

# 高落差超高压电缆的设计与敷设技术

张正东 荣乐 叶磊

土耳其得美电缆有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i1.19047

**[摘要]** 为满足山地输电、抽水蓄能电站等对高落差超高压电缆提出的基础要求,以500KV平铝套加光纤单元结构大截面高压电缆为研究重点,阐述高落差超高压电缆结构选型设计要点,分析光纤单元防弯折打扭优化措施,剖析与皱纹铝护套相比,平滑铝带在外径减小、载流量提升、间隙放电等方面存在的技术优势,同时明确该结构电缆不适合高落差场景下的90°弯曲敷设及对应规避方案。梳理重点试验验证项目,根据竖井等高落差场景敷设要求,制定适配高落差超高压电缆设计和施工方案。研究表明,平铝套结构配合优化的光纤布置,能确保通信稳定性,有效提升电缆载流能力,缩减外径,结合针对性敷设工艺可满足高落差场景电气性能及机械安全需求。

**[关键词]** 超高压电缆; 高落差; 平铝套; 光纤单元; 敷设技术

**中图分类号:** TM247 **文献标识码:** A

## Design and Installation Technology of High-Voltage Cables for Steep Drop Sections

Zhengdong Zhang Le Rong Lei Ye

Turkish Demirer Kablo Co., Ltd.

**[Abstract]** To meet the basic requirements for high-drop ultra-high-voltage cables in mountainous power transmission and pumped storage power stations, the focus is placed on 400KV high-voltage cables with a flat aluminum sheath and fiber-optic unit structure. This paper elaborates on the key design points for selecting the structure of high-drop ultra-high-voltage cables, analyzes optimization measures for preventing bending and twisting of the fiber-optic unit, and compares the technical advantages of smooth aluminum tape over corrugated aluminum sheaths in terms of reduced outer diameter and increased current-carrying capacity. It also clarifies that this structure of cable is not suitable for 90° bending installation in high-drop scenarios and provides corresponding avoidance schemes. Key experimental verification projects are outlined, and design and construction schemes for adapting high-drop ultra-high-voltage cables are formulated based on the installation requirements in high-drop scenarios such as shafts. Research indicates that the flat aluminum sheath structure, coupled with optimized fiber-optic layout, can ensure communication stability, effectively enhance the current-carrying capacity of the cable, reduce the outer diameter, and meet the electrical performance and mechanical safety requirements in high-drop scenarios when combined with targeted installation techniques.

**[Key words]** Ultra-high voltage cable; Large height difference; Smooth aluminum sheath; Optical fiber unit; Installation technology

### 引言

自国家推行“双碳”发展目标以来,山地风电、抽水蓄能电站等新能源项目获得飞速发展,作为能量传输重要载体,高落差超高压电缆的应用场景也越来越广泛<sup>[1]</sup>。所谓高落差,通常是结合电缆敷设场景、电压等级、电缆结构特性以及行业技术规范的约定俗成,核心指向电缆敷设路径中两点间的垂直高度差超出常规敷设允许范围的情况。高落差超高压电缆必须承受重力拉力和复杂环境侵蚀,还需兼顾在线监测和电力传输功能,对结

构设计和敷设技术要求极为严苛<sup>[2]</sup>。常规皱纹铝护套电缆在高落差、大截面场景下,极易出现光纤弯折易受损、载流量受限及外径偏大等问题,对工程应用效能产生严重制约。500KV平铝套加光纤单元结构大截面高压电缆突破传统技术瓶颈,通过结构创新,具有空间适配性、光纤防护和载流能力等优势,同时需规避高落差场景下的90°弯曲敷设风险。为此,该研究基于500KV平铝套加光纤单元结构大截面高压电缆结构类型,剖析高落差超高压电缆技术要点,聚焦皱纹铝护套、平铝套的性能差异,

提出竖井敷设技术, 以为高落差输电工程电缆应用提供实践支撑。

### 1 结构选型设计

超高压电缆结构如图1所示, 有紧压圆形、分割导体之分, 对于大落差超高压电缆的设计来说, 应该重视对电缆的热力学特性进行考虑, 实际设计过程中主要依据的是电缆金属护套结构以及缓冲层展开选型工作<sup>[3]</sup>。对于大落差超高压电缆的设计来说, 应该重视对电缆的热力学特性进行考虑, 实际设计过程中主要依据的是电缆金属护套结构, 缓冲层以及光纤单元的配置展开选型工作。为此, 需要重点攻克两大技术难点: 一是优化光纤单元的结构设计, 以解决其易于弯折受损的问题, 确保状态监测信号的长期可靠性; 二是采用平铝套结构, 凭借其优异的贴合性从根本上杜绝间隙放电的风险。通过对这些关键维度的统筹设计, 才能最终实现电缆系统安全、稳定、长寿命运行的目标。



图1 高落差超高压平滑铝套+光纤单元结构电缆

(1) 缓冲层。高落差超高压电缆运行期间, 由于缓冲层可以吸收绝缘膨胀量, 因此需要根据电缆在运行期间的导体温度, 利用热路方程式求得缓冲层的绝缘温度后, 再依据热平衡原理计算得到绝缘膨胀值。交联聚乙烯在不同温度下的密度见图2。

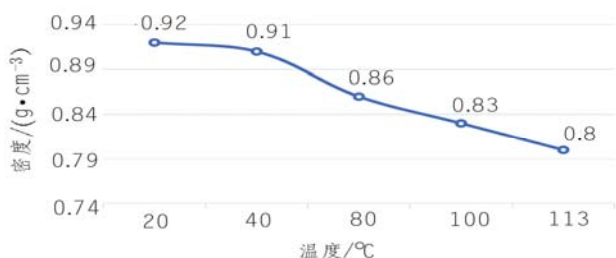


图2 交联聚乙烯密度数值

根据热量守恒原则, 绝缘径向膨胀量计算数值最大是1.0mm。所设计500kV平铝套加光纤单元结构借助复合缓冲层缓解绝缘径向膨胀。和平洞隧道场景有所差异, 高落差电缆运行环境往往伴随缓冲层摩擦力, 要求交联线芯必须提升抗滑移性, 缩减缓冲层的厚度, 同时有效缩减缓冲层间隙。

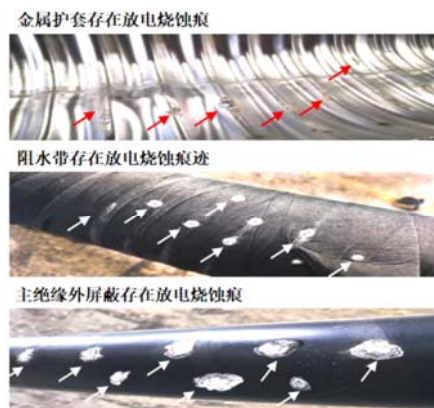


图3 皱纹金属护套结构缓冲层烧蚀

(2) 金属护套结构。传统设计的皱纹铝护套与缓冲层接触时, 皱纹铝护套内侧的波谷和波峰处极易与缓冲带形成微小的气隙<sup>[4]</sup>。特别是在电缆弯曲时, 这些气隙可能会被放大, 成为局部放电的起始点。在高电压场强作用下, 间隙内空气被电离产生间隙放电, 放电产生的高温会灼烧电缆外屏蔽层, 长期累积会导致外屏蔽破损、绝缘性能下降, 最终引发电缆击穿, 严重影响工程安全运行。虽然通过精湛的工艺(如半导体填充技术)可以缓解, 但平铝套从结构上就根除了这一风险, 其采用光滑铝带纵包焊接工艺, 表面平整密实, 与缓冲层贴合紧密, 无明显间隙, 从根本上杜绝了间隙放电风险。

高落差超高压电缆设计中, 作为电缆电磁屏蔽、机械防护、径向阻水性关键部件, 金属护套结构形式会对电缆性能产生直接影响, 综上所述因此优先考虑平滑铝护套结构, 且与皱纹铝护套相比, 500kV平铝套选择光滑铝带纵包焊接工艺, 除了杜绝了间隙放电的风险外还具有机械适配性、提升载流量和减小外径等优势<sup>[5]</sup>。其中, 载流量提升上, 平铝套结构密实、表面光滑, 与皱纹铝护套相比, 热传导系数提高15-20%, 显著降低护套热阻。外径减少上, 平铝套不需要预留褶皱空间, 与皱纹铝护套相比, 同规格电缆外径可缩小5-8%。此外, 平铝套光滑表面有助于降低敷设摩擦阻力, 有效减少损伤护套与内部结构。

(3) 光纤单位防弯折打扭设计与生产。作为在线监测电缆的关键, 光纤单元集成在高落差场景下拉伸、弯曲会出现弯折打扭现象, 对通信稳定性产生影响。500kV平铝套电缆选择螺旋布置与防护约束联合设计, 在光纤单元螺旋梳绕之前需确保电缆线芯应力得到有效释放, 可通过交联生产工艺和烘房脱气工艺进行有效控制, 优先考虑立塔生产线进行交联的生产, 使导体的内应力有足够空间得到释放, 脱气工序应合理地将温度控制在70℃左右, 使线芯的绝缘应力得到充分释放, 线芯应力的释放避免了光纤生产过程中, 因线芯扭力而出现不同角度的旋转问题情况, 造成光纤单元随之发生弯折及扭结的风险<sup>[6]</sup>。其中, 每根光纤单元管的两侧分别使用两根直径大于光纤单元管直径的铜丝对光纤予以保护, 且梳绕节距不小于电缆直径的4-5倍, 以螺旋方式缠绕在缓冲层外侧, 并在光纤单元外侧缠绕半导体绑带以固定光纤单元防止施工及放线过程中的位移, 在半导体绑带

带外继续缠绕缓冲层,避免平铝套在缩径过程中挤压光纤单元带来的风险。

(4)平铝护套的缩径参数需结合1.1的热膨胀量进行合理设计,既能满足电缆运行过程中的热膨胀释放导致的外径增大,又能有效避免因平铝护套与电缆线芯间隙过小而导致光纤单元受力。

(5)平铝护套与HDPE护套之间选择共挤热熔胶,增强HDPE护套与平铝护套的黏附性,提升平铝护套的抗弯曲性能。

(6)成品盘具尺寸的选择需满足该结构电缆的最小弯曲半径,避免因弯曲半径过小而导致光纤单元受力弯折以及平铝套的起皱。

(7)关于电缆施工时,电缆弯曲半径不小于电缆直径的25D。

## 2 试验验证

### 2.1 试验标准依据

500kV平铝套加光纤单元电缆试验验证结合IEC 62067《额定电压150kV(U<sub>m</sub>=170kV)以上至500kV(U<sub>m</sub>=550kV)挤出绝缘电力电缆及其附件——试验方法和要求》,IEC 60794-1-2《光缆 第1-2部分:总规范——光缆基本规格》和GB/T 35535-2017《额定电压500kV(U<sub>m</sub>=550kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件》,GB/T 7424.1《光缆 第1部分:总则》为依据,同时兼顾长期运行性能、电气性能和机械性能验证,契合中国及国际标准的要求。

### 2.2 电气性能试验

依据标准开展电气性能试验,重点考核产品一致性。局部放电试验按要求,于1.75U<sub>0</sub>额定电压下展开,规定局放量≤5pC,施加于成盘电缆的电压为2.5U<sub>0</sub>,持续0.5h无击穿。非金属护套直流耐压试验依据标准,施加电压为25KV,持续1min无击穿,确保护套和绝缘系统密封性。对于热循环电压试验,弯折电缆为U型,加热导体到许可温度以上5~10℃,8h后自然冷却,循环20次后,施加交流电压2U<sub>0</sub>无击穿<sup>[7]</sup>。此外,冲击电压试验按标准施加1675kV冲击电压,正负极性各10次无闪络,以此验证绝缘系统对瞬时过电压耐受能力。

### 2.3 机械性能和光纤专项试验

根据高落差场景需求,实施拉伸性能、弯曲性能和防滑脱试验。遵循标准GB/T 7424.1《光缆第1部分:总则》和IEC 60794-1-2《光缆 第1-2部分:总规范——光缆基本规格》要求严格控制弯曲半径,反复弯曲30次,对光线衰减变化进行检查,要求衰减增量≤0.1B/Km。拉伸试验施加相当于电缆1.5倍的拉力,60min后的导体电阻变化率≤2%,且光纤无明显弯折。光纤专项试验分为机械稳定性试验、衰减特性试验,-40℃~85℃温度区间的光纤衰减波动≤0.05dB/km。拉伸、弯折试验后,光纤接头无松动现象,且通信速率稳定,在线监测功能可靠,对成品的两端均进行光纤衰减的测试,测试均合格。

### 2.4 平铝套和皱纹铝套性能对比试验

以对比试验的方式验证平铝套优势,采用同截面皱纹铝护套电缆和500KV平铝套,相同环境下测试载流量和外径,采用稳

态升温法,通过调节电缆负载电流,直至导体温度达到额定稳定温度(90℃),记录此时的电流值作为电缆额定载流量。核心计算公式:载流量提升率(%)=(试验组额定载流量-对照组额定载流量)/对照组额定载流量×100%。

导体温度测试采用光纤测温法,在两组电缆导体中心嵌入测温光纤,施加恒定载荷电流1580A,待温度稳定后(连续30min温度波动≤0.5℃)记录导体温度值。核心计算公式:导体温度下降值(℃)=对照组稳定温度-试验组稳定温度。测试数据显示,1580A恒定载荷下,对照组皱纹铝护套电缆导体稳定温度为T<sub>1</sub>,试验组平铝套电缆导体稳定温度为T<sub>2</sub>,经计算T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>=6~8℃。导体温度的降低可有效延缓绝缘层老化速度,延长电缆使用寿命,同时降低电缆运行过程中的能耗,提升运行安全性与经济性。

与皱纹铝护套相比,平铝套电缆载流量提高9.2%,1580A载荷下,平铝套电缆导体温度下降6~8℃。外径测量表明,平铝套电缆外径缩减6.3%,且重量下降7.1%,由此验证平铝套在空间适配性、载流能力方面的优势。

## 3 竖井敷设技术

### 3.1 竖井敷设技术要求

该400kV平铝套加光纤单元结构高压电缆不适合高落差场景下的90°弯曲敷设:平铝套为光滑焊接结构,90°弯曲会导致铝带受力不均产生起皱、开裂,破坏护套完整性及电磁屏蔽性能;同时90°弯曲会使内部光纤单元承受剧烈弯折力,超出螺旋结构缓冲范围,引发光纤弯折打扭、衰减量骤增甚至断裂。该结构成品电缆的标准弯曲半径为不小于22D,敷设时弯曲半径不小于25D。

为规避扭转应力对电缆及光纤的损伤,可在电缆牵引头处安装360°可旋转装置,牵引绳牵引电缆过程中,电缆可根据自身应力与扭力自由调整方向,避免扭力积聚导致内部光纤弯折、铝套变形。作为高落差电缆敷设的重要场景,竖井落差大、空间窄,施工难度高,除控制弯曲参数外,还需严控电缆侧压力,转弯处侧压力≤3kN/m,同时采取可靠防滑措施,防止电缆因重力滑落;敷设温度应≥0℃,在支架下方架设聚乙烯波纹管,避免电缆与支架碰撞损伤。

### 3.2 前期准备

竖井敷设前,勘察、清理电缆路径,严格检查支架、竖井内壁有无尖锐凸起,防腐处理支架,安装防护套。针对电缆重量和落差,要求敷设设备额定载荷≥电缆自重的2倍,设备开机率必须≥95%,以缩短设备关停调整时间。检查电缆外观,并开展绝缘测试,提前规划电缆敷设点位和顺序,间隔2~3m加设一处防滑支架,电缆转弯位置加设导向滑轮,严格控制转弯角度,确保弯曲半径满足技术要求。

### 3.3 敷设施工工艺

为确保500kV平滑铝套光纤单元电缆的敷设质量与安全,本次施工采用自上而下的分段敷设方案。核心宗旨是避免“冲击载荷”与“过大的侧壁压力”,关键在于实施全程可控的“慢速、平稳”放线工艺。

### 3.3.1 放线速度控制

推荐将放线速度严格控制在5米/分钟至15米/分钟的范围。该低速方案基于大量工程实践经验,能有效抑制速度突变产生的动态效应,是保护电缆及内部光纤单元的基础。

### 3.3.2 核心力学参数控制

**动态拉力控制:** 过快的启动、停止或速度波动会引发显著惯性力(冲击载荷),其值可能远超静态拉力,极易损伤导体、绝缘屏蔽及关键的光纤单元。因此,必须在牵引端实时监测牵引力,确保其始终低于电缆及光纤单元的最大允许拉力。

**侧壁压力控制:** 电缆经过弯道或滑轮时,运行速度越高,产生的向心力越大,导致电缆对侧壁的压迫力(侧壁压力)呈倍数增长。过高的侧壁压力会挤压平滑铝套,致使内部光纤产生微弯或宏弯衰减,严重时可能造成永久性损伤。控制速度是限制侧壁压力的直接有效手段。

### 3.3.3 结构特性针对性措施

针对500kV平滑铝套电缆的结构特点,敷设时须严格防止电缆扭转,以避免内部光纤单元因“打扭”而受损。应利用专用凹槽等工具引导电缆按预设路径和位置集中弯曲,确保弯曲应力由光纤单元自身的螺旋结构有效吸收。

### 3.4 敷设后检测运维

敷设工作结束后,实施绝缘电阻测试、交流耐压试验和光纤通信测试,以此验证高落差超高压电缆通信稳定性和电气性能。定期展开运维监测,通过光纤单元采集电缆温度、振动等数据,实时掌握高落差电缆运行状态,针对高落差位置重点检查电缆护套完整性和固定支架的稳定性,第一时间处理异常情况,为电缆长期安全运行提供保障。

## 4 结语

本研究以500kV平滑铝套加光纤单元结构大截面高压电缆为研究重点,阐述高落差超高压电缆结构选型设计要点,分析光纤

单元防弯折打扭优化措施,剖析与皱纹铝护套相比,平滑铝带在外径减小、载流量提升、避免间隙放电等方面存在的技术优势,明确该结构电缆在高落差场景的敷设禁忌及应对方案。500kV平滑铝套加光纤单元结构大截面高压电缆通过结构创新,有效解决了高落差场景下传统电缆的载流量不足、外径偏大、光纤易损伤等技术难题,配合360°可旋转牵引装置、22D弯曲半径控制等针对性敷设工艺,可规避90°弯曲及扭转损伤风险。本文通过系统阐述该类型电缆的结构选型设计、试验验证要点及竖井敷设技术,构建了高落差超高压电缆的设计与施工一体化技术体系。试验数据与工程实践表明,该技术方案可满足抽水蓄能电站等复杂高落差场景的应用需求,兼顾电力传输效率、运行安全性与运维便捷性。

### [参考文献]

- [1]夏定友,刘守亮,何栋,等.高落差超高压电缆设计及敷设技术[J].四川水力发电,2025,44(5):62-65.
- [2]程明亮,张亚,詹陶,等.高落差大截面高压电缆的敷设技术研究[J].通信电源技术,2023,40(4):64-66.
- [3]张福强,程诗明,王超.抽水蓄能电站高落差500 kV电缆敷设工艺[J].水电站机电技术,2022,45(11):97-98.
- [4]CIGRE技术手册TB889[M].国际大电网会议,2023:5-6.
- [5]詹卫国.垂直高落差大截面电缆敷设施工方法[J].电力系统装备,2021(1):92-95.
- [6]程明亮,张亚,詹陶,等.110kV单芯交联聚乙烯绝缘电缆的热膨胀作用分析[J].设备管理与维修,2024(22):61-63.
- [7]赵瑞民.抽水蓄能电站高落差竖井环境下高压电缆敷设方案[J].电线电缆,2022(5):51-54.

### 作者简介:

张正东(1988--),男,汉族,江苏南通人,中级工程师,本科,单位土耳其得美电缆有限公司,研究方向:高压电缆设计与制造。