

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.004

## 施工缺陷对超导电缆中接头内电场分布的影响

党卫军<sup>1</sup>, 孙奇珍<sup>1</sup>, 薛艺为<sup>1</sup>, 丁璨<sup>2</sup>, 曾文凡<sup>1</sup>, 方春华<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510620;

2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 超导电缆的中接头是影响电缆寿命的主要因素之一。为了研究中接头在制造和施工环节中造成的缺陷对高温超导电缆的影响,文中在电场数值计算分析的基础上利用有限元仿真软件对不同缺陷进行仿真建模,分析了绝缘层划伤、绝缘层杂质、超导带焊接毛刺3种典型施工缺陷对接头内电场分布的影响规律。结果表明,绝缘层划伤存在空气隙时,最大场强随着空气隙厚度增加而减小;绝缘层残留杂质时,杂质周围电场畸变最严重;超导带焊接毛刺的位置及大小对最大场强有较大影响。3种缺陷结构参数对缺陷周围的最大场强有较大影响,结构参数变化均会引起最大场强的较大变化。研究结果可以指导超导电缆中接头的施工工艺。

**关键词:** 超导电缆;中接头;典型缺陷;电场分布;电场畸变

中图分类号: TM854

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)05-0023-07

### 0 引言

高温超导电缆与常规电力电缆相比,两者电压等级相近时,高温超导电缆的输送容量可提升3~5倍,电能损耗只有常规电缆的40%<sup>[1]</sup>。在同样的空间走廊下,超导电缆可以传输更大的容量,极大精简电网结构,减小电压等级,具有更好的经济效益和社会效益。因此,超导电缆应用前景广阔<sup>[2-3]</sup>。

高温超导电缆中接头能够保障电能远距离传输,是超导电缆线路中的重要组成部分。制作中接头需剥离屏蔽层等部分,此时电场向外发散,使屏蔽层切断部位电场发生严重畸变<sup>[4-6]</sup>,局部位置场强过大,提高了发生局部放电的概率<sup>[7]</sup>。与交联聚乙烯电缆中接头相比,为了减少漏热,超导电缆中接头采用了真空连接方式,电缆的中接头包含多层固体复合绝缘层。电应力集中现象会在电缆中接头铜屏蔽、半导体屏蔽、绝缘层和导电层的剥切处产生,并且在剥切过程中材料极易被划伤,灰尘、导电微粒等杂质极易在现场制作安装过程中侵入,所以这些缺陷会集中在电应力下产生局部放电,最终可能引发重大事故<sup>[8-9]</sup>。以往输电线路发生的故障统计结果表明,电缆中接头故障的概率大约为70%,因此电缆接头运行状态将直接影响电缆的安全运行<sup>[10]</sup>。

基于目前的研究和时谐电磁场公式,文中通过有限元分析软件,对带有中接头绝缘层划伤、绝缘层存在杂质、超导带焊接毛刺3种不同施工缺陷

的超导电缆中接头电场分布进行仿真计算,研究这3种典型缺陷情况下电场分布情况,探究中接头缺陷大小、位置等不同参数对电场分布的影响关系,由此判断3种典型施工缺陷对高温超导电缆附件危害程度,为现场施工提供一定指导意见。

### 1 电场数值计算分析与模型参数

#### 1.1 电场数值计算分析

目前交流输电配线路中电气设备的工作频率为50 Hz,电极间电压在短时间内变化较缓慢,可以作为静电场来进行理论分析计算<sup>[11]</sup>。而超导电缆接头结构近似轴对称,因此建立其平面模型,通过有限元软件计算可得超导电缆接头电场分布。介电材料中静电场基本方程组为:

$$\begin{cases} D_i = \varepsilon_m E_i \\ E_i = -\partial\varphi/\partial x_i \\ \partial D_i/\partial x_i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $D_i, E_i$ 分别为材料内的电位移和电场, $i=1,2$ ; $\varepsilon_m$ 为介电常数; $\varphi$ 为电势; $x_i$ 为距离。

在静电场模型中,超导电缆中接头内部静电场能量可用待定电位函数及其导数的积分式表示,在边界为 $c$ 、电荷密度为 $\rho$ 、介电常数为 $\varepsilon$ 的平面域 $D$ 内,边界 $c$ 的电位 $\varphi$ 满足第一类边界条件和泊松方程。

$$\varphi|_c = f(s) \quad (2)$$

$$\nabla^2 \varphi = -\rho/\varepsilon \quad (3)$$

通过差分法中的离散化处理,将区域 $D$ 分解为有限个子区域(称为单元) $e$ ,然后通过有限个节点电位的函数,近似地用这些离散单元表示静电场能

收稿日期:2020-04-10;修回日期:2020-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607103)

量<sup>[12-14]</sup>,将静电场能量极值的变分计算简化为多元函数取极值的问题,得到电场能量的泛函数为:

$$W(\varphi) = \iint_D \frac{1}{2} \varepsilon E^2 dD = \iint_D \left( \frac{\varepsilon}{2} \nabla^2 \varphi - \rho \varphi \right) dD \quad (4)$$

泛函变分为:

$$\delta W(\varphi) = \iint_D [\varepsilon \nabla \varphi \cdot \nabla(\delta \varphi) - \rho \delta \varphi] dD \quad (5)$$

最后将电位移和电场的关系及能量泛函数结合,通过积分求得各节点电位,完成高温超导电缆的静电场求解。

### 1.2 仿真模型及参数

超导电缆中接头结构主要包括电缆铜芯、定径管、超导层、导体连接管、主绝缘、外导电层、屏蔽层、接合绝缘层、倾斜通道、冷却剂通道和外护层。其中冷却剂通道被设置在接合绝缘层处,用来对导体连接部分进行冷却,防止电缆芯体连接部位产生热量而导致温度升高。仿真模型如图1所示,各个部分结构材料参数如表1所示。

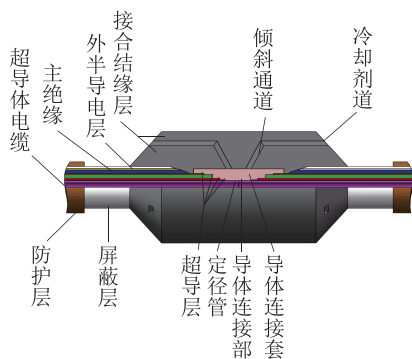


图1 仿真模型结构

Fig.1 Simulation model structure

表1 结构参数

Table 1 Structural parameters

名称	材料	相对介电常数	厚度/mm	长度/mm
导电层	氧化铀钽铜	10 000	1	1 556
绝缘层	聚丙烯木纤维复合纸	2.21	3.4	1 406
外半导电层	光面碳纸	1 000	1	620
内半导电层	光面碳纸	1 000	1	182
屏蔽层	氧化铀钽铜	10 000	0.5	956
液氮		1.43		
空气		1		
金属杂质		10 000		

仿真分析中,在导电层施加电压,在铜屏蔽层施加零电位,对模型进行网格划分时采用4级SmartSize智能化剖分网格,并在3种典型缺陷处进行细化,分析各种缺陷处电场分布情况。

## 2 主绝缘层划伤缺陷与电场分布关系

制作电缆中接头时需将部分外半导电层剥除,经常会因在半导电层断开处切割过深而划伤主绝缘层,形成主绝缘划伤缺陷,且该处缺陷不易被发现。将外半导电层切断处作为基准,分别分析了沿轴向方向距离切断位置左右两边不同位置处存在主绝缘划伤时的电场分布情况,其中空气隙长度为0.2 mm,厚度为0.1 mm,缺陷位置分布见表2,缺陷模型示意如图2所示。

表2 主绝缘层划伤缺陷位置分布

Table 2 The distribution of scratches on the main insulation layer

序号	缺陷位置	距切断处位置/mm
1	左	-3
2	左	-2
3	左	-1
4	基准	0
5	右	1
6	右	2
7	右	3

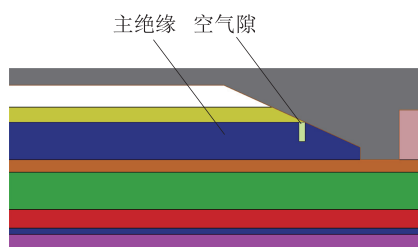


图2 主绝缘划伤缺陷示意

Fig.2 Schematic diagram of main insulation scratch defect

当气隙位置远离应力锥时,电场畸变并不严重,外半导电层切断位置电势很集中,其周围空气隙处电场最大,达到3.66 MV/m,改变该处空气隙大小,并设定该处为基准位置,分别沿轴向向左和向右分析空气隙长度和厚度对电场分布的影响。由于长气隙较少出现,且长气隙远离应力锥部分处的电场变化较小,因此,设定气隙长度为1~6 cm,间隔取值为0.8 mm。空气隙长度一定时最大场强随厚度变化曲线如图3(a)所示,空气隙厚度一定时最大场强随长度变化曲线如图3(b)所示。

超导电缆绝缘层运行环境处在交变电场中,其场强分布与相对介质常数成反比,气隙相对介电常数小于绝缘层介电常数,即相对介电常数在气隙与绝缘层交界处发生突变导致电场畸变。由图3可知,最大场强随气隙长度的变化范围为3~4.5 MV/m,

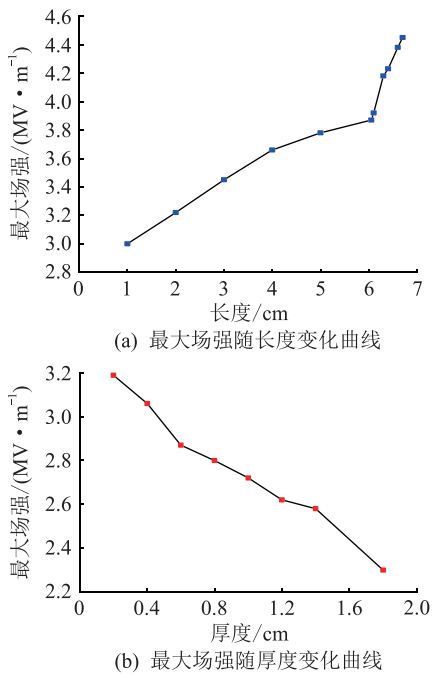


图3 最大场强与空气隙参数变化关系

Fig.3 Relationship between maximum field intensity and air gap parameters

均大于空气击穿场强。当空气隙长度在1~6 cm之间,随着气隙长度增加,最大场强逐渐增加,特别是在气隙长度达到6 cm以后,每增加1 mm,最大场强会急剧增加。该区域正好在超导带焊接处附近,焊接处附近电势集中,电场密集,该处附近出现空气隙,附近介电常数突变,导致该处出现电场最大值。

通常气隙上下表面的距离及张开位移很小,可认为是小间隙,分析气隙厚度范围为0~2 mm时的最大场强变化发现,电场强度随气隙厚度的变化范围为2.3~4.2 MV/m,且随着缺陷厚度增加,空气隙周围击穿场强逐渐减小,当厚度超过0.4 mm后,场强小于空气电离场强3 MV/m。空隙内电场可以看作均匀电场,在高电场作用下空隙内的放电击穿可近似看作汤逊型放电,根据巴申定律可知,空气隙厚度越薄,空气隙周围电场畸变程度越严重,即场强与厚度成反比。

### 3 绝缘层含杂质缺陷与电场分布关系

#### 3.1 杂质位置、大小对电场分布影响

半导体层切断处及超导带焊接位置附近绝缘层极易残留杂质微粒,同时2处附近电势集中降落,电场最为密集,附近出现杂质后,电场畸变程度更为严重。分析2处附近杂质参数对电场分布影响,其中杂质参数和位置分布见表3。

远离半导体层切断处和超导带焊接部位的绝缘层含杂质时电场较小,因此仅考虑半导体层切断

表3 杂质参数和位置分布

Table 3 Impurity parameter and position distribution

序号	轴向距切断处距离	径向距切断处距离	轴向距接管距离	径向距接管距离
1	0.2	0.5	1.0	0.5
2	0.4	1.0	2.0	1.0
3	0.8	1.5	3.0	1.5
4	1.6	2.0	4.0	2.0
5	3.2	2.5	5.0	2.5
6	6.4	3.0	6.0	3.0

处和超导带焊接部位附近区域存在杂质的情况,缺陷模型示意如图4所示,仿真分析结果如图5所示。

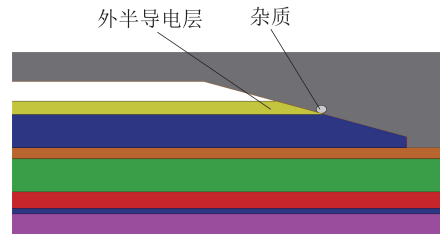


图4 绝缘层含杂质缺陷示意

Fig.4 Schematic diagram of insulation layer containing impurities

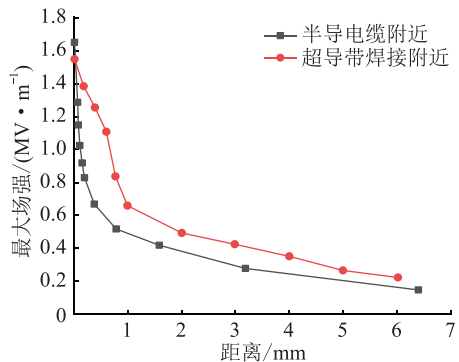


图5 最大场强与杂质位置变化关系

Fig.5 The relationship between maximum field strength and impurity location

距离半导体层切断处及超导带焊接部位1 mm以内的绝缘层残留杂质会导致杂质周围电场畸变,且杂质边缘不同方位畸变程度不一样。特别是在1 mm距离以内,随着距离减小,最大场强增加较快,杂质边缘最大电场畸变程度愈发严重,且超导带焊接部位附近杂质周围最大场强大于半导体层切断处。半导体层附近及超导带焊接附近杂质半径发生变化时,最大场强变化曲线如图6所示。

随着杂质半径增加,超导带焊接部位附近和半导体层切断处附近最大场强均近似呈现正比例增长的规律,杂质半径越大则越靠近半导体层切断处和超导带焊接部位,场强增加较快。杂质半径微小

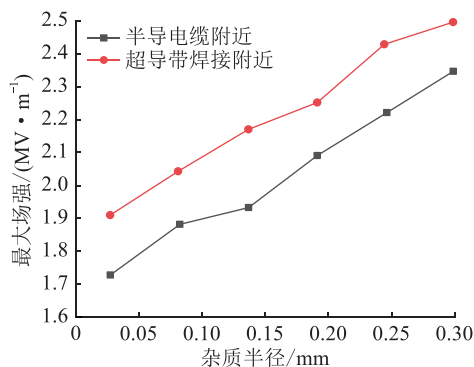


图6 电场与杂质半径变化关系

Fig.6 The relationship between maximum field strength and impurity radius

的增加将导致电场急剧增加,杂质大小严重影响该区域附近电场强度大小。

### 3.2 杂质特性对电场分布影响

空气中弥散着各种类型杂质,其中沙粒间的非对称性摩擦会使沙粒带上电荷<sup>[15-17]</sup>,文献[18]通过对空气中悬浮砂砾实际的测量,得出这些悬浮砂砾的正负最大荷质比分别为  $1.58 \times 10^{-4}$  C/kg,  $-3.04 \times 10^{-4}$  C/kg。本节通过研究电中性沙粒、正电荷沙粒、负电荷沙粒3种电荷,得出砂砾荷质比大小和极性对该处绝缘层电场分布影响。一般情况下,一颗沙粒大约 1.5 mg,根据荷质比进行换算得到相应的电荷量分别为  $2.37 \times 10^{-10}$  C,  $-4.56 \times 10^{-10}$  C,设置5种电荷进行仿真计算,  $q_1 = 2.37 \times 10^{-10}$  C,  $q_2 = 4.56 \times 10^{-10}$  C,  $q_3 = -2.37 \times 10^{-10}$  C,  $q_4 = -4.56 \times 10^{-10}$  C,  $q_5 = 0$ ,分析不同电荷量和电性沙粒对电场分布影响<sup>[19-21]</sup>。

- (1) 正电荷沙粒和电中性沙粒混合,分为  $q_1$  和  $q_5$  组合,  $q_2$  和  $q_5$  组合;
- (2) 负电荷沙粒和电中性沙粒混合,分为  $q_3$  和  $q_5$  组合,  $q_4$  和  $q_5$  组合;
- (3) 相同电荷沙粒,即全是正电荷或者全是负电荷,分为  $q_1$  和  $q_1$  组合,  $q_2$  和  $q_2$  组合;
- (4) 正负电荷沙粒混合,分为  $q_1$  和  $q_3$  组合,  $q_2$  和  $q_4$  组合,  $q_1$  和  $q_4$  组合,  $q_2$  和  $q_3$  组合。

首先,考虑单种电荷的沙粒周围电场分布情况,分析了  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$  5种电荷周围电场分布,结果如图7所示。不论沙粒带何种电性电荷,电中性沙粒最大场强最小,沙粒电荷量和电性均影响电场分布,其中沙粒带负电荷比沙粒带正电荷时周围最大场强要大一些,负电荷沙粒周围最大场强为正电荷沙粒周围最大场强的 1.57 倍左右,电荷量为  $q_3$  的沙粒周围电场强度为 5 种电荷中最大,而电中性沙粒场强最小,电荷量为  $q_5$  沙粒周围最大场强为电

荷量为  $q_5$  沙粒周围最大场强的 6.67 倍左右。由静电能与电荷量、电压之间的关系可知,当静电能一定时,电荷量越大,相应电压越小,带电荷量越小,负电荷的沙粒与导体之间电势差越大。按照电场数值计算原理可知,此时求解的电场为最大场强,带电荷量为  $q_3$  沙粒即为此种情况。图8进一步分析了4种不同电荷量和电性沙粒周围电场分布。

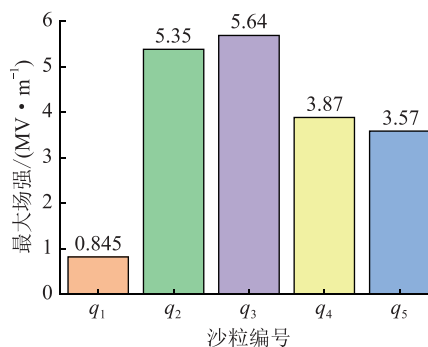


图7 5种电荷沙粒下最大场强

Fig.7 Maximum field strength under 5 kinds of charged sand

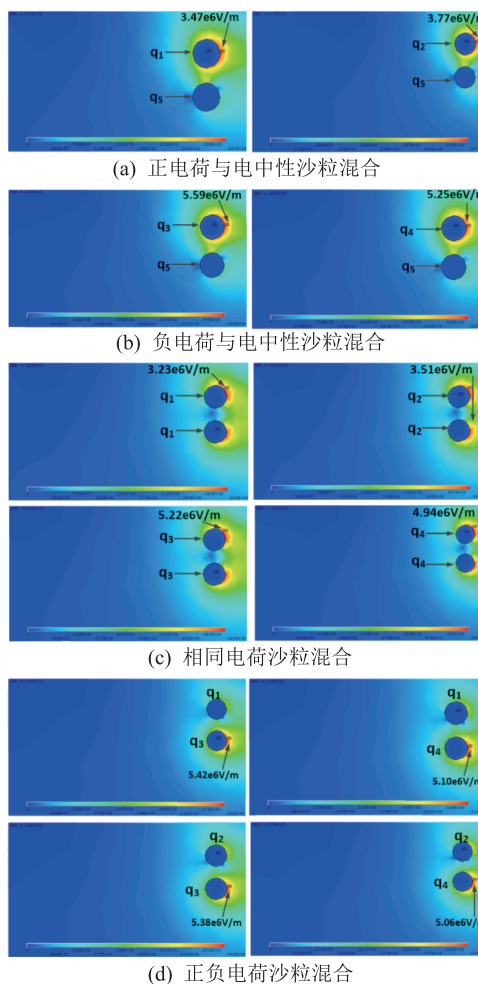


图8 不同沙粒环境下电场分布情况

Fig.8 Electric field distribution in different sand environment



如图 8(a)、(c)所示,混合同种电荷的沙粒比混合中性电荷沙粒与带正电荷沙粒的最大场强小 0.245 MV/m 左右;如图 8(b)、(c)所示,混合同种电荷的沙粒比混合中性电荷沙粒与带负电荷沙粒的最大场强小 0.34 MV/m 左右;如图 8(d)所示,混合正负电荷的沙粒附近最大场强均大于 5 MV/m,负电荷与中性电荷混合沙粒最大场强同样全部大于 5 MV/m,且最大场强出现在混合负电荷沙粒的情况,仿真分析结果统计如图 9 所示。

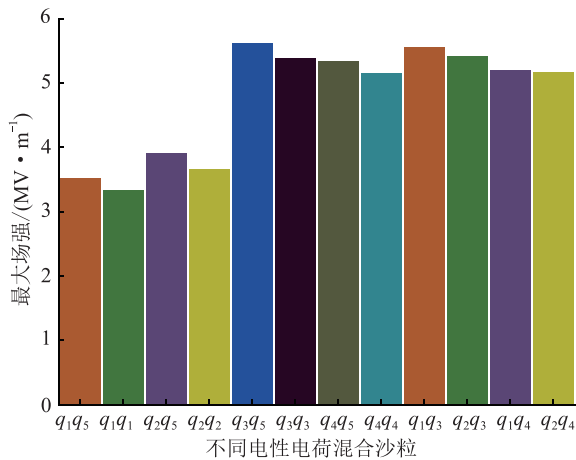


图 9 不同电性沙粒环境下电场

Fig.9 Electric field in different electrical sand environment

沙粒带电荷之后,会与原电场发生叠加,叠加后场强发生了改变,且电场随着沙粒电荷大小、电性、荷质比等发生变化,其中沙粒携带电荷是导致电场畸变的重要原因。

#### 4 超导带焊接毛刺缺陷与电场分布关系

超导电缆制作中接头时,需对 2 段电缆的超导带进行人工焊接,因焊接工艺参差不齐,焊接后超导带残留微小毛刺,现场施工中极易忽略。毛刺一般呈三角形尖刺状,分析超导带毛刺位置及大小与电场关系,其中三角形毛刺高为 0.3 mm,毛刺其他具体属性见表 4,缺陷示意图见图 10。

表 4 超导带焊接毛刺缺陷位置分布

Table 4 Location distribution of welding burr defects in superconducting tape mm

名称	底边长	轴向	径向
1	0	0	0
2	0.1	0.4	0.4
3	0.2	0.8	0.8
4	0.3	1.2	1.2
5	0.4	1.6	1.6
6	0.5	2.4	2.4

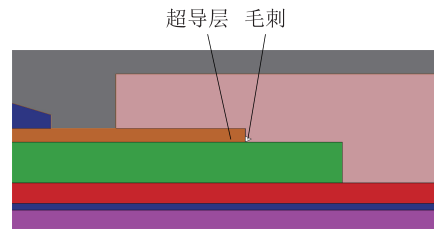


图 10 超导带焊接毛刺缺陷示意

Fig.10 Schematic diagram of welding burr defects in superconducting tape

沿超导带轴向和径向的杂质周围最大场强随杂质位置、大小变化的曲线如图 11 所示。

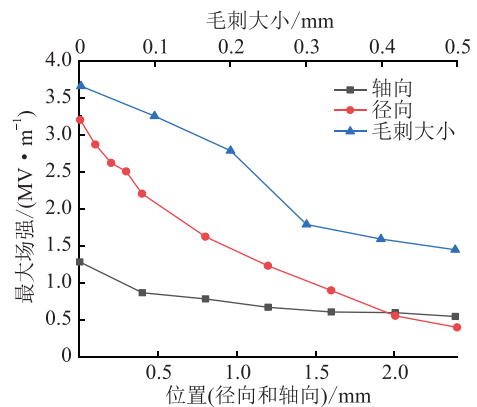


图 11 最大场强与缺陷位置、大小的变化关系

Fig.11 The relationship between maximum field strength and defect location and size

沿着超导带焊接位置径向,越远离中接头内超导层,毛刺周围最大场强越小;沿着超导带焊接位置轴向,越靠近焊接中心位置,最大场强越小。在超导带焊接部位与绝缘层分界面处电场强度最大,且沿焊接部位径向的杂质周围电场强度高于沿轴向的,沿焊接部位径向的最大场强为 3.25 MV/m。

随着毛刺的逐渐增大,毛刺周围的最大场强从 3.61 MV/m 减小到 1.52 MV/m。通常情况下,当焊接部位表面存在毛刺即相当于表面有尖形导体时,根据能带论的一般结果可知,当毛刺带电,毛刺上会存在带较高能量的自由电荷,这些自由电荷必定先行占据毛刺尖端部位较低的高能级。由于毛刺针尖处面积  $S$  小,电荷密度  $\sigma$  大,由公式  $E = \sigma/S$  可知,针尖周围场强十分大,且毛刺越小,场强越大,场强与毛刺大小成反比,越是微小毛刺危害程度越大,特别是沿焊接部位径向的毛刺。

#### 5 结论

通过对超导电缆绝缘层划伤、绝缘层存在杂质、超导带焊接毛刺 3 种施工缺陷进行有限元仿真研究,分析 3 种典型施工缺陷结构参数与电场关系,得到如下结论:

(1) 3种缺陷结构参数对缺陷周围最大场强有较大的影响,最大场强随结构参数变化发生较大的变化。

(2) 随着空气隙长度增加,最大场强逐渐增大,特别是在靠近超导带焊接部位附近的绝缘层空气隙附近,最大场强随气隙长度微小变化发生急剧增长;随着空气隙厚度增加,最大场强逐渐减小,场强与气隙厚度近似呈反比关系。

(3) 沙粒杂质是否携带电荷及电荷极性对电场有重要影响。混合沙粒组合中,正电荷混合沙粒最大场强最小,为3.31 MV/m,负电荷沙粒对最大场强影响最大,一旦其他电性沙粒与携带负电荷沙粒混合,沙粒周围最大场强均超过5 MV/m。

(4) 超导带焊接部位与绝缘层分界面处场强最大,且沿焊接部位径向的杂质周围场强高于沿轴向的。随着毛刺逐渐增大,毛刺周围最大场强逐渐减小,电场畸变程度与毛刺大小成反比。

参考文献:

[1] 逯康康,方进,黄晓华,等. 高温超导电缆终端预制式应力锥缺陷的研究分析[J]. 低温与超导,2014,42(4):31-35.  
LU Kangkang,FANG Jin,HUANG Xiaohua, et al. The analysis of the defect of the prefabricated stress cone of HTS cable termination [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2014, 42 (4): 31-35.

[2] 宗曦华. 高温超导电缆研究及前景分析[J]. 新材料产业, 2017(7):23-27.  
ZONG Xihua. Research and prospect analysis of HTS cable [J]. Advanced Materials Industry, 2017(7):23-27.

[3] 李红雷,林一,黄兴德. 高温超导电缆在大都市电网的应用前景[J]. 电力与能源,2017,38(3):255-257.  
LI Honglei,LIN Yi,HUANG Xingde. Application of high temperature superconducting cable in the metropolitan power Grid [J]. Power & Energy, 2017,38(3):255-257.

[4] PETER Cheetham,WOJIN Kim,CHUL Han Kim, et al. Use of partial discharge inception voltage measurements to design a gaseous helium cooled high temperature superconducting power cable [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1):191-199.

[5] NICK Suttell,CHUL H K,JUAN Ordonez, et al. Three-dimensional finite-element analysis of terminations for gaseous-helium-cooled high-temperature superconducting power cables [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4):1.

[6] TETSUO Yasui,NATSUKO Takeda,YUSUKE Yokoo, et al. Temperature and pressure distribution simulations of 3-km-long high-temperature superconducting power cable system with fault current for 66-kV-class transmission lines [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4):1-5.

[7] XU Y,LUO P,XU M, et al. Investigation on insulation material

morphological structure of 110 and 220 kV XLPE retired cables for reusing [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2014, 21(4):1687-1696.

[8] 项恩新,周婉亚,王科,等. 高压电缆中间接头外半导体层缺陷放电研究[J]. 云南电力技术,2019,47(1):24-27.  
XIANG Enxin,ZHOU Wanya,WANG Ke, et al. Study on the discharge of defects in the semi conducting layer outside the intermediate joint of high voltage cable [J]. Yunnan Electric Power, 2019, 47(1):24-27.

[9] 洪浚轩,何文,何浩辉,等. 电缆线路中间接头绝缘缺陷电场仿真与放电小室局放检测研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(8):56-61.  
HONG Junxuan,HE Wen,HE Haohui, et al. Research on electric field simulation of insulation defects of cable intermediate joints and detection of partial discharge in discharge chamber [J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(8):56-61.

[10] 王凯翔. 10 kV 电缆中间接头故障分析与对策[J]. 今日自动化, 2019(5):105-106.  
WANG Kaixiang. Fault analysis and countermeasure of 10 kV cable intermediate joint [J]. Automation Today, 2019 (5): 105-106.

[11] 方春华,刘浩春,任志刚,等. 硅脂对交联聚乙烯绝缘与硅橡胶界面电场的影响[J]. 高压电器, 2019, 55(4):65-71.  
FANG Chunhua,LIU Haochun,REN Zhigang, et al. Effect on electric field of silicone grease on XLPE/Silicone rubber interface [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4):65-71.

[12] 王有元,王亚军,熊俊,等. 振荡波电压下 10 kV 交联聚乙烯电缆中间接头的局部放电特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(4):1068-1074.  
WANG Youyuan,WANG Yajun,XIONG Jun, et al. Partial discharge characteristics of 10 kV XLPE cable joints under oscillating voltage [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41 (4): 1068-1074.

[13] 方春华,汤世祥,潘明龙. 10 kV 电缆中间接头典型缺陷仿真分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(2):55-59.  
FANG Chunhua,TANG Shixiang,PAN Minglong. Simulation analysis of typical defects in 10 kV cable joints [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, 38 (2):55-59.

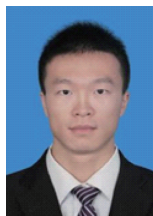
[14] 王霞,余栋,段胜杰,等. 高压电缆附件设计环节中几个关键问题探讨[J]. 高电压技术, 2018, 44(8):2710-2716.  
WANG Xia,YU Dong,DUAN Shengjie, et al. Discussion on several key issues in the design of high voltage cable accessories [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44 (8): 2710-2716.

[15] 穆利安. 基于颗粒跟踪法的二维风沙电数值模拟[D]. 兰州:兰州大学, 2018.  
MU Li'an. Numerical simulation of two dimensional wind sand electrification based on particle tracking method [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.

[16] 王娟,李兴财. 沙尘暴过程中 5~7 000 m 高度大气电场及

- 其对颗粒带电量影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 23-28.  
WANG Juan, LI Xingcai. Exploration of the atmospheric electricity at 5~7 000 m height in sandstorm and its effect on the electrification of sands[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 23-28.
- [17] 周俊, 谢莉. 考虑沙粒局部带电沙尘暴对电磁波衰减—Mie解[C]//2016年全国环境力学学术研讨会摘要集. 2016: 75.  
ZHOU Jun, XIE Li. Considering the attenuation of electromagnetic wave caused by local charged sand dust storm—Mie solution[C]//Proceedings of the Summary of 2016 National Symposium on Environmental Mechanics. 2016: 75.
- [18] 罗生虎. 风沙流结构的实验与数值研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.  
LUO Shenghu. Experiment and numerical simulation of wind-blown sand cloud[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [19] 邓鹤鸣, 何正浩, 马军, 等. 沙尘天气下大沙粒对放电发展的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1246-1252.  
DENG Heming, HE Zhenghao, MA Jun, et al. Effect of large sand dust particles on discharge development in sand dust weather [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1246-1252.
- [20] 柳松, 彭嘉康, 陈守直, 等. 高温对交联聚乙烯电缆/硅橡胶预制件接头界面压力影响的仿真研究[J]. 电线电缆, 2014(1): 10-13.  
LIU Song, PENG Jiakang, CHEN Shouzhi, et al. Simulation of interfacial pressure between XLPE cable and silicon rubber prefabricated joint coupled with high tempera[J]. Wire & Cable, 2014(1): 10-13.
- [21] 刘云鹏, 李玥翰, 刘海峰, 等. 风沙条件下导线电晕特性的模拟试验系统设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2417-2423.  
LIU Yunpeng, LI Yuehan, LIU Haifeng, et al. Design of simulation test system for corona characteristics of conductor under sandstorm condition [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2417-2423.

#### 作者简介:



党卫军

党卫军(1971),男,学士,高级工程师,从事配电运行管理、配电自动化管理等相关工作(E-mail:603156025@qq.com);

孙奇珍(1984),女,硕士,工程师,从事配电技术、供电可靠性、电能质量管理等相关工作;

薛艺为(1990),男,硕士,工程师,从事输变电设备和电力电缆外绝缘相关工作。

## Influence of construction defects on electric field distribution of superconducting cable intermediate joints

DANG Weijun<sup>1</sup>, SUN Qizhen<sup>1</sup>, XUE Yiwei<sup>1</sup>, DING Can<sup>2</sup>, ZENG Wenfan<sup>1</sup>, FANG Chunhua<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;

2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** The connector of the superconducting cable is one of the main factors affecting the life of the cable, in order to study the influence of the defects caused by the intermediate joints in the manufacturing and construction process on high-temperature superconducting cables. Therefore, based on the numerical calculation and analysis of electric field, the finite element method is used to simulate different defects and analyze the influence of three typical construction defects on the electric field distribution in the joint, such as the scratch of insulation layer, the impurity of insulation layer and the welding burr of superconducting tape. The result shows that the maximum electric field intensity decreases with the increase of air gap thickness when there is air gap caused by scratch of the insulating layer. When the insulating layer has the impurities, the electric field distortion around the impurities is the most serious. The tape welding position and the size of burr have great influence on the field intensity of the welded area. The three defect structure parameters have a great influence on the maximum field strength around the defect, and the structural parameter changes will cause a large change in the field strength. The research results can guide the construction process of the superconducting cable intermediate joint.

**Keywords:** superconducting cable; middle joint; typical defects; distribution of electric field; distortion of electric field

(编辑 钱悦)