

Discussion on Several Issues in the Production and Manufacturing of Polypropylene Insulated Logging Cables

Aihong Shen^{1,3} Manhua Tao^{1,3} Zili Feng^{2,3} Xuchen Yang^{1,3}

1.Jiangsu Huaneng Cable Co., Ltd., Gaoyou, Jiangsu, 225699, China

2.Jiangsu Xinhuaneng Cable Co., Ltd., Gaoyou, Jiangsu, 225699, China

3.Yangzhou Key Laboratory of Load Detection Cables, Gaoyou, Jiangsu, 225699, China

Abstract

Polypropylene-insulated logging cables feature excellent dielectric properties, heat resistance and corrosion resistance, but still face challenges in material selection, process control and quality management. This paper focuses on the effects of raw material purity, formulation, insulation extrusion, cabling and sheathing processes, and online inspection on cable performance and service life, highlighting the role of batch stability and full-process quality control. Future directions such as modified polypropylene and intelligent manufacturing are briefly discussed to support engineering applications.

Keywords

polypropylene-insulated logging cable; manufacturing process; quality control; modified polypropylene; intelligent manufacturing

聚丙烯绝缘测井电缆生产制造的若干问题探讨

沈爱红¹³ 陶曼桦¹³ 冯自立²³ 杨徐辰¹³

1. 江苏华能电缆股份有限公司, 中国·江苏 高邮 225699

2. 江苏新华能电缆有限公司, 中国·江苏 高邮 225699

3. 扬州市承荷探测电缆重点实验室, 中国·江苏 高邮 225699

摘要

聚丙烯绝缘测井电缆作为新一代测井传输与供能载体, 具有优良的介电性能、耐热性和耐腐蚀性, 但在生产中仍存在材料选择、工艺控制和质量管理等问题。本文重点分析原材料纯净度、配方体系、绝缘挤出和成缆护套工艺及在线检测对电缆性能和寿命的影响, 强调批次稳定性和全过程质量控制的重要性, 并简要探讨改性聚丙烯和智能制造等发展方向, 为工程应用提供参考。

关键词

聚丙烯绝缘测井电缆; 生产制造工艺; 质量控制; 改性聚丙烯; 智能制造

1 引言

测井电缆是油气勘探与开发中传递电能、信号和机械拉力的重要装备, 其性能直接影响测井数据的准确性和作业安全。随着勘探向深井、超深井、高温高压及强腐蚀等复杂地层发展, 传统测井电缆在绝缘耐温、电性能稳定性和机械可靠性方面的不足日益突出, 对新型绝缘材料提出更高要求。在此背景下, 聚丙烯因介电性能好、密度低、可通过改性提高耐温性、加工性好且成本适中, 逐渐成为测井电缆绝缘材料的重要方向。

目前测井电缆绝缘仍以聚乙烯、交联聚乙烯和氟塑料等为主, 这些材料工艺成熟, 但在高温长期老化、环境应力

开裂、比重和成本控制方面存在局限。聚丙烯绝缘电缆在介电损耗、击穿强度和重量控制方面具有优势, 有利于长井段、大深度条件下的稳定测量和高效施工。但其在高温刚性、低温冲击性能、加工窗口以及导体和护套材料的相容性方面仍需改进, 相关制造技术与质量控制体系也有待完善。

2 聚丙烯绝缘测井电缆的结构与性能要求

测井电缆的基本结构组成: 测井电缆在井下同时承担电能传输、信号传递和机械承载等功能, 要求在有限截面内兼顾电气、机械和环境适应性。典型聚丙烯绝缘测井电缆主要由导体、绝缘层、屏蔽层、护套和加强构件组成。导体部分: 导体负责传输电能和信号, 多采用高导电率铜或镀银铜丝绞合结构。多芯电缆根据不同用途配置控制芯、电源芯和测量芯, 并通过合理的线径和绞合节距平衡导电性能、信号

【作者简介】沈爱红(1972-), 女, 中国江苏高邮人, 本科, 工程师, 从事承荷探测传感电缆研发及产业化研究。

衰减和柔韧性。导体表面清洁和平整有利于提高聚丙烯绝缘的粘附性和界面电场均匀性。绝缘层绝缘层用于防止导体间及导体与金属构件间电击穿。聚丙烯绝缘一般采用挤出紧密包覆导体，其厚度、圆整度、偏心度以及气孔、杂质等缺陷直接影响击穿电压和长期电气稳定性。聚丙烯对结晶度和分子取向较敏感，设计时需留有一定电气裕度。屏蔽层：为降低外界电磁干扰，多数测井电缆设置金属屏蔽层，可采用铜带、铜线或钢丝与铜线混编结构，兼具屏蔽与部分承载作用。屏蔽与绝缘界面应平整无尖角，以减少局部电场集中和早期老化。护套层：护套起防水、防腐和机械保护作用，常用耐油、耐高温、耐腐蚀材料。与聚丙烯绝缘配套时，要考虑热膨胀匹配和粘附性，减小温度循环引起的界面应力和开裂风险。加强构件：电缆在下放与提升过程中承受较大拉力和多次弯曲，一般采用钢丝铠装或专门加强层承担主要机械载荷。其结构和材料决定电缆抗拉、抗扭性能和寿命，需要与聚丙烯绝缘的刚度和变形协调，避免对绝缘层产生过大挤压或剪切。

聚丙烯绝缘材料特性：电气性能：聚丙烯介电常数和介质损耗低，有利于降低信号衰减和失真，适合长距离高精度测量。其击穿强度和体积电阻率较高，在合适厚度下可满足高电压和长期绝缘要求。但其电气性能受结晶度、分子量分布和添加剂体系影响较大，配方或工艺控制不当可能导致介电损耗增大和电树枝加速发展。机械性能：聚丙烯具有较好强度和刚性且密度低，有利于减轻电缆自重。但高结晶度时材料偏硬、韧性不足，低温下冲击性能下降，易引起绝缘脆裂。通过共聚改性、填料调整和增韧体系可改善强韧平衡。还需关注在多次弯曲和交变载荷下的疲劳性能，避免微裂纹扩展导致绝缘失效。耐温与耐腐蚀性能：聚丙烯长期耐温一般优于普通聚乙烯，经耐热稳定剂、交联或共聚改性可进一步提高，以适应高温井况。

典型工况与性能指标要求：高温高压工况：在深井和高温高压井中，绝缘层需在 150℃ 左右甚至更高温度及高静水压力下长期保持介电强度和机械完整性。重点指标包括：长期工作温度等级及热老化后击穿电压保持率，高温介质中的绝缘电阻和介电损耗变化，以及压力作用下的尺寸稳定性和抗蠕变能力。相关材料需通过热老化和高温高压试验验证。井下腐蚀与复杂介质环境：电缆长期接触地层水、油气混合物及酸性气体，绝缘和护套共同承担防护功能。需要在含盐水、 H_2S 、 CO_2 等介质中的化学稳定性，在油基和水基泥浆、完井液中浸泡后的机械、电气性能保持率，并具备一定抗微生物侵蚀和应力腐蚀开裂能力。聚丙烯虽耐多种化学品，但在应力与温度耦合作用下仍可能发生环境应力开裂，需要在结构设计中留足安全裕度。机械载荷与服役可靠性：电缆受自重、井液浮力变化、拖曳力以及卷筒重复缠绕产生的弯曲和扭转载荷。关键指标包括最大允许拉力及安全系数、规定弯曲半径下的弯曲寿命和绝缘完好性，以及多次

循环拉伸后的结构和信号稳定性。

3 生产制造过程与关键工艺环节

聚丙烯绝缘测井电缆的生产制造，围绕“高电气性能—高可靠性—高一一致性”展开，重点在原材料、绝缘挤出、成缆护套及全过程质量控制的协同优化。各环节相互影响，任何一处失控都可能在井下放大为绝缘击穿或机械失效，因此需对关键工艺进行有针对性的控制。原材料选择与预处理：①聚丙烯树脂及添加剂选择：聚丙烯树脂是绝缘层的主体，其牌号和物性决定电缆的电气、机械和耐温性能。用于测井电缆的树脂应具备：适中的熔体流动速率、低介电常数和介质损耗、高击穿强度，以及较高结晶度和良好耐热氧化性能。添加剂体系以抗氧化剂为主，可辅以光稳定剂、金属钝化剂、填料和增韧剂等。既要抑制加工与服役过程中的热氧降解，又要避免迁移、析出和对介电性能的不利影响，因此配方和用量需严格控制，一般不使用高极性添加剂。②导体材料及结构控制：导体多选用镀银铜、镀镍铜或高强度合金材料，以兼顾导电性、耐腐蚀性和抗疲劳性能。通过控制单线直径、绞合节距和绞向，减小电阻偏差和局部应力；并对导体进行严格除油和表面清洁，提高与聚丙烯绝缘的粘附性，减少界面空隙。③原材料预处理：聚丙烯及部分添加剂易受水分影响，挤出时会产生气泡、银丝，降低绝缘致密性和耐电压水平。生产中需对树脂烘干、保温并密封储存，使含水率满足工艺要求。导体进线前要完成除油、烘干和张力的预调，以避免后续挤出偏心 and 拉伸不稳定。挤出绝缘工艺：绝缘挤出是关键工序，直接关系到绝缘层尺寸精度、致密性和电气性能。①温度区间控制：聚丙烯的加工温度窗口较窄，需精确设定机筒各区、机头及模具温度。既要保证熔体塑化均匀，又要避免过热降解。温度过高会引起分子链断裂、表面粗糙和变色；温度过低则塑化不足，易残留未熔颗粒，形成绝缘薄弱点。②螺杆转速与挤出速度：螺杆转速和牵引速度共同决定绝缘厚度、致密度和偏心率。应通过试验确定合适转速区间，配合恒速牵引和在线测径，实现对外径和偏心的闭环控制，避免剪切热过大或混炼不充分。③模具设计与挤包方式：根据电缆结构选择压力挤出或半压力挤出。模具设计要兼顾导体尺寸、目标绝缘厚度和熔体流场，使熔体流速分布均匀，并通过合理的导向结构保证导体在模具内稳定居中，减少偏心和跳动。3、成缆与护套工艺：成缆与护套工艺决定电缆的柔韧性、抗拉性能和整体结构稳定性。①成缆节距与绞合结构：成缆节距直接影响电缆的弯曲性能、扭转稳定性及信号串扰。节距过小虽柔软，但易产生局部应变集中；节距过大则结构松散、易滑移。需结合计算和弯曲疲劳试验选定节距，并合理配置各层节距比，避免受拉或扭转时出现“翻身”和局部变形。②张力控制与同步协调：成缆过程中，各芯线、加强构件和铠装钢丝必须在合适张力下同步运行。通过恒张力放线和张力监测反馈，防止芯线松弛或过度拉

伸,尽量减少在聚丙烯绝缘层中引入残余应力。4、过程质量控制:为保证电缆批次一致性和长期可靠性,需要建立全过程质量控制体系。①在线检测项目:在挤出和成缆环节布置在线测径仪、火花机及视觉检测装置,实时监控外径、偏心率和表面缺陷,一旦偏离设定范围及时预警和调整。②缺陷识别与工艺反馈:对气泡、杂质、偏心、粗糙等缺陷进行分类记录,分析其与原材料批次及工艺参数的关系,借助统计分析找出关键影响因素,及时优化温度、过滤、烘干和张力等条件。

4 生产中主要问题及成因分析

聚丙烯绝缘测井电缆在生产工艺上与传统产品相近,但受材料特性和井下高温、高应力环境影响,更易在绝缘、结构和界面等环节出现隐蔽缺陷,服役后可能放大为绝缘击穿、信号失真或机械失效。(一)绝缘性能相关问题及成因:绝缘击穿电压偏低或波动大,部分产品耐压水平偏低、离散度大,主要原因包括:①原料水分和杂质控制不严,聚丙烯树脂烘干不充分或吸湿,添加剂分散不良,易在挤出中形成微孔、夹杂和“针孔”,成为电场集中点,降低击穿电压。导体表面油污、氧化层或损伤会削弱绝缘贴合,在界面形成空隙和潜在放电通道。②挤出工艺稳定性不足,聚丙烯加工温区窄,机筒温度不均、剪切过大或模具过热会导致热氧降解,绝缘强度下降。介电损耗偏高与局部放电倾向:部分电缆交流耐压、局放试验中介电损耗偏高、局放起始电压偏低,主要与:①添加剂体系不合理,部分抗氧化剂、润滑剂和填料选型或用量不当,增加体系极性和电导损耗,导致介电损耗角增大。服役中添加剂迁移、析出产生界面层或微空隙,促使局部放电提前发生。②界面结合不良,导体与绝缘、绝缘与屏蔽或护套之间黏结不足,在弯曲、卷绕及温度变化下易产生微剥离和“空鼓”,界面间隙成为局放敏感区域。(二)机械与结构稳定性问题及成因:弯曲和卷绕疲劳下绝缘开裂,聚丙烯刚性较大、耐反复弯折能力有限,电缆长期

卷绕、弯折和拉伸后,部分产品出现微裂纹甚至贯穿裂纹,主要原因包括:①材料配方偏硬或增韧不足:为提高耐温和模量采用高结晶度聚丙烯或刚性填料,而增韧体系不足,特别在低温下易脆裂,弯曲应力集中的部位更易开裂。②结构设计及节距不合理:成缆节距过小或层间结构匹配不佳,使弯曲变形集中在局部区域,铠装钢丝刚度较高又叠加附加应力,绝缘厚度裕度不足或圆整度差时更易产生裂纹。③加工残余应力未有效释放:挤出时绝缘层经拉伸和冷却收缩形成残余应力,如缺乏适当热定型和缓冷,会在后续卷绕和服役过程中与外加载荷叠加,引发微裂纹萌生和扩展。纵向滑移、扭曲和“翻身”现场使用中部分电缆出现扭转不稳、鼓包或芯线滑移,严重时“翻身”报废,主要因:①成缆张力控制不当,各层芯线、加强层、铠装层张力不均,部分过紧、部分过松,服役中在交变拉力作用下层间重新滑移和应力重分布,导致内层挤压、芯线外突。②层间摩擦系数失衡,聚丙烯表面光滑,如屏蔽层或填充材料选择不当,摩擦力不足,易造成芯线纵向滑移。铠装钢丝节距、包覆角设计不合理,也会降低抗扭稳定性,增加“翻身”风险。

5 结语

总体来看,聚丙烯绝缘测井电缆生产中存在的问题具有材料、工艺与结构高度耦合、缺陷隐蔽且服役放大明显等特点。只有充分认识这些问题及成因,才能在配方设计、工艺控制和结构优化中采取针对性措施,提升产品一致性和井下服役可靠性。

参考文献

- [1] 刘文军,赵金洲,张建军,等.聚丙烯绝缘测井电缆的结构设计与性能分析[J]. 电线电缆, 2020, 38(4): 45-50.
- [2] 高志强,李海波,王占国.测井电缆用聚丙烯绝缘材料研究现状与发展趋势[J]. 石油矿场机械, 2019, 48(6): 72-77.
- [3] 张凯,孙岩,李岩.聚丙烯绝缘测井电缆挤出工艺参数优化研究[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(2): 33-38.