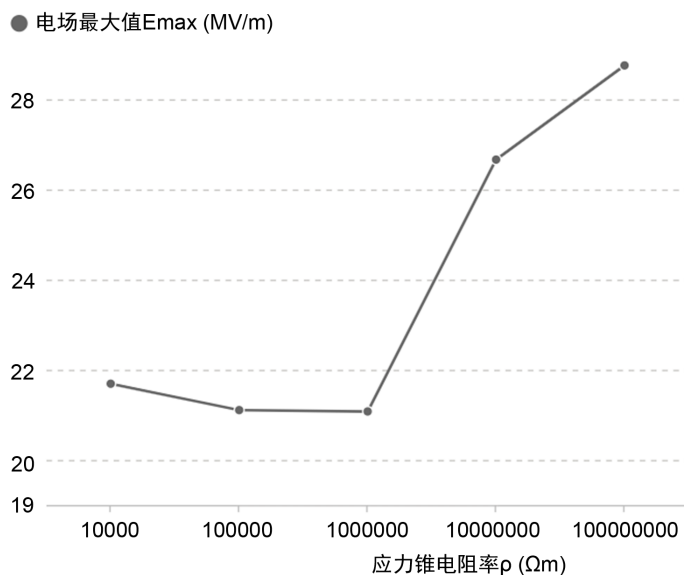


Figure 16. Effect of stress cone resistivity on electric field magnitude

图 16. 应力锥电阻率对电场大小的影响

2.3. 应力锥的仿真小结

从 1)、2)、3)各项仿真结果见表 1：当应力锥的张开角度小于 10° 时；应力锥轴向越长时；应力锥电阻率不大于 $10^6 \Omega\cdot\text{m}$ 时，其处理电场能力最强。

Table 1. Summary of electric field simulation at stress cone

表 1. 应力锥处电场仿真汇总

应力锥电阻率 ρ (Ωm)	10^4	10^4	10^4	10^4	10^4	10^4	10^4	10^4	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
应力锥长度 L (mm)	40	40	40	40	60	80	100	120	80	80	80	80	80
应力锥撑开角度 θ ($^\circ$)	5	10	15	20	10	10	10	10	10	10	10	10	10
电场最大值 E_{max} (MV/m)	24.936	24.161	24.928	25.717	24.126	21.692	21.575	21.169	21.107	21.077	26.664	28.753	

3. 屏蔽层的设计方法

3.1. 屏蔽层设计的要素

在电缆接头制作过程中，导体的连接一般采用压接方式连接，这就导致导体表面不光滑，从而引起表面电场强度增加。所以电缆接头设计时都会设置内屏蔽层，用来平行包覆在内部导体表面上，使绝缘和导体有良好的接触，来消除导体表面不光滑的影响。由于内屏蔽层材质为半导体橡胶材质可近似看成导体，其表面光滑程度和边角处的处理情况也必然影响到电场强度大小；另外试验表明内屏蔽层覆盖导体的长度也会影响接头内电场强度。

由于电缆接头内屏蔽层均是由模具注橡生产而成，模具表面经过抛光处理，即屏蔽层的表面光滑程度满足要求，所以内屏蔽层的设计要素有：电阻率、轴向长度和边缘边角的倒角大小。内屏蔽层和应力

锥材质相同，其电阻率 ρ 在应力锥仿真时已经确定不应大于 $10^6 \Omega \cdot m$ ，下面只针对内屏蔽层的轴向长度和边缘倒角大小进行仿真分析。

3.2. 屏蔽层的仿真

35 kV 电力电缆快插接头的内屏蔽层设计结构见图 17 所示，设置不同的内屏蔽层轴向长度和边缘倒角大小，根据仿真的电场分布变化，探索内屏蔽层处理电场最佳时的各项参数[4] [5]。

由于各种电缆接头大小不一样，其内屏蔽长度也不一样，无法直接确定内屏蔽层长度，所以本次仿真取内屏蔽层与导体的长度差值 ΔL 变化进行，选择 ΔL 取值范围为：-4~6 mm；内屏蔽层边缘倒角半径 R 取值范围为 0~3 mm。

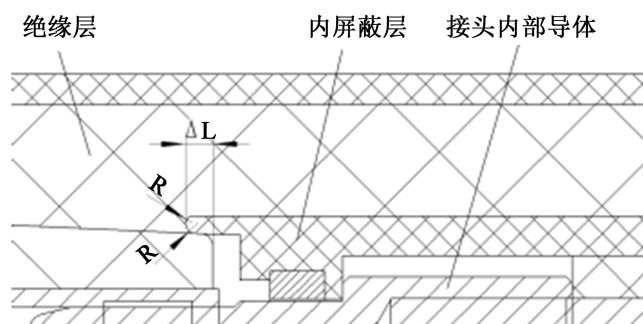


Figure 17. Structural diagram of the inner shield of the 35 kV power cable quick-plug connector
图 17. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处结构图

1) 取内屏蔽层与导体的长度差值 ΔL 为 0 固定不变、倒角半径不断变化时，仿真电力电缆快插接头内屏蔽层处的电场大小：

a) $\Delta L = 0$ mm, $R = 0$ mm、即不倒角时，内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 26.260$ MV/m，见图 18 所示。

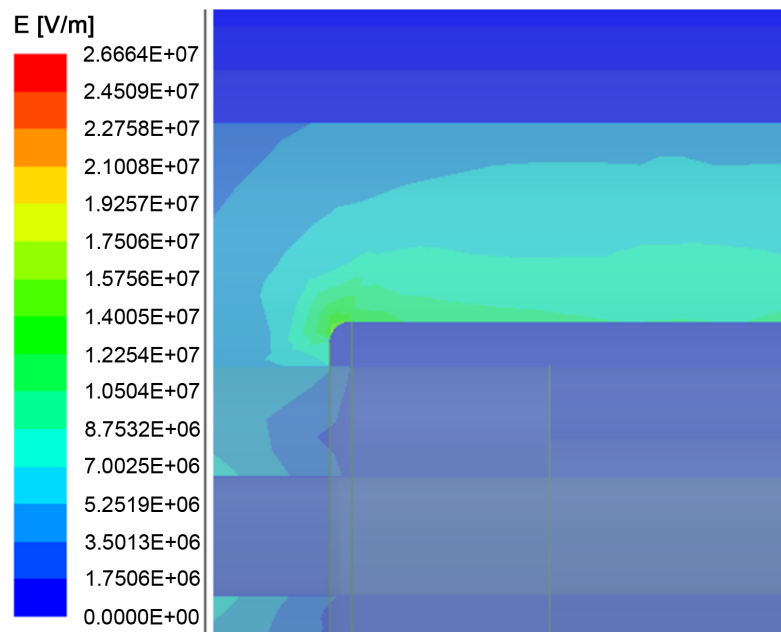


Figure 18. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 18. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

b) $\Delta L = 0$ mm, $R = 0.5$ mm, 内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 25.693$ MV/m, 见图 19 所示。

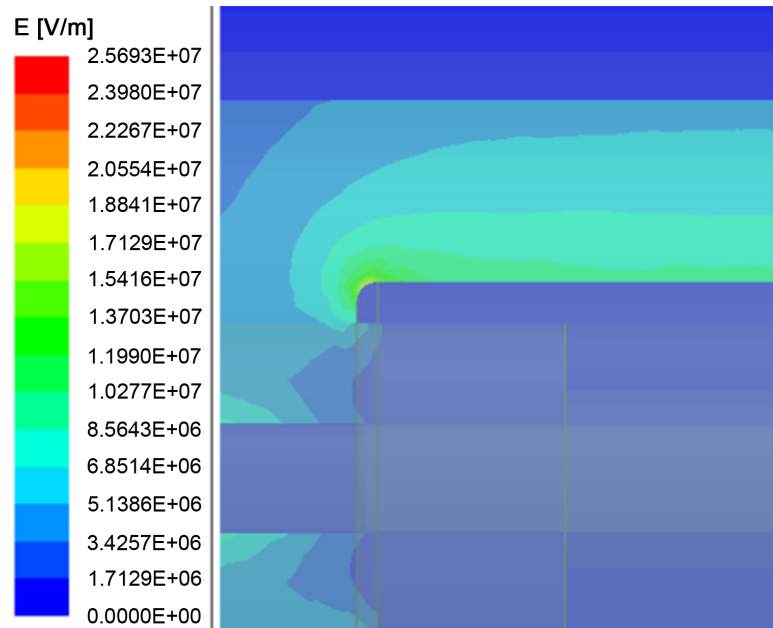


Figure 19. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 19. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

c) $\Delta L = 0$ mm, $R = 1$ mm, 内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 23.291$ MV/m, 见图 20 所示。

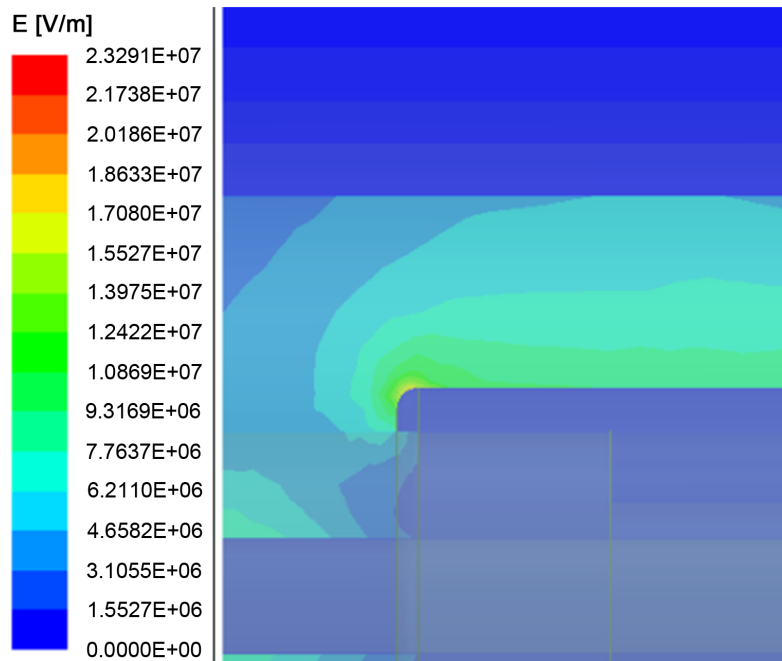


Figure 20. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 20. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

d) $\Delta L = 0$ mm, $R = 1.5$ mm, 内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 22.705$ MV/m, 见图 21 所示。

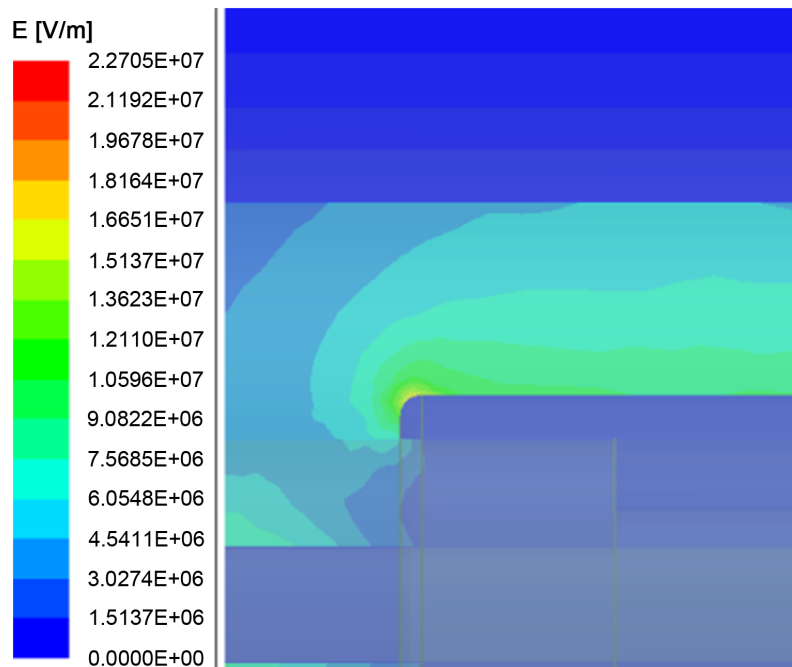


Figure 21. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 21. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

e) $\Delta L = 0$ mm, $R = 2$ mm, 内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 21.180$ MV/m, 见图 22 所示。

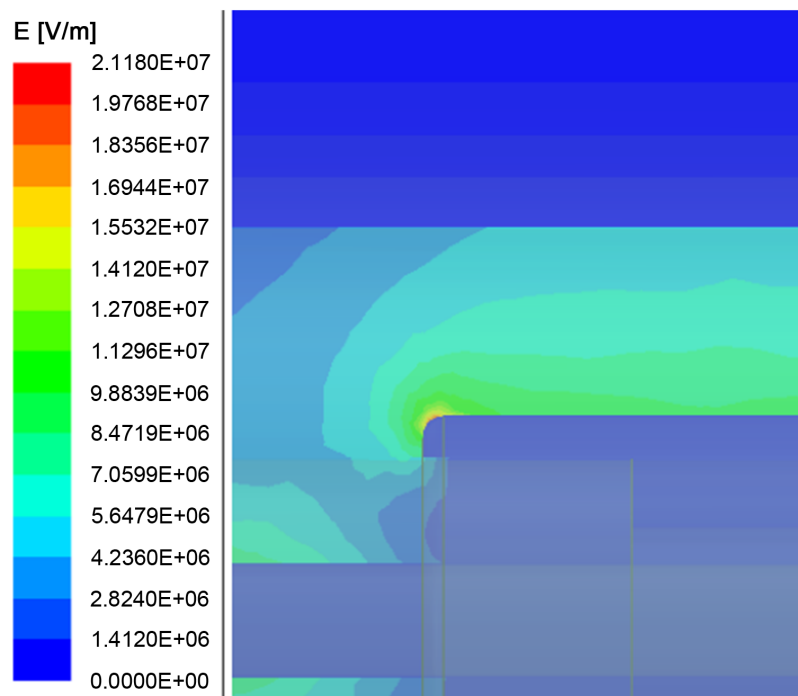


Figure 22. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 22. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

f) $\Delta L = 0$ mm, $R = 3$ mm, 内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 21.127$ MV/m, 见图 23 所示。

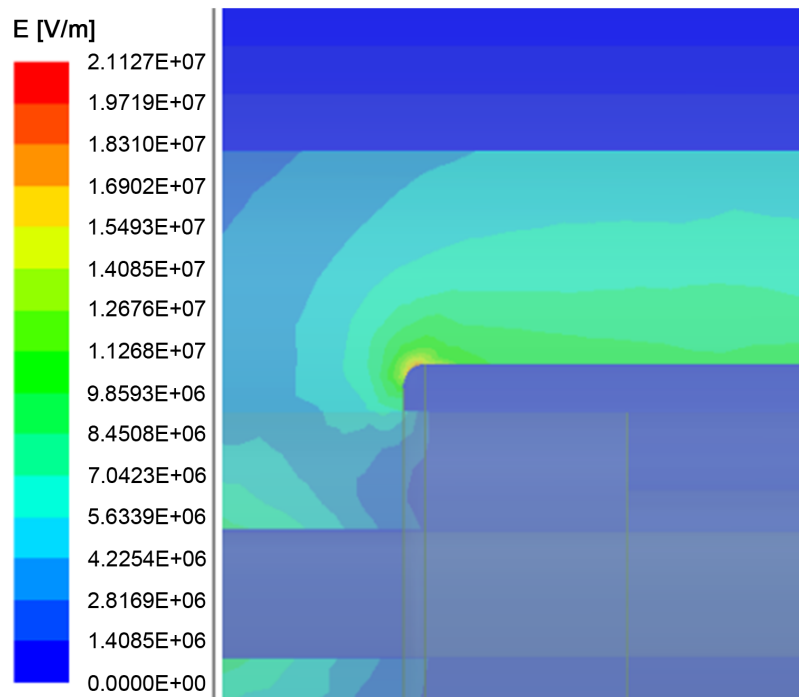


Figure 23. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 23. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

由上述 a)、b)、c)、d)、e)、f) 仿真结果见图 24 所示可以得出：内屏蔽层倒角半径 R 越大 E_{\max} 越小，在 R 大于 1 mm 后， E_{\max} 明显减小， R 超过 2 mm 后， E_{\max} 趋于一个较小值稳定。

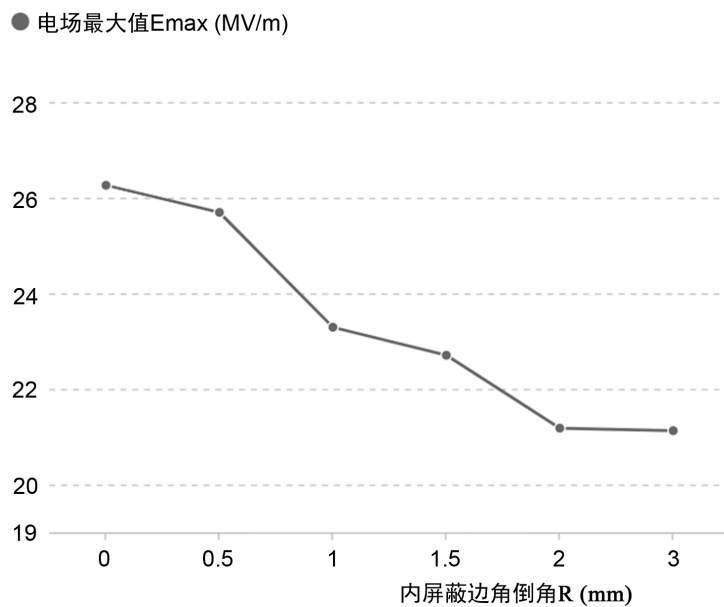


Figure 24. Influence of chamfering of inner shielding layer on the magnitude of electric field
图 24. 内屏蔽层边角倒角对电场大小的影响

2) 取内屏蔽层导体倒角半径 $R = 2$ mm， ΔL 不断变化时，仿真电力电缆快插接头内屏蔽层处的电场大小：

a) $\Delta L = -4$ mm, $R = 2$ mm 时, 内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 25.318$ MV/m, 见图 25 所示。

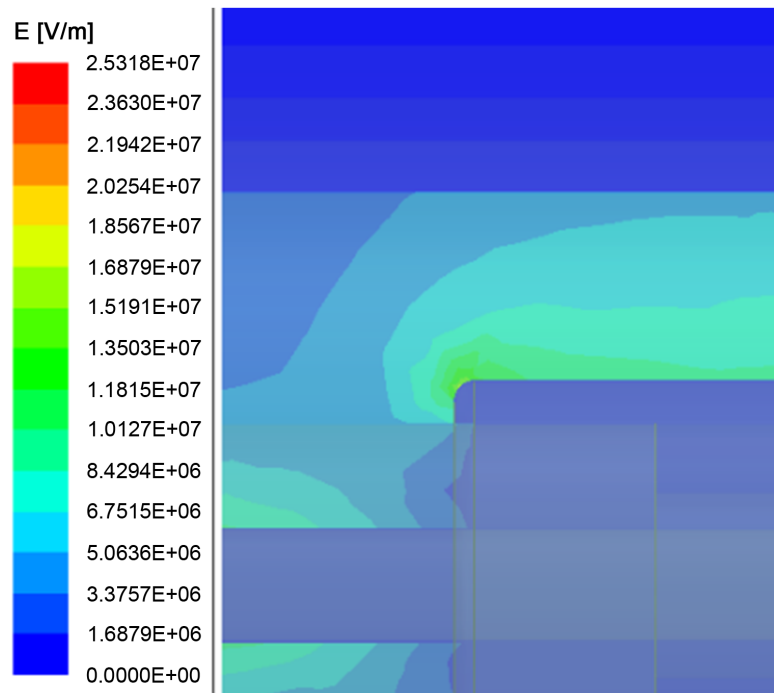


Figure 25. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 25. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

b) $\Delta L = -2$ mm, $R = 2$ mm 时, 内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 24.423$ MV/m, 见图 26 所示。

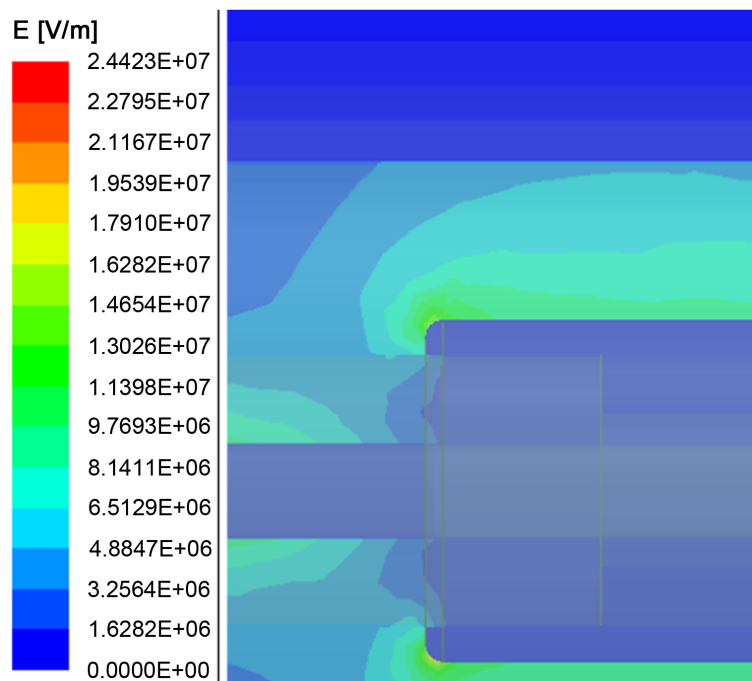


Figure 26. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 26. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

c) $\Delta L = 2 \text{ mm}$, $R = 2 \text{ mm}$ 时, 内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 20.674 \text{ MV/m}$, 见图 27 所示。

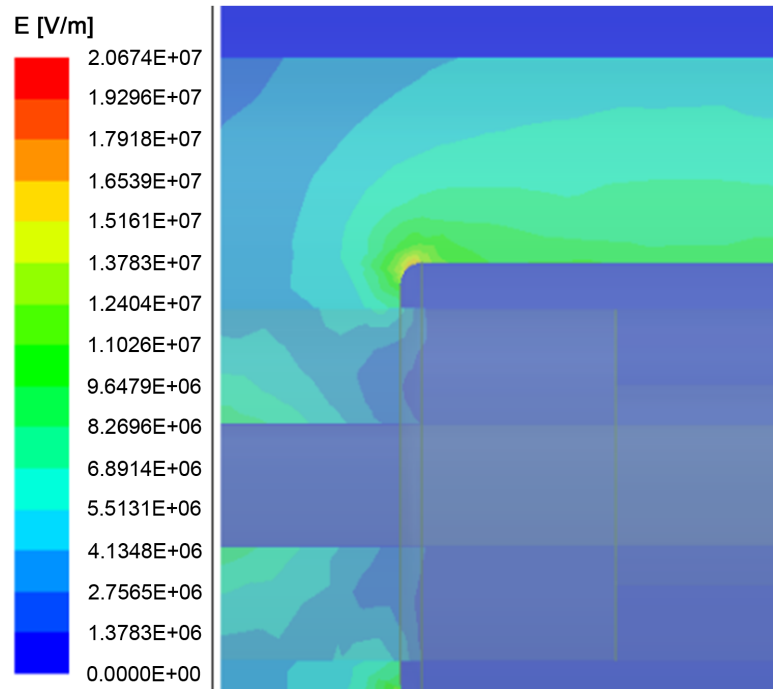


Figure 27. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 27. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

d) $\Delta L = 4 \text{ mm}$, $R = 4 \text{ mm}$ 时, 内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 18.992 \text{ MV/m}$, 见图 28 所示。

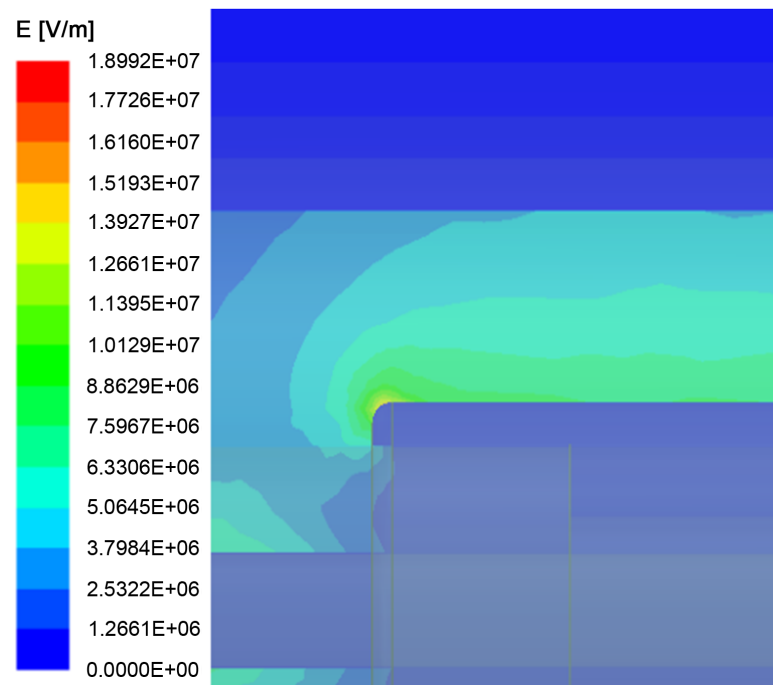


Figure 28. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 28. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

e) $\Delta L = 6 \text{ mm}$, $R = 2 \text{ mm}$ 时, 内屏蔽层处的电场最大值 $E_{\max} = 18.990 \text{ MV/m}$, 见图 29 所示。

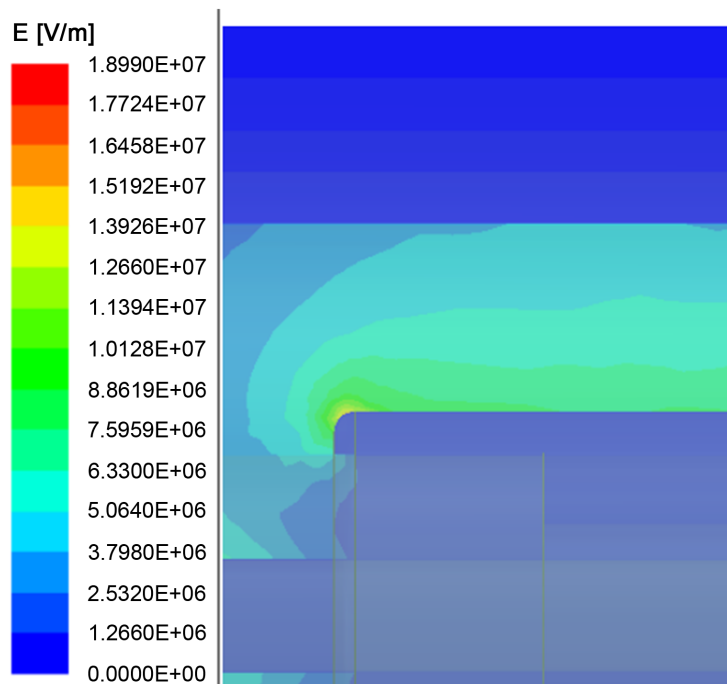


Figure 29. Electric field at the inner shield of 35 kV power cable quick-plug connector
图 29. 35 kV 电力电缆快插接头内屏蔽处电场

由上述 a)、b)、c)、d)、e) 仿真结果见图 30 所示可以得出: 内屏蔽层长度与导体长度差值 ΔL 越大, 内部电场 E_{\max} 越小, 当 $\Delta L > 4 \text{ mm}$ 后, E_{\max} 趋于稳定。

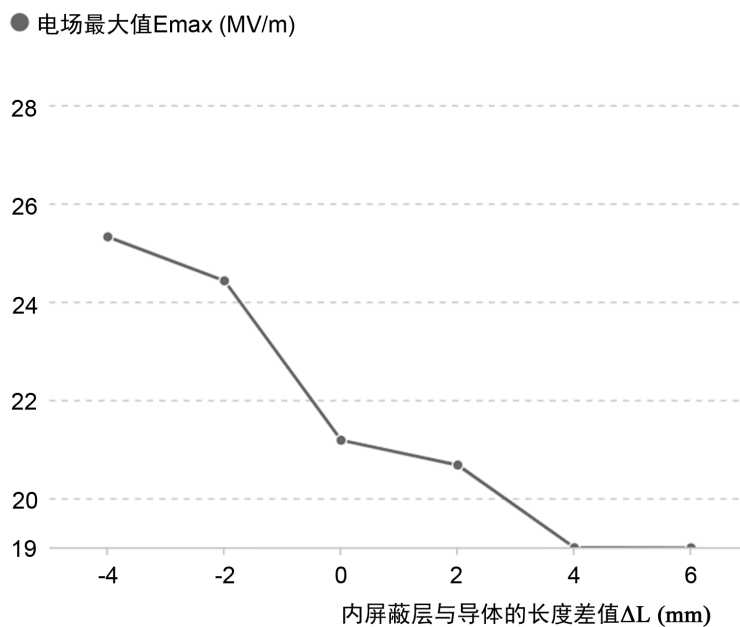


Figure 30. Influence of the difference between the inner shielding layer and the conductor length on the magnitude of the electric field

图 30. 内屏蔽层与导体长度差值对电场大小的影响

3.3. 屏蔽层的仿真小结

从 1)、2)各项仿真结果见表 2: 当内屏蔽层倒角半径 $R \geq 2 \text{ mm}$ 、内屏蔽层长度与导体长度差值 $\Delta L \geq 4 \text{ mm}$ 时; 其处理电场能力最强。

Table 2. Summary of electric field simulation at inner shielding layer

表 2. 内屏蔽层处电场仿真汇总

内屏蔽层倒角半径 R (mm)	0	0.5	1	1.5	2	3	2	2	2	2	2
内屏蔽层与导体的长度差值 ΔL (mm)	0	0	0	0	0	0	-4	-2	2	4	6
电场最大值 E_{\max} (MV/m)	26.260	25.693	23.291	22.705	21.180	21.127	25.318	24.423	20.674	18.992	18.990

4. 设计试验验证

在初次设计 35 kV 电力电缆快插接头过程中, 因为未做全面性仿真, 设计时依据 10kV 电力电缆快插接头的设计经验, 应力锥的材料电阻率 $\rho = 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 、轴向长度 $L = 112 \text{ mm}$ 和张开角度 $\theta = 8.5^\circ$; 内屏蔽层边角倒角半径 $R = 1 \text{ mm}$, 内屏蔽层长度与导体长度差值 $\Delta L = 1.5 \text{ mm}$ 。

设计的产品在场内初次试验时, 工频耐压试验出现了 30%样品击穿, 如此高的击穿几率, 属于不正常现场, 故对击穿事件进行分析。分析发现击穿产品的击穿点均在同一个位置, 且该位置正好处于内屏蔽层包裹导体的边缘处, 见图 31 所示。



Figure 31. 35 kV Electric power cable express the connect point

图 31. 35 kV 电力电缆快插接头击穿点

通过击穿点位置可以确定应力锥的设计没有问题, 击穿原因与内屏蔽层的设计有必然关系。随后检查最初设计图纸, 结合本文分析内屏蔽层的设计要素, 发现内屏蔽层设计边角倒角半径 R 和内屏蔽层长度与导体长度差值 L 的取值都不合适, 导致内屏蔽层处内部电场较大, 易发生击穿。

为了验证上述分析的原因是否正确, 将内屏蔽层图纸进行修改, 将 R 更改为 2 mm , ΔL 更改为 4 mm , 随之也根据尺寸将生产的模具进行对应修改。

修改后再进行生产试验验证, 试验合格率达到到了 100%, 随后送往第三方检测机构进行型式试验。

由 35 kV 电力电缆和 35 kV 电力电缆快插接头组成的试品, 依据 GB/T12706.4 试验标准完成型式试验。部分结果列入表 3 中。

Table 3. Type test results of 35 kV power cable push-in connector
表 3. 35 kV 电力电缆快插接头型式试验结果

序号	试验项目	要求	试验方法	试验结果
1	工频耐压	AC: 95 kV/5min	第四章或第五章	不击穿, 不闪络
2	局部放电	AC: 37 kV 下, ≤ 10 pC	第七章	≤ 10 pC
3	冲击电压试验	每个极性冲击 10 次	第六章	不击穿, 不闪络
4	恒温负荷循环试验 (在空气中)	Θ_t° 和 53 kV 下循环 30 次	第九章	通过
5	恒温负荷循环试验 (在水中)	Θ_t° 和 53 kV 下循环 30 次	第九章	通过
6	温升试验	导体通 400 A 电流, 导体温升 不大于 55 K		≤ 55 K
7	短路动稳定	在 T_d 下短路一次	第十二章	无可见损伤

表 3 结果证实: 设计修改后的 35 kV 电力电缆快插接头的电气性能符合标准要求, 接头内部电场得到了有效处理。

5. 结论

本文通过 maxwell 有限元分析方法, 仿真出 35 kV 电力电缆快插接头的应力锥和内屏蔽层在不同的设计参数下, 接头内部的电场大小及分布情况, 找出应力锥和内屏蔽层设计的最优设计值, 并通过试验进行了验证, 证明:

35 kV 电力电缆接头应力锥设计的张开角度 $\theta = 10^\circ$ 时, E_{\max} 最小; 应力锥长度 L 越大, E_{\max} 越小, $L > 80$ mm, E_{\max} 值变化减少;

35 kV 电力电缆接头的应力锥和内屏蔽层所用材料的电阻率 ρ 大于 $10^6 \Omega \cdot m$ 后, E_{\max} 会明显下降;

35 kV 电力电缆接头的内屏蔽层设计中屏蔽管边缘倒角半径 R 越大, E_{\max} 最小; 在 R 大于 1 mm 后, 处理电场能力明显增强, R 超过 2 mm 后, E_{\max} 变化趋于稳定; 内屏蔽层长度与导体长度差值 ΔL 越大, 处理电场能力越强, 当 $\Delta L > 4$ mm 后, 趋于稳定。

基金项目

南方电网高海拔地区 35 kV 架空输电线路旁路带电作业关键技术与装备研究项目 (YNKJXM20210110)。

参考文献

- [1] 李国倡, 梁箫剑, 魏艳慧, 苏国强, 雷清泉. 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.
- [2] 刘英, 苏宇, 李文沛. 10kV XLPE 电缆接头的电场模拟方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 30-35.
- [3] 蒋晓娟, 梁惟钢, 夏俊峰, 孙建生. 35 kV 电力电缆冷缩式中间接头典型缺陷电场计算及故障分析[J]. 绝缘材料, 2015(11): 59-63+68.
- [4] 孔德武, 周明阳, 徐玮, 赵毅. 电缆附件的电场数值计算和优化设计[J]. 电线电缆, 1997(3): 7-10.
- [5] 余海涛, 邵可玉, 罗俊华. 用有限元法优化高压电缆参数[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 3-4+8.