

# 光伏发电系统用直流电缆生产工艺探讨

徐勇

江苏赛德电气有限公司 江苏高邮 225651

DOI:10.12238/ems.v7i7.14296

**[摘要]** 本文围绕光伏发电系统直流电缆展开研究。在性能要求上,分析了绝缘性能与机械性能,如额定电压、载流能力、绝缘电阻及抗拉、耐磨、柔韧、耐候性等指标。在生产工艺优化方面,介绍了核心材料针对性改良,包括选材优化与实验验证,以及多层共挤与精密温控技术。最后对工艺进行展望,指出多层共挤将实现更多层结构、研发新型材料,精密温控将升级,二者结合会更紧密,以提升电缆性能,推动行业发展。

**[关键词]** 光伏发电系统; 直流电缆; 生产工艺

## 一、光伏发电系统对直流电缆的性能要求分析

### (一) 绝缘性能

光伏发电系统中直流电缆作为连接光伏组件、汇流箱与逆变器等关键设备的媒介,其性能直接影响到系统运行的综合效率;在实践环节,光伏发电系统对直流电缆的性能要求首先体现在电气性能层面,强调光伏发电系统的直流侧电压从几百伏到上千伏不等,因此直流电缆的额定电压应当高于系统最高工作电压,以防止电压波动或雷击等情况下发生绝缘击穿;同时这类电缆还应当具备较强的载流能力以满足系统最大工作电流的要求,且要考虑温度、负载方式等因素对载流量的影响,因为过高的电流会导致电缆发热加速绝缘老化甚至引发火灾,所以在选择电缆时需根据系统电流、环境温度等条件通过查表或计算确定合适的电缆截面积。另外,绝缘电阻是衡量电缆绝缘性能的重要指标,光伏直流电缆应具有高绝缘电阻以防止漏电或短路事故发生,且绝缘电阻值需符合相关标准要求并在长期使用过程中保持稳定。

例如,某新能源公司在甘肃敦煌 100MW 光伏电站项目中,其直流系统电压最高达 1000V,因此选用额定电压 1500V 的交联聚乙烯绝缘直流电缆,该电缆通过 GB/T18480-2015 标准测试,在 20℃ 时绝缘电阻达到 150MΩ·km,远超标准要求的 100MΩ·km,有效防止了电压波动(实测最大电压波动幅度±5%)及雷击(当地年平均雷暴日 22 天)情况下的绝缘击穿。该系统最大工作电流为 200A,环境温度最高 40℃,根据 IEC60287 标准计算,选择 50mm<sup>2</sup> 的铜芯电缆,其载流量在 40℃ 时达 210A,满足系统需求,且运行三年后实测电缆表面温度仅 45℃,未出现因电流过高导致的绝缘老化现象。

### (二) 机械性能

在机械性能层面,光伏电站通常建设在户外,电缆在敷设过程中可能会受到拉伸、弯曲等机械力的作用,因此电缆应当具备足够的抗拉强度以承受敷设过程中的拉力,避免电缆受损;同时电缆在敷设和使用过程中可能会与地面、支架等物体发生摩擦,良好的耐磨性可以延长电缆的使用寿命,减少因磨损导致的绝缘损坏和短路风险;此外光伏电站的电缆敷设路径复杂,可能涉及转弯、穿管等操作,而柔韧性好的电缆将更加便于敷设和安装,能够减少安装过程中的难度和成本;最后光伏电站长期暴露在户外环境,受到阳光、雨水、风沙、紫外线等多种因素的影响,因此电缆应当具备良好的耐候性,能够抵抗紫外线辐射、臭氧侵蚀、高低温变化等,以保持稳定的电气性能和机械性能。

例如,上述光伏电站地处戈壁滩,电缆敷设路径包含 1.5km 的地面直埋段和 0.8km 的支架架空段,敷设时需承受最大 200N 的拉力,因此选用抗拉强度≥15MPa 的电缆,经现场拉力测试,电缆在 250N 拉力下未出现护套开裂现象。在耐

磨性测试中,模拟电缆与支架的摩擦(往复摩擦 5000 次,压力 5N),护套层磨损厚度仅 0.1mm,未暴露绝缘层;电缆敷设时需穿越 90° 弯管(弯曲半径为电缆直径的 10 倍,即 70mm),其柔韧性满足要求,安装效率较普通电缆提升 30%。此外,电缆经受-40℃至+90℃的高低温循环测试(100 次循环)后,绝缘电阻下降幅度仅 3%,耐候性符合 UL4703 标准要求。

## 二、光伏发电系统直流电缆生产工艺优化

### (一) 核心材料针对性改良

#### 1. 选材优化

在光伏发电系统中,直流电缆作为能量传输的关键部件,其生产工艺的优化至关重要,尤其是针对核心材料的针对性改良能够显著提升电缆性能和可靠性;在实践环节,工厂需要明确核心材料在电缆中的关键作用,因为直流电缆的核心材料如导体和绝缘材料直接影响着电缆的导电性、绝缘性等关键指标,所以改良核心材料是优化电缆生产工艺的核心环节。这要求工程师深入分析材料性能,通过专业的测试和研究详细了解核心材料在现有生产工艺中的各项性能指标,如导体的电阻率、绝缘层的耐压性能,找出这些性能指标中存在的不足,明确需要改良的方向和目标;基于此,根据性能分析结果有针对性地选择改良方法,比如若发现导体材料的电阻率过高影响电能传输效率,则可考虑使用更纯的原材料或优化材料的合金配比来降低电阻率,而对于绝缘层材料若耐压性不够,则可研究添加特殊的添加剂或改变材料分子结构来提高其耐压能力。

例如,基于上述的需求,某电缆厂为提升导体性能,将原纯度 99.95% 的电解铜导体改为 T2 无氧铜(纯度 99.97%),同步优化拉制工艺:采用碳化钨模具(硬度≥2300HV),将拉伸速度从 12m/s 降至 8m/s,并增加在线退火工序(退火温度 350℃,持续时间 20min),使改良后电阻率从  $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  降至  $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ,经 GB/T3048.4 测试,200A 电流下导体损耗较改良前减少 2.3%,年节约电能约 1.2 万 kWh/10km。绝缘材料方面,针对原 EVA 绝缘层(邵氏硬度 65A)工频耐压 1200V 的不足,在双螺杆挤出机(长径比 40:1,转速 300rpm)中添加 15% 纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(粒径 50nm,表面经硅烷偶联剂处理),通过正交试验确定最佳混炼温度 165℃,使改良后绝缘层工频耐压提升至 1500V,且在 1800V 电压下经受 1min 耐压测试无击穿,击穿场强达 32kV/mm(GB/T1408.1 标准要求≥25kV/mm)。

#### 2. 实验验证

在确定改良方法之后,工程师需要进行大量的试验和验证,期间可通过小批量生产试验测试改良后材料的实际性能是否达标,同时还要评估改良对生产工艺和其他环节的影响,确保改良不会带来生产成本过度增加、生产效率降低等新闻

题;在试验成功之后,需将改良后的材料与工艺逐步运用到大规模生产中,此环节需要建立严格的质量监控体系,对每一批次的电缆进行性能测验,以确保改良后的电缆质量可靠稳定,同时还要收集生产过程中的反馈信息,根据实施情况对改良方案进行进一步优化调整。此外,工作人员需要持续关注行业技术发展和市场需求变化,由于光伏发电产业技术的进步对直流电缆的性能要求会越来越高,因此工程师需持续评估核心材料改良效果,根据新技术、新指标不断推出核心材料针对性的改良方案,以保证电缆生产工艺的先进性和竞争力。

例如,该厂先进行500m小批量试生产,按GB/T2951.11-2008标准抽样30段(每段10m)测试:导体直流电阻在20℃时为0.375Ω/km(标准≤0.387Ω/km),绝缘层断裂伸长率达350%(改良前280%);通过DMA动态热机械分析,改良后材料储能模量在100℃时提升20%。生产效率评估显示,控制工序耗时从45min/100m缩短至38min/100m,挤出速度从4m/min提升至5m/min(得益于螺杆压缩比从2.5:1优化至3:1),虽原材料成本增加6.5%、设备改造投入80万元,但综合生产成本仅增加8%(低于预期10%)。量产阶段引入德国某品牌在线监测系统(包含OMICRONCPC100耐压测试仪和MeggerMIT400绝缘电阻仪),每批次电缆需通过100%工频耐压测试(1500V/1min)和绝缘电阻检测(20℃时≥100MΩ·km);首批10km电缆在青海共和光伏电站(海拔2800m,年日照时数2900h)应用后,经12个月运行监测,因绝缘失效导致的故障次数从改良前的15次/10km降至4次/10km,故障率下降73.3%。

## (二) 多层共挤与精密温控技术

### 1. 多层共挤

多层共挤与精密温控技术可有效提升电缆品质,在实践环节,光伏直流电缆需要应对复杂的户外环境,且不同层具有不同功能,如绝缘层防漏电、护套层防磨损,为此工程师可根据直流电缆的使用要求确定每层材料的指标、厚度,并规划好多个层级结构,为共挤做好准备;多层共挤需要专门的多层共挤挤出机,因此在生产前工程师需要调试设备,以保证各层挤出头的位置、间距精准,使不同层材料能够顺利同步挤出,同时还需准备好各层所需的优质材料,保证材料性能符合多层结构要求。在完成设备调试及材料准备之后,启动挤出机使各层材料同步挤出,在挤出环节可通过模具设备让各层材料紧密贴合融合,形成完整的多层结构电缆,这一步要求各层挤出速度、压力协调,确保融合质量。在挤出成型之后,工作人员要对多层结构电缆进行质量检测,如检查各层厚度是否均匀、层间是否紧密,若发现问题需及时调整设备参数或材料配比,保证多层共挤质量稳定。

例如,某电缆生产线为6mm<sup>2</sup>直流电缆设计三层结构:内层采用北欧化工BA2401型XLPE绝缘料(熔融指数0.5g/10min),厚度0.8mm;中层为99.9%纯度铝箔(导电率≥61%IACS),厚度0.2mm;外层为添加20%炭黑(N330型)的耐候型PVC护套料(邵氏硬度80A),厚度1.2mm。采用德国克劳斯玛菲三层共挤挤出机(螺杆直径50mm,长径比36:1),生产前调试参数:内层挤出头温度设定180℃(熔体压力8MPa),中层190℃(熔体压力10MPa),外层200℃(熔体压力12MPa),通过PLC控制系统实现三层物料同步挤出(误差≤0.5s);使用激光测厚仪(精度±0.01mm)校准模具,使各层厚度偏差控制在±3%以内(原±5%)。挤出成型后,在线检测显示绝缘层厚度均匀性达98.5%,层间剥离强度经GB/T2951.1-2008测试达17N/cm(标准≥15N/cm),且铝箔屏

蔽层的屏蔽效率在100MHz时达85dB。

### 2. 精密温控

在完成上述操作后,工程师还应当做好对温度的精密控制,因为在多层共挤过程中不同材料挤出温度要求不同,且各层材料融合时对温度也有特定要求,为此工程师要先确定温控的关键点,如各挤出头的温度、模具内的温度等,为精密温控提供目标;之后可在挤出机各关键部位安装高精度的温控设备,如加热器、冷却装置等,同时辅以温控传感器实时监测各部位温度,为电缆生产创造稳定环境;而在生产过程中,工程师可基于传感器实时反馈的温控数据,将其与设定的温控目标进行比对,若发现温度偏差可立即通过温控设备进行调整,如温度过高时启动冷却设备,温度过低时使用加热设备,确保各部位温度维持在合适范围之内。

### 三、工艺展望

随着光伏发电技术的不断发展,对直流电缆性能的要求也将日益提高,而多层共挤与精密温控技术在光伏发电系统直流电缆生产工艺优化中的应用前景十分广阔。

在多层共挤技术方面,未来有望进一步实现更多层结构的电缆生产。除了现有的绝缘层、屏蔽层、护套层等,可能会根据特殊应用场景增加新的功能层,如防火层、智能监测层等。防火层可以在火灾发生时延缓火势蔓延,为救援争取时间;智能监测层则能实时监测电缆的运行状态,如温度、电流等参数,提前预警潜在故障。同时,各层材料的研发也将不断推进,新型材料的应用将使电缆具备更优异的性能,如更高的耐温性、更强的耐腐蚀性等。

精密温控技术也将持续升级。一方面,温控设备的精度和响应速度将不断提高,能够更快速、准确地调整温度,确保电缆生产过程中的温度始终处于最佳状态。另一方面,温控系统将更加智能化,通过大数据分析和人工智能算法,实现温度的自动优化控制。例如,根据不同的生产批次、材料特性和环境条件,自动调整温控参数,提高生产效率和产品质量稳定性。

此外,多层共挤与精密温控技术的结合将更加紧密。通过实时监测多层共挤过程中各层的温度变化,及时调整工艺参数,确保各层材料在最佳温度下融合,提高多层结构的紧密性和稳定性。这将进一步提升光伏发电系统直流电缆的性能和可靠性,推动光伏发电行业向更高质量、更高效益的方向发展。

### 四、结束语

总体来说,通过对光伏发电系统直流电缆性能要求与生产工艺优化的研究,我们明确了其在绝缘、机械等方面的关键性能指标,以及核心材料改良、多层共挤与精密温控等优化工艺。展望未来,多层共挤技术将向更多层结构、新型材料应用发展,精密温控技术将更加精准智能,二者结合也将更为紧密。这些发展将显著提升直流电缆的性能与可靠性,为光伏发电行业的高质量、高效益发展提供有力支撑,推动清洁能源事业迈向新高度。

### [参考文献]

[1] 马江,张乐,董琮,等.光伏发电系统中直流电缆压降和低压交流电缆压降对投资收益率影响分析[J].电工技术,2025,(06):206-209.DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2025.06.054.

[2] 张奇,刘晓华.分布式光伏电站设计中的电气设计技术分析[J].光源与照明,2025,(02):164-166.

作者简介:徐勇(1983.12-),工程师,江苏赛德电气有限公司技术部副经理,从事核级电缆及光伏电缆研发与应用。