

口径可调式配电网电缆端头真空防护罩设计

赵小卫¹, 张 荣², 张 阳², 李艺璇¹, 党嘉玮², 马伟杰¹, 怡龙龙¹, 张艺婷¹

(1. 国网甘肃省电力公司临夏供电公司, 甘肃 临夏 731100;

2. 国网甘肃省电力公司物资事业部, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对配电网电缆端头在实际工作环境中常见的问题, 如外界损伤、磨损、老化、腐蚀等, 设计了一款口径可调式电缆端头保护罩。首先, 分析了目前电缆端头腐蚀和老化的原因以及现有保护装置和措施的缺点, 如缺乏通用性、密封不严、强度不够等。然后, 结合三维建模和有限元应力分析完成了电缆端头保护罩的设计。该保护罩采用腔体抽真空的方式, 使得配电网电缆端头始终处于真空环境中, 从而实现与空气完全隔绝, 有效防止端头的腐蚀和老化。保护罩的外壳部分采用轻质的铝合金材料, 具备良好的机械强度, 可以有效防止电缆端头受到磨损和冲击, 同时提高了保护罩的便携性。该保护罩的口径可以调节, 能够适应不同规格的配电网电缆, 具有很好的通用性。最后, 根据相关国家标准对所设计的保护罩完成了应力监测以及防水性和密封性的实验测试。本研究设计的配电网电缆端头口径可调式真空保护罩为电缆端头的保护提供了一定的参考和借鉴。

关键词: 配电网电缆端头; 保护罩; 口径可调节; 有限元; 应力分析

Design of adjustable caliber vacuum protective cover for power distribution network cables

ZHAO Xiaowei¹, ZHANG Rong², ZHANG Yang², LI Yixuan¹, DANG Jiawei², MA Weijie¹, YI Longlong¹, ZHANG Yiting¹

(1. State Grid Gansu Province Electric Power Company Linxia Power Supply Company, Linxia 731100, China;

2. State Grid Gansu Province Electric Power Company Materials Department, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A caliber-adjustable cable end protection cover is designed to address the common problems of cable ends in distribution networks in the actual working environment, such as external damage, abrasion, aging, corrosion, and so on. Firstly, the current causes of cable end corrosion and aging as well as the shortcomings of existing protective devices and measures, such as lack of versatility, poor sealing, and insufficient strength, are analyzed. Based on the former, the design of the cable end protection cover is completed by combining three-dimensional modeling and finite element stress analysis. The protective cover adopts the cavity vacuuming method, which makes the cable ends of the distribution network always in a vacuum environment, thus realizing complete isolation from the air and effectively preventing the corrosion and aging of the ends. The shell part of the protective cover is made of lightweight aluminum alloy with good mechanical strength, which can effectively prevent the cable ends from abrasion and impact, and at the same time improve the portability of the protective cover. The caliber of the protective cover can be adjusted to adapt to different specifications of the distribution network cable, with good versatility. Finally, stress monitoring and experimental tests of waterproofness and sealing were completed on the designed protective cover according to relevant national standards. The adjustable caliber vacuum protective cover for distribution network cable ends designed in this study provides a certain reference and reference for the protection of cable ends.

Key words: distribution network cable terminations; protective cover; adjustable diameter; finite element; stress analysis

0 引言

配电网是电力系统中直接与用户相连并向用户分配电能的环节，是保障电力“配得下、用得上”的关键环节。在配电网中，电能从输电网进入变压器站，变压器将高压电转变成低压电，然后通过电缆、电缆槽等方式输送到用户设备。在各级电网中，配电网电缆起着重要的传输与分配作用。通常用若干根或几组导线绞合而成的配电网电缆，各导线之间均处于绝缘状态，外包绝缘层^[1]。一般情况下，配电网电缆是指35 kV及以下的中低压电缆。

在电缆敷设过程中，切割电缆会导致新的切口形成。如果没有适当的保护措施，电缆在存放、施工和运输过程中所处的复杂环境会造成切口处绝缘层磨损、老化加速以及缆芯严重腐蚀等问题。因此在下次使用该电缆时，只能切除氧化、老化或受损的部分电缆，使用性能良好的部分，这造成了严重的工程浪费，增加了施工成本。综上所述，研究设计一种配电网电缆端头保护装置，对于保证电网安全运行和节约工程成本具有重要的实际意义。

目前，对于配电网电缆端头保护装置的研究还相对较少。然而，可以从其他类似的研究案例中获得一些启发。文献[2]针对中深海岸线敷设海底电力电缆的需求，开发了一种保护管系统，该系统能够满足在海水下敷设电力电缆的要求。文献[3]提出一种保护装置的方案，旨在降低10 kV电缆端头故障率，并提升电缆线路供电质量，该方法既能防止中间接头浸泡于水中，又能预防过热运行。文献[4]针对电缆端头因产生短路电弧而造成爆炸事故的问题，从壳体材料、泄能孔的泄能方式和壳体壁厚等方面进行了设计，提出了一种电缆端头防爆装置。该文献提出的设计方法和关键参数为电缆切口保护装置结构的优化提供了新的思路。文献[5]采用自制的高耐磨及阻燃材料制备了改性聚丙烯电缆保护管，同时提高了电缆保护管耐磨、阻燃性、弯曲模量和刚度。

1 配电网电缆端头的老化与腐蚀

1.1 配电网电缆的内部结构

电力电缆按电缆的绝缘和结构不同，可分为纸绝缘电缆、挤包绝缘电缆和压力绝缘电缆^[6]。目前采用交联聚乙烯（XLPE）作为绝缘材料的电缆在配电网中应用较为广泛，该电缆在电网中占有极其重要的地位。XLPE是由聚乙烯与交联剂按照特定比例混合制成的。交联聚乙烯绝缘电缆有着制造周期短、效率高、安装工艺简单和耐热性强的优点。常用的电力电缆结构包括导体、导体屏蔽层、绝缘层、绝缘屏蔽层、金属屏蔽层、填料、内护套、铠装层和外护套等^[7-11]，其结构如图1所示。

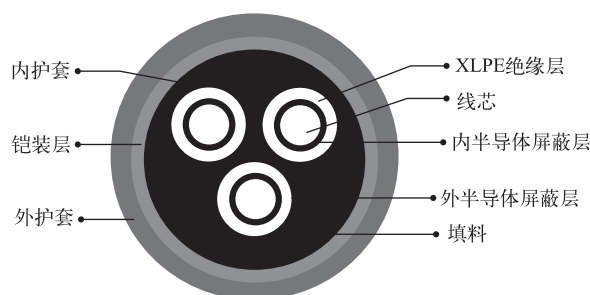


图1 三芯交联聚乙烯电缆结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross-linked polyethylene cable structure

1.2 配电网电缆端头的老化与腐蚀机理

配电网电缆端头属于电缆本体的一部分，其老化机理和电缆本体的老化机理相同。在实际工程中，由于切割后电缆内部结构受到微小破坏并完全暴露在外环境中，导致电缆端头成为绝缘性能最薄弱且最容易发生绝缘老化的区域。早期对电缆绝缘老化的研究多考虑单一因素的特性，但近年来的研究表明，电缆绝缘老化是多种因素共同影响的结果^[12-13]。根据老化方式的不同，电缆绝缘老化可以分为热老化、水树老化、电树老化和其他老化形式^[14]。腐蚀也是导致配电网电缆端头损坏和绝缘失效的重要原因之一。导致配电网电缆端头腐蚀的原因有很多，如化学腐蚀、电化学腐蚀（微电池腐蚀和浓差电池腐蚀）、多因

素腐蚀等^[15-16]。

2 结构与材料的选型

由前文分析配电网电缆端头老化和腐蚀的原因可知,电缆端头老化和腐蚀的主要原因是电缆在完成工程切割后直接暴露在外部复杂环境下所导致的。因此,为了解决这个问题,设计了一种专门针对配电网电缆端头的保护装置。本节将对保护罩各部分结构的设计原理做出详细的说明。

2.1 壳体与腔体的设计与原理

在机械设计过程中,通常要考虑以下两个重要因素:应力分布是否均匀和如何避免应力集中。圆形是一种内外应力分布相等的特殊形状,其应力分布均匀性非常好,因此在一些对应力分布要求比较高的场合,如汽车轮毂、飞机零部件等领域被广泛应用;椭圆形的应力集中系数通常比矩形低,应力分布比较平缓,适合于长筒形零件的连接、转弯、过渡等处的设计。在本研究中,因为还要考虑与其他元件的组装,所以选用圆形和椭圆形过渡设计本装置的壳体形状,因此设计的壳体结构如图2所示。

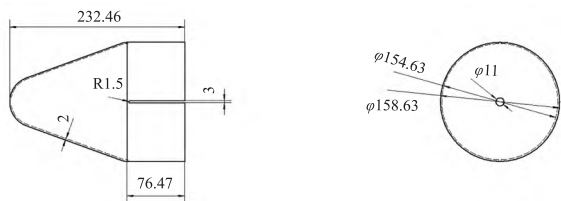


图2 壳体几何设计图

Fig. 2 Casing geometry drawing

另外,由于需要对电缆端头进行密封保护,因此在壳体内部设置一个与其内壁紧密贴合的橡胶腔体。这个腔体的几何结构与壳体前端部分高度吻合,确保密封效果的最优化。

2.2 密封塞的设计与原理

密封塞是确保密封性能和口径可调性能的关键。它采用圆台形状,与腔体相配合。整个密封塞由3个密封垫片组成,按照从小到大的顺序排列。每个密封垫片由两个瓣片组成,中间留有电缆进口,如图3所示。这种设计的优点在于可以

有效地保证密封性能,并且允许根据需要进行口径的调整。

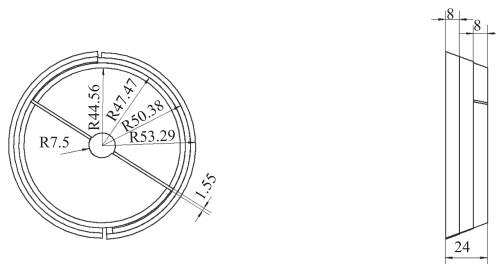


图3 密封塞设计图

Fig. 3 Seal plug design drawing

2.3 真空泵的选择及抽气速度计算

(1) 真空泵的有效抽气速度S计算

真空系统中的气体总量包括真空系统产生、排出和泄漏的气体总量。根据此公式计算出的有效抽气速率S通常应比主泵的额定抽气速率至少高20%~30%。

$$S = \frac{Q}{p_g} \quad (1)$$

式中, p_g 为真空系统要求的工作压力(Pa); Q 为真空系统的总气体量(Pa·L/s)。

(2) 定泵的抽气速度

主泵的抽气速度由有效抽气速度S和泵与真空室之间的流量比U决定。串联公式为

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{U} \quad (2)$$

在选择真空泵时,需要考虑气体的种类。前级泵的配置取决于主泵,分类如下。

1) 罗茨泵为主泵,蒸汽泵为前级泵。主泵应与前级泵的有效抽气速度相对应,即

$$S_q > p_g \frac{S}{p_n} \text{ 或 } \frac{Q_{\max}}{p_n} \quad (3)$$

式中, S_q 为前级泵的抽气速度(L/s); p_n 为主泵前级的临界前级压力(Pa); $Q_{\max}$ 为最大排气量(Pa·L/s); p_g 为主泵最高的工作压力(Pa)。

在选择前级泵时,应考虑到机械泵的抽气速度是在大气压下测量的,所以应根据抽气速度曲线选择泵。

2) 罗茨泵为主泵,油封机械泵为前级泵,

计算式为

$$S_p = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{8} \right) S_L \quad (4)$$

式中, S_p 为前级泵的抽气速度 (L/s); S_L 为罗茨泵的抽气速度 (L/s)。

3) 罗茨泵为主泵, 水环泵为前级泵。罗茨泵-水环泵系统中, 水环泵抽气的速度由经验公式确定。

$$S_s = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5} \right) S_L \quad (5)$$

式中, S_s 为前级泵抽气的速度 (L/s)。

2.4 各结构的材料选型

在材料选型方面, 主要关注对外部壳体、内部腔体、密封塞和锁紧螺母等部件的选材。其中, 外部壳体和保持架均采用铝合金材料。铝合金具有重量轻、强度高和易于加工成型等优点, 同时铝合金可以完全回收和利用。因此铝合金在航空、交通运输、机电等场景中的应用十分广泛。相比于其他金属材料, 铝合金的优势非常明显。

对于内部腔体和密封塞, 选择采用硅橡胶材料。硅橡胶是一种由硅原子和氧原子构成的高分子化合物, 具有良好的弹性和柔软性。还具有较低的化学反应性、结构稳定性、极好的密封性能、耐高低温和耐候性等优点。因此, 制作内部腔体和密封塞时, 硅橡胶材料的抗氧化性、密封性和经济性都相当出色。

ABS塑料是一种常见的材料, 其原料易得, 物理性能好, 成本相对于其他硬质塑料较低, 且ABS塑料所含的三种单体物质的相对含量可任意变化, 从而制成各种树脂^[17]。ABS聚合三种材料的性能: A使其拥有较好的耐化学性、耐热性和硬度; B使其拥有好的柔性和韧性; S使其拥有好的热塑性、加工和成型性能, 因此广泛用于汽车工业、电气和电子设备、办公和通信设备中。选择采用ABS塑料作为紧锁螺母的材料。

3 配电网电缆端头保护罩仿真分析

根据以上配电网电缆端头保护罩的原理分

析、材料选择以及图样规格设计, 本节讨论材料失效判据, 并利用有限元仿真软件对保护罩进行1:1比例模型的搭建以及结构优化分析。其中, 各装配体建模如图4所示。

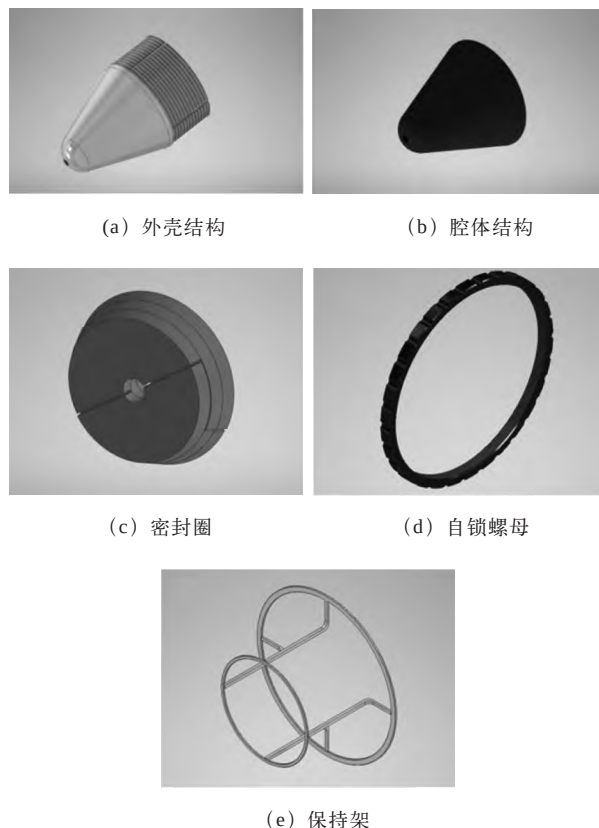


图4 各装配体结构

Fig. 4 Structure of each assembly

对各部件进行总体装配, 装配效果如图5所示。



图5 总体装配效果图

Fig. 5 General assembly effect diagram

3.1 冯·米塞斯应力推导以及材料失效的判定依据

第四强度理论 (即冯·米塞斯应力) 认为, 无论何等应力状态, 只要畸变能密度达到与材料性能有关的某一极限值, 材料就会发生屈服^[18-20]。因此, 本文使用冯·米塞斯应力 (Von Mises Stress) 作为失效判定指标。

塑性材料单向拉伸或压缩时, 线性变形阶段, 应变能密度计算公式为

$$V_{\sigma} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (6)$$

在三向应力状态下, 应变能密度计算公式为

$$V_{\varepsilon} = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (7)$$

体应变能密度计算公式为

$$V_v = \frac{1}{2} \sigma_m \varepsilon_m + \frac{1}{2} \sigma_m \varepsilon_m + \frac{1}{2} \sigma_m \varepsilon_m = \frac{3}{2} \sigma_m \varepsilon_m \quad (8)$$

根据式(7)和式(8), 用总应变能减去因体积变化而储存的应变能, 得到畸变能密度计算公式为

$$V_d = \frac{1+\mu}{3E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1) \\ = \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (9)$$

屈服状态下, 畸变能密度为

$$V_d = \frac{1+\mu}{6E} (2\sigma_s^2) \quad (10)$$

由上述两式相等可推出理论上的屈服准则为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq \sigma_s \quad (11)$$

式中, σ 为Mises等效应力; σ_s 为屈服应力; σ_1 为第一主应力; σ_2 为第二主应力; σ_3 为第三主应力。

为结构保留足够的安全裕量, 比如安全系数1.2, 等效Mises应力应小于最大许用应力, 为 $\sigma_s/1.2$ 。若最大等效Mises应力已经达到最大许用应力, 那么就可认为结构失效, 而不是达到屈服应力才失效。

3.2 网格划分

参照Inventor应力分析工程师指导手册, 在应力分析前需要为模型进行应力分析配置, 一般来说, 网格平均元素大小在0.05~0.1之间, 最大元素在0.1~0.2之间; 分级系数是影响细致和粗略网格之间网格过渡一致性的主要参数, 取值在1.5~3.0之间; 最大转角是影响弯曲曲面上的元素数目, 角度越小, 曲线上的网格元素越多,

取值在30°~60°之间, 创建弯曲网格元素, 使网格的划分更加准确。其次, 在有些比较狭小或者复杂的面上, 上述网格的设置无法提供非常精确的分析结果, 所以还需要继续手动调整局部的网格划分。收敛项配置包括 h 优化最大数、停止条件和 h 优化阈值。

在Inventor中模型的总体网格的划分结果如图6所示。其中平均元素大小为0.1, 最小元素大小为0.2, 分级系数为1.5, 最大转角为60°, 节点有49 098个, 元素有25 988个, 局部网格大小为0.05 mm, 优化最大数为1, 优化停止条件为2%, 优化阈值为0.75。网格划分结果如图6所示。



图6 网格划分结果

Fig. 6 Grid division results

3.3 结果分析

在Inventor软件的应力分析环境中, 已自动算出等效Mises应力的数值, 对于铝合金来说, 只需分析等效Mises应力是否大于材料的最大许用应力即可判定材料是否发生了失效, 本装置在以下所有分析计算中, 安全系数全部取1.2。

通过查阅相关资料和大量的有限元分析, 对装置的前端结构和尾部保持架滑槽进行了结构设计, 如图7所示。前端设计为曲面和椭圆形连接, 在消除应力集中现象方面呈现出了良好的效果。同时, 尾部保持架滑槽中和前端气嘴安装孔中都增加了圆角, 以实现应力的分散, 有效消除应力集中现象。如图8所示, 此时最大等效Mises应力为13.49 MPa, 发生在保持架滑槽最底端, 远低于铝合金的最大许用应力。最大位移为0.912 mm, 发生在外壳的最后端, 不会影响到腔体的密封性。

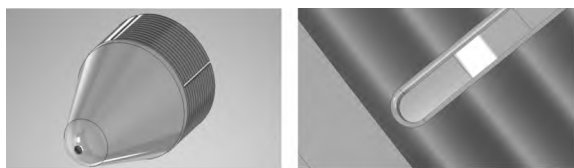


图7 保护罩结构

Fig. 7 The structure of the protective cover

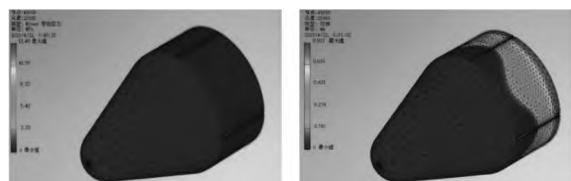


图8 保护罩应力分布和位移情况

Fig. 8 The stress distribution and displacement situation of protective cover

通过上述分析结果表明,所有参数都满足设计要求中的数值,达到了模型结构设计的目的。

4 配电网电缆端头保护罩性能测试

根据GB/T 33213—2016、GB/T 4208—2017和ASTM F238-09等相关国家检测标准,对保护罩的结构应力和防水、真空密封性能进行了测试。

4.1 保护罩应力测试

根据GB/T 33213—2016^[21],利用光纤布拉格光栅传感器实现对保护罩结构的应力状态分布测试。在测试中,确定传感器测点的数量、类型和位点尤为关键。通过初步进行的保护罩结构应力仿真分析完成对壳体的结构设计时,发现保护罩后部滑槽是整个保护罩最容易发生应力集中的部位,因此需在薄弱部位结合科学的布设方式安装一定数量的光纤传感器,完成对保护罩的应力测试。滑槽部位在一般情况下视为二向应力,如图9所示,可采用3个应变片按90°夹角方向排列的形式完整地描述滑槽横截面的应变情况。

在保护罩的实际应用测试中,结合A、B、C三者测量结果,计算得出的滑槽横截面应力最大值变化曲线如图10所示,最大应力值为11.3 MPa。实验验证表明,保护罩壳体结构设计

合理,具有一定的机械稳定性能,测试过程未发生应力集中现象导致滑槽变形等应力问题。

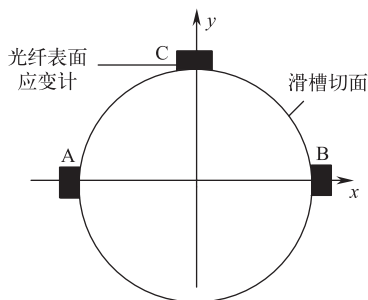


图9 滑槽传感器布设图

Fig. 9 The sensor layout of chute

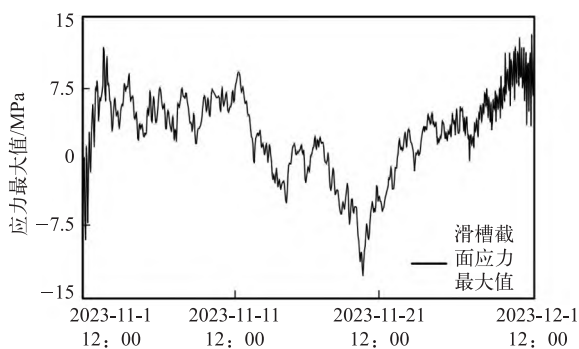


图10 滑槽截面实测应力最大值变化曲线

Fig. 10 Variation curve of the maximum measured stress of the chute cross-section

4.2 保护罩防水性能测试

如图11所示,保护罩的进水路径主要有前端抽气口、密封圈层间和密封圈与电缆端口接触面三种。潮气侵入本质是由于密封性所导致的问题,这里讨论的防水性主要考虑保护罩的雨淋和处于水环境中的防护性能。

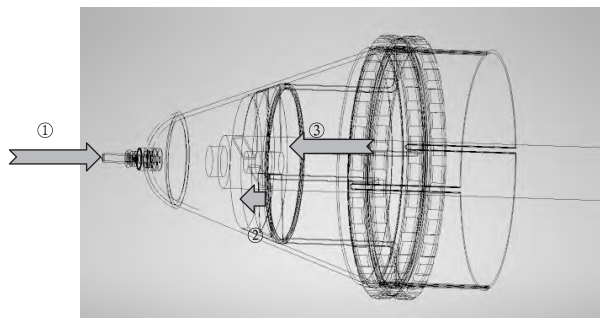


图11 保护罩进水路径

Fig. 11 Water ingress path of the protective cover

将密封圈的三层橡胶内侧和腔体涂上示水剂,根据GB/T 4208—2017^[22]使用潜水箱将保护罩浸入水面内1 m,浸入时间30 min;使用直径6.3 mm的喷嘴,距离保护罩2.5~3 m,水流量为 (3.5 ± 0.625) L/min,持续时间10 min。取出保护罩后,通过计算密封圈三层橡胶和腔体的湿壁面积的占比验证保护罩防水性能。图12a、图12b分别是潜水箱和淋水后的密封圈各层和腔体的湿壁面积占比情况。

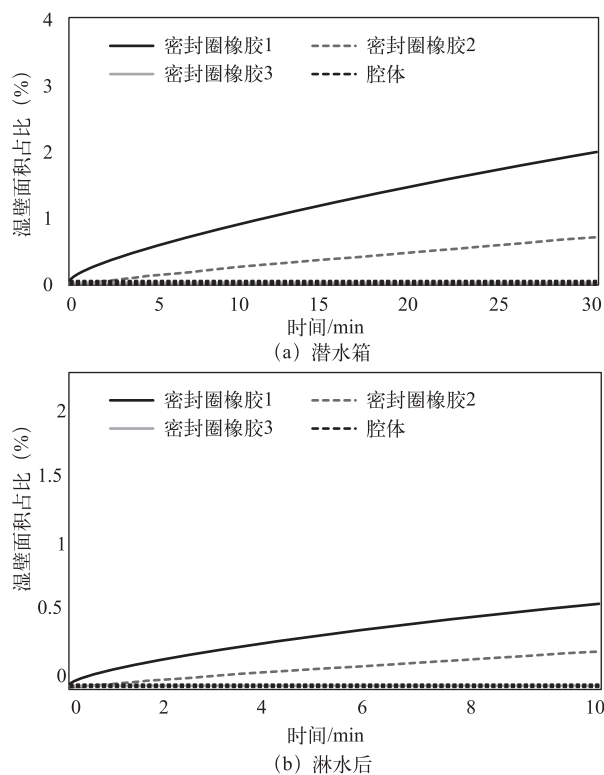


图12 潜水箱和淋水密封圈、腔体湿壁面积占比

Fig. 12 Submersible tank and drench seals, chamber wet wall area percentage

检测后由实验结果可知,保护罩虽然在潜水和淋水条件下,密封圈的最外层湿水面积较大,但第三层橡胶和保护罩最里面的腔体均未受水,因此所设计保护罩具有优良的防水性能,可以在雨天等复杂涉水环境中保持其对电缆端口稳定的保护性能。

4.3 保护罩密封性测试

参考ASTM F238-09标准^[23],采用真空衰减法对保护罩的密封性进行测试,首先给定测试参

数,将保护罩放入测试腔体,对测试腔体抽真空,保护罩内外压差使得保护罩内气体通过气隙进入测试腔体。然后利用仪器内的绝压传感器和差压传感器监测绝压和差压的变化,最终通过压差值判定保护罩的气密性是否良好。测试参数:测试压力40 mbar,抽真空时间20 s,测试时间15 s,平衡时间10 s;测试腔体:测试样品前选择并安装适合于保护罩大小的测试腔体。调整测试腔体使其保持良好的密封性。实验选择有机玻璃质的测试腔体,可避免因环境温度等因素产生不利影响。下表是四组测试压差的均值与方差。

表 保护罩检测结果统计表

Tab. Protective cover test results statistics

	A	B	C	D
压差均值 /Pa	37.9	35.4	38.2	34.6
方差	2.8	1.0	3.0	2.2

由上表的测试结果可知,保护罩压差均值均在合理范围内且离散程度较小。因此可得出保护罩的密封性良好。

5 结束语

根据本文的分析结果,口径可调式真空保护罩被证明能够有效保护电缆端头,减少电缆的浪费。在一定的操作范围内,该保护罩可以根据电缆直径进行调整,确保与配电网电缆紧密贴合,最大程度地防止空气进入,从而减缓电缆切口的老化和腐蚀,提升电缆的使用寿命。通过分析,可得出以下结论。

1) 该保护罩设计创新,不仅发挥了传统保护罩的功能,还采用了可调式结构,大大提高了保护罩的灵活性和适用性。该保护罩适用于各种规格的配电网电缆,并且安装和拆卸都十分方便。

2) 本文采用高效的真空泵进行排气,使用耐高温和抗腐蚀的材料制作保护罩,进一步保证了其使用寿命和效用。

3) 电缆端头口径可调式真空保护罩具有优良的机械、防水和密封性能,可有效地实现对工况环境中电缆端头的保护。在未来的研究和开发中,可以进一步研究和探索保护罩的适用范围和

准确度, 以及如何进一步提高保护罩的使用寿命和效果。

参考文献

- [1] 陈晓亮, 赵呈呈. 配电电缆常见故障分析及维护方法[J]. 通讯世界, 2015(22): 118-119.
- [2] Hsien Hua Lee. Analysis on a cast-iron pipe applied to protection of underwater cable[C]. proceedings of 2016 international symposium on Materials Science and Engineering (MSCIENG2016). Ed. Shanghai Laixi Conference Service Co. 2016: 59-64.
- [3] 周永强. 10 kV电缆中间头保护装置的研制思路及试验分析[J]. 产业创新研究, 2018(11): 127-128.
- [4] 孙浩天. 220 kV高压电缆接头防爆保护装置的端头结构设计和测试[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2023.
- [5] 吴惠民. 高耐磨阻燃改性聚丙烯电缆保护管的制备及性能研究[J]. 橡塑技术与装备, 2021, 47(12): 12-17.
- [6] 张金平. 配电网电缆防盗技术及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [7] 王金锋, 郑晓泉, 孔志达, 等. 防水型交联聚乙烯绝缘电力电缆结构分析[J]. 电线电缆, 2009(6): 4-8, 44.
- [8] 李磊. 110 kV高压铝护套电缆结构设计优化[J]. 电线电缆, 2023(2): 59-62.
- [9] 柴治国, 崔政伟, 谢皓. 自动化集装箱码头电缆电磁场对IGV磁钉的干扰控制[J]. 水运工程, 2022, 60(10): 199-203.
- [10] 刘岳楠. 电力电缆局部放电特性研究及模式识别[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [11] 傅晨钊, 郝谦, 梁永春. 复杂直埋电缆群缆芯温升快速算法研究[J]. 高压电器, 2021, 57(5): 130-136.
- [12] 刘云鹏, 刘贺晨, 李演达. 直流叠加交流电压下交联聚乙烯中电树枝特性研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 601-608.
- [13] 许刚, 谈元鹏, 黄琳. 基于低秩矩阵填充的XLPE电力电缆寿命评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 268-277.
- [14] 张成, 李洪飞, 杨延滨, 等. 交联聚乙烯电缆老化、诊断及修复研究进展[J]. 绝缘材料, 2020, 53(7): 1-11.
- [15] 戴辉. 配网电缆常见各类故障与预防策略分析[J]. 无线互联科技, 2012(7): 112-114.
- [16] 姜华. 电力电缆中铜铝材料耐腐蚀性能探讨[J]. 建筑电气, 2011, 30(10): 72-76.
- [17] 张宝忠. ABS树脂生产技术与市场现状[J]. 广东化工, 2023, 50(7): 122-124.
- [18] GEORGIOS T A, DIMITRIS P L. Experimental evaluation of a low-voltage power distribution cable model based on a finite-element approach[J]. Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1455-1460.
- [19] LRA B, MSS B, SAA, et al. Dynamic mechanical analysis, electrical properties and water sorption behaviour, of phenol formaldehyde nanocomposite reinforced with multiwalled carbon nanotubes[J]. Materials Today, 2022, 51: 2395-2402.
- [20] KWON D J, KWON I J, Milam-Guerrero J A, et al. Aramid nanofiber-reinforced multilayer electromagnetic-interference (EMI) shielding composites with high interfacial durability[J]. Materials & Design, 2022, 215: 110452-110462.
- [21] 全国无损检测标准化技术委员会. 基于光纤传感技术的应力监测方法[S]. 2017-04-01.
- [22] 全国电气安全标准化技术委员会. 外壳防护等级(IP代码)[S]. 2017-07-31.
- [23] ASTM. Standard test method for nondestructive detection of leaks in packages by vacuum decay method(F2338-09) [S]. 2013.

作者简介

赵小卫(1993—), 男, 助理工程师, 国家注册二级建造师, 研究方向为现代物资供应链体系建设, 电网物资性能检测。

(收稿日期: 2023-11-07)