

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.008

轻质高绝缘复合芯体制备及其在66 kV复合横担中的应用

张重远¹, 苏 铮¹, 李 乐¹, 高峰晟¹, 李浩义¹, 尹晓萱¹, 刘贺晨¹,
刘云鹏¹, 周松松², 唐 力³

(1. 华北电力大学河北省绿色高效电工新材料与设备重点实验室, 河北 保定 071003; 2. 中国电力科技研究院有限公司, 北京 100192; 3. 中国南方电网电力科学研究院, 广州 510000)

摘要: 随着“双碳”战略的逐步落实, 新型复合材料横担正逐步代替铁制横担, 在电力线路中的应用日益广泛。文中制备得到密度为1.1 g/cm³的66 kV轻质高绝缘复合绝缘横担, 并对其进行吸水率、染料渗透、水扩散泄漏电流、击穿强度、热诱导、机械及电气试验。试验结果表明: 填充芯体材料样品的质量吸水率为0.141%, 水扩散泄漏电流小于103.3 μ A, 交流击穿强度大于71 kV/cm, 各项性能指标均达到DL/T 1580—2016棒形复合绝缘子用芯棒技术规范对于理化性能、电气性能及机械性能的标准要求, 样品及横担整体无明显缺陷, 横担耐老化性较好。同时, 轻质高绝缘复合绝缘横担微观界面结合良好, 绝缘性能优于传统实心横担, 满足新型电力系统清洁低碳、安全可靠的应用需求。

关键词: 轻质高绝缘材料; 复合绝缘横担; 绝缘芯体; 电气性能

Preparation of Light-weight and High Insulation Composite Core and Its Application in 66 kV Composite Cross-arm

ZHANG Zhongyuan¹, SU Zheng¹, LI Le¹, GAO Fengsheng¹, LI Haoyi¹, YIN Xiaoxuan¹,
LIU Hechen¹, LIU Yunpeng¹, ZHOU Songsong², TANG Li³

(1. Hebei Key Laboratory of Green and Efficient New Electrical Materials and Equipment, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510000, China)

Abstract: With the gradual implementation of the ‘dual Carbon’ strategy, the cross arm with new composite material is gradually replacing the iron cross arm and its application in power lines is becoming more and more extensive. In this paper, a 66 kV lightweight and high-insulating composite insulation cross arm with a density of 1.1 g/cm³ is prepared and subjected to such test as water absorption, dye penetration, water diffusion leakage current, breakdown strength, thermal induction, mechanical and electrical performance. The test results show that the mass water absorption rate of the sample filled with core material is 0.141%, the water diffusion leakage current is less than 103.3 μ A and the AC breakdown strength is higher than 71 kV/cm. All the performance indexes can reach the requirements of DL/T 1580—2016 technical specification for core bars for bar composite insulators in terms of physical and chemical properties, electrical properties and mechanical properties. Both the sample and the cross arm as a whole have no obvious defects and the cross arm has good aging resistance. At the same time, the lightweight and high-insulation composite insulation cross arm has good microscopic interface bonding performance, and the insulation performance is superior to that of the traditional solid cross arm, which meets the application needs of the new power system for clean, low-Carbon, safe and reliable applications.

Key words: light-weight and high insulating material; composite insulated cross-arm; insulated core; electrical performance

收稿日期: 2023-12-10; 修回日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52207023)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52207023).

0 引言

随着全球气候环境的逐渐恶化和国际能源结构的深刻变革,中国提出了落实“双碳”战略这一基本应对策略^[1-7]。因此,大力发展新型电工材料,围绕电工行业建立低碳环保节能的新目标是实现“双碳政策”的必然途径。然而,目前中国输配电线路大多沿用传统绝缘配置,即铁制横担加绝缘子串悬挂导线的方式运行,这种传统电工材料带来了一系列环境问题,如土地资源使用率高,有色金属大量使用等^[8];同时,铁制横担易被腐蚀、质量大、易开裂,安装维护成本高^[9],也不符合电网安全运行、经济性的目标。因此研究新型电工材料,降低输电线路横担生产、安装、运行、维护的生产成本和环境成本对推动“双碳”战略在电力系统中的实施具有极其重要的意义^[10-11]。

复合材料绝缘横担具有优异的电气及机械性能,是传统铁制横担的有效替代。复合材料即为两种或两种以上材料复合形成的新型材料,可以在保留二者优势的同时获得组成材料所不具备的性能^[12-14]。纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)主要由树脂基底和纤维组成,具有化学稳定性好、电气性能优良以及耐腐蚀等特点^[15],由FRP制备的复合横担具有耐腐蚀、抗老化、降低线路维护成本、降低运输和组装成本、提高配电线路的绝缘水平等优点^[16]。国内外相关单位和学者针对复合绝缘横担开展了大量研究工作,目前复合绝缘横担主要有实心型、填充型以及空心型3类^[17]。现有的实心横担自重较大,会造成挠度过大及增大线路施工难度等问题^[18];填充型复合横担内填充材料耐水分渗透、耐高低温、绝缘性能以及抗老化性能较差^[19];空心横担长期运行中可能存在填充气体泄露风险,导致横担绝缘水平下降甚至造成内绝缘闪络击穿,威胁着复合绝缘横担的长期可靠运行^[20]。

为解决现有复合绝缘横担材料及结构问题,文中提出利用聚合物微球填充树脂基复合泡沫材料制备复合横担绝缘芯体,并在此基础上试制了66 kV轻质高绝缘复合绝缘横担样机。针对复合横担材料,开展了吸水率、染料渗透、水扩散泄漏电流、热诱导、微观形貌等试验,并针对复合绝缘横担样机开展了机械、电气性能试验。试验结果符合DL/T 2240—2021、DL/T 1580—2016以及Q/GDW 11875—2018标准要求,验证了轻质高绝缘复合绝缘横担具有优异的综合机电性能,为轻质高绝缘横担的推广应用提供了关键试验依据。

1 材料和性能测试

1.1 材料

所选连续玻璃纤维(浙江嘉兴巨石有限公司)为96000特克斯;填充用轻质高绝缘材料由环氧树脂、固化剂、聚合物微球、促进剂按100:80:4:1的比例组成,其中环氧树脂组分(南通凤凰树脂厂)为双酚A二缩水甘油醚(DGEBA),固化剂(浙江波力姆有限公司)为甲基六氢邻苯二甲酸酐(MHHPA),促进剂(纯度:95%,上海麦克林有限公司)为2,4,6-三(二甲基氨基甲基)苯酚(DMP-30),并且聚合物微球(日本松本S-90)是一种外壳为热塑性丙烯酸树脂类聚合物,内核为烷烃类气体组成的空心球状微粒。伞裙及护套原材料为固态硅橡胶(浙江华宝有限公司)。

1.2 轻质高绝缘复合芯体制备

将连续玻璃纤维浸胶固化拉挤成玻璃纤维空心管。后将环氧树脂、固化剂、聚合物微球、促进剂按比例导入容器,均匀搅拌;把玻璃纤维空心管上下加装金具,用液压机将混合物注入管中,密封后将整体送入烘箱中进行固化。搅拌、浇注过程容器应维持加热状态并保证恒温。最后取出样品卸下金具,将复合横担芯体两端切除多余废料,保留1 400 mm的要求长度。

1.3 66 kV 复合绝缘横担制备

轻质高绝缘复合绝缘横担的硅橡胶注射成型工艺和金属压接工艺为把芯体的表面用偶联剂乙醇溶液均匀的覆盖后置于烘箱中。将芯体放置在注射机中并封闭模具,将融化状态的硅橡胶注入模具中,同时温度升高至110℃并保持120 min以实现硅橡胶的硫化。取出模具后,对模具接缝的边缘和配件的涂层部分进行修剪和固定,两端加装金具,制作出测试所需的复合横担。试验样品横担长1 400 mm,芯体横截面直径为80 mm,硅橡胶厚度为5 mm。

实心横担选取襄阳国网合成绝缘子有限公司FS-110/10型复合绝缘横担,横担长1 400 mm,芯体横截面直径为80 mm,硅橡胶厚度为5 mm。

1.4 性能测试试验方法

1.4.1 密度测试

密度测定方面采用标准水置换法进行,计算出二者的实际密度为

$$\rho_s = \frac{\rho_f \times m_s}{m_f} \quad (1)$$

式(1)中: ρ_s 为样品实际密度; ρ_f 为水的标准密度; m_s 为样品质量; m_f 为流出水的质量。由于金属法兰重量过大会提升整体误差水平,故采用去除金属

法兰的横担结构进行试验。

1.4.2 吸水率测试

考虑到外层憎水性硅橡胶护套会减少芯体的吸水量,文中采用无硅橡胶下的极端条件测试吸水性。依据 DL/T 1580—2016,选取不加护套和金具的实心芯体样品和填充芯体样品,以与芯体轴线呈 90°方向锯取长度为 50 mm±1 mm 的样品,放入 50 ℃ 烘箱干燥 24 h 后,在干燥器中冷却至室温,使用分析天平称量样品质量记为 M (精度为 0.001 g)。将样品浸泡在蒸馏水(25 ℃)中,每隔 24 h 称量样品的质量记为 M' ,称量前使用滤纸擦干试样表面水分,试样在水中取出 1 min 内完成测量,代入式(2)、(3)计算各芯体材料样品的 24 h 绝对吸水质量 M^* 、质量吸水率 ω_q :

$$M^* = M' - M \quad (2)$$

$$\omega_q = \frac{M' - M}{M} \times 100\% \quad (3)$$

1.4.3 染料渗透试验

依据 DL/T 1580—2016,从制备的轻质高绝缘复合绝缘横担上以与芯体轴线呈 90°方向锯取长度为 10 mm±0.5 mm 试样共 3 组,横担两侧、中间部位各一组,每组取两份样品,样品切割面使用细纱布打磨直至光滑,打磨过程中需保持两端面平行且清洁;在容器中放置一层直径相同(范围为 1~2 mm)的钢球,试样按纤维垂直向上方向放置于钢球上;将含 1% 红色或紫罗兰色次甲基染料的酒精溶液倒入容器中且保证液面比球顶高(2.5±0.5) mm,该染色液会在毛细作用下穿过芯体逐渐上升,测量并记录得到该染色液穿过样品的时间。

1.4.4 热诱导试验

依据 DL/T 1580—2016,从制备的轻质高绝缘复合绝缘横担上以与芯体轴线呈 90°方向锯取长度为 50 mm±0.5 mm 试样,将试样放入 150 ℃ 烘箱中烘制 4 h,待样品冷却至室温后观察芯体端面有无油状渗出物;将 1% 紫罗兰色次甲基染料的乙醇溶液涂于样品两端表面,观察芯体端面有无裂纹。

1.4.5 水扩散试验

依据 DL/T 1580—2016,水扩散泄漏电流试验参考 DL/T 1580—2016,试样规格厚度为 30 mm±0.5 mm,取填充芯体、填充横担及实心横担样品各 1 组,每组 5 份,在含 0.1% NaCl 的去离子水中煮沸 100 h,在沸腾时间结束后,将试品从玻璃容器中取出,在环境温度下置于装满去离子水的另一玻璃容器中,持续至少 15 min,擦干后置于平板电极施加 12 kV 电压,使用 Rigio-DM3068 电流传感器测量泄漏电流,精度

为 ±0.1 μA。观察试验过程中样品是否出现击穿和表面闪络,测量得到试验期间的泄漏电流值。

1.4.6 机械性能试验

芯体和端部金属附件之间的结合影响复合材料横担承受机械载荷的能力^[21]。通过拉脱载荷试验验证使用填充芯体是否会影响芯体与端部金属附件的匹配,以及是否能满足实际应用的要求。依据 Q/GDW 11875—2018,试验设备为立式拉伸试验机,试验开始后,快速均匀地施加 10 kN 的载荷并保持 90 s,观察芯体是否从端部附件中拔出。

为了确定芯体和复合横担整体在抵抗弯曲载荷方面的差异,进行了弯曲破坏试验。试验设备为弯曲试验机。测试过程见图 1。依据 Q/GDW 11875—2018,将横担安装在弯曲试验机上,弯曲载荷的施加方向垂直于芯体的轴线方向。然后均匀施加载荷,直到芯体失效,并记录端部位移和施加载荷的值。

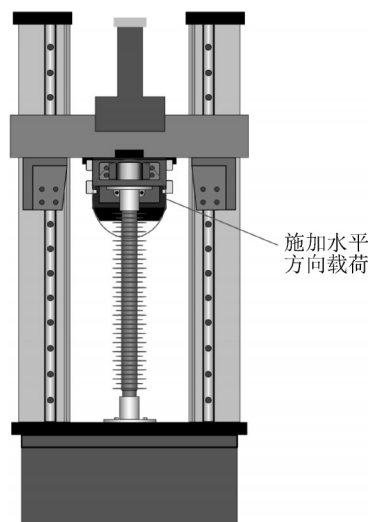


图1 弯曲破坏装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the bending destruction device

1.4.7 电气性能试验

通过击穿电压表征轻质高绝缘复合绝缘横担的芯体绝缘强度,通过正极性的伏秒特性曲线表征轻质高绝缘复合绝缘横担的防雷性能^[22]。

依据 DL/T 1580—2016,工频击穿测试样规格厚度为 10 mm±0.5 mm,试验采用球—球电极,两端电极分别加载到轻质复合泡沫材料部位,为排除沿面闪络现象带来的误差,将试样置于变压器油中,按照 1 kV/s 的升压速率进行升压直到试样被击穿,使用威布尔分布对实验结果进行统计分析。

依据 Q/GDW 11875—2018,为获得轻质高绝缘复合绝缘横担防雷性能,对横担整体进行施加雷电冲击电压的表面闪络试验,获得正极性伏秒特性曲

线。试验装置图见图2。本次雷电冲击试验在华北电力大学保定校区完成,所使用的装置为高压脉冲8级冲击电压发生器,该装置标称电压为800 kV,标称能量为30 kJ,每级冲击电压上限为100 kV。整套装置主要由主控平台、高压分压器、高压充电回路以及触发回路等组成。

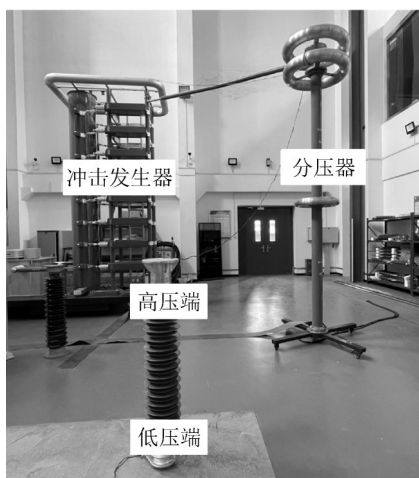


图2 雷电冲击试验装置图

Fig. 2 Lightning impact test device diagram

1.4.8 微观表征

利用 Nova Nano-450 扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察 10 kV 激活电压的真空条件下,材料中微球和树脂、树脂和纤维的结合情况。将固化好的样品经液氮冷却后脆断,测试前在脆断面喷金,观察脆断面的形貌。考虑到样品的高绝缘性能,在观察之前将其放置在用于溅射涂层的铝支架上。

2 结果与讨论

2.1 密度

各材料、横担的密度见图3。制备得到的填充芯体材料样品密度为 1.09 g/cm³,轻质高绝缘复合填充横担密度为 1.1 g/cm³,实心横担密度为 2.2 g/cm³,轻质材料密度为 0.6 g/cm³。

相比于实心横担,文中所制备的轻质高绝缘复合绝缘横担密度减少 44%,这一数值可以说明轻质复合材料填充型横担具有明显的密度优势,满足轻量化要求。

2.2 吸水率

吸水率是衡量绝缘材料性能的重要参数,绝缘材料吸水会导致其介质损耗升高、内部缺陷增多、绝缘性能下降,在高场强下易出现击穿现象进而导致事故发生,因此对填充材料的吸水率有较高的要求。质量吸水率通过式(4)计算^[23]

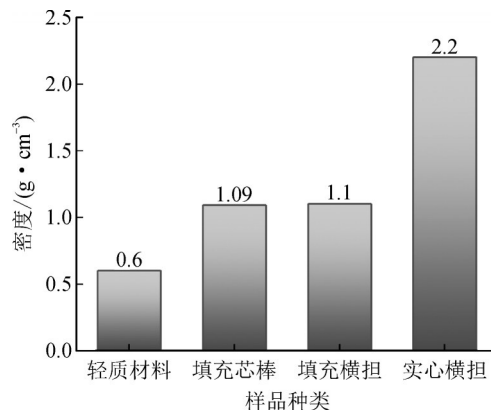


图3 各样品密度对比

Fig. 3 Comparison of the densities of each sample

$$C = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (4)$$

绝缘横担样品的 24 h 吸水质量、质量吸水率见表 1。

表1 绝缘芯体材料样品 24 h 吸水率

Table 1 24 h water absorption of insulating core material sample

参数	轻质芯体材料	实心芯体材料	DL/T 1580—2016 标准	折算密度标准
绝对吸水质量/mg	91.30	83.40	96.97	96.97
质量吸水率/%	0.141	0.043	0.050	0.150

混合了有机微珠的环氧基复合泡沫材料的吸水率取决于材料的内部孔隙和微珠与树脂基体之间的界面缝隙,以及环氧基体自身影响^[24]。从表 1 中可以看出,使用质量吸水率进行表征时,轻质复合材料的质量吸水率远高于实心芯体,但是比较样品的绝对吸水质量,相差并不大。出现这一问题主要是轻质材料密度小导致的。

为此对比 DL/T 1580—2016 标准中实心芯体吸水率 0.05% 的要求,换算得到的绝对吸水质量为 96.97 mg,根据公式可以得到轻质芯体材料的实际要求吸水率为 0.15%,轻质材料的吸水率仍满足要求,综合考虑轻质复合材料芯体仍符合标准规定。

2.3 染料渗透

染料渗透法依靠测试溶液的毛细作用来确定护套与芯体、芯体内的纤维与填充材料间界面是否存在整体缺陷^[25]。对制备的填充芯体样品进行了测试,结果见图 4。

由图 4 可知,试验中的 4 只样品在 15 min 内均未出现染料液贯穿的现象,在样品的任何部分都没有通过毛细管作用将染色溶液吸引到表面上。结果表明样品整个样品的上下部分都没有缺陷,界面结合良好,制备得到的复合横担符合标准。

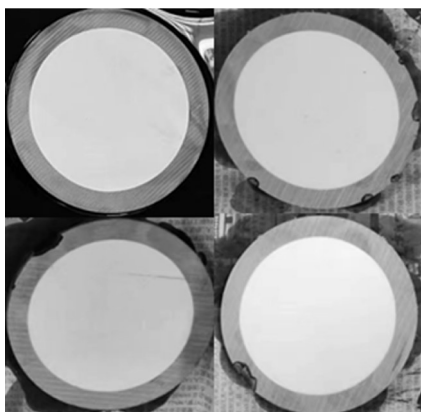


图4 染料渗透试验结果

Fig. 4 Dye penetration test results

2.4 热诱导

热诱导试验是有效反映轻质高绝缘芯体理化性质的重要测试方法,试验结果是横担芯体使用安全性的必要评价标准^[26-27]。热诱导试验前横担样品见图5,热诱导试验结果见图6。



图5 热诱导试验前样品

Fig. 5 Sample before heat induction test

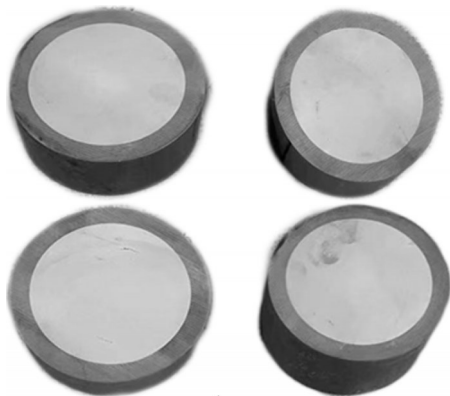


图6 热诱导试验结果

Fig. 6 Thermal induction test results

由图6可知,试验样品在进行热诱导试验后均未出现界面缺陷及端面裂纹,轻质芯体材料满足标准规定。

2.5 泄漏电流

复合材料的水扩散泄漏电流试验,既可以分析材料的绝缘性能,也可以通过水分子的热扩散运动分析样品内部的微观缺陷,是衡量横担性能的重要参数之一,也是横担使用安全性的主要评价指标。文中样品的泄漏电流试验结果见图7。

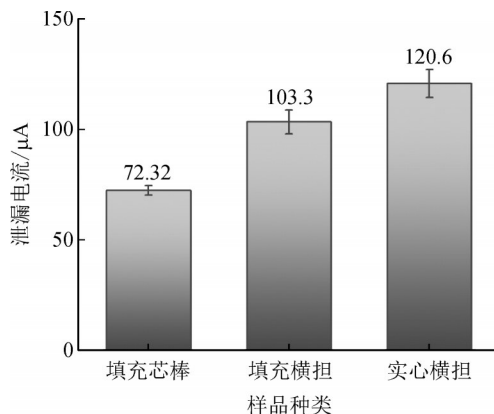


图7 泄漏电流试验结果

Fig. 7 Leakage current test results

由图7可知,文中实验室制备得到的填充芯体、填充横担及购买的实心横担样品泄漏电流分别为72.32、103.3、120.6 μA 。填充横担的泄漏电流小于实心横担,这是因为轻质绝缘填充材料的内部有机微球和树脂基体的结合程度远高于纤维和树脂基体,同时芯体内部的界面结合良好,减少了水分的渗入,减小了泄漏电流。

标准 DL/T 1580—2016 规定芯体材料的泄漏电流应小于364 μA 。可见,轻质高绝缘复合绝缘横担的绝缘性能满足标准规定且明显优于实心芯体材料。

2.6 机械性能

复合材料横担芯体和端部金属附件是承载的关键部件,因此它们之间的结合非常重要。压接过程中,端部金具在外力的作用下轻微变形以保证芯体与配件连接紧密。拉脱试验证明所制备的芯体接头连接是否符合工艺要求,拉脱位移曲线见图8。试验证明轻质高绝缘复合绝缘横担未发生端部金具变形或脱落,芯体与端部金具结合良好。

复合绝缘横担在线路中受到附件恒载外,还受到电线方向的张力和随机的风载,因此,抗弯失效能力对复合横担的安全稳定运行至关重要。两类复合横担弯曲位移和载荷之间的关系曲线见图9,可以看出,轻质高绝缘复合横担有较小的弹性模量,导致更易发生形变;填充芯体材料在承受极限载荷时,界面处的树脂会首先发生粘结破坏,界面损伤至脱离,导致横担整体呈塑性形变,而实心芯棒会在受力中将应力分散至每根纤维,直至达到承

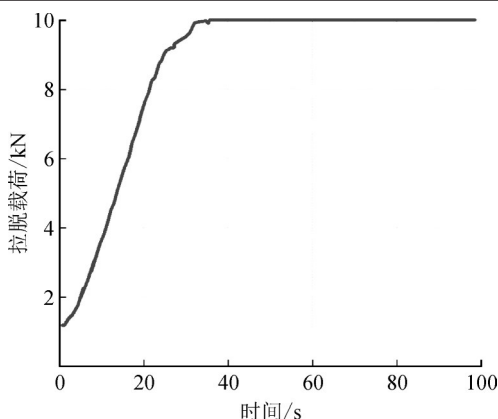


图8 拉脱试验曲线

Fig. 8 Pull-off test curve

载能力上限瞬间失效；轻质高绝缘复合绝缘横担的极限载荷低于实心横担，但考虑到轻质高绝缘复合横担自重远低于实心复合绝缘横担，因此，在相同工况要求下，轻质高绝缘复合横担实际直径设计值略大于实心复合绝缘横担。据此，文中制备的 66 kV 轻质高绝缘复合横担的弯曲破坏载荷达到了 17 kN，远大于标准要求，满足实际工况运行条件。

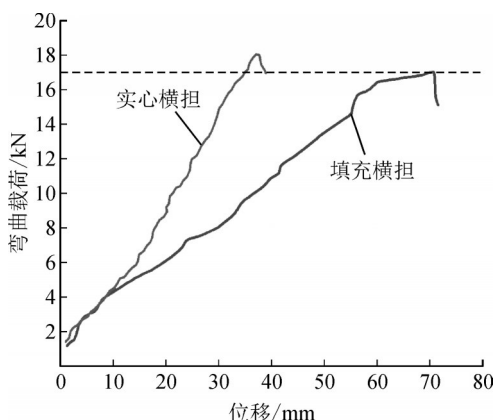


图9 弯曲载荷—位移曲线

Fig. 9 Bending load-displacement curve

2.7 电气性能

横担芯体材料的击穿强度反映自身对电场的耐受能力，是评价横担绝缘性能的重要指标。根据 DL/T 1580—2016，对击穿数据使用两参数 Weibull 分布进行处理^[28]。两参数的 Weibull 分布表达式为

$$F(y) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{y}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (5)$$

式(5)中： y 为变量，代表试样击穿电压、场强或击穿时间； $F(y)$ 为对应于参数 y 的失效概率； α 为尺度参数，表示失效概率为 63.2% 时的击穿电压、场强或击穿时间值，也称为平均值； β 为形状参数，代表试验数据的分散性，其值越大，数据分散性越小， β 也代表着 Weibull 拟和曲线的斜率。引入 Ross 分布函数对失效概率 $F(y)$ 进行估算，其表达式为

$$F(i, m) = \frac{i - 0.44}{m + 0.25} \times 100\% \quad (6)$$

式(6)中： i 为试样序号； m 为每组试样的总数。

实心芯体和填充芯体击穿强度的威布尔概率分布图见图 10。实心芯体的 63.5% 概率下击穿强度为 58.14 kV/cm，填充芯体的 63.5% 概率下击穿强度为 85.76 kV/cm，实心芯体的击穿破坏强度明显小于填充芯体，这是由于聚合物微球与环氧树脂基体结合良好，微球分布均匀，导致内部场强较为均匀；而实心复合材料芯体由于存在大量有机—无机界面，界面处场强集中。同时标准规定击穿场强不低于 30 kV/mm 时，填充芯体可以为横担提供足够的内绝缘强度。

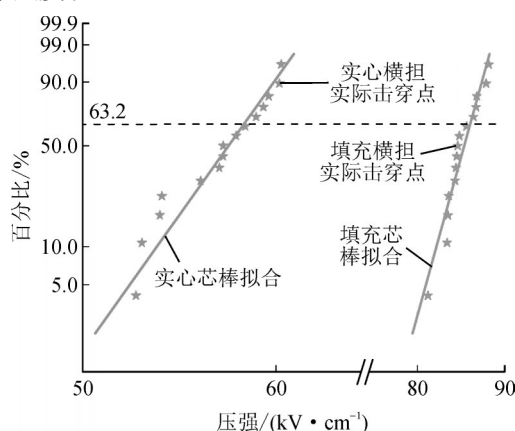


图10 击穿电压威布尔分布

Fig. 10 Breakdown voltage Weibull distribution

对轻质高绝缘复合绝缘横担进行了雷电冲击电压下表面闪络试验，验证了其防雷性能。为了消除温度和湿度对放电的影响，使用参数法将温度校正到标准温度 20 ℃ 和湿度至 11 g/m³ 的绝对湿度。轻质高绝缘复合绝缘横担的正极性 $U_{50\%}$ 数值采用多级法测量，10 次击穿试验后得到标准条件下正极性 $U_{50\%}$ 为 729.36 kV。虽然无法满足负极性击穿电压的设备条件，但由于负极性的击穿电压高于正极性，故均满足 550 kV 以上的防雷要求。轻质高绝缘复合绝缘横担的正极性性伏秒特性曲线见图 11，根据 DL/T 5579—2020 架空输电线路复合横担杆塔设计规程，对比标准雷电电压，在相同的放电时间下，复合绝缘子的击穿电压均远远高于标准要求，电气性能稳定可靠。

2.8 微观形貌

展现了不同尺度下复合泡沫材料和纤维材料的 SEM 图像见图 12，从图 12(a) 可以看出微球暴露在断裂的表面或者嵌入在树脂基体中，且微球在环氧树脂基体中的分散均匀。当图像放大后(图 12(b))，可以看出空心微球和树脂基体之间存在相间区域，

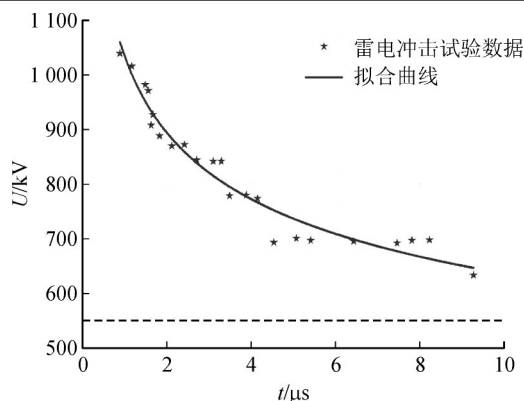


图11 正极性伏秒特性曲线

Fig. 11 Positive polarity volt-second characteristic curve

称为界面层,界面层厚度均匀,厚度在 $0.9\sim 1.2\ \mu\text{m}$ 间。研究表明有机物界面厚度在 $10^3\sim 10^4\ \text{nm}$ 时,界面结合良好且具有较高的力学强度^[29]。由于 μm 级微球具有巨大的比表面积和表面能,同时微球填料的添加具有抑制材料内部击穿通道发展的作用,因此相比于纯环氧树脂—纤维体系有着更加优异的电气性能^[30~31]。可以看出可以看出树脂和微球结合良好并有较厚的界面层。当图像倍数进一步放大,从图12(c)可以清楚的观察到微球和树脂基体之间的夹层,不同区域下的夹层局部凸起但整体厚度基本相当,这表明树脂基体和微球之间有很强的相互作用,结合程度较好。图12(d)显示了芯体截面和侧面树脂基内的纤维情况,可以看出纤维断裂处光滑平整,与基体结合紧密,排列整齐,界面结合良好。纯环氧树脂—纤维体系的断裂面呈现出河流状,是典型的脆性断裂形貌;有机微球的添加可以吸收断裂能量,均匀分散后还能阻止裂纹的扩展,从而起到增韧作用^[32~33]。

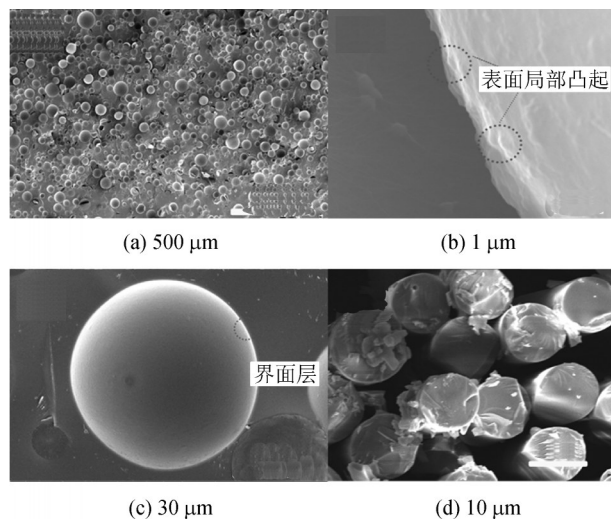


图12 不同尺寸下SEM图

Fig. 12 SEM diagram at different sizes

3 结论

文中以有机微球/环氧树脂作为芯体材料,制备了轻质高绝缘复合绝缘横担,并进行了性能测试,比较了复合填充横担和传统实心横担的差异,相关的结论如下:

1)轻质高绝缘复合绝缘横担的密度仅为 $1.1\ \text{g}/\text{cm}^3$,相比于实心横担减少了44%,满足了轻量化需求,拓宽了应用场景,有着极高的经济价值。

2)轻质高绝缘复合绝缘横担内部芯体的质量吸水率与实心横担相当,电气、理化性能检测均通过试验,表明界面性能优异,有较好的耐热性能和老化性能。

3)轻质高绝缘复合绝缘横担的弯曲模量和破坏挠度方面劣于相同尺寸的实心芯体,但高于国家标准规定,满足横担使用要求。

4)轻质高绝缘复合绝缘横担的击穿场强强于实心横担。通过显微电镜观察,有机微球和树脂基体之间的界面层结合紧密,增强横担韧性,微球分布均匀,减少微观放电通道,提高了横担的耐压水平。

参考文献:

- [1] 刘英军,解彦曦. 电工行业节能技术和发展趋势分析[J]. 电器工业, 2020(10):42-44.
LIU Yingjun, XIE Yanxi. Analysis of energy-saving technology and development trend in the electrical industry[J]. China Electrical Equipment Industry, 2020(10):42-44.
- [2] 彭 静,王 军,亓富军,等.“双碳”目标下配电网多阶段扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 153-161.
PENG Jing, WANG Jun, QI Fujun, et al. Multi-stage expansion planning of a distribution network with double-carbon policy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 153-161.
- [3] 负保记,张恩硕,张 国,等.考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11-19.
YUN Baoji, ZHANG Enshuo, ZHANG Guo, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a ‘dual Carbon’ mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 11-19.
- [4] 瞿晟琨,应飞祥,秦少茜,等.“双碳”背景下海上风电维护策略研究现状与展望[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 23-30.
QU Chengmin, YING Feixiang, QIN Shaoxi, et al. Research status and prospects of offshore wind power maintenance strategy under background of carbon peak and Carbon neutrality[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 23-30.
- [5] 尚 勇,王 喆,严 欢,等.“双碳”背景下陕西新型电力系统研究探索[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 20-27.

- SHANG Yong, WANG Zhe, YAN Huan, et al. Research exploration of Shaanxi new type power system in the background of 'dual Carbon' [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 20-27.
- [6] 郭正雄, 秦耀文, 李欣悦, 等. “双碳”一站式数字化服务平台建设与应用[J]. 供用电, 2023, 40(11): 18-25.
- GUO Zhengxiong, QIN Yaowen, LI Xinyue, et al. Construction and application of the 'dual Carbon' one-stop digital service platform[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(11): 18-25.
- [7] 周小光, 资 慧, 金 田, 等. 双碳目标下电网异址双活调控中心负载均衡控制方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 107-115.
- ZHOU Xiaoguang, ZI Hui, JIN Tian, et al. Load balancing control method for remote active-active control centers of power grid with Carbon peak and neutrality targets[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 107-115.
- [8] 邱雪梅, 黄译丹, 李 雍, 等. 复合材料杆塔研究现状及发展趋势[J]. 电气技术, 2017(9): 1-3.
- QIU Xuemei, HUANG Yidan, LI Yong, et al. Composite tower research status and development trend[J]. Electrical Engineering, 2017(9): 1-3.
- [9] 朱岸明, 杨大渭, 刘云贺, 等. FRP复合材料杆塔横担研究应用现状及分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(10): 76-82.
- ZHU Anming, YANG Dawei, LIU Yunhe, et al. Research and application status and analysis of FRP composite tower crosshead[J]. Grids and clean energy, 2015, 31(10): 76-82.
- [10] 马文阳, 霍 锋, 杜志叶, 等. 基于ATP-EMTP的全复合材料电杆线路防雷技术研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 105-110.
- MA Wenyang, HUO Feng, DU Zhiye, et al. Lightning protection technology of all-composite pole line based on ATP-EMTP[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 105-110.
- [11] 段 辉, 李林蔚, 宋 羽, 等. 宽温域自粘结复合材料的量子化学研究及应用[J]. 大电机技术, 2023(6): 85-89.
- DUAN Hui, LI Linwei, SONG Yu, et al. Quantum chemistry study and application of self-adhesive composites with wide temperature range[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(6): 85-89.
- [12] 孙 涛, 赵雪灵, 高理迎, 等. 特高压直流线路复合材料转动横担设计[J]. 电力建设, 2014, 35(9): 35-38.
- SUN Tao, ZHAO Xueling, GAO Liying, et al. UHVDC transmission line rotation cross arm design for fiber reinforced plastic[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(9): 35-38.
- [13] 徐 欣, 程 冬, 谢佐鹏, 等. 110 kV输电线路不挂绝缘子复合材料绝缘横担的研制与应用[J]. 电力建设, 2014, 35(7): 104-109.
- XU Xin, CHENG Dong, XIE Zuopeng, et al. Development and application of composite cross arm in 110 kV transmission line without insulator[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(7): 104-109.
- [14] 姜 岚, 罗曼平, 黄 力, 等. 复合横担杆塔不平衡张力调节装置及其设计方法研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(5): 100-105.
- JIANG Lan, LUO Manping, HUANG Li, et al. Unbalance tension adjusting device and design method of composite cross arm tower[J]. Smart Power, 2022, 50(5): 100-105.
- [15] 夏开全. 纤维增强树脂基复合材料输电杆塔及其应用进展[C]//’05全国FRP与结构加固学术会议. 西安, 中国: 中国土木工程学会, 2005: 173-177.
- XIA Kaiquan. Fiber reinforced resin matrix composite transmission pole tower and its application progress[C]//’05 Selected Proceedings of the National Conference on FRP and Structural Reinforcement. Xi'an, China: China Civil Engineering Society, 2005: 173-177.
- [16] 刘云鹏, 李 乐, 张铭嘉, 等. 复合绝缘横担界面特性检测研究现状[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 408-424.
- LIU Yunpeng, LI Le, ZHANG Mingjia, et al. Research status of interface detection for composite cross-arm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 408-424.
- [17] 王小丽. 复合绝缘横担在220 kV架空输电线路中的应用[J]. 电气应用, 2013, 32(1): 74-78.
- WANG Xiaoli. Application of composite insulated crossbar in 220 kV overhead transmission line[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(1): 74-78.
- [18] 刘贺晨, 董 鹏, 周松松, 等. 不同分子量聚醚胺共混对环氧复合泡沫绝缘材料热性能及电气性能的影响分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(10): 2589-2601.
- LIU Hechen, DONG Peng, ZHOU Songsong, et al. Analysis of the effect of blending different molecular weight polyetheramines on the thermal and electrical properties of epoxy composite foam insulation materials[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(10): 2589-2601.
- [19] 周松松, 李哲远, 周 军, 等. 10 kV配电线路复合绝缘横担技术研究及应用现状综述[J]. 中国标准化, 2020(s1): 328-334.
- ZHOU Songsong, LI Zheyuan, ZHOU Jun, et al. Review of research and application status of composite insulation cross-load technology for 10 kV distribution lines[J]. Chinese standardization, 2020(s1): 328-334.
- [20] 何灿明. 输电线路复合横担杆塔的应用及推广分析[J]. 通讯世界, 2018(3): 231-233.
- HE Canming. Application and promotion analysis of composite stretcher tower of transmission line[J]. Telecom World, 2018(3): 231-233.

- [21] 王 哲,朱永凯,杨岚琦,等. 电杆复合横担极限承载力及截面参数影响分析[J]. 山西建筑,2022,48(17):12-16.
WANG Zhe, ZHU Yongkai, YANG Lanqi, et al. Influence of section parameters on bearing capacity of FPR composite pole cross arm[J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(17):12-16.
- [22] 吴 雄,闻集群,刘晓宇,等. 不同结构型式的配网复合绝缘横担电气性能研究[J]. 绝缘材料,2021,54(5):40-46.
WU Xiong, WEN Jiqun, LIU Xiaoyu, et al. Electrical performance of composite insulation crossarms with different structures in distribution networks[J]. Insulating Materials, 2021, 54(5):40-46.
- [23] 张思刚. 水分侵入下聚氨酯填充型复合绝缘横担FRP/RPUF界面老化特性及机理研究[D]. 北京:华北电力大学,2022.
ZHANG Sigang. Study on FRP/RPUF interface aging characteristics and mechanism of polyurethane - filled composite insulation cross arm under moisture intrusion[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2022.
- [24] TAGLIAVIA G, PORFIRI M, GUPTA N. Influence of moisture absorption on flexural properties of syntactic foams[J]. Composites Part B Engineering, 2012, 43(2):115-123.
- [25] Insulators for overhead lines-composite suspension and tension insulators for a. c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V-definitions, test methods and acceptance criteria; IEC 61109—2008[S]. 2008.
- [26] PAPAILIOU K O, SCHMUCK F. Silicone composite insulators[M]. Germany:Springer Science & Amp, 2013.
- [27] 聂章翔,王黎明,杨翠茹. 复合绝缘子芯棒与护套交界面在水和高温作用下的老化特性[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15):4601-4611.
NIE Zhangxiang, WANG Liming, YANG Cuiru. Aging characteristics of interface between core and sheath of composite insulators under water and high temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15):4601-4611.
- [28] 刘 英,姜 晖,曹晓珑. 现役交流XLPE电缆绝缘切片试样的交、直流耐压性能对比[J]. 高电压技术, 2017, 43(11):3559-3567.
LIU Ying, JIANG Hui, CAO Xiaolong. Comparison of AC and DC voltage endurance properties of insulation sheet samples spirally - cut from existing AC XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11):3559-3567.
- [29] 李铁骑,章明秋,曾汉民. 纤维复合材料界面层结构、性质及作用[J]. 高分子材料科学与工程, 1997(6):15-20.
LI Tieqi, ZHANG Mingqiu, ZENG Hanmin. Structure, properties and functions of fiber composite interface layer [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 1997(6): 15-20.
- [30] LIU Yunpeng, LI Lei, LIU Hechen, et al. Hollow polymeric microsphere-filled silicone-modified epoxy as an internally insulated material for composite cross-arm applications[J]. Composites Science and Technology, 2020, 200(10): 108418-1-108418-8.
- [31] 马万里,田付强,熊雯雯,等. 环氧树脂/氮化硼微纳复合材料的导热与电气绝缘性能研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(7):36-42.
MA Wanli, TIAN Fuqiang, XIONG Wenwen, et al. Thermal conductivity and electrical insulation properties of epoxy/BN micro and nano composites[J]. Insulating Materials, 2019, 52(7):36-42.
- [32] ZHANG Zhongyuan, DAI Xiaohan, LI Lei, et al. Current status of research on the modification of thermal properties of epoxy resin-based syntactic foam insulation materials[J]. Polymers, 2021, 13(18):3185.
- [33] 彭 鹏,虞锦洪,江平开. 超支化聚芳酰胺接枝氮化硼/环氧复合材料的制备与性能研究[J]. 绝缘材料, 2012, 45(3):1-5.
PENG Peng, YU Jinhong, JIANG Pingkai. Preparation and properties of Boron nitride/epoxy composite grafted with hyperbranched aromatic polyamide[J]. Insulating Materials, 2012, 45(3):1-5.
- 张重远(1969—),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统过电压与防护及电力系统电磁兼容(E-mail: hvzzy_01@163.com)。
- 苏 铮(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为高压新型电工材料(E-mail:499684214@qq.com)。