

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.009

基于改性聚丙烯的电缆支架结构设计

李濛¹, 刘源¹, 韩卓展¹, 李家兴¹, 黄增斌^{2,3}, 李嘉豪^{2,4}, 赵金军²

[1. 广东电网有限责任公司广州供电局输电管理二所, 广州 510620; 2. 广州市香港科大霍英东研究院, 工程材料及可靠性研究中心, 广州 511458; 3. 香港科技大学(广州)未来技术学院, 广州 511453; 4. 广东工业大学机电工程学院, 广州 510006]

摘要: 针对电力隧道中不锈钢电缆支架耐腐蚀性差、使用寿命短等问题,以聚丙烯(PP)为基体,引入多壁碳纳米管(CNTs)、导电炭黑(CB)与玻璃纤维(GF)协同改性,提升PP复合材料的导电性能和力学性能,设计并制备CNTs/CB/GF/PP复合材料-不锈钢复合电缆支架。采用有限元法对电缆支架在30年服役期内的力学可靠性进行评估,并进一步对比分析纯PP复合材料、薄不锈钢、厚不锈钢及复合支架四类电缆支架的力学性能与成本。研究结果表明,所开发的电缆支架具有低电阻率、良好的耐腐蚀性以及高承载能力。在材料层面,通过CNTs/CB协同填充改性PP,使该复合材料体积电阻率为 $(85\,926.4\pm398.5)\,\Omega\cdot\text{cm}$ 且阻燃等级不低于HB;在结构层面,设计了该复合材料与不锈钢结合的电缆支架结构,仿真预测结果表明,该支架短期承载安全系数为4.0,在30年长期服役后,仍能保持1.4的承载安全系数。在工艺与成本上,复合电缆支架采用分体成型与胶黏连接工艺,其中CNTs/CB/GF/PP复合材料的成型采用注塑工艺,有效简化了工艺并降低了成本。与纯不锈钢支架相比,新型支架成本从204.5元降至118.6元,降幅达到了42%。因此,该复合支架兼具低成本、长寿命与高承载优势,适用于电力隧道工程。

关键词: 电缆支架; 复合材料; 低电阻率; 耐腐蚀性; 承载能力

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0073-07

Design of cable bracket structure using modified polypropylene

LI Meng¹, LIU Yuan¹, HAN Zhuozhan¹, LI Jiaxing¹, HUANG Zengbin^{2,3}, LI Jiahao^{2,4}, ZHAO Jinjun²

[1. Guangdong Power Grid Co. Ltd. Guangzhou Power Supply Bureau Transmission Management No.2, Guangzhou 510000, China;
2. Center for Engineering Materials and Reliability, Fok Ying Tung Research Institute, HKUST, Guangzhou 511458, China;
3. School of Future Technology, The Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Guangzhou 511453, China;
4. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China]

Abstract: To address the issues of poor corrosion resistance and short service life associated with existing stainless steel cable brackets in power tunnels, a CNTs/CB/GF/PP composite-stainless steel hybrid cable bracket was designed and fabricated. Using polypropylene (PP) as the matrix, multi-walled carbon nanotubes (CNTs), conductive carbon black (CB), and glass fibers (GF) were introduced for synergistic modification to enhance the electrical and mechanical properties of the PP composites. The finite element method (FEM) was employed to evaluate the mechanical reliability of the cable bracket over a 30-year service period. Furthermore, a comparative analysis regarding the mechanical properties and costs was conducted among four types of cable brackets: pure PP composite, thin stainless steel, thick stainless steel, and the hybrid bracket. The research results indicate that the developed cable bracket features low electrical resistivity, excellent corrosion resistance, and high load-bearing capacity. At the material level, the synergistic filling of PP with CNTs and CB achieves a volume resistivity of $85\,926.4\pm398.5\,\Omega\cdot\text{cm}$ and a flame retardancy rating of no less than HB. At the structural level, a hybrid architecture combining the composite material with stainless steel was designed. Simulation predictions demonstrate that the bracket possesses a short-term load-bearing safety factor of 4.0, and it can still maintain a safety factor of 1.4 after 30 years of long-term service. Regarding manufacturing processes and economics, the hybrid cable bracket

基金项目: 广州供电局2024年非极性高分子材料电缆支架研发(技术开发)项目(GDKJXM20231394),广州市黄埔区科学技术局项目(2023GH04)

通信作者: 赵金军, 硕士, 研究方向为复合材料结构多物理场应用场景变形、强度、寿命预测与结构优化

收稿日期: 2025-12-26

引用格式: 李濛, 刘源, 韩卓展, 等. 基于改性聚丙烯的电缆支架结构设计[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 73-79.

LI Meng, LIU Yuan, HAN Zhuozhan, et al. Design of cable bracket structure using modified polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 73-79.

et utilizes a split-forming and adhesive bonding process, wherein the composite components are fabricated via injection molding. This approach effectively simplifies the manufacturing procedure and reduces overall expenses. Compared to traditional pure stainless steel brackets, the cost of the novel bracket is reduced from 204.5 CNY to 118.6 CNY, representing a significant decrease of 42%. Thus, the hybrid bracket offers low cost, long service life, and high load-bearing capacity, and is suitable for power tunnel applications.

Keywords: cable bracket; composites; low resistivity; corrosion resistance; load-bearing capacity

在现代城市电力输送系统中,电力隧道的作用日益凸显,其规模迅速扩大^[1],以广州地区为例,在运及建设中的隧道总长度已接近 100 km,电缆支架数量超过 80 万套。

目前,隧道内铺设的电缆支架主要采用角钢材质。角钢价格低廉,但耐腐蚀性差,这不仅会导致传输能量的损耗^[2-3],还可能加速电缆外皮的老化剥落^[4-5]。且当电缆承载高电流时,角钢支架存在涡流发热问题,增加安全隐患。此外,根据 GB 50217-2018,大截面 220 kV 及以上电缆线路只能使用环氧或不锈钢支架,但不锈钢支架价格高昂,是角钢支架的 2.7 倍,且在沿海地区同样面临海水侵蚀的风险^[6]。环氧支架因极性材料结构,存在吸水率高、耐用性差等问题。水分吸收和化学侵蚀会造成复合材料内部的结构应力和微裂纹,导致机械性能下降进而发生断裂^[7];同时,因环氧支架本身无导电性能,在电缆外护层破损导致铝护套接地时,可能因悬浮电位引发人身安全风险。此外,环氧材料还存在老化和蠕变问题,难以在重载、高服役寿命的场景中使用^[8-9]。

聚丙烯(PP)作为一种通用塑料,其成本低,易加工,绿色可重复利用等优点在多个领域被广泛应用。但因其存在力学强度低及蠕变问题,聚丙烯材质电缆支架暂无相关研究与应用。

与环氧树脂相比,PP 具有较低的吸水性,有利于在潮湿环境中保持稳定。与金属相比,PP 材料具有良好的耐腐蚀性,且比强度高,成本低,可设计性好,可重复利用等优点^[10-11]。同时可通过改性,使得 PP 基材料在导电性、阻燃性、强度和寿命方面得到进一步的提升,满足电缆支架的工程要求。

针对上述挑战,本研究以 PP 材料作为基体,通过对其进行改进,同时与金属不锈钢一同配合设计支架,解决 PP 的蠕变问题,提高支架的承载性能。研究旨在设计一种适用于电缆隧道的复合材料半导电电缆支架,同时满足电缆支架复合材料的体积电阻率 $\leq 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$,阻燃等级不低于 HB;支架承载

能力不低于同等型号的角钢电缆支架($\geq 400 \text{ kg/m}$)。为实现上述目标,本研究首先对复合材料进行研究,隧道电缆支架用非极性 PP 基复合材料主要由 PP 树脂、玻璃纤维(GF)、导电填料等组成。导电填料的种类及添加量对复合材料的导电性能和力学性能均有比较大的影响^[12]。通过材料配方优化与纤维增强技术的结合^[13],提升材料的力学性能、耐候性及耐久性,随后利用计算机仿真技术进行隧道电缆支架的结构设计、受力分析及寿命预测^[14],以确保支架的结构设计与成型方案在实际应用中的可靠性和安全性。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP1:EP640V,中海壳牌石油化工有限公司;

PP2:650 粉,中国石油化工股份有限公司;

马来酸酐接枝 PP(MAPP):PC-1B,佛山市南海柏晨高分子新材料有限公司;

短玻璃纤维(SGF):ECS305-4.5-K,重庆国际复合材料股份有限公司;

导电炭黑(CB):E900,四川正好特种炭黑科技有限公司;

多壁碳纳米管(CNTs):中科院成都有机化学有限公司;

抗氧剂 1010、抗氧剂 168:德国巴斯夫股份公司;

硅烷偶联剂:KH-570,南京曙光化工集团有限公司;

无水乙醇:国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

低温等离子体处理机:DienerZeptoW6,德国迪纳电子两合公司;

双螺杆挤出机:CX26-44,南京瑞亚挤出机械制造有限公司;

注塑机:海天 Mars 1200,海天国际控股有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪:WKT-400TC,江苏维

科特仪器仪表有限公司。

1.3 材料制备

采用等离子体处理机对氩气与氧气的混合气体在室温下进行处理。随后,将KH-570硅烷偶联剂溶解于去离子水与无水乙醇的混合液中,制备水解液。将GF浸入水解液中,在室温下机械搅拌浸渍20 min,随后依次进行预干燥和高温固化处理。

CB母粒采用高负载量CB(质量分数35%)与PP基体预复合制备,利用多级剪切场作用实现炭黑初级团聚体的解离与均匀分布,CB母粒的配方见表1。

通过熔融共混工艺制备复合材料。将干燥后的PP EP640 V、MAPP、CB母粒及抗老化助剂由主

表1 CB母粒的配方

Tab. 1 Formulation of CB masterbatch

Item	PP 650 powder	CB	MAPP	Antioxidant 1076	Antioxidant 168
Mass fraction/%	59.6	35	5	0.2	0.2

喂料口加入双螺杆挤出机,GF与CNTs则通过侧喂料口加入,在190~230℃的熔融温度和200 r/min的螺杆转速下进行高效混合与功能化接枝,经水冷、切粒后得到复合材料粒子,最终通过注塑成型制成标准测试样条。材料制备过程及测试样条如图1所示。使用CB、CNTs、CNTs/PP作为填料制备的新型GF/PP复合材料分别命名为CB/GF/PP复合材料、CNTs/GF/PP复合材料、CNTs/CB/GF/PP复合材料。三种复合材料的实验配方见表2。

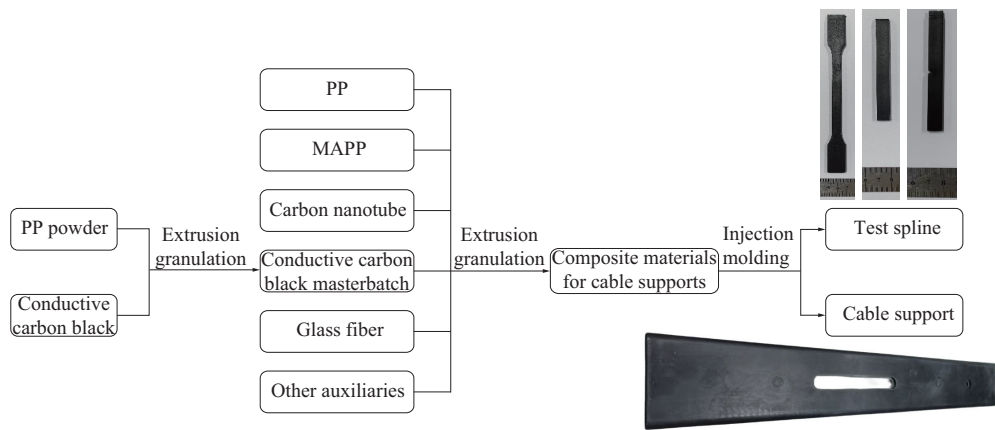


图1 材料制备过程及测试样条

Fig. 1 Material preparation process and test samples

表2 三种复合材料实验配方

Tab. 2 Three experimental formulations for composites

Composites	PP EP640 V	MAPP	CB masterbatch	GF	CNTs	Antioxidant 1010	Antioxidant 168
CB/GF/PP	15.6	4	40	40	/	0.2	0.2
CNTs/GF/PP	50.6	4	/	40	5	0.2	0.2
CNTs/CB/GF/PP	42.6	4	10	40	3	0.2	0.2

1.4 性能测试及表征

MFR测试使用MFR仪,根据ISO 1133-1:2022,在2.16 kg载荷、230℃温度条件下进行。

密度根据ISO 1183-1:2019测试。

拉伸性能根据ISO 527-1:2019,在50 mm/min的拉伸速率下进行测试。

弯曲性能根据ISO 178:2019,采用2 mm/min的速率测试。

悬臂梁缺口冲击性能根据ISO 180:2023,使用摆锤下摆能量为2.75 J的设备测试。

体积电阻率根据GB/T 1410-2006测试。

水平燃烧测试根据UL 94-2023进行,试样尺寸为125 mm×13 mm×3 mm,火焰施加时间为10 s,记录余焰时间、余辉时间及燃烧滴落行为。

2 复合材料力学性能分析

三种复合材料的力学及阻燃、体积电阻率性能对比见表3。对比三种复合材料的体积电阻率可以发现,与单独添加CNTs和CB相比,两种导电填料共同填充PP得到的复合材料的导电性能要明显更优,这是由于CB可作为“纳米焊点”降低CNTs间接接触电阻,同时CNTs桥接CB聚集体,使复合体系逾渗阈值相对单一填料迅速下降。用CNTs与CB共

表3 三种复合材料的力学性能、体积电阻率及阻燃等级

Tab. 3 Mechanical properties, volume resistivity and flame retardant rating of three composites

Composites	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%	Flexural strength/MPa	Flexural modulus/MPa	Cantilever beam notch impact/(kJ·m ⁻²)	Volume resistivity/(Ω·cm)	Flame retardant rating
CCB/GF/PP	56.1±0.3	3.0±0.0	93.3±0.0	11 323.4±27.8	5.3±0.2	180 454.2±138.3	HB
CNTs/GF/PP	104.1±0.2	5.3±0.0	159.5±0.2	10 668±31.6	10.3±0.1	184 009.9±198.7	HB
CNTs/CB/GF/PP	97.3±0.2	3.5±0.1	144.3±0.1	9 531±27.8	10.6±0.2	85 926.4±398.5	HB

同填充的PP体积电阻率为(85 926.4±398.5) Ω·cm, 阻燃等级为HB,拉伸强度提高至(97.3±0.2) MPa,弯曲强度提升到(144.3±0.1) MPa。所以选择CNTs/CB填充非极性PP基复合材料作为电缆支架的非极性复合材料是最佳的选择。

3 电缆支架设计

3.1 结构设计

CNTs/CB/GF/PP 复合材料在长期重载工况下仍难以满足寿命要求,为此,引入不锈钢作为辅助支撑,设计了一种分体成型后再组装的CNTs/CB/GF/PP 复合材料-不锈钢复合电缆支架结构方案。

图2为分体成型方案的整体装配图,如图2所示,支架采用双层结构。上层为CNTs/CB/GF/PP 复合材料,下层为冲压成型的不锈钢,两者通过螺栓、胶黏与抱箍的方式连接。螺栓连接确保界面紧密接触,同时配合弹簧垫圈可有效防止因PP变形而导致螺栓松动。支架的几何尺寸参数见表4。

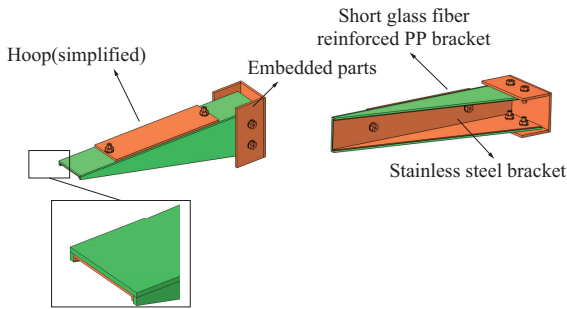


图2 分体成型方案的整体装配图
Fig. 2 Overall assembly drawing of split forming scheme

表4 电缆支架尺寸参数
Tab. 4 Dimension parameters of cable bracket

Dimension parameter/mm	Value
Overall length	750
Overall width	120
Leading edge height	10
Trailing edge height	180
PP board thickness	6
Steel plate thickness	1.5

3.2 有限元仿真模拟

采用有限元方法对电缆支架在30年服役期内的机械可靠性进行评估。研究引入了代表性体积

元(RVE)方法,综合考虑了组分材料性能、微观结构及纤维取向等因素,从而确定了准确的宏观力学性能参数。在仿真模型中,CNTs/CB/GF/PP 复合材料被等效简化为各向同性材料,其模量参数通过宏观力学测试获得。图3为仿真边界条件,在抱箍表面施加4 kN的法向方向载荷以模拟电缆重力;在预埋件后端施加固定约束;同时施加支架自重及螺栓预紧力。根据GB/T 3098.1-2010,选用M16螺栓(4.6级),预紧力设定为25 200 N。图4为网格划分示意图,采用六面体结构化网格,旨在实现较高的计算精度。

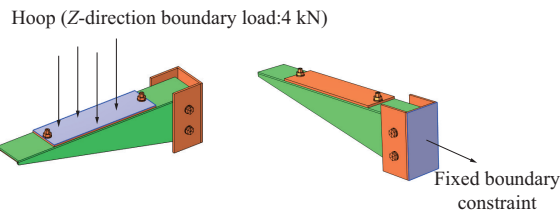


图3 有限元仿真的边界条件
Fig. 3 Boundary conditions of finite element simulation

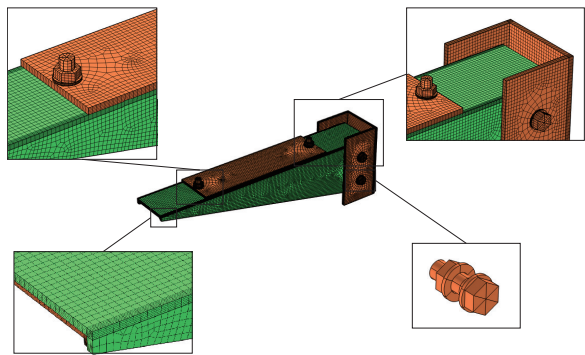


图4 有限元仿真网格划分
Fig. 4 Grid division of finite element simulation

首先对CNTs/CB/GF/PP 复合材料与不锈钢的复合结构进行验证。仿真所需材料参数见表5、表6。此外,考虑到隧道湿热工况下CNTs/CB/GF/PP 复合材料的老化现象及其长期服役性能的退化,研究引入了材料性能与时间的关系(当前性能与原始性能之比)。CNTs/CB/GF/PP 复合材料性能与时间的关系基于参考文献中的实测数据进行拟合^[15]。

图5为电缆支架在初始承载下的仿真结果。由

表5 CNTs/CB/GF/PP复合材料参数

Tab. 5 Parameters of CNTs/CB/GF/PP composites

Parameters	Value
Tensile modulus/MPa	7 800
Poisson's ratio	0.3
Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 210
Norton creep model parameters $\{A, n\}$	$\{3.0 \times 10^{-10}, 1.54\}$

表6 不锈钢材料参数

Tab. 6 Parameters of stainless steel material

Parameters	Value
Tensile modulus/GPa	200
Poisson's ratio	0.3
Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850

图5可知,电缆支架上侧边受预埋件约束的上部区域为风险区域,最大拉应力达24.5 MPa。鉴于短玻纤增强PP复合材料的拉伸强度为97.3 MPa,采用拉伸强度与最大拉应力之比作为安全系数,电缆支架在初始承载下的安全系数为4.0。对于不锈钢板,根据 Von Mises 应力分析,风险区域位于电缆支架上侧加强筋外缘靠近预埋件约束处,最大应力为42.0 MPa。由于不锈钢的拉伸强度为460 MPa,计算得出其安全系数为11.0。此外,根据电缆支架变形仿真结果,在初始承载下,电缆支架垂直挠度为0.3 mm。

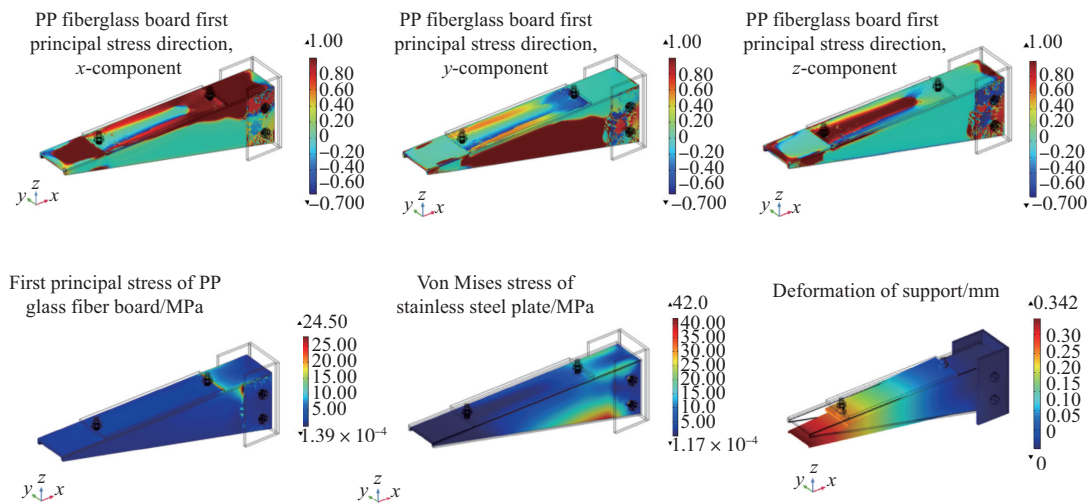


图5 初始承载下电缆支架的受力与变形云图

Fig. 5 Force and deformation nephogram of cable bracket under initial bearing

为验证仿真结果的可靠性,依据 GB/T 34182-2017 对支架进行了承载力测试(如图6所示)。在施加400 kg(约4 kN)载荷后,支架未出现开裂、贯通性裂纹或断裂现象,测试表现与仿真结果一致。

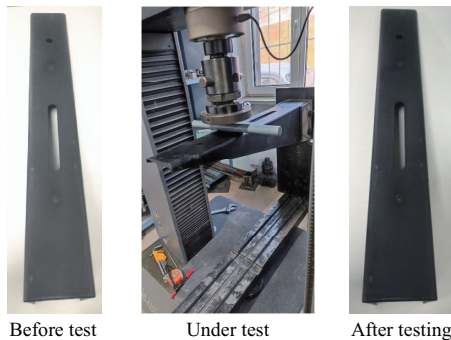


图6 测试过程图

Fig. 6 Test process diagram

图7展示了支架经历30年服役后的仿真结果。受材料蠕变和老化效应影响,CNTs/CB/GF/PP复合材料结构的承载能力逐渐衰减,其承担的最大应力

下降至5.4 MPa。由于应力重分布,不锈钢结构承担了更多的载荷,其最大应力显著上升至323.5 MPa。此时,支架的整体安全系数取决于不锈钢结构,安全系数为1.4,垂直挠度增加至1.9 mm。表7汇总了支架在初始状态与30年后的性能数据。评估结果表明,尽管性能有所退化,支架在全寿命周期内仍能提供有效的承载能力,满足设计许用要求。但因实验周期限制,未能进行30年实测验证,将在后续进行研究。

进一步对比分析了四种不同电缆支架的力学性能与成本,见表8。四种不同电缆支架包括: CNTs/CB/GF/PP 复合材料电缆支架、厚不锈钢电缆支架、薄不锈钢电缆支架和 CNTs/CB/GF/PP 复合材料+不锈钢复合电缆支架(其中复合材料占比25%,不锈钢占比75%)。

分析表明,CNTs/CB/GF/PP 复合材料电缆支架

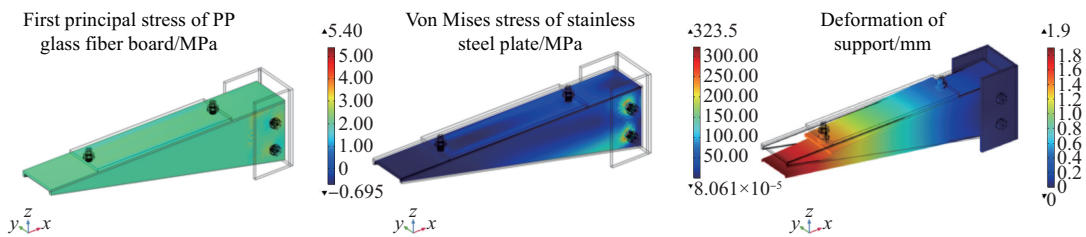


图7 支架服役30年后的应力与变形云图

Fig. 7 Contours of stress and deformation of cable bracket after 30 years of service

表7 电缆支架在初始和30年承载期的性能

Tab. 7 Performance of cable bracket for initial and 30-year bearing periods

Bearing period/year	Maximum stress/MPa		Vertical deflection/mm	Safety factor
	CNTs/CB/GF/PP	stainless steel		
0	24.5	42.0	0.3	4.0
30	5.4	323.5	1.9	1.4

受制于材料的蠕变与湿热老化特性,难以满足长期重载工况下的刚度与强度需求;薄不锈钢电缆支架的抗屈曲性能不足;厚不锈钢电缆支架则成本过高;相比之下,CNTs/CB/GF/PP 复合材料与薄不锈钢的复合电缆支架能够有效整合两种材料的优势,在强度、刚度、抗屈曲性能及成本控制等方面均满足设计要求。

CNTs/CB/GF/PP 复合材料与薄不锈钢的复合电缆支架利用不锈钢承担主要载荷,弥补了PP基体在长期服役中的性能衰减短板,确保了电缆支架的长期力学性能稳定性;同时,CNTs/CB/GF/PP 复合材料通过提供辅助刚度,显著抑制了不锈钢层的屈曲失稳风险。

有限元仿真验证显示,该复合支架在经历30年全寿命周期后,在4 kN标准载荷下垂直挠度仅为1.9 mm,安全系数仍保持在1.4,展现出优异的机械可靠性。此外,通过采用GF增强PP注塑模压及分体成型工艺,进一步节省了材料与加工成本,成本

核算表明,通过采用GF增强PP复合材料+不锈钢复合电缆支架的材料与加工成本较纯不锈钢支架的材料成本相比,新型支架成本从204.5元降至118.6元,降低了42%。

4 结论

(1)材料层面。采用多因素耦合调控,以及CNTs/CB协同填充改性PP,优化了复合材料的电学与力学性能。制备的CNTs/CB/GF/PP复合材料体电阻率为(85 926.4±398.5) Ω·cm,阻燃等级为HB,拉伸强度提高至(97.3±0.2) MPa,弯曲强度提升到(144.3±0.1) MPa。

(2)结构层面。基于有限元分析,设计了CNTs/CB/GF/PP 复合材料-不锈钢复合电缆支架结构。不锈钢内层有效弥补了CNTs/CB/GF/PP 复合材料在湿热老化与蠕变方面的性能短板。仿真预测表明,该支架在4 kN载荷下,30年服役期后的安全系数仍可保持在1.4,垂直挠度仅为1.9 mm,承载与变形控制性能优异。

(3)工艺与成本。CNTs/CB/GF/PP 复合材料-不锈钢复合电缆支架采用分体成型与胶黏连接工艺,其中CNTs/CB/GF/PP 复合材料成型采用注塑工艺,有效简化了工艺并降低了成本。与纯不锈钢支架相比,新型支架成本从204.5元降至118.6元,降幅高达42%。

表8 不同支架的力学性能与成本

Tab. 8 Mechanical performance and cost of different brackets

Items	CNTs/CB/GF/PP bracket	Stainless steel (thick) bracket	Stainless steel (thin) bracket	CNTs/CB/GF/PP-stainless steel hybrid bracket
Strength safety factor	1.26	5.75	2.63	1.40
Vertical deflection/mm	50.60	0.13	0.67	1.90
Buckling resistance	OK	OK	NG	OK
Cost(including processing)/CNY	80.8	204.5	116.8	118.6

Notes: when estimating processing costs,the cost of stainless steel processing is not taken into account; OK indicates qualified,meaning the bracket meets the requirements in the buckling stability analysis and calculation;NG indicates unqualified,meaning the bracket failed the buckling stability check.

参考文献

- [1] 周金海,周虹霞,王鑫,等.城市电力隧道规划及结构设计研究[J].铁道建筑,2012,52(1):69-72.
ZHOU Jinhai, ZHOU Hongxia, WANG Xin, et al. Study on planning and structural design of urban power tunnel[J]. Railway Engineering, 2012, 52(1):69-72.
- [2] 王伟,崔宇霆,孙双倩,等.基于有限元法的电缆支架涡流损耗分析[J].通信电源技术,2018,35(7):83-84.
WANG Wei, CUI Yuting, SUN Shuangqian, et al. Eddy current loss analysis of cable support based on finite element method[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(7):83-84.
- [3] 周秀,陈德志,王贺虎,等.换流变压器结构件涡流损耗的计算与分析[J].电测与仪表,2024,61(7):103-108.
ZHOU Xiu, CHEN Dezhi, WANG Hehu, et al. Analytical calculation of eddy current loss of converter transformer structural parts [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 103-108.
- [4] QUAN S W, GAO S B, MU Q, et al. Onboard EPR cable aging evaluation by rectangular-SPP-CNN based on LMMGS processing method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1-10.
- [5] 龙军,郑斌,李珊,等.电力系统节能环保调度的多目标决策方法[J].电力系统保护与控制,2012,40(18):35-40.
LONG Jun, ZHENG Bin, LI Shan, et al. A multi-objective decision-making method for economic dispatch of power system considering energy conservation and environmental protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18):35-40.
- [6] 高坤,史汉桥,孙宝岗,等.湿热老化对GF/环氧树脂复合材料性能的影响[J].复合材料学报,2016,33(6):1 147-1 152.
GAO Kun, SHI Hanqiao, SUN Baogang, et al. Effects of hydrothermal aging on properties of glass fiber/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6):1 147-1 152.
- [7] 史传卿,郑思国.高强度复合材料电力电缆支架技术性能研究[J].供用电,2011,28(2):61-63, 69.
SHI Chuanqing, ZHENG Siguo. The technical performance research on the electric cable rack made with high strength composite[J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(2):61-63, 69.
- [8] 高克卿.国内外工程塑料的发展现状[J].黑龙江科学,2020,11(2): 160-161.
GAO Keqing. The development of engineering plastics at home and abroad[J]. Heilongjiang Science, 2020, 11(2):160-161.
- [9] 李成钢,张建国,杨立恒,等.低压架空电缆绝缘材料老化开裂分析[J].工程塑料应用,2019,47(4):99-102.
LI Chenggang, ZHANG Jianguo, YANG Liheng, et al. Analysis on insulation materials ageing cracking of low voltage overhead cables [J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(4):99-102.
- [10] 栗宇杰,吴奇林.玻璃钢复合电缆支架在施工现场的应用[J].施工技术,2019(增刊1):548-550.
SU Yujie, WU Qilin. Application of FRP composite cable bracket in construction site[J]. Construction Technology, 2019(Suppl 1): 548-550.
- [11] 郝东东.纤维增强材料在轨道交通建设工程中的应用[J].塑料助剂,2022(5):40-42, 50.
HAO Dongdong. Application of fiber reinforced polymer in rail transit construction[J]. Plastic Additives, 2022(5):40-42, 50.
- [12] 郑强,税波,沈烈.炭黑填充多组分高分子导电复合材料的研究进展[J].高分子材料科学与工程,2006,22(4):15-18.
ZHENG Qiang, SHUI Bo, SHEN Lie. Recent progress in studies on the conductive composites composed of multi-component polymers filled with carbon black[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2006, 22(4):15-18.
- [13] 李磊.复合材料电缆支架结构强度的有限元仿真计算[J].化学推进剂与高分子材料,2018,16(2):68-71.
LI Lei. Finite element simulation calculation of structural strength of composite cable support[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2018, 16(2):68-71.
- [14] 刘朝艳. 2022—2023年世界塑料工业进展(II):工程塑料和特种工程塑料[J].塑料工业,2024,52(4):1-26.
LIU Chaoyan. Progress of the world's plastics industry in 2022-2023(II): Engineering plastics and special engineering plastics[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(4):1-26.
- [15] 周晓东,戴干策. GF毡增强聚丙烯复合材料的湿热稳定性[J].玻璃钢/复合材料,1999(1):16-19.
ZHOU Xiaodong, DAI Gance. Moisture stability of glass fiber mat reinforced polypropylene[J]. Fibr Reinforced Plastics Composites, 1999(1):16-19.