



朱鹏宇, 缪小明, 缪威玮, 等. 额定破断力架空型微束光缆的研制 [J]. 电线电缆, 2025, 68(5): 61-67.
ZHU P Y, MIAO X M, MIAO W W, et al. Development of overhead micro-beam optical cables with rated breaking force[J]. Wire & Cable, 2025, 68(5): 61-67.
DOI: [10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240118](https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.20240118)

额定破断力架空型微束光缆的研制

朱鹏宇, 缪小明, 缪威玮, 赵 静, 林静韬

(江苏中天科技股份有限公司, 南通 226463)

摘 要: 为适用老旧线路杆区域通信线路的敷设条件, 同时保障整体线路的安全性, 通过结构设计、理论计算、材料选型和试验验证等手段, 研制额定破断力架空型微束光缆, 并对其拉伸、破断等机械性能, 以及环境性能进行测试验证。结果表明, 研制的额定破断力架空型微束光缆既符合老旧线路杆的敷设条件, 又具备额定破断力在 1350~2000 N 范围的断裂能力, 能够有效避免老旧线路杆在遭遇车辆顶挂等外力时, 因光缆牵连导致线杆倒塌的风险, 从而保护整个线路设施不被破坏。

关键词: 线路杆; 额定破断力; 架空光缆; 线路敷设; 顶挂

中图分类号: TN913.33

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2025)05-0061-07

0 引 言

近几年, 随着光传输网络全覆盖工程的建设, 光纤到户的任务尤为繁重, 各国通信系统的整体安全性考量也越来越成为考核重点^[1]。但是, 受到规划、地形、环境、人文、成本、历史发展等多种因素的影响, 新增光纤的架设存在困难。电力系统的电力传输网建设较早, 电力线路杆的布局敷设也相对较广, 于是借用电力线路杆架设通信线路成为常态^[2-3]。目前, 欧洲、北美等发达国家地区的电力线路杆因敷设时间较早, 其材质通常为木质结构, 且高度普遍较低。我国通信线路的建设需求较为急迫, 若重新敷设通信线路杆或更换已有电力线路杆, 将面临高额的施工成本。因此, 在老旧电力线路杆上增设架空光缆, 既可以推进光纤到户工作, 又能够规避新增电信号线产生的电磁干扰问题^[4]。

GB 51158—2015《通信线路工程设计规范》规定, 一根线路杆只适合悬挂一条光缆。但是, 在农村、山地等地区, 由于线路杆资源紧张, 且其高度普遍较低, 光缆挂靠电力线路杆的情况时常发生。这种挂靠老旧线路杆的架空光缆, 其主要威胁是在遭遇车辆等设备顶挂时, 线路杆上的通信设备会损坏; 同时, 线路杆会因光缆拖拽而倾斜甚至倒塌, 严重时还会导致整条线路瘫痪。

基于此, 研制额定破断力架空型微束光缆具有重要意义。该光缆能够满足架空环境下的敷

设条件, 并具备一定的抗拉能力; 同时, 在遭遇紧急情况时, 可以在安全力值范围内完成脆断, 避免因光缆拖拽带来的二次伤害, 保证线路杆与其他线路的安全性, 降低线路维护成本。本文考量了光缆各部分的材料选型及其与光缆的适配问题, 并通过反复制样和多次试验, 针对架空光缆在布放过程中可能面临的环境问题进行了模拟测试, 以期达到相关设计要求。

1 结构与性能要求

1.1 结构设计

根据光缆与金具的匹配使用要求, 光缆外径固定为 7.0 mm, 内部必须最大限度地配备 96 芯光纤, 内部空间相对紧凑。光缆的整体结构设计见图 1。

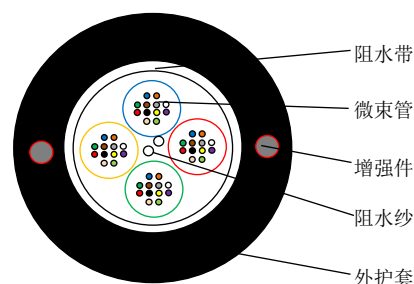


图 1 额定破断力架空型微束光缆结构图

Fig.1 Structure of overhead micro-beam optical cable with rated breaking force

光缆的整体结构中, 光单元采用光纤密度较高的弹性体充油微束管, 微束管单元具有小直

径、薄壁厚、大芯数的结构特点;同时,内部油膏层在拥挤空间中受力时可为光纤提供缓冲。增强件采用护套嵌入式结构。嵌入式增强件的特点是在占用较少光缆内部空间的前提下,能够在光缆受力时充分承受拉力,有效保护内部光单

元,满足各项拉伸性能要求。

根据光缆的应用场景及施工要求,内部光纤容量芯数为 36, 48, 72 和 96。以型号为 GYNHT P-36/48/72/96 G.657.A1 的额定破断力架空型微束光缆为例,其技术要求见表 1。

表 1 额定破断力架空型微束光缆的技术要求

Tab.1 Technical requirements for overhead micro-beam optical cable with rated breaking force

主要性能		技术要求
外径/mm		7.0±0.1
破断力/N		1310~2000
光纤拉伸应变/%	拉力载荷为800 N	≤0.667, 拉力去除后, 护套应无目力可见开裂
衰减性能/(dB·km ⁻¹)	1310 nm	≤0.4
	1550 nm	≤0.3
附加衰减/dB	侧压 (每10 cm光缆的压力为2000 N)	<0.005
	卷绕 (12倍缆径, 3圈, 5次)	<0.5
耐电压时间/min	样品长度≥5 m, 浸泡时间为24 h, 交流电压为15 kV	>5
温度循环	a: -20~60 ℃, 两个循环, 每个温度维持 4 h; b: 85 ℃, 维持168 h; c: -20~60 ℃, 两个循环, 每个温度维持4 h	
	整个过程中 (1310, 1550 nm) 光纤衰减变化≤0.1 dB (与20 ℃时比较), 且在试验结束后, 温度恢复至20 ℃时, 无残余附加衰减	

2 关键性能研究

2.1 额定破断力

2.1.1 理论分析

额定破断力是额定破断力架空型微束光缆的关键性能指标,指光缆断裂时的数值在一定区间内,以保证光缆能够在施工和使用过程中,遇到超高车辆顶挂等特殊情况时能够及时断裂,保障周边设施的系统性安全。光缆在满足额定破断力的同时,还需要具备一定的抗拉性能。因此,本文的首要难点是确定架空光缆额定破断力的下限。基于光缆结构,采用理论计算方法探究理论破断力的合理范围。

本文将光缆布放及使用过程中的拉伸力视为由光缆护套层与加强件共同承担,且两者在拉伸时同步拉伸,受力全过程中两者间无滑移。最大力值取 800 N,以模拟施工中的拉拽、牵引等操作对光缆造成的影响。受金具与光缆匹配要求的限制,光缆外径固定为 7.0 mm,壁厚为 1.4~1.6 mm,外护套材料采用高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE)。根据 T/CAICI 7—2018《光缆用黑色聚乙烯护套料标准》,采用 HDPE 的最低抗拉强度 20 MPa 及最高弹性模量 1 400 MPa

进行理论计算,得出架空光缆在极限拉伸 0.667% 应变下相应破断力的下限。

光缆中护套实际受力面积为

$$S = \pi \times \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} - d \right)^2 \right] \tag{1}$$

式中: S 为光缆护套实际受力面积, mm²; D 为光缆外径,取 7.0 mm; d 为光缆壁厚,取 1.4 mm。

护套理论破断力为

$$F_1 = S \times E_1 \tag{2}$$

式中: F_1 为护套材料的理论破断力, N; E_1 为护套材料的最低抗拉强度,取 20 MPa。

采用最高弹性模量进行计算,护套材料在最大应变时可承受的拉伸力为

$$F_2 = S \times E_2 \times \varepsilon \tag{3}$$

式中: F_2 为护套在最大应变时可承受的拉伸力, N; E_2 为护套的最高弹性模量,取 1 400 MPa; ε 为护套的最大应变,取 0.667%。

根据 GB/T 24202—2021《光缆增强用碳素钢丝》,金属增强件的弹性模量不小于 186 GPa。因此,本文中金属加强件的弹性模量 (E_3) 取 190 GPa。在给定的安全施工力值范围 ($F_{\max}$) 为 800 N 时,光缆所受到的拉伸力将由护套与加强件共同承担;在考虑护套经拉伸后能够承受的最大力值的

基础上, 剩余部分应由加强件完全承担。因此, 加强件所受到的力为

$$F_3 = F_{\max} - F_2 = 2 \times \pi \times R_i^2 \times E_3 \times 1\,000 \times \varepsilon \quad (4)$$

式中: F_3 为加强件所受到的力, N; R_i 为加强件的半径, mm。

将 $F_{\max}=800\text{ N}$ 代入公式(4), 可推导出

$$R_i = \sqrt{\frac{800 - F_2}{2 \times \pi \times E_3 \times 1\,000 \times \varepsilon}} \quad (5)$$

根据计算出的加强件半径, 得出其理论破断力为

$$F_4 = 2 \times \pi \times R_i^2 \times E_4 \quad (6)$$

式中: F_4 为加强件的理论破断力, N; E_4 为金属加强件的最低抗拉强度, 取 1900 MPa 。

嵌入加强件后, 护套的截面积会略微减小。护套的截面积减小后的理论破断力为

$$F_5 = (S_1 - 2 \times \pi \times R_i^2) \times E_1 \quad (7)$$

式中: F_5 为护套截面积减小后的理论破断力, N; S_1 为护套的截面积, mm^2 。

嵌入加强件后护套与加强件能够提供的理论最低破断力(F)为

$$F = F_4 + F_5 \quad (8)$$

由上述过程可计算出 R_i 为 0.2676 mm , 据此进行加强件选型, 所选加强件的 F_4 为 854.5616 N , 故 F 为 1338.166 N 。考虑到外护套厚度、加强件直径、微束管光单元套管外径等尺寸在制造过程中容许的误差对光缆破断力的影响, 以及阻水带等其余部件提供的额外破断力增值, 最终修正本文中的 F 为 1350 N 。

根据绝大部分老旧线路上设备与线路杆等基础设施的承力极限, 如光缆在受到超过 2000 N 的力后仍能够保持完整, 不会对周边基础设施造成连带破坏, 确定额定破断力架空型微束光缆 F 的上限为 2000 N 。因此, F 的范围为 $1350\sim 2000\text{ N}$ 。

2.1.2 增强件的选型

根据上述理论计算, 增强件的破断力下限为 854.5616 N , 以满足额定破断力要求。考虑到最大破断力 2000 N , 且护套材料及内部阻水材料也会承受一定的力, 为给生产与测试留出足够的冗余度, 保证体系具有较强的鲁棒性, 将最大破断力设定为 1800 N , 此时对应增强件的最大破断力为 1316.6 N 。本文的光缆结构中存在两根增强件, 且在理想状态下两者受力相当并共同分担所受外力, 故最终将两根增强件的破断范围设定为 $900\sim 1300\text{ N}$, 单根破断力范围为 $450\sim 650\text{ N}$ 。

在结构设计阶段, 考虑到整体尺寸的局限

性, 以及微束管与护套之间需要具备一定的空间, 在最大芯数(96 芯)中, 最大壁厚仅为 1.5 mm 。为避免增强件嵌入护套后出现裸露等现象, 增强件尺寸需要控制在 0.8 mm 以内。在后续的增强件选型阶段, 为确保架空光缆整体的弯曲及卷绕性能, 未采用传统光缆开发中常用的钢丝等质地较硬且易出现形变的增强元件, 而质地较软非金属材料的尺寸在小于 0.8 mm 时, 也难以达到其破断力。因此, 参照 YB/T 098—2012《光缆增强用碳素钢绞线》, 增强件最终选用既满足破断力要求又具备优异弯曲性能的钢绞线, 其主要技术指标见表 2。

表 2 增强件的主要技术指标

Tab.2 Main technical requirements of strength member

参数	技术要求
直径/mm	<0.8
弹性模量/GPa	≥ 190
钢绞线的总破断力/N	500 ± 50

2.2 耐压性能

结合光缆的环境需求, 护套的耐受电压相较于 GB/T 17737.106—2018《同轴通信电缆 第 1-106 部分: 电气试验方法 电缆护套的耐电压试验》中的要求更高。耐压试验要求对比见表 3, 试验原理见图 2。

表 3 耐压试验要求对比

Tab.3 Demand comparison of withstand voltage test

项目参数	技术要求	
	同轴通信电缆	额定破断力架空型微束光缆
试样长度/m	无要求	>5
浸泡时间/h	1	24
交流电压/kV	0.8~5	15
维持时间/min	1~2	>5

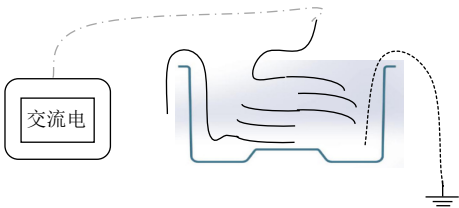


图 2 耐压试验原理图

Fig.2 Schematic diagram of withstand voltage test

试验开始前, 常温常压下将样品在纯水中浸泡 24 h , 取长度至少为 5 m 的样品, 在 15 kV 的交

流电环境中耐受不小于 5 min。本文初期选用常规 HDPE 护套材料,满足相关机械性能需求的同时,又根据 MOYANO M A 等^[5]的研究,在 HDPE 护套材料中通过添加辅料等方式对阻燃性能或

耐压性能进行改性,为备后续研究。

样品制备后,对其进行交流电耐压测试,发现光缆多处被击穿。光缆的两处电压击穿部位见图 3。

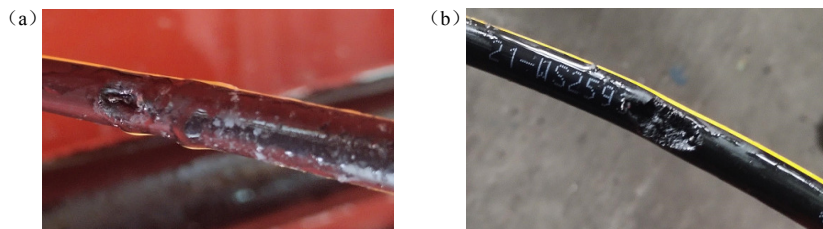


图 3 光缆的电压击穿部位: (a) 击穿部位 1; (2) 击穿部位 2

Fig.3 Voltage breakdown part of optical cables: (a) Breakdown part 1; (2) Breakdown part 2

为避免实际使用过程中光缆护套被交流电击穿,保证线路整体的安全性,本文针对初期确定的光缆结构在击穿试验中遇到的实际问题,进行归因分析。

护套被击穿的位置靠近加强件外侧,经实际测量,该处壁厚仅为 1.4 mm,在特殊情况下容易被交流电击穿,导致损伤。针对上述情况,在保证侧压性能的前提下,增大加强件处的壁厚,同时重新设计模具,在保证加强件内侧不裸露的情况下,减小加强件孔的中心距,以增大加强件外侧壁厚。此外,前期浸泡处理过程中,护套材料不够密实,导致水分渗入内部,影响光缆护套的憎水性能。憎水性能良好时,护套上的小水珠很难连成片,能够保持光缆表面干燥;憎水性较差时,水珠将会覆盖在护套表面^[6],同时材料的介电系数较低,使其无法承受 15 kV 交流电压。因此,亟需开发具有更高密实度、高介电系数,以及性能更优的护套材料。

结合上述分析,本文提出以下改进方向:①在保证内部空间的条件下,壁厚增加的范围有限,可将壁厚由 1.4 mm 增大至 1.5 mm,经验证,壁厚仅增加 0.1 mm 无法从根本上解决护套被击穿的问题;②减小内模中心距,可将钢绞线外侧壁厚由原来的 0.4 mm 增大至 0.7 mm,但护套仍然会出现被击穿的现象;③在原有材料的介电性能和体积电阻上,增加材料的介电性能和熔体强度。已有研究^[7]证实,可通过添加助剂,降低护套材料中空间电荷积累的速率,提升材料的击穿场强性能,但需要额外对改性后材料的混合性能及熔融情况进行研究,以规避可能存在的熔融不完全等因素对光缆质量造成的负面影响。

根据上述技术路线对材料进行改进,选取

5 个试样,对其进行介电强度测试,结果见表 4。

表 4 护套试样的介电强度

Tab.4 Dielectric strength of sheath material samples

试样序号	介电强度/(MV·m ⁻¹)
试样 1	33.2
试样 2	31.8
试样 3	32.2
试样 4	32.9
试样 5	31.5

由表 4 可知,各护套试样的介电强度均大于 31 kV·mm⁻¹。根据 T/CAICI 7—2018,常规聚乙烯护套材料的介电强度仅为 25 kV·mm⁻¹。经改进后,护套材料在交流 15 kV 电压下,并未出现击穿现象。

3 光缆性能验证

3.1 拉伸及破断性能验证

根据需求和 GB/T 7424.21—2021《光缆总规范 第 21 部分:光缆基本试验方法 机械性能试验方法》的相关规定,对光缆的拉伸及破断性能进行验证。光缆附加衰减与光纤应变随负载变化的曲线见图 4,光缆破断性能验证见图 5。其中, D 为光缆外径。

由图 4 可知,在安装力为 150 N 的条件下,光纤应变为 0.16%;在最大力值为 400 N 的条件下,光纤应变为 0.52%;试验全过程,附加衰减保持稳定,整体曲线平滑,表明内部加强件与护套能够对光纤起到足够的保护作用。由图 5 可知,破断力为 1790 N,在 1350~2000 N 之间完成脆断,达到了额定破断力的要求,实现了满足拉伸条件的同时又满足其破断要求,从而满足线路运行的合

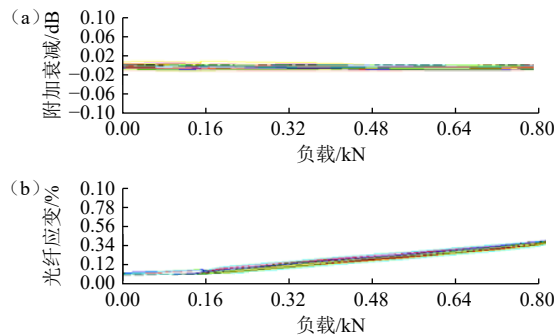


图 4 光缆附加衰减及光纤应变随负载变化的曲线:
(a) 附加衰减; (b) 光纤应变

Fig.4 Curves of additive attenuation and fiber strain with load: (a) Additive attenuation; (b) Fiber strain

理性及安全性。综上,该光缆的拉伸及破断结果满足设计要求。

3.2 其他机械性能验证

根据 GB/T 7424.21—2021 及使用规范,对该光缆压扁、冲击、卷绕及扭转等机械性能进行试验验证,结果见表 5。

由表 5 可知,该光缆的机械性能满足技术要求和实际使用要求。

3.3 环境性能验证

根据 GB/T 7424.22—2021《光缆总规范 第 22 部分:光缆基本试验方法环境性能试验方法》,对光缆进行温度循环及渗水试验。对于相对特殊的气密、耐交流电压试验,则模拟应用场景实际情况进行。为确保试验的稳定性,本文选用 24 个试样,每个试样的长度均超过 20 m,先后对其进行试验,结果见表 6。

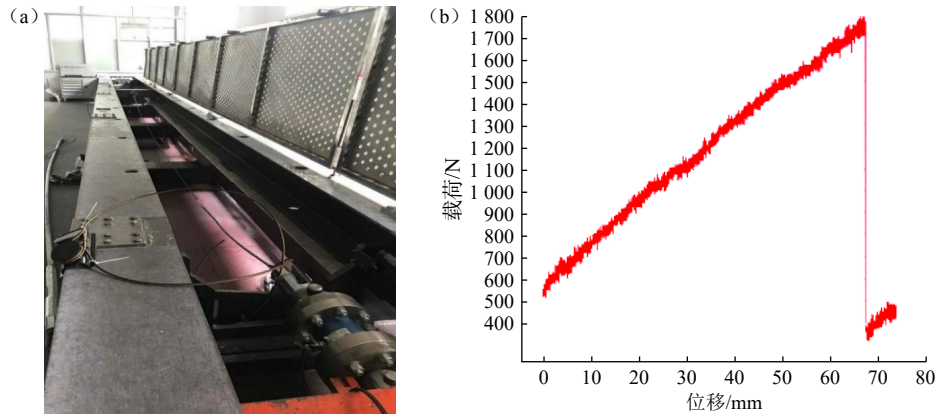


图 5 光缆破断试验验证: (a) 破断性能测试; (b) 试验结果

Fig.5 Cable breakage test verification: (a) Breaking performance test; (b) Test results

表 5 机械性能试验结果

Tab.5 Test results of mechanical properties

测试项目	试验条件	附加衰减/dB		
		设计指标	试验中测试结果	试验后测试结果
压扁	每10 cm的压力为2000 N, 保载时间为10 min	≤0.05	0.010	0.004
冲击	冲击能量为10 J, 冲击高度为1 m	≤0.05	0.008	0.007
卷绕	弯曲直径为12 D, 弯曲3圈, 进行5次	≤0.05	0.028	0.011
扭转	扭转长度为1 m, 扭转角度为±180°, 进行5次	≤0.05	0.007	0.004

表 6 环境性能试验结果

Tab.6 Test results of Mechanical properties

测试项目	项目参数	设计指标	测试结果
温度循环	每10 cm的压力为2 000 N, 保载时间为10 min	附加衰减≤0.05 dB	0.010 dB (试验中) 0.004 dB (试验后)
渗水	水柱为1 m, 长度为3 m	光缆末端24 h内不渗漏	无渗漏
气密性	气压为30 kPa, 长度为1 m, 试样数量为5根	光缆末端48 h内无渗漏	未渗漏
耐电压	交流电压为15 kV, 浸泡时间≥24 h, 样品长度>5 m, 时间>5 min	试验期间护套无击穿	未击穿

由表6可知, 24个试样均未出现击穿, 且每个试样均在15 min主动停止电压供电, 表明光缆既可以满足其环境性能要求, 又可以有效减少其在敷设过程中对低温^[8]、耐电压^[9]等性能所需要的额外设置。

4 结束语

本文研制的额定破断力架空型微束光缆通过了机械、环境等性能试验验证, 表明该光缆在具备抗拉条件的同时, 可以在额定破断力为1350~2000 N的范围内完成脆断, 能够满足较低及老旧线路杆的敷设条件, 在线路遭遇外力时, 可以保证线路杆与其他线路的安全性, 降低线路维护成本。此外, 该光缆出色的机械性能及环境性能, 同样能够适用于农村、山区等敷设资源紧张的场景, 可实现与电力线路杆的挂靠, 能够降低线路敷设成本。在未来, 该光缆也可以配合传感光缆, 实现老旧电力线路运行状态检测, 以及环境态势实时感知等功能。

参考文献 References

- [1] MAN H W, HAN G J, ZHANG G M, et al. Discussion on the application of overhead power communication optical cable[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1654: 012090.
- [2] 满运锋, 申京, 李馨春, 等. 光缆路由普查方法分析与研究[J]. *光通信研究*, 2024(2): 75-79.
MAN Y F, SHEN J, LI X C, et al. Analysis and research on optical cable route survey method[J]. *Study on Optical Communications*, 2024(2): 75-79.
- [3] 麻宁杰, 王华昕, 汤波, 等. 新型电力系统下架空输电线路受极端天气影响的风险评估与运维决策[J/OL]. [2025-05-18]. 电测与仪表. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240529.1353.002.html>.
MA N J, WANG H X, TANG B, et al. Risk assessment and operation and maintenance decision of overhead transmission lines affected by extreme weather in novel power system[J/OL]. [2025-05-18]. *Electrical Measurement & Instrumentation*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240529.1353.002.html>.
- [4] CHANG E S. Research on application of optical fiber composite overhead phase line in medium and low voltage overhead transmission line[J]. *Academic Journal of Engineering and Technology Science*, 2023, 6(4): 060408.
- [5] MOYANO M A, PARÍS R, MARTÍN-MARTÍNEZ J M. Viscoelastic and adhesion properties of hot-melts made with blends of ethylene-co-n-butyl acrylate (EBA) and ethylene-co-vinyl acetate (EVA) copolymers[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019, 88: 34-42.
- [6] 丁道齐. 电应力作用下 ADSS 光缆损伤机理及对策[J]. *电力系统通信*, 2001(9): 1-12.
DING D Q. ADSS cable damage mechanisms on the electrical stress action and counterplot[J]. *Telecommunications for Electric Power System*, 2001(9): 1-12.
- [7] CHEN Y, ZOU H W, LIANG M, et al. Melting and crystallization behavior of partially miscible high density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (HDPE/EVA) blends[J]. *Thermochimica Acta*, 2014, 586: 1-8.
- [8] 党乐, 郭金刚, 崔亚茹, 等. 架空输电线路金具材料研究现状及发展[J]. *电气技术*, 2022, 23(4): 1-6.
DANG L, GUO J G, CUI Y R, et al. Research status and development of power fittings materials for transmission lines[J]. *Electrical Engineering*, 2022, 23(4): 1-6.
- [9] 张平. 配电线路绝缘导线雷击断线的防范[J]. *上海电气技术*, 2024, 17(2): 20-22.
ZHANG P. Prevention of lightning disconnection of insulated conductors of distribution lines[J]. *Journal of Shanghai Electric Technology*, 2024, 17(2): 20-22.

收稿日期: 2024-06-27

修回日期: 2024-11-14

作者简介:



朱鹏宇 ZHU Pengyu
1993—, 男, 工程师
主要从事光缆研发工作
E-mail: zhupy@ztt.cn

Development of Overhead Micro-Beam Optical Cables with Rated Breaking Force

ZHU Pengyu, MIAO Xiaoming, MIAO Weiwei, ZHAO Jing, LIN Jingtao
(Jiangsu Zhongtian Technology Co., Ltd., Nantong 226463, China)

Abstract: In order to apply laying conditions of communication lines in old line pole area, and ensure safety of the whole line, overhead micro-beam optical cables with rated breaking force were developed by means of structural design, theoretical calculation, material selection and test verification. Mechanical properties such as tensile and breaking strength were verified, as well as environmental performance. Results showed that overhead micro-beam optical cables with rated breaking force could meet laying conditions of old line rods, and had breaking capacity of rated breaking force in the range of 1 350 N to 2 000 N, which could effectively avoid the risk of pole collapse due to fiber optic cable implication when old poles encountered external forces such as vehicle roof hanging, so as to protect the entire line facilities from being damaged.

Key words: line pole; rated breaking force; overhead optical cables; line laying; top hanging