

## 10 kV 交流 XLPE 电缆熔接头的直流电场仿真分析

王启隆<sup>1</sup>, 王国海<sup>2</sup>, 王方舒<sup>3</sup>, 黄 韵<sup>3</sup>, 韩 哲<sup>3</sup>, 陈向荣<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院浙江省电机系统智能控制与变流技术重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江万马高分子材料集团有限公司, 浙江 杭州 311305;

3. 宁波东方电缆股份有限公司, 浙江 宁波 315800)

**摘要:** 为了研究具有不同电气性能的熔接头在直流下运行的电场分布, 本文以 10 kV 交流交联聚乙烯(XLPE)电缆熔接头为例, 通过有限元仿真软件建立熔接头电场和温度场耦合仿真模型, 得到了当恢复绝缘且具有不同直流电导率时熔接头的直流电场分布。结果表明: 当恢复绝缘的直流电导率大于本体绝缘时, 熔接头直流运行时的最大场强位于反应力锥处。随着绝缘温差的增大, 反应力锥场强逐渐减小而应力锥场强逐渐增大。反应力锥坡度越小, 其电场强度越大, 但熔接头恢复绝缘与本体绝缘的结合性更好。

**关键词:** 熔接头; 电场分布; 反应力锥; 应力锥

**DOI:** 10.12067/ATEEE2105043

**文章编号:** 1003-3076(2021)10-0037-07

**中图分类号:** TM247

### 1 引言

随着新能源直流电源和城市直流负荷的大量接入, 对于现有的交流配电网, 其逐渐无法满足新的直流输电和配电要求<sup>[1,2]</sup>。与交流配电网相比, 直流配电网具有输送容量大、线路损耗小、供电距离长、线路成本低等优势, 然而在大型城市中土地资源十分紧张, 难以建设新的直流线路。随着电力电子技术的快速发展, 可以将交流配电网改造为直流配电网, 即利用现有的交流电缆线路输送直流电, 对直流配电网的实现意义重大<sup>[3-5]</sup>。

电缆中间接头是延长电缆线路的重要附件。国内的中间接头一般采用冷缩式、热缩式和预制式, 三种接头均是采用屏蔽管或应力锥来控制电场, 引入大量的复合绝缘界面, 界面的电气参数匹配性差, 容易造成界面电荷积累。此外, 机械应力形成的绝缘界面防水性能较差, 容易造成界面放电, 这不仅是电缆故障发生的重要原因, 也是接头局部放电测量的研究重点<sup>[6]</sup>。由文献[7]可知, 当 10 kV 交流电缆的冷缩式中间接头改为直流运行后, 高压屏蔽管周

围的场强较大, 容易发生空间电荷积累; 并且由于电缆本体 XLPE 绝缘和接头硅橡胶绝缘的直流电导率和介电常数不匹配, 两者交界面处也容易积累界面电荷, 从而造成界面电场的畸变。此外, 接头硅橡胶绝缘在高温下具有明显的热老化特征, 容易生长丛状电树枝, 成为电缆的潜伏故障隐患<sup>[8]</sup>。

陆缆熔接头技术可将两根电缆连接并恢复至一根新电缆状态。熔接头采用与电缆本体绝缘材料相同的绝缘恢复材料, 可减少界面极化造成的界面电荷积累, 并且熔接头的内外屏蔽层均按照电缆本体结构进行恢复, 可避免应力锥和屏蔽管周围的电场集中问题, 因此相比于冷缩式中间接头, 熔接头更适合直流运行。虽然恢复绝缘材料与电缆本体绝缘材料相同, 但在恢复绝缘材料的硫化过程中, 由于其工艺和温度等环境条件无法保持与电缆本体绝缘一致, 同时靠近新旧绝缘交界面处的本体绝缘存在再加热导致的二次硫化问题<sup>[9]</sup>, 所以熔接头恢复绝缘和电缆本体绝缘的直流电导率和介电常数大小不同, 导致新旧绝缘交界面出现电场集中现象。

目前所开展的新型电缆接头研究主要集中在海

**收稿日期:** 2021-05-20

**基金项目:** 宁波市“科技创新 2025”重大专项(2018B10019)、浙江大学“百人计划”(自然科学 A 类)

**作者简介:** 王启隆(1998-), 男, 四川籍, 博士研究生, 研究方向为直流输电、先进电工材料及测试技术;

陈向荣(1982-), 男, 湖南籍, 研究员, 博士生导师, 博士, 研究方向为先进电工材料+新一代测量传感技术, 先进电力装备+新一代电网, 高电压新技术等先进高压输电新技术(通信作者)。

缆工厂接头的工艺改进和电场设计两个方面。文献[9]研究了500 kV海缆工厂接头中恢复绝缘、近接头绝缘和电缆本体绝缘的交联度和结晶度特征。文献[10]优化设计了500 kV海缆工厂接头的界面长度,使工厂接头内部电场小于电缆本体电场。文献[11]提出了工厂接头导体快速焊接的方法。文献[12]介绍了110 kV交联聚乙烯海缆模注式工厂接头的制作工艺,包括绝缘硫化等关键步骤。文献[13]建立了高压110 kV海缆工厂接头的电磁-热耦合有限元模型,并仿真计算了工厂接头的温度场分布。可以发现,新型接头的相关报道主要关于海缆工厂接头的制作工艺和理论研究,而针对陆缆熔接头的理论研究还少有报道。

目前,对于我国10 kV的XLPE电缆线路,在地铁、医院、工厂等一些重要供电区域,为了进一步提高供电可靠性,熔接头的使用量不断增加且制作工艺也逐渐成熟<sup>[14]</sup>,但相应的理论研究仍较为缺乏。本文以10 kV的XLPE电缆熔接头为例,利用有限元法,通过多物理场耦合仿真软件Comsol Multiphysics建立了熔接头的温度场和电场耦合仿真模型,研究了当恢复绝缘具有不同直流电导率时,熔接头在直流运行方式下的电场分布,并进一步研究了绝缘温差和反应力锥角度对熔接头直流电场分布的影响。

## 2 熔接头仿真模型建立

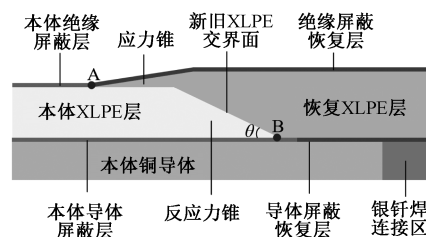
### 2.1 熔接头分类

陆缆熔接头分为包带模塑型熔接头(Taped Melting Joint, TMJ)和挤塑模注型熔接头(Extruded Melting Joint, EMJ)。EMJ容易造成绝缘线芯严重偏心,绝缘表面引入气隙和杂质,甚至出现凹凸不平 and 裂缝等现象。相比于EMJ, TMJ的绝缘恢复工艺更简单,所以制作周期更短,制作成本也更小,但其容易在熔接头新旧绝缘交界面和恢复绝缘内部之间引入气隙和杂质,并且绝缘厚度越大,绕包难度也越大。因此,EMJ一般用于220 kV电压等级及以上具有较厚绝缘的电缆,而TMJ一般用于220 kV电压等级以下具有较薄绝缘的电缆。对于10 kV中压电缆熔接头,一般采用TMJ技术。

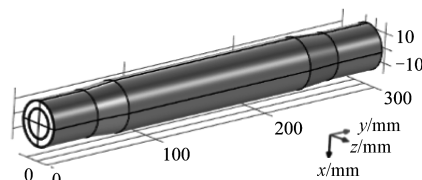
### 2.2 熔接头结构和参数

熔接头存在两个三结合点,其中A点为绝缘屏蔽恢复层、本体XLPE层和恢复XLPE层的三结合点,B点为本体导体屏蔽层、本体XLPE层和恢复

XLPE层的三结合点。新旧XLPE交界面为本体XLPE层和恢复XLPE层之间的斜坡交界面;应力锥位于本体XLPE层上方,绝缘屏蔽恢复层下方的恢复XLPE层锥形部位;反应力锥位于新旧XLPE交界面下方,本体导体屏蔽层上方的本体XLPE层锥形部位,反应力锥表面即为新旧XLPE交界面。10 kV交流XLPE电缆熔接头的二维结构示意图和三维模型如图1所示。



(a) 熔接头二维结构示意图



(b) 熔接头三维模型

图1 熔接头二维结构示意图和三维模型

Fig.1 Two-dimensional structure and three-dimensional model of melting joint

10 kV交流XLPE电缆熔接头的具体形状参数由宁波东方电缆股份有限公司提供。根据文献[15],本体绝缘屏蔽层、绝缘屏蔽恢复层、本体导体屏蔽层和导体屏蔽恢复层的直流电导率均取 $5 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ 。在本文中,熔接头反应力锥角度 $\theta$ 取 $15^\circ$ ,其主要尺寸参数和热物理参数见表1。

表1 熔接头结构和热物理参数

Tab.1 Structural and thermo-physical parameters of melting joint

结构名称	尺寸参数/ mm	密度/ ( $\text{kg/m}^3$ )	比热容/ [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]	导热系数/ [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]
铜导体	9.15(半径)	8 900	380	386.4
本体XLPE层	4.5(厚度)	1 200	1 000	0.25
恢复XLPE层	5.2(厚度)	1 200	1 000	0.25
半导体层	0.4(厚度)	1 200	1 100	0.28

### 2.3 模型基本方程

在熔接头温度场仿真中,各类材料的导热系数保持不变,静态热传导方程如下:

$$\lambda \nabla^2 T + \phi = 0 \quad (1)$$

式中, $\lambda$  为导热系数; $T$  为介质温度,K; $\phi$  为体积热源强度, $\text{W}/\text{m}^3$ 。在温度场仿真中,铜导体温度始终设为定值,作为熔接头的热源。绝缘屏蔽层温度也始终设为定值且将绝缘屏蔽层设为热绝缘边界条件,与外界无热量交换。

在熔接头电场仿真中,铜导体加载 10 kV 电压而绝缘屏蔽层接地,电场方程如下:

$$\nabla(\gamma \cdot \nabla U) + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial(\nabla U)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中, $\gamma$  为绝缘材料的直流电导率, $\text{S}/\text{m}$ ; $U$  为电势,V; $\varepsilon_0$  为真空介电常数, $\text{F}/\text{m}$ ; $\varepsilon_r$  为绝缘材料的相对介电常数; $t$  为时间,s。当铜导体加载直流电压时,其绝缘层电场稳态时呈阻性分布,电场强度与电导率呈反比,且同时受空间电荷和表面电荷的影响。绝缘材料的直流电导率  $\sigma$  同时由电场强度  $E$  和温度  $T$  决定,如下所示<sup>[16]</sup>:

$$\sigma(E, T) = A \exp(-\phi e / (k_B T)) \sinh(B |E|) / |E| \quad (3)$$

式中, $A$  为与材料有关的常数, $\text{V}/(\Omega \cdot \text{m}^2)$ ; $\phi$  为活化能,eV; $e$  为电子电荷量,C; $k_B$  为玻尔兹曼常数, $\text{J}/\text{K}$ ; $B$  为电导率对电场的依赖系数, $\text{m}/\text{V}$ ; $E$  为电场强度, $\text{V}/\text{m}$ 。本文选取不同熔接头的 5 个恢复绝缘试样和 1 个本体绝缘试样进行直流电导率测试,其中,在不同测量温度和电场强度下,熔接头本体绝缘的直流电导率如图 2 所示。

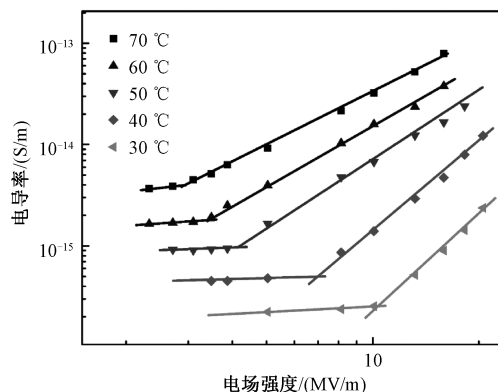


图2 本体绝缘在不同温度和电场强度下的直流电导率

Fig.2 DC conductivity of original insulation under different temperatures and electric fields

根据式(3)对图2中熔接头本体绝缘的直流电导率进行拟合,可得  $A = 3.2 \text{ V}/(\Omega \cdot \text{m}^2)$ 、 $\phi = 0.56 \text{ eV}$ 、 $B = 2.77 \times 10^{-7} \text{ m}/\text{V}$ 。同理,对于 5 个恢复绝缘试样,其在不同测量温度和电场强度下的直流电导率拟合系数见表 2。

表2 熔接头绝缘直流电导率拟合系数

Tab.2 Coefficients of conductivity fitting for melting joint insulation

系数	$A/$ ( $\text{V} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$\phi/$ eV	$B/$ ( $\text{m}/\text{V}$ )
本体绝缘	3.2	0.56	$2.77 \times 10^{-7}$
恢复绝缘 1	3.8	0.54	$2.93 \times 10^{-7}$
恢复绝缘 2	4.3	0.58	$2.62 \times 10^{-7}$
恢复绝缘 3	7.7	0.56	$2.53 \times 10^{-7}$
恢复绝缘 4	9.3	0.52	$2.55 \times 10^{-7}$
恢复绝缘 5	15.8	0.48	$2.45 \times 10^{-7}$

由表 2 可知,5 个恢复绝缘试样的系数  $A$  均大于本体绝缘的系数  $A$ ,其中恢复绝缘 5 的系数  $A$  达到本体绝缘的 4.9 倍,这是因为恢复绝缘在现场制作时极易产生缺陷,导致其电导率一般大于本体绝缘。相比于系数  $A$ ,恢复绝缘试样的系数  $\phi$  和系数  $B$  与本体绝缘差别不大,且呈现与系数  $A$  相反的变化趋势,其中恢复绝缘 5 的系数  $\phi$  和  $B$  分别是本体绝缘的 0.86 和 0.88 倍,这是因为恢复绝缘和本体绝缘的原材料相同,且在直流电导率拟合时,恢复绝缘直流电导率拐点所对应的阈值场强以及不同温度曲线之间的差距与本体绝缘基本一致。因此,可认为恢复绝缘直流电导率特性与本体绝缘直流电导率特性的差异主要体现在系数  $A$  上,而恢复绝缘的系数  $\phi$  和  $B$  与本体绝缘基本相同。对于之后的直流电场研究,熔接头恢复绝缘取  $A = 3.2 k_0 \text{ V}/(\Omega \cdot \text{m}^2)$ ,即在相同场强和温度下,恢复绝缘的直流电导率是本体绝缘的  $k_0$  倍,其系数  $\phi$  和  $B$  与本体绝缘取值相同。

由于现场手工制作的熔接头恢复绝缘的交联温度和时间难以精确控制,恢复绝缘的交联度一般低于本体绝缘<sup>[9]</sup>,由文献<sup>[17]</sup>可知,XLPE 的交联度越低,XLPE 的直流电导率越大,并且在制作熔接头过程中恢复绝缘内部极易引入杂质,导致恢复绝缘的直流电导率大于本体绝缘的直流电导率,此外,由恢复绝缘脱气时间不足所造成的自由基再交联不充分<sup>[18]</sup>,也会使恢复绝缘的直流电导率增大,所以  $k_0 \geq 1$ ,这也与恢复绝缘直流电导率的实际测量结果相一致。

### 3 熔接头直流电场仿真分析

#### 3.1 $k_0$ 对直流电场的影响

因为绝缘层的直流电场强度与电导率成反比,且电导率同时受到温度和场强影响,所以直流电场强度与温度和场强相关。由于熔接头为手工制作,



恢复绝缘质量与技术人员操作的关系较大,其电导率表现为不固定的值,根据实际生产的经验值,本文认为恢复绝缘的电导率不超过本体绝缘的10倍。当10 kV交流XLPE电缆熔接头加载10 kV直流电压、铜导体温度设为70℃、绝缘屏蔽层温度设为65℃时,逐渐增大 $k_\sigma$ (从1增加到10),结果如图3所示。

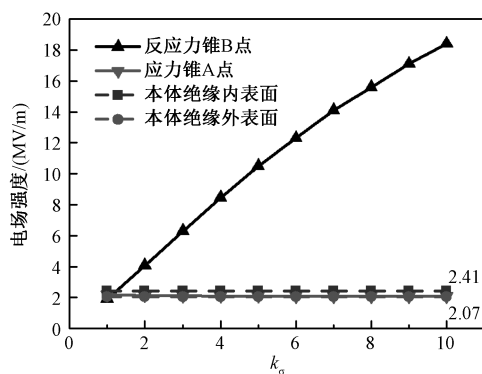


图3 熔接头直流电场强度与 $k_\sigma$ 的关系

Fig.3 Relationship between DC electric field strength of melting joint and  $k_\sigma$

由图3可知,反应力锥B点场强 $E_B$ 随 $k_\sigma$ 增大而增大,可用幂函数 $E_B = 2.42 k_\sigma^{0.89}$ 拟合,拟合优度为0.995。应力锥A点场强 $E_A$ 随 $k_\sigma$ 增大基本保持不变。当 $k_\sigma > 1$ 时,反应力锥B点场强大于应力锥A点场强。当 $k_\sigma = 1$ 时,反应力锥B点场强小于应力锥A点场强。在远离新旧绝缘交界面的本体绝缘和恢复绝缘中,随着 $k_\sigma$ 增大,两者电场强度始终保持不变,对于本体绝缘,其内表面场强最大,为2.41 MV/m,而其外表面场强最小,为2.07 MV/m;对于恢复绝缘,其内表面场强最大,为1.89 MV/m,而其外表面场强最小,为1.49 MV/m。

可以发现熔接头在直流工况下本体绝缘外表面场强大于恢复绝缘内表面场强,且本体绝缘和恢复绝缘电场分布较为均匀。这是因为直流电导率受到绝缘温度的影响,绝缘内表面靠近高温铜导体,所以绝缘内表面温度高于绝缘外表面温度,导致绝缘内表面直流电导率大于绝缘外表面直流电导率,而直流场强与直流电导率成反比,所以熔接头绝缘的直流电场分布较为均匀;又因为恢复绝缘的厚度大于本体绝缘,所以熔接头在直流工况下恢复绝缘内表面场强小于本体绝缘外表面场强。当 $k_\sigma$ 为1、2,即恢复绝缘电导率为本体绝缘电导率的1、2倍时,熔接头直流电场分布如图4所示。

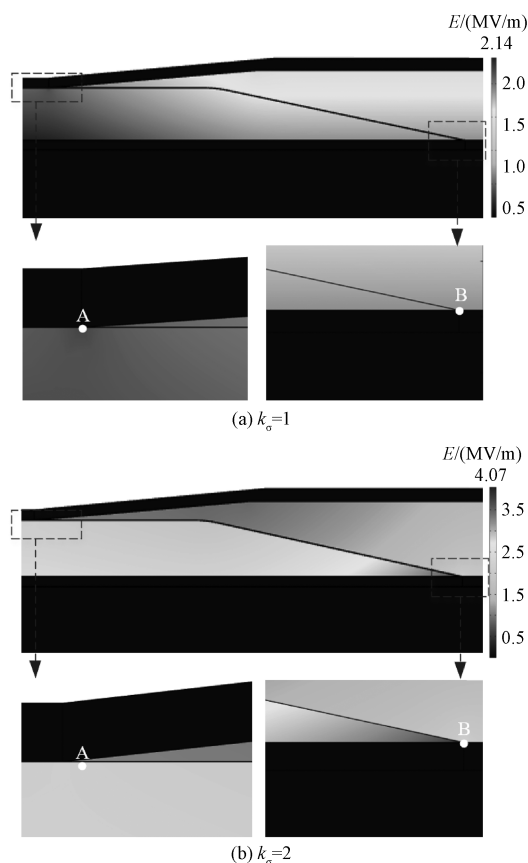


图4 熔接头直流电场分布

Fig.4 DC electric field distribution of melting joint

由图4可知,当 $k_\sigma = 2$ 时,应力锥A点场强为2.13 MV/m,而反应力锥B点场强为4.07 MV/m。由此可见,当恢复绝缘的直流电导率大于本体绝缘时,熔接头在直流工况下的场强主要集中在反应力锥B点,所以B点处更容易发生局部放电。

### 3.2 绝缘温差对直流电场的影响

设 $k_\sigma = 2$ ,熔接头铜导体的温度保持70℃不变且加载10 kV直流电压,绝缘外屏蔽层接地,为了实现不同的绝缘温差(铜导体与绝缘外屏蔽层的温度差),将绝缘外屏蔽层的温度分别设为65℃、60℃、55℃、50℃、45℃、40℃,熔接头电场强度与绝缘温差的关系如图5所示。

由图5可知,在远离新旧绝缘交界面的本体绝缘中,随着绝缘温差的增大,内表面场强逐渐减小而外表面逐渐增大;当绝缘温差为9℃时,内表面场强等于外表面场强,约为2.2 MV/m;当绝缘温差大于9℃时,外表面场强超过内表面场强,此时本体绝缘电场分布发生反转。对于应力锥和反应力锥,随着绝缘温差的增大,反应力锥B点场强逐渐减小而应力锥A点场强逐渐增大;当绝缘温差为21℃时,反

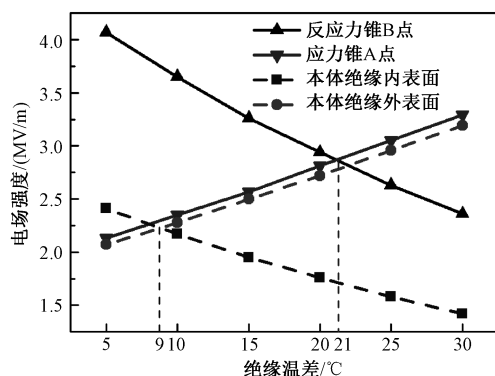


图5 熔接头直流电场强度与绝缘温差的关系

Fig.5 Relationship between DC electric field strength of melting joint and insulation temperature difference

应力锥 B 点场强等于应力锥 A 点场强, 约为 2.8 MV/m; 当绝缘温差大于 21 °C 时, 应力锥 A 点场强超过反应力锥 B 点场强, 此时熔接头新旧绝缘交界面的电场分布发生反转, 界面场强分布均匀且较大, 容易发生界面闪络。

根据文献[7], 因为 10 kV 交流电缆的绝缘层厚度仅为 4.5 mm, 电缆正常运行时绝缘温差一般为 5 °C, 所以本体绝缘内表面场强大于外表面场强。因为 10 kV 交流电缆熔接头的恢复绝缘层厚度稍大于本体绝缘, 熔接头正常运行时绝缘温差稍大于 5 °C, 但远小于 21 °C, 所以在熔接头直流运行过程中, 反应力锥 B 点场强大于应力锥 A 点场强, 新旧绝缘交界面的电场分布不会发生反转。

### 3.3 反应力锥角度对直流电场的影响

设熔接头的铜导体温度为 70 °C 且绝缘外屏蔽层温度为 65 °C, 保持  $k_0$  为 2 不变。为了研究反应力锥角度对直流电场的影响, 改变反应力锥角度  $\theta$  (如图 1(a) 所示), 熔接头电场强度与反应力锥角度的关系如图 6 所示。

由图 6 可知, 随着反应力锥角度的增大, 应力锥 A 点场强和本体绝缘内外表面场强始终不变。当反应力锥角度从 5° 增大到 12° 时, 反应力锥 B 点场强的变化小于 0.1 MV/m。当反应力锥角度大于 12° 时, 反应力锥 B 点场强随着反应力锥角度增大而快速减小, 有利于熔接头安全稳定运行。但当反应力锥角度较大时, 在进行恢复 XLPE 绝缘包带熔融的过程中, 熔融的恢复 XLPE 绝缘由于重力的原因下坠, 导致无法与本体绝缘充分融合, 从而出现界面缺陷。当反应力锥角度较小时, 反应力锥处场强越大, 并且反应力锥角度越小, 新旧绝缘交界面坡度越长, 由于制作工艺的问题, 界面缺陷出现的概率也越大,

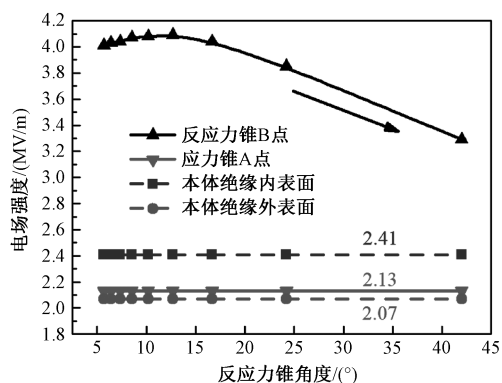


图6 熔接头直流电场强度与反应力锥角度的关系

Fig.6 Relationship between DC electric field strength of melting joint and anti-stress cone angle

但恢复 XLPE 绝缘更容易与本体绝缘相融合, 保证熔接头新旧绝缘交界面的电气性能。因此, 反应力锥角度不宜过小, 也不宜过大。由于恢复绝缘的电气性能弱于本体绝缘, 在熔接头的恢复绝缘处, 为了减小场强, 往往需要增加恢复绝缘的厚度, 但恢复绝缘的厚度越大, 熔接头散热更加困难, 容易造成熔接头过热。

## 4 结论

本文通过对 10 kV 交流 XLPE 电缆熔接头进行温度场和电场耦合仿真, 得到了所选型号电缆熔接头直流运行时的电场分布, 同时研究了非线性电导率控制层对熔接头新旧 XLPE 绝缘交界面电场分布的影响, 主要结论如下:

(1) 当熔接头直流运行时, 熔接头的绝缘场强主要集中在反应力锥 B 点。随着恢复绝缘直流电导率的增大, 反应力锥 B 点场强增大而应力锥 A 点场强基本保持不变; 当恢复绝缘的直流电导率为本体绝缘的 2 倍时, 反应力锥 B 点场强接近应力锥 A 点场强的 2 倍。

(2) 随着绝缘温差的增大, 反应力锥 B 点场强减小而应力锥 A 点场强增大, 当绝缘温差大于 21 °C 时, 应力锥 A 点场强超过反应力锥 B 点场强。当反应力锥角度大于 12° 时, 反应力锥 B 点场强随着反应力锥角度增大而迅速减小, 此时有利于熔接头安全稳定运行, 但当反应力锥角度较大时, 在熔接头制作过程中, 容易出现界面缺陷。

## 参考文献 (References):

- [1] Mok K, Wang M, Tan S, et al. DC electric springs——A technology for stabilizing DC power distribution systems

- [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (2): 1088-1105.
- [2] 江道灼, 郑欢 (Jiang Daozhuo, Zheng Huan). 直流配电网研究现状与展望 (Research status and developing prospect of DC distribution network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36 (8): 98-104.
- [3] Liu Ying, Cao Xiaolong, Fu Mingli. The upgrading renovation of an existing XLPE cable circuit by conversion of AC line to DC operation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32 (3): 1321-1328.
- [4] 刘英, 曹晓珑, 何子兰, 等 (Liu Ying, Cao Xiaolong, He Zilan, et al.). 现役交流 XLPE 电缆配电线路改为直流运行的技术方案及实例分析 (Technical scheme and case study of the upgrading renovation of existing XLPE cables from AC distribution system to DC operation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (1): 96-103.
- [5] Yu J, Smith K, Urizarbarrena M, et al. Initial designs for the ANGLE DC project; converting existing AC cable and overhead line into DC operation [A]. 13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission [C]. Manchester, UK, 2017.
- [6] 肖利龙, 吴海涛, 任重, 等 (Xiao Lilong, Wu Haitao, Ren Zhong, et al.). 基于多物理跟踪监测的电缆附件缺陷局部放电比值演化特征及诊断方法研究 (Partial discharge evolution characteristics and diagnostic method of cable accessories based on multi-physical tracking) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (9): 28-35.
- [7] Yu Jingzhe, Chen Xiangrong, Zhou Hao. Electric field calculation and optimization for stress cone of DC cable joint based on the coaxial double-layer insulation model [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27 (1): 33-41.
- [8] 费益军, 张云霄, 周远翔 (Fei Yijun, Zhang Yunxiao, Zhou Yuanxiang). 硅橡胶热老化特性及其对电缆附件运行可靠性的影响 (Thermo characteristics of Silicone rubber and its effects on operational reliability of extra-high voltage cable accessories) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (12): 30-34.
- [9] 赵薇, 胡列翔, 张振鹏, 等 (Zhao Wei, Hu Liexiang, Zhang Zhenpeng, et al.). 500 kV 海缆熔接头绝缘恢复对 XLPE 工频击穿性能和晶相结构的影响 (Effects of 500 kV submarine cable factory joint insulation recovery on power frequency breakdown and crystalline morphology of XLPE) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2019, 45 (11): 3437-3443.
- [10] 王少华, 阎黎冰, 李特, 等 (Wang Shaohua, Yan Libing, Li Te, et al.). 交流 500 kV 交联聚乙烯绝缘海缆设计关键问题 (Key problems of design for AC 500 kV cross-linked polyethylene insulation submarine cable) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2018, 54 (8): 225-230, 236.
- [11] 高凯, 陈龙啸, 杨黎明, 等 (Gao Kai, Chen Longxiao, Yang Liming, et al.). 海底电缆熔接头导体快速焊接方法 (A conductor welding method applied to soft joint of submarine cable) [J]. 电线电缆 (Wire & Cable), 2016, (6): 14-17.
- [12] 狄健, 梅文杰, 汤国良, 等 (Di Jian, Mei Wenjie, Tang Guoliang, et al.). 110 kV 交联电缆模注式接头的研究 (The research of extrusion molded joint for 110 kV XLPE cable) [J]. 电线电缆 (Wire & Cable), 2018, (1): 15-18.
- [13] 杨其鹏 (Yang Qipeng). 考虑不同接头影响下的海底电缆温度场分析与载流量计算 (Analysis of temperature field and calculation of ampacity of submarine power cable considering different joint) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2017.
- [14] 杨尧 (Yang Yao). 10 kV 电缆熔接头技术的应用 (Application of 10 kV cable melting joint technology) [J]. 电子技术与软件工程 (Electronic Technology & Software Engineering), 2020, 4 (21): 227-228.
- [15] Chen Xiangrong, Yu Jingzhe, Zhou Hao. Thermo-electric field analysis of AC XLPE cable in monopole, bipole, and tripole DC operation modes [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13 (14): 2959-2966.
- [16] 于竞哲, 苏宜靖, 周浩, 等 (Yu Jingzhe, Su Yijing, Zhou Hao, et al.). 10 kV 交流 XLPE 电缆改为直流运行的温度场和电场仿真分析 (Simulation of temperature field and electric field for 10 kV AC XLPE cable in DC operation) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2017, 43 (11): 3653-3660.
- [17] 朱晓辉 (Zhu Xiaohui). 交联工艺对交联聚乙烯绝缘特性的影响 (Effects of cross-linking method on insulation properties of cross-linked polyethylene) [D]. 天津: 天津大学 (Tianjin: Tianjin University), 2010.
- [18] 李志伟, 金海云, 张涛, 等 (Li Zhiwei, Jin Haiyun, Zhang Tao, et al.). 脱气时间对交联聚乙烯电缆绝缘材料聚集态结构与链结构的影响 (Effect of degassing time on aggregation structure and chain structure of XLPE cable insulation material) [J]. 西安交通大学学报 (Journal of Xi'an Jiaotong University), 2018, 52 (4): 15-23.

## DC electric field simulation analysis for 10 kV AC XLPE cable melting joint

WANG Qi-long<sup>1</sup>, WANG Guo-hai<sup>2</sup>, WANG Fang-shu<sup>3</sup>, HUANG Yun<sup>3</sup>,  
HAN Zhe<sup>3</sup>, CHEN Xiang-rong<sup>1</sup>

(1.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Electrical Machine Systems, College of Electrical Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;2.Zhejiang Wanma Macromolecule Material. Co., Ltd.,  
Hangzhou 311305, China; 3.Ningbo Orient Wires & Cables Co., Ltd., Ningbo 315800, China)

**Abstract:** To study the electric field distribution of melting joints with different electrical properties in DC operation, the electric field and the temperature field coupling simulation model is established according to the parameters of the 10 kV AC XLPE cable melting joints. The DC electric field distribution of the melting joints with different DC conductivity is obtained. The results show that when the DC conductivity of the restored insulation are larger than that of the original insulation, the maximum electric field strength of the melting joint in DC operation is located at the anti-stress cone. As the insulation temperature difference increases, the electric field of the anti-stress cone decreases, while the electric field strength of the stress cone increases. When the slope of the anti-stress cone is smaller, the electric field strength of the anti-stress cone is larger, but the bonding between the restored insulation and the original insulation is stronger.

**Key words:** melting joint; electric field distribution; anti-stress cone; stress cone