

基于多物理场耦合的高压电缆接头防爆装置端头部位结构的优化设计

仇 炜¹, 崔江静¹, 黄顺涛¹, 刘 真², 杨 鑫², 钟其达³, 梁 振²

(1.广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519000; 2.长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 3.广东安诺新材料科技有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 针对现有的高压电缆接头防爆装置在端头部位普遍存在的应力集中问题, 利用电场、温度场、流场和位移场耦合的有限元仿真方法, 对高压电缆接头防爆装置的端头部位弯曲弧度进行了优化设计。基于三层迭代算法得到防爆腔体内部不同时刻气体流速、压强分布和腔体内壁承受的应力值。对不同曲率半径的弧形端头内壁承受的压强和应力进行仿真计算, 准确得出内部端头处各连接点的最大应力值, 从而选取承受应力最均衡的优化弧度, 有效加强了高压电缆接头防爆装置的保护作用, 降低了高压电缆接头爆炸对电缆线路造成的二次破坏。

关键词: 高压电缆接头; 防爆装置; 结构优化; 多物理场耦合

Optimum design of the front part structure of explosion-proof device for high-voltage cable joints based on multi-physics coupling

CHOU Wei¹, CUI Jiangjing¹, HUANG Shuntao¹, LIU Zhen², YANG Xin²,
ZHONG Qida³, LIANG Zhen²

(1. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Co., Ltd., Zhuhai 519000, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 3. Guangdong Annuo New Material Technology Co., Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: Aiming at the stress concentration problem existing in the front part of the high-voltage cable joint explosion-proof device, using the finite element simulation method of electric field, temperature field, flow field and displacement field coupling, the design on the bending curvature of the front part of the high-voltage cable joint explosion-proof device is optimized. Based on the three-layer iterative algorithm, the gas flow velocity, pressure distribution and stress value of the inner wall of the cavity are obtained at different times in the explosion-proof cavity. The pressure and stress on the inner wall of the curved front part of different curvature radius are simulated and calculated, and the maximum stress value at each joint point at the front part is calculated accurately to select the optimum arc with the the most balanced stress, strengthening the protection function of the explosion-proof device of the high-voltage cable joint effectively, and reducing the secondary damage caused by the explosion of the high-voltage cable joint to the cable line.

Key words: high-voltage cable connector; explosion-proof device; structural optimization; multi-physics coupling

0 引言

随着电缆线路的不断增加, 电缆中间接头引

发的故障几率增高。据有关资料统计^[1-2], 我国几乎每年都有不同程度的电缆火灾事故的发生, 绝大多数的电缆火灾事故都是由电缆中间接头爆炸引起的。加强对电缆中间接头防爆防火技术研

国家自然科学基金青年基金项目 (51407013); 广东电网有限责任公司科技项目资助 (项目编号: GDKJXM20161905)

究对保证电缆的安全稳定运行具有至关重要的意义。针对此问题,一系列的金属型高压电缆接头防爆装置被开发。这类保护装置能够有效避免接头故障因爆炸和失火造成的二次伤害,避免故障事态扩大化造成的二次损失。

高压电缆接头短路时,放电电弧释放的巨大能量,导致固体材料断裂,以及密封空间内气体迅速膨胀。因而,高压电缆接头配套保护装置最终损害的形式是内部瞬间产生巨大压强对保护装置产生的巨大冲击力^[3]。但目前使用的金属型防爆装置在端头收缩部位大多采用折线型结构。当电缆接头发生爆炸时,巨大的电弧能量冲击防爆装置内壁,对装置内部产生的冲击力将在端头部位产生畸变,造成端头部位承受的冲击应力远大于其他部位,使得端头部位更容易被炸裂。

针对目前高压电缆接头防爆装置端头部位弧度的设计大都凭借生产厂家的经验,缺少理论支撑和计算方法,在实际应用中存在较大的偏差,无法达到最优化效果的问题,本文提出了基于多物理场耦合的有限元计算方法,通过优化电缆接头防爆装置端头部位的弧度设计,尽可能保证防爆装置内壁承受压力的均衡性,进一步提高了高压电缆接头防爆装置的性能。

1 220 kV电缆接头防爆装置建模

参考国内外相关文献^[4-5]以及实际220 kV XLPE绝缘高压交流电缆附件各部位的几何参数,根据国内附件厂家生产附件原型以及材料承受的电场强度,在COMSOL Multiphysics 仿真软件中按照1:1的比例建立了二维轴对称仿真模型。保护装置长度为2 200 mm,宽度为335 mm,如图1所示。

根据前期研究结果,将电弧等效为半径4.4 mm、位于轴线420 mm处的热源球体。选用的电弧能量热损耗密度为 $7 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$,以探究内部空气变化及弯曲处优化规律。

针对目前折线型结构。通过优化折线弧度,以达到防爆装置壳体内部气压分布最优化的目的。高压电缆接头保护装置端部细节如图2所示。

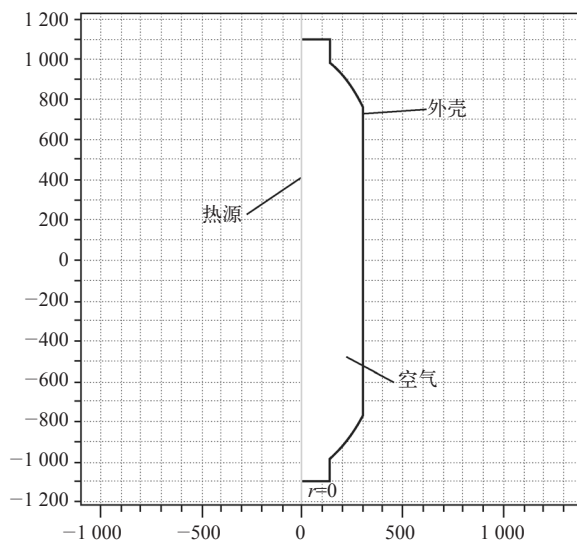


图1 高压电缆接头保护装置仿真示意图

Fig.1 High-voltage cable joint protection device simulation diagram

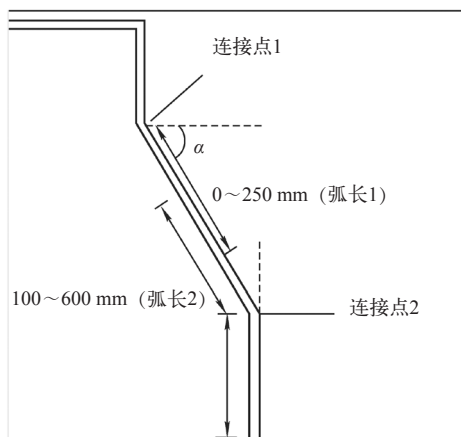


图2 高压电缆接头保护装置端部细节图

Fig.2 High-voltage cable connector protection device front part detail

2 基于多物理场耦合的防爆壳体端头部位弧度优化的仿真计算方法

2.1 多物理场耦合方式

电缆接头短路电弧引起的爆炸,从物理过程上看,是电场、温度场、流体场和应力场相互耦合的结果^[6-7]。电弧高温引起温度升高,气体膨胀,冲击防爆壳体,在壳体上产生一定的应力。

基于以上假设,采用多物理场耦合问题,其实质是多物理场之间的信息传递问题,包括场源

耦合、流耦合和属性耦合等。电缆接头仿真过程中的电磁场、热场、流场和应力场之间的耦合作用关系如图3所示^[8]。

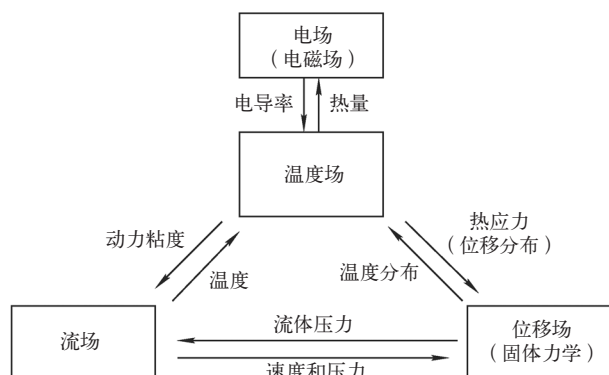


图3 耦合作用形式

Fig.3 Coupling effect form

2.2 热-流-固多物理场耦合方程

(1) 温度场

根据傅里叶传热定律和能量守恒定律，描述温度场的控制方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T = \nabla (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

式中， k 为导热系数； ρ 为材料密度； C_p 为常压热容； Q 为热源。

其中，所采用的边界条件为最外层设置为物体表面与周围环境进行的对流交换系数，有孔设置为开边界^[9]。

(2) 流场（空气域控制方程）

电流体动力学中流体运动受惯性力、粘性力和电场力的支配，这些力影响流体的运动。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \nabla) u = \nabla [(-pL + \mu (\nabla u + (\nabla u)^T)) - \frac{2}{3} \mu (\nabla u)L] + F \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho u) = 0 \quad (3)$$

式中， ρ 为材料密度； u 为流体速度； p 为压强； L 为单位向量； F 为体积力； T 为温度。

其中，所采用的边界条件是设置孔的边界条件为出口，其他边界设置为壁^[10]。

(3) 应力场（外壳）

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot S + F_v \quad (4)$$

式中， ρ 为材料密度； F_v 为体积力。

2.3 边界条件

为了简化电缆接头绝缘击穿电弧过程数值计算的复杂性，对几何结构作出以下几个假设简化计算。

1) 不考虑电缆接头绝缘击穿通道截面尺寸的变化，即将绝缘电弧击穿通道等效为球体进行处理。由于电缆中间接头附件在现场制作安装过程中，需将电缆本体的各层先进行剥切，再进行安装。在金属屏蔽层、外半导体层和内半导体层被切断处，电势的等位面严重弯曲，使得该部位出现严重电场应力集中现象，容易导致电弧击穿事故的发生。而相对整个壳体而言，绝缘电弧击穿通道的体积极小，且由于电弧能量极高，空气瞬间膨胀即刻对保护壳体产生冲击力，电弧形状对仿真结果影响较小，考虑电缆接头绝缘击穿电弧过程仿真的计算量，将绝缘电弧击穿通道等效为球体进行处理。

2) 认为电弧位置始终位于同一位置^[11-12]。电弧产生后迅速达到稳态，保持稳定的热源产生能量。电弧产生后，由于电弧周围温度迅速升高，并将电缆烧穿，直接与空气接触，忽略剩下的电缆材料对整个爆炸过程的作用。

3) 密封装置气密性很好，不存在在气体膨胀过程中泄漏的情况。

4) 忽略电缆接头绝缘击穿通道内电弧对两端铜导体和周围绝缘介质的烧蚀，即不考虑金属蒸气和有机蒸汽掺杂到气体后对气体密度的影响^[13]。

3 防爆壳体端头部位的弧度优化

针对高压电缆接头防爆装置端头部位弯曲弧度进行仿真，主要通过电场、温度场、流场和位移场耦合的有限元仿真方法，基于三层迭代算法^[14]得到防爆腔体内部不同时刻气体的温度、密度、气流速度以及压强分布和腔体内壁承受的应力值；对不同曲率半径的弧形端头内壁承受的压强和应力进行计算，准确得出内部端头处各连接

点的最大应力值，从而选取承受应力最小的弧度。另外，在采用多物理场耦合时，设置有若干假设条件，包括：假设电缆接头一旦出现短路电弧，其能量值将迅速达到稳态，保持稳定的热源产生能量；防爆装置未泄能时气密性很好，不存在气体膨胀过程中出现泄漏的情况。

3.1 气体受热膨胀变化过程

电弧产生时，从 $t=0$ 时刻开始，气体的加热过程持续时间为70 ms（以带弹簧装置的泄能孔为对象）。下面的一系列图显示 $t=10$ ms、 $t=30$ ms及 $t=70$ ms时保护装置内部气体的气流速度以及压强分布，不同时刻内部气体受热的气流速度变化过程如图4所示。

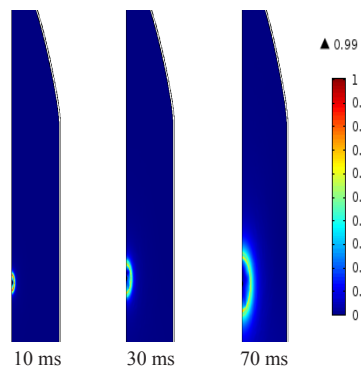


图4 内部气体气流速度变化情况

Fig.4 Internal gas flow velocity change situation

由图4可知，当电弧发生故障时，电弧周围温度迅速升高，空气分子内能增加，导致电弧周围的空气瞬间流动，在10 ms时刻，电弧周围气体速度迅速增大，约为1 m/s。但整个装置为密封环境，温度升高不明显区域的分子密度增加，分子间作用力增强，这将限制热分子向低温区域扩散。当时间为70 ms时，速度明显减小（红色区域颜色变浅代表速度降低）。同理，不同时刻下的气压变化情况如图5所示。

由图5可知，电弧故障在密封空间内发生之后，随着时间的发展，空气中分子之间的间隙增大。同时，由于电弧释放的能量不能释放，导致内部气压迅速上升。在小能量作用下，70 ms保护装置内部绝对气压（指直接作用于容器或物体表面的压力）升高为159 Pa。

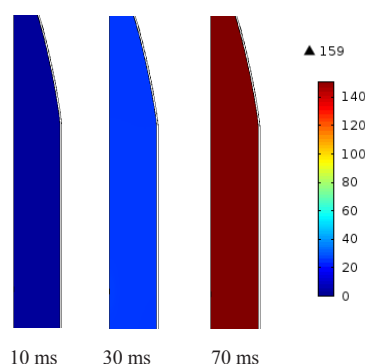


图5 内部气压变化情况

Fig.5 Internal gas pressure change situation

由气体受热膨胀变化过程可知，电弧故障发生之后，电弧释放能量导致故障处周围温度升高。由于防爆装置具有良好的气密性，装置内部气压迅速上升，随之产生巨大冲击力将对装置造成破坏。通过对仿真结果进行分析，发现当保护装置内部气体绝对气压升高时，导致保护装置结构发生不同程度的形变。当装置内壁由于受到外力因素发生变形时，装置各部分之间产生相互作用的内力，试图降低物体的形变程度以抵抗外力作用，这种内力被称作保护装置的应力^[15]。通过对电弧故障发生后不同弧度对应的保护装置应力变化情况进行分析，可以进一步优化高压电缆接头防爆装置端头应力分布。

3.2 防爆装置端头处弯曲弧度的确定

在保护装置密封情况下，装置外壁所受应力随着壁厚的增加而较小。通过仿真可以发现，应力最大处为保护装置弯曲连接处，如图6所示。

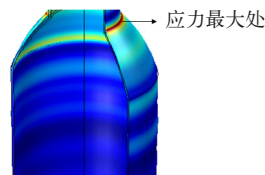


图6 三维保护装置应力分布云图

Fig.6 Three-dimensional protection device stress distribution nephogram

针对应力分布最大位置，仿真前将保护装置弯曲连接处分别设置为折角、曲率弧度为0.1、曲率弧度为0.3、曲率弧度为0.5和曲率弧度为0.7，得到连接点1处至弧长1（位置示意图见图2）的防爆

壳体应力变化图如图7所示。

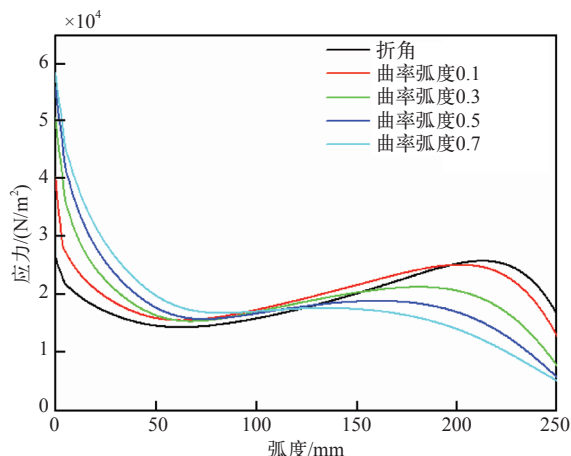


图7 连接点1至弧长1不同曲率下的壳体应力分布图

Fig.7 Stress distribution of the shell at different curvatures from junction 1 to arc length 1

由图7可知,不同曲率对应的弧长1的应力分布有所区别。在弧长为0(即连接点1处)处,随着曲率的增大,应力值不断增加。这是由于连接点1处的两侧线段中间夹角减小,应力变大。因此在连接点1处设置为折角结构时,壳体承受的应力最小。另外,由于连接点1处负责衔接保护装置的端口部位和主体部位,结合实际生产需要,最终确定在连接点1处应采取折线型结构。

图8显示了连接点1至弧长1处的应力与折线和水平线的夹角 α (示意图如图2所示)的变化关系。仿真结果发现连接点1至弧长1的折线与水平线的夹角 α 越大时,应力值越小。当夹角 α 大于 60° 时,连接处的应力下降速度变缓,说明当 α 大

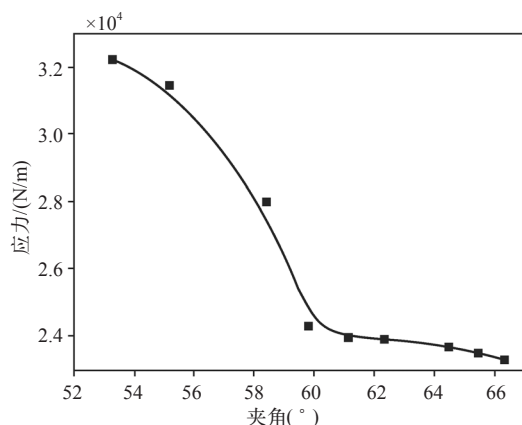


图8 连接点1处不同夹角大小的应力变化曲线图

Fig.8 Stress variation curve at different angles at junction 1

于 60° 时,改善效果变得不太明显。考虑到防爆壳体的体积随着夹角 α 增大而减小,当内部产生相同能量时,体积越小,所承受气压的冲击力越大。故连接点1处折角角度不宜过大。故选取连接点1处夹角 α 为 60° 。

同时,当连接点1至弧长1部分设置为 60° 折角时,在弧长220 mm位置的应力值将超过连接点1的应力值,因而需要对连接点2处的弯曲弧度(位置示意图如图2所示)进行优化。

如图9所示,当连接点2处(位置示意图如图2所示)选择折角设置时,其应力值(7×10^4 N/m)远远大于连接点1(2.5×10^4 N/m);将连接点2处设置为圆角时,连接点2处的应力得到不同程度的改善,这是因为当保护壳弯曲处设置为折角时,在相同电弧能量下,保护壳弯曲处所受应力远远大于周围材料所受应力。在巨大应力差的作用下,极有可能在电弧故障情况下应力保护壳损害甚至炸毁。当保护壳设置为具有一定弧度的圆角时,该连接处的极值应力大大降低。同时,随着圆角曲率半径增大,连接点2及周围的壳体应力值都有不同程度的改善。当曲率半径大于0.25 m时,连接点2及周围的壳体应力均小于连接点1。

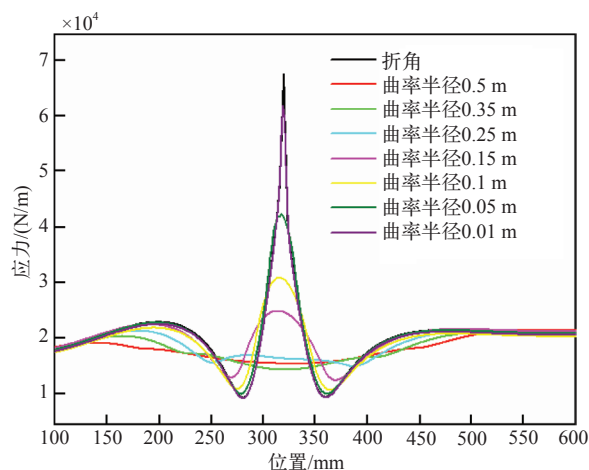


图9 弧长2不同曲率半径下的应力分布图

Fig.9 Stress distribution diagram of arc length 2 with different radius of curvature

连接点2处应力随曲率半径变化情况如图10所示。随着连接点2处曲率半径的增大,该点的应力值不断减小。当曲率半径大于0.3 m时,连接点2的

应力值几乎不发生变化。说明当曲率半径小于0.3 时, 改变曲率半径能够较好地改善连接点2处的应力分布, 当曲率半径大于0.3 时, 改善效果变得不太明显。因而, 选择连接点2处的圆弧曲率半径为0.3 m。

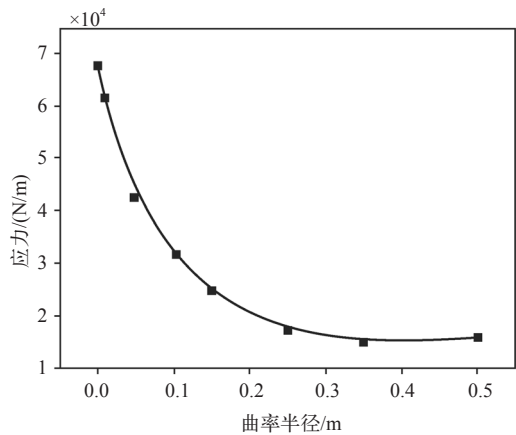


图10 连接点2处不同曲率半径大小下的应力变化曲线图
Fig.10 Stress curve at different curvature radius at junction 2

综上所述, 图中连接点1的弯曲系数(弯曲系数定义为应力最大值/应力最小值)随着折角的增大而减少, 连接点2的弯曲系数随着圆弧曲率的增大而减小。综合考虑保护壳内部体积大小等因素, 保护装置对连接点1折角角度 α 的优化选择 60° , 连接点2的曲率半径的优化选择0.3 m。弧度结构细节图

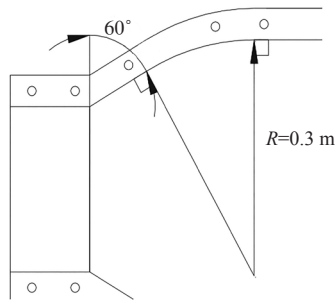


图11 弧度结构细节图
Fig.11 Radial structure detail diagram

4 结束语

针对目前高压电缆接头保护用型防爆装置在端头收缩部位由于折角型设计而导致的应力集中问题, 基于热-流-固多物理场耦合原理, 建立了高压电缆接头防爆装置内部气体膨胀过程的模

型, 对电缆接头保护装置端头部位的几何结构进行了优化设计。所采用的方法为高压电缆接头防爆壳体的结构设计提供了理论指导和方法依据。

基于电弧发展时间内密封空间内气压变化情况, 计算了不同端头结构的高压电缆中间接头保护装置的应力变化规律。得到了保护装置电缆接触部位采用 60° 折角的折线型设计, 防爆壳体收缩部位采用曲率半径为0.3 m的圆弧型设计的优化选择。同时建议装置结构弯曲连接处仍需要进行加固处理。该结果为金属性高压电缆接头防爆装置的设计提供直接的参考数据。

参考文献

[1] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[2] 吴畏, 汪泓, 黄智伟, 等. 110 kV高压电力电缆中间接头电场-温度场的仿真分析[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(8): 15-17, 21.

WU Wei, WANG Feng, HUANG Zhiwei, et al. Simulation analysis of electric field-temperature field of intermediate joint of 110 kV high voltage power cable[J]. Transducer and Microsystems, 2011, 30(8): 15-17, 21.

[3] LIU G, LIU Y, WANG C, et al. The study on evaluation model for prefabricated HV stress cone of cable terminations weakness based on finite element[C]. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE, 2006: 486-489.

[4] 谢强, 王晓游, 傅明利, 等. 高压电缆接头过盈配合及硅橡胶附件力学性能计算[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 498-506.

XIE Qiang, WANG Xiaoyou, FU Mingli, et al. Calculation of interference fit of high-voltage cable joints and mechanical properties of silicone rubber accessories[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(2): 498-506.

[5] 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.

- CHENG Peng. Electromagnetic-thermal-force characteristics and characterization methods of internal defects of cable joints[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [6] 陈庆国, 秦艳军, 尚南强, 等. 温度对高压直流电缆中间接头内电场分布的影响分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2619-2626.
- CHEN Qingguo, QIN Yanjun, SHANG Nanqiang, et al. Analysis of the influence of temperature on the electric field distribution in the intermediate joint of high voltage DC cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2619-2626.
- [7] ZHAO X, YANG X, GAO L, et al. Tuning the potential distribution of AC cable terminals by stress cone of nonlinear conductivity material[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 2686-2693.
- [8] ALSHARIF M, WALLACE P A, HEPBURN D M, et al. Partial discharge resulting from internal degradation in underground MV cables: modelling and analysis[C]. Universities Power Engineering Conference, IEEE Xplore, 2009: 1-5.
- [9] 曹晓珑, 钟力生. 电气绝缘技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [10] 杨帆, 杨旗, 程鹏, 等. 电缆接头内部气隙放电缺陷下的绝缘劣化程度表征方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 24-32.
- YANG Fan, YANG Qi, CHENG Peng, et al. A method for characterizing the degree of insulation degradation under air gap discharge defects in cable joints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 24-32.
- [11] KUNDU P, KISHORE N K, SINHA A K. Simulation and analysis of acoustic wave propagation due to partial discharge activity[C]. 2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 2006: 607-610.
- [12] 伍国方. 高压直流电缆附件内缺陷对电场分布的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- WU Guofang. Study on the influence of defects in high voltage DC cable accessories on electric field distribution[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [13] DU B X, GU L. Effects of interfacial pressure on tracking failure at XLPE cable joint by analyzing discharge light distribution[C]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, IEEE, 2010: 1-4.
- [14] 尚康良, 曹均正, 赵志斌, 等. 320 kV XLPE高压直流电缆接头附件仿真分析和结构优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 2018-2024.
- SHANG Kangliang, CAO Junzheng, ZHAO Zhibin, et al. Simulation analysis and structural optimization design of 320 kV XLPE high voltage DC cable connector accessories[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 2018-2024.
- [15] 严有祥, 朱婷, 王蕾. 基于有限元法对 ± 320 kV直流XLPE电缆中间接头电场与空间电荷的仿真计算[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3591-3598.
- YAN Youxiang, ZHU Ting, WANG Lei. Simulation calculation of electric field and space charge of intermediate joint of ± 320 kV DC XLPE cable based on finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3591-3598.



仇 炜

仇炜(1983-) 硕士, 高级工程师。主要研究方向为电气设备的运行和维护。

(收稿日期: 2018-08-14) **EA**