

一种单桅杆绝缘材料拉挤编织技术的研究

李云 薛靖祺 段标 黄友平 李其

云南电网有限责任公司红河个旧供电局, 云南 个旧 661000

[摘要] 由于纤维材料本身性质的缺陷, 如脆性、耐冲击性、耐老化性等, 使其应用受到限制。因此利用特种技术对纤维或织物进行改性显得很重要。在芳纶纤维后处理时, 将特殊功用的改性材料粒子加入聚合形成纤维的高聚物溶液中, 充分搅拌均匀后进行聚合反应, 然后进行纺丝加工。对纤维或织物进行改性后处理使其功能强化: ①将改性材料作为固体物质直接加入到织物后整理剂中, 使改性物质均匀分散在后处理织物中; ②将改性物质的微乳液和织物后处理剂均匀混合后, 使织物通过这种含有改性材料的整理液; ③将含有改性材料的整理剂在一定黏合剂存在下涂覆到织物表面, 形成一种功能性涂层, 改善织物的性能。运用改性技术对纤维或织物改性, 可以大幅改善其韧性、耐冲击性、耐老化性、绝缘性能等。

[关键词] 纤维材料; 绝缘材料; 拉挤编织技术; 单桅杆

DOI: 10.33142/hst.v6i5.9538

中图分类号: TS184.5

文献标识码: A

Research on a Pull Squeeze Weaving Technology for Single Mast Insulation Material

LI Yun, XUE Jingqi, DUAN Biao, HUANG Youping, LI Qi

Honghe Gejiu Power Supply Bureau of Yunnan Power Supply Co., Ltd., Gejiu, Yunnan, 661000, China

Abstract: Due to the inherent defects of fiber materials, such as brittleness, impact resistance, aging resistance, etc., their application is limited. Therefore, it is important to use special technologies to modify fibers or fabrics. During the post-treatment of aramid fibers, special functional modified material particles are added to the polymer solution polymerized to form fibers, thoroughly stirred, and then subjected to polymerization reaction, followed by spinning processing. After modifying fibers or fabrics to enhance their functionality: ① Directly adding the modified material as a solid substance to the fabric finishing agent to evenly disperse the modified substance in the treated fabric; ② Uniformly mix the microemulsion of the modified material with the fabric post-treatment agent to make the fabric pass through the finishing liquid containing the modified material; ③ Apply a finishing agent containing modified materials to the surface of the fabric in the presence of a certain adhesive, forming a functional coating that improves the performance of the fabric. The use of modification technology to modify fibers or fabrics can significantly improve their toughness, impact resistance, aging resistance, insulation performance, etc.

Keywords: fiber material; insulation material; pultrusion weaving technology; single mast

引言

目前, 国内的绝缘型材绝缘部分主要采取拉挤工艺生产, 材料为环氧树脂增强玻璃纤维, 外形均为圆管。在纤维铺层结构方面, 对于低端厂家, 一般是在杆的内外两侧铺设玻璃纤维布作为抗扭、抗压方面的增强, 但是玻纤布在固化的时候没有施加张力, 其纤维的强度无法得到充分地发挥, 为了达到性能要求, 只能采取增加布的用量的方法, 带来重量的额外增加; 对于有一定技术能力的厂家则采取拉挤-缠绕工艺, 在纵向纤维内部增加正反两层环向纤维, 从而可大幅提高抗压性能, 并在外部铺设电子级的玻纤布, 从而使绝缘型材具有更好的外观和抗老化性能。但是由于目前我国的复合材料设计能力与国外先进水平还有一定差距, 尤其是在中小企业, 对于纵向、环向纤维的铺层设计还处于现场技术人员根据使用效果和摸索, 处于能用即可的阶段, 而不能从材料性能和原理上进行有限元建模、使用工况的分析指导, 存在着过度设计的问题, 具有很大的优化空间。1 项目的理论和实践依据

1 项目研究内容的原理

1.1 高强度纤维增强环氧树脂材料制备技术研究

复合材料强度高、密度小、绝缘和耐腐蚀, 基于复合材料以上特点, 纤维增强复合材料可以兼顾绝缘绝缘型材料的高机械强度、高绝缘和轻质的功能需求。

(1) 重量轻, 复合材料强度高, 韧性好。玻璃纤维增强环氧复合材料拉伸、弯曲和压缩强度达到 300MPa 以上, 玻纤单向板的强度可达 600MPa 以上, 超过或与普通钢材相当, 而密度一般小于 2.0 g/cm^3 , 约为钢材的 $1/4$ 。

(2) 过电压耐受水平高, 防雷击、污秽闪络能力强。实验数据表明(表 1), 复合材料表面电阻率通常高于 $1.0 \times 10^{12} \Omega$, 耐漏电起痕可接近 2.5 级, 受潮后的泄漏电流仍处在 μA 级别, 淋雨和污秽闪络电压分别达到 160kV/m 和 38kV/m, 大大增加了绝缘型材的绝缘爬距, 阻断了绝缘型材的相地闪络通道。

(3) 耐腐蚀, 维护少。复合材料对酸、碱、盐及有机溶剂等介质具有优异的耐腐蚀性能, 例如, 大部分复合

材料在 5%盐酸溶液中腐蚀 30 天后仍能保留 90%以上的力学性能，在碱性环境中仍能长时间保持较好的机械强度，大幅节约维护工期和成本。

表 1 复合材料的电气性能

试验项目	复合材料	依据标准
表面电阻率	$1.58 \times 10^{15} \Omega$	GB/T 1410
体积电阻率	$5.40 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$	GB/T 1410
介质损耗因素	0.00252	GB/T 1409
耐电痕化	≥ 2.5 级	GB/T 6553
染料渗透	$> 15\text{min}$	GB/T 19519
水扩散	0.154~0.319mA	GB/T 19519
憎水性	HC2	DL/T 864
工频淋雨性能	160kV/m	GB 13398
工频污秽性能	38kV/m	GB/T 4585

1.2 项目研究内容的理论和实践依据

(1) 理论依据

①高机械强度和电气绝缘性能的绝缘型材研制过程

高机械强度和电气绝缘性能的绝缘型材研制主要包括拉挤树脂配方的研发、绝缘型材纤维铺层结构设计、拉挤-缠绕/编织及真空浸渍工艺研究。其中，拉挤树脂配方拟采用传统环氧类树脂的同时，还计划开发出拉挤用聚氨酯树脂体系，添加适当的电工级 SiO₂ 或 Al₂O₃。拉挤用聚氨酯树脂具有黏度低、固化速度快的优点，可以大幅提高纤维含量，从而提升绝缘型材的力学性能和密度；对纤维具有良好的浸润性，结合特制的高压注胶设备，可有效改善传统开放式浸胶槽存在的树脂浸渍不充分、绝缘型材中存在微小气泡的现象。同时拉挤用聚氨酯还具有良好的电气性能和耐候性能，是替代现有环氧类拉挤树脂的理想材料。填料拟选用电工级二氧化硅或者 Al₂O₃，采用硅烷偶联剂进行表面处理，经活性处理而成，既保留普通硅微粉的特性，表面又有一层复合偶联薄膜，这种膜具有憎水性，内部不吸潮，故不经高温处理即可用，使用方便，同时使绝缘型材表面的结构得到改善，提高抗沿面漏电性能。通过树脂配方的优化，得到适合拉挤工艺、树脂与纤维的浸润性与界面结合良好的树脂配方体系。

②绝缘型材纤维铺层结构设计

由于复合材料属于各向异性材料，纵向纤维提供绝缘型材的刚性和抗拉性能，环向纤维提供绝缘型材的抗压、抗扭性能。根据绝缘型材的使用工况和性能要求，结合备选纤维材料的力学性能，对绝缘型材的纤维铺层取向、外形尺寸有限元设计分析，使其在满足性能要求的前提下，减少重量，提高刚性，从而满足作业人员安全便携、准确操作的要求。

③加工工艺研究

绝缘型材的电气性能和抗老化性能不仅与树脂配方相关，还与实际生产中的拉挤工艺有很大关系，只有控制

拉挤模具的温度梯度设置、拉挤速度与树脂体系的凝胶、固化及脱模阶段相匹配，使树脂固化完全并顺利脱模，产品的性能才能得到充分发挥，保证生产的稳定性和绝缘型材的成品率。需对各种环氧树脂、固化剂、增韧剂、填料等进行分析，设计大量配方进行对比试验及筛选。电工专用环氧树脂除具有一般通用型环氧树脂特性外，另一特点是纯度高，其杂质含量极微。增韧固化剂主要用来解决树脂体开裂问题，比例可根据各种产品的具体要求而增减。目前，增韧固化剂的种类在不断增多，如何选用需要按设计要求综合考虑。填料选用一般为电工级活性硅微粉，活性硅微粉是用复合硅烷偶联剂，经活性处理而成，既保留普通硅微粉的特性，表面又有一层复合偶联薄膜，这种膜具有憎水性，内部不吸潮，故不经高温处理即可用，使用方便，同时使浇注体表面的结构得到改善，提高沿面漏电性能。配方体系中，所有材料互溶性好，浇注件固化后无分层现象，表面光亮，又无凹凸不平缺陷，具有优异的黏着性、耐疲劳性和绝缘性能。

虽然绝缘型材的物理性能是否优异，取决于浇注树脂本身的特性，但只有严格实施先进的浇注或拉缠工艺，树脂充分浸润纤维，制品性能才能达到指标满足工况要求，产品的可靠性、质量稳定性及成品率也得到大幅度提高。在浇注或拉缠、固化过程中，掌握树脂胶的初期黏度及黏度上升、可使用时间、凝胶化时间、脱膜时间、硬化时间、发热反应、收缩等基本因素。掌握模具的预热温度，使浇注胶和模具的可湿性良好，容易脱泡，缩短浇注时间。浇注工艺中，嵌件与浇注胶的黏结力一般要达到几吨，故在装模前，彻底清洗嵌件外，在嵌件的设计上应力求与浇注胶接触面黏结力的提高，同时避免固化后浇注体内部应力和热应力的增加。严格控制成型质量，成型件材料避免各种杂质和水分，操作过程保持高的真空度，避免浇注后的气孔和砂眼的出现。

项目拟从树脂配方体系的优化和纤维铺层结构设计上解决复合绝缘型材的配方、工艺及产品性能难题。采用先进材料测试手段，通过 DSC、AFM、SEM、FT-IR 等技术对纤维及树脂基体表面的结合性能进行分析，辅助以提高树脂体系和纤维之间界面的性能。对树脂配方及其增强材料的改性，材料配比的优化，改善绝缘型材内部的致密性和外表面的光洁度，使产品的电气性能能够满足实际工况要求。

(2) 实践依据

依据本项目的研究内容和各单位的技术优势，团队作出了合理的任务分工，从纤维增强复合材料的材料配方、成型加工工艺和检测评估手段强强联手，开发高机械强度和绝缘强度的高压作业工器具，掌握 220kV 绝缘操作核心研制技术，实现高压绝缘型材装备国产化技术。项目的实践依据如下：

高强度纤维增强环氧树脂材料制备技术研究,本团队依托“先进输电技术国家重点实验室”和“国家能源高压直流输电技术与装备研发中心”等平台,曾牵头实施两项国网总部项目,《复合材料输电杆塔技术研究及工程示范》获国网科学技术进步一等奖,《220kV 及以下变电站母线及设备带电作业关键技术与应用》获国网科技进步奖二等奖。主导发布了行业标准《国家电网公司输电杆塔用纤维复合材料技术条件》。本团队拥有电力用复合材料制造和研究实力处于国内领先水平的生产企业,已研制在不减少强度的情况下,将壁厚由 2.5mm 减少至 1.8~2mm 的绝缘型材,并实现在 220kV 输电线路上的应用。

1.3 项目研究的关键和难点

项目突破高机械强度作业工器具材料及 200kV 绝缘绝缘型材的制备工艺障碍,通过新型树脂材料配方改性和增强材料铺层结构设计综合提高绝缘部分的机械强度,并实现 220kV 绝缘绝缘型材的设计和制作,减轻作业人员的劳动强度和提高其作业安全系数。

绝缘型材绝缘部分要求在满足性能和工况要求的同时尽量降低重量,要求十分准确地完成材料选型和纤维铺层设计;同时采用了新型的树脂,既要实现铺层设计,又要摸索新型树脂的注胶方式和固化反应,对于拉挤-缠绕设备和生产工艺提出了更高的要求。二、项目研究内容和实施方案

1.4 项目的研究内容

开展纤维种类选型、新型树脂配方和纤维树脂之间的界面结合性能研究。对纤维、树脂、填料等基础材料进行选型,在现有环氧树脂配方体系的基础上,开发新型聚氨酯体系,设计大量配方进行对比试验及筛选,通过对配方浇注样条进行机械和绝缘性能测试,确定最优化配方体系。由于普通的玻璃纤维强度低,绝缘性能差,要想开发高性能绝缘绝缘型材必须采用力学性能更高,绝缘性能更好的纤维增强材料,如高强玻纤、芳纶纤维等,选用适当的偶联剂对纤维进行浸渍处理,利用电子显微镜和浸润性测试仪等先进测试手段分析纤维和界面的状况、化学基团含量及其对胶液的浸润性能,通过调整树脂体系的不同成分,优化树脂与纤维浸润性能,从而提高界面的结合机会,从而提高成型后材料的绝缘性能和力学性能。

对绝缘型材件的外形以及纤维的铺层设计,以及在使用工况下有限元结构分析,确定绝缘型材件的外形结构和内部纤维的布置方式,满足性能要求的同时降低产品重量;开发出适合于新型聚氨酯类拉挤树脂的注胶设备和浸渍工艺,使树脂能够充分地浸渍纤维,消除气泡;对拉挤-缠绕/编织工艺及设备进行优化改造,使之能够实现纤维铺设的预期设计,达到树脂固化充分、产品质量稳定、成品率高的目的。对泡沫材料的选型及其填充工艺进行开发,制得杆件成品。

对拉挤绝缘型材体进行机械和电气性能测试,包括绝缘型材的渗透试验,机械力学性能、机械老化、绝缘耐压试验,对成品质量进行评价。

2 项目的实施方案

(1) 高强度泡沫填充纤维增强环氧树脂材料制备技术研究

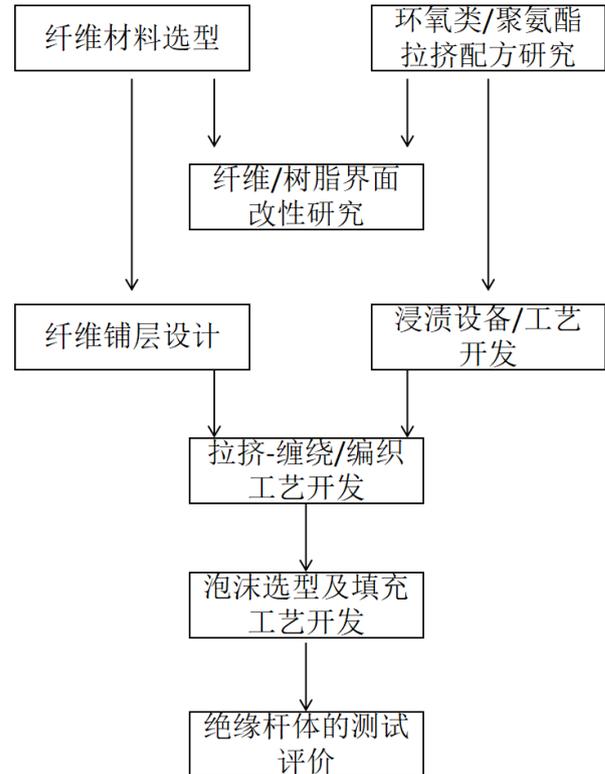


图1 高强度泡沫填充纤维增强环氧树脂材料制备技术研究方案

在现有环氧树脂基础配方体系下,进一步开发拉挤用聚氨酯树脂配方体系;选用高强玻纤、芳纶纤维及聚酰亚胺纤维等具有高强度、绝缘性好的特种纤维作为增强材料,以达到质轻高强的目的;研究纤维表面处理技术以及树脂改性技术,增强纤维和树脂间的界面结合能力;对绝缘型材件的外形以及纤维的铺层设计,满足性能要求的同时降低产品重量;开发出适合于新型聚氨酯类拉挤树脂的注胶设备和浸渍工艺,使树脂能够充分地浸渍纤维,消除气泡;对拉挤-缠绕/编织工艺及设备进行优化改造,使之能够实现纤维铺设的预期设计,树脂固化充分,产品质量稳定,成品率高的目的。对泡沫材料的选型及其填充工艺进行开发,制得杆件成品。对拉挤绝缘型材体进行机械和电气性能测试,对产品的质量进行评价。

(2) 纤维种类选型、新型树脂配方和纤维树脂之间的界面结合性能研究

绝缘绝缘型材杆件的主要原材料组成为树脂体系和纤维铺层,高电压等级绝缘型材对于树脂体系的选型主要从三个方面的基础特性来进行考虑:①电气绝缘特性;②

机械力学特性；③工艺成型特性。电气绝缘性能主要从介电常数、介电损耗、介电强度以及体积电阻率等性能综合考虑，机械力学特性主要从拉伸强度、弯曲强度、杨氏模量、断裂伸长率等方面进行考虑。

综合对比环氧/聚氨酯树脂配方体系，主要包括树脂的玻璃化转变温度、吸水率、机械力学性能和电气绝缘性能对比。开展树脂的基础特性参数分析，在复合材料的拉挤成型工艺过程需要结合绝缘型材的制备成型工艺参数，从体系的热力学性能、不同反应阶段的形态等方面综合考虑。在拉挤成型过程中，树脂体系的不同反应阶段的形态控制是工艺中重要因素。树脂在模具中分为凝胶阶段、固化阶段、收缩脱模阶段，在凝胶阶段中，树脂开始受热黏度下降，体积膨胀，在模具腔体中受压，使得树脂进一步浸渍纤维，多余的树脂被挤出模具，而后开始交联反应，树脂分子量急剧增加，黏度快速上升，直至成为凝胶态，树脂分子不再移动。此时的温度设置不宜太高，否则反应太快，多余的树脂来不及挤出造成堵模；树脂的固化阶段分子量进一步上升，同时放出大量的热，反过来加快固化反应，当交联程度达到一定阶段，树脂开始收缩，逐渐脱离模具，进入脱模阶段；树脂和模具是否能够顺利脱模决定着产品的表面形态和工艺的成败，否则会在表面造成掉渣、划痕的缺陷，随着掉渣在模具中的积累，使得模腔空间越来越小，最后发生堵模，不得不停止生产。树脂体系的基础参数对于工艺参数的制定具有很大的指导意义。

玻璃纤维绝缘型材主要使用范围在 220kV 及以下电压等级，在保持同等电气绝缘性能的前提下玻璃纤维绝缘型材的质量较重、抗拉强度水平较低。由于普通的玻璃纤维强度低，绝缘性能差，欲开发高性能绝缘绝缘型材必须采用力学性能更高，绝缘性能更好的纤维增强材料，如高强玻纤、芳纶纤维等，利用电子显微镜和浸润性测试仪等先进测试手段分析纤维和界面的状况、化学基团含量及其对胶液的浸润性能，通过调整树脂体系的不同成分，优化树脂与纤维浸润性能，从而提高界面的结合机会，从而提高成型后材料的绝缘性能和力学性能。

(3) 绝缘型材件的外形以及纤维的铺层设计

复合材料的显著特点是可设计性强，同样外形的产品，不同的纤维取向其性能也有很大的不同。通过对使用工况的有限元受力分析以及产品外形、纤维铺层结构的设计，可以实现最优的质量/性能比，可以达到相对于现有产品刚性、抗压抗扭等性能相同的情况下显著降低杆件的质量，提高便携能力以及使用操作的准确性。

(4) 开发新型聚氨酯类拉挤树脂的注胶设备和浸渍工艺

新型拉挤用聚氨酯树脂具有黏度低、反应速度快的特点，与传统的开放式浸胶槽不同，其特别适合于采用密闭注射的方式浸渍纤维。设计合理的注胶设备，优化注胶压

力、注胶长度和流道设计，能够使低黏度树脂更好地和纤维浸渍，消除气泡，防止杆体产生缺陷。同时由于其为密闭注射，没有有害溶剂的挥发，显著改善了工人的工作环境。

(5) 拉挤-缠绕/编织工艺优化及设备改造

通过对拉挤-缠绕/编织设备的改造，优化生产工艺，调整拉挤速度、缠绕/编织速度以及模具的温度，使之能够实现纤维铺设的预期设计，树脂固化充分，达到产品质量稳定，成品率高的目的。优化注胶时间、温度、真空度、压力、流量和流速，使得绝缘型材制品无气隙、无局部放电、漏电流小、机械强度高等特点。

(6) 泡沫材料的选型及其填充工艺进行开发

改性优化绝缘型材内的高密度填充泡沫工艺，用空心管制造的绝缘绝缘型材内、外表面及端部必须进行防潮处理，可采用泡沫对空心管进行填充，以防止内表面受潮和脏污。

(7) 拉挤绝缘型材体进行机械和电气性能测试

对拉挤绝缘型材体进行机械和电气性能测试，包括绝缘型材的渗透试验，机械力学性能、机械老化、绝缘耐压试验，对产品的质量进行评价。

(8) 高机械强度复合材料在高压作业工具的应用技术研究

高压绝缘型材采用本项目开发的高强度泡沫填充玻璃纤维增强聚氨酯树脂材料制成，综合提升其绝缘性能和机械强度；高压绝缘型材广泛用于各类电气设备的带电作业和安全用具使用工作中，绝缘型材的绝缘性能好坏，直接影响到带电作业工作的开展。其绝缘性能一般取决于材料内部致密性良好，复合材料界面性能优异，材料内部无气隙和气泡。局部放电测试是评价电气绝缘复合材料的重要指标，电气设备绝缘内部常存在一些弱点，例如环氧浇注复合材料绝缘制品中容易出现气隙或者气泡，由于空气的击穿场强和介电常数都比固体介质小，因此在外施电压作用下这些气隙或者气泡会首先发生放电，放电的能量很微弱，故不影响设备的短时绝缘强度。项目为了进一步考察绝缘型材内部是否存在潜在的微小缺陷，对绝缘型材的型式试验方案进行了修正，验证高压绝缘型材的电气绝缘特性。

开展绝缘管材试制与测试分析，包括绝缘管尺寸优化、受力状态分析，试制样品并进行机械和电气强度校核；测试新型绝缘型材的各项性能，按照 GB/T 1033.1-2008 的 A 法进行材料的密度试验；按照 GB/T 1034-2008 的规定进行吸水率试验；按照 GB/T 1409-2006 的规定进行材料的电气性能试验（50Hz 介质损耗角正切试验）；染料渗透试验过程如下：将试品完全浸泡在 0.1% 体积品红及蒸馏水溶液的容器中，然后将以上容器放在真空箱中保持 1h，再解除真空并取出试件在大气环境中干燥 24h，干燥后，

将试品从每一端头截掉 10mm, 观察试件切面是否被品红燃料渗透。电气性能试验包括受潮前、后绝缘试验; 绝缘湿态试验; 工频耐压试验; 操作冲击耐压试验; 机械性能试验项目包括: 弯曲试验、扭力试验、径向挤压试验等。

进行新型绝缘型材在设备上的试应用, 评估分析其在可靠性、便捷性、经济性方面的综合性能, 形成应用评估报告。

试验地点为国网浙江省电力有限公司(浙江华电器材检测研究所有限公司)、南瑞集团有限公司、昆明飞翔材料技术有限公司、全球能源互联网研究院有限公司、国网福建省电力有限公司, 将完成典型作业工具的绝缘管材试制与测试分析, 研制出绝缘型材样机, 静抗弯负荷 > 132 N·m, 较同规格产品端部机械强度提升 40%, 整体重量降低 10% 以上; 复合绝缘型材 3 min 工频耐受电压 > 580 kV, 操作耐受冲击电压 > 1050 kV, 其他各项性能符合标准 GB13398-2008 要求实现采用新材料、新工艺的高压绝缘绝缘型材应用验证。

①针对高压绝缘型材绝缘部分的工作条件要求, 提出高强度泡沫填充纤维增强环氧树脂材料的制备技术, 解决增强纤维浸润性差、及其与树脂基体的界面结合不紧密的问题, 高强度、高防潮的改性纤维憎水角 $\geq 110^\circ$, 建立起树脂配方体系与纤维表面结合性能之间的最佳匹配关系。

②掌握纤维增强聚氨酯树脂复合材料的制备技术, 复合绝缘型材密度 $\geq 1.75 \text{ g/cm}^3$, 吸水率 $\leq 0.15\%$, 50 Hz 介质损耗角正切 ≤ 0.01 , 绝缘型材及填充泡沫材料符合渗透试验要求, 纵向弯曲强度 > 700 MPa, 径向介电强度 > 20 kV/mm, 从配方、结构和工艺方面提升高压绝缘型材的机械强度和电气绝缘性能。

③研制出绝缘型材样机, 静抗弯负荷 > 132 Nm, 较同规格产品端部机械强度提升 40%, 整体重量降低 10% 以上; 复合绝缘型材 3 min 工频耐受电压 > 580 kV, 操作耐受冲击电压 > 1050 kV, 其他各项性能符合标准 GB13398-2008 要求, 实现采用新材料、新工艺的高压绝缘绝缘型材应用验证, 为基于高机械强度复合材料的高压作业工具深化应用提供技术支撑。

3 成果形式

(1) 装置或系统

憎水角 $\geq 110^\circ$ 、高强度、高防潮的改性纤维, 复合绝缘型材密度 $\geq 1.75 \text{ g/cm}^3$, 吸水率 $\leq 0.15\%$, 50Hz 介质损耗角正切 ≤ 0.01 , 绝缘型材材料符合渗透试验要求, 纵向弯曲强度 > 700 MPa, 径向介电强度 > 20 kV/mm;

绝缘型材一套, 静抗弯负荷 > 132 N·m, 较同规格产品端部机械强度提升 40%, 整体重量降低 10% 以上; 复合绝缘型材 3 min 工频耐受电压 > 580 kV, 操作耐受冲击电压 > 1050 kV, 其他各项性能符合标准 GB13398-2008 要求。

绝缘型材设备一套, 包括拉挤模具、注料机及拉挤设备, 其中模具设计尺寸优化, 收缩变形量为小于 2%, 注料机压力满足模具浸透需求, 拉挤设备压拉模具, 加热装置满足生产需求。

(2) 最终成品参数

名称	密度 g/cm ³	拉伸强度 mpa	屈服强度 mpa	弯曲强度 mpa	硬度
新型 管材	1.95	820	710	750	95

表 2 成品参数

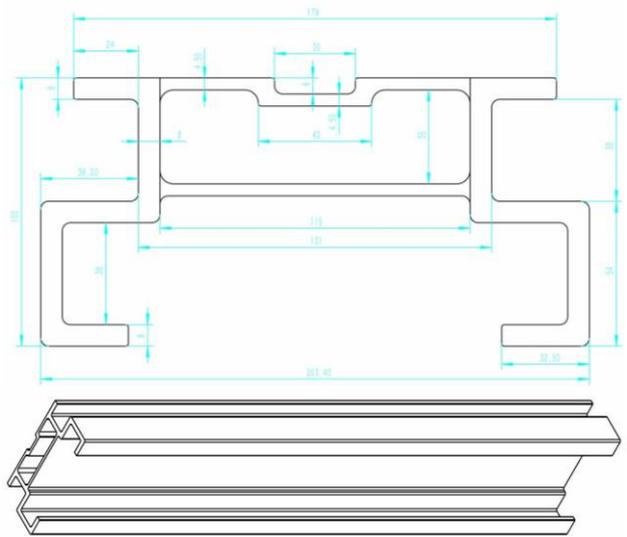


图 2 单桅杆绝缘柱平面图

[参考文献]

- [1] 邵梦春, 杨春尧, 吴维翔. 重复测量对电线电缆用聚氯乙烯塑料体积电阻测试值的影响[J]. 电气技术与经济, 2023(2): 11-14.
 - [2] 范梓远, 王鹏, 于超凡, 等. 重复方波下气压对新能源汽车主绝缘材料电老化特性影响研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(4): 60-67.
 - [3] 欧振宇, 韩俊伟, 焦芬, 等. 废旧 PVC 电线热重分析及热解试验研究[J]. 甘肃科学学报, 2023, 35(2): 48-54.
- 作者简介: 李云 (1985.4—), 男, 云南民族大学; 电气自动化技术, 助理工程师; 薛靖祺 (1984.12—), 男, 云南大学; 法律事务, 助理工程师; 段标 (1982.6—), 男, 昆明理工大学; 经济管理, 助理工程师; 黄友平 (1995.2—), 男, 昆明理工大学; 电气工程及其自动化, 助理工程师; 李其 (1979.7—), 男, 长沙理工大学; 电气自动化, 助理工程师。