

聚丙烯绝缘电缆生产制造的若干问题探讨

胡君臣

扬州光明电缆有限公司，江苏高邮，225652；

摘要：研究通过分析聚丙烯绝缘电缆生产制造环节，明确原料改性与工艺适配性不足、绝缘层成型质量控制难度大两大核心问题。针对这些问题，研究采用原料特性系统分析、多组分协同改性体系构建、工艺参数优化与在线监控结合的方法，同时搭建全流程成型质量管控体系，涵盖工艺重点锚定、多参数协同监控与动态调整及质量追溯数据分析。研究形成从原料改性到成品制造的全链条优化方案，为提升聚丙烯绝缘电缆生产质量提供技术支撑。

关键词：聚丙烯；绝缘电缆；生产制造

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.017

引言

聚丙烯因轻量化、高绝缘性等优势在电缆绝缘材料领域应用日益广泛，但其固有低温脆性与耐电痕性缺陷及生产工艺适配难题，导致现有生产环节频繁出现绝缘层开裂、厚度不均等质量问题，制约行业发展。基于此，研究聚焦聚丙烯绝缘电缆生产核心痛点，以原料改性与工艺适配优化、全流程质量管控为核心改进思路，旨在提出针对性解决策略，提升生产稳定性与产品可靠性。

1 聚丙烯绝缘电缆生产制造存在的问题

1.1 原料改性与工艺适配性不足

聚丙烯本身存在低温脆性显著与耐电痕性较差的固有缺陷，设计师与生产者需通过共聚、填充、共混等改性手段提升其绝缘性能与力学性能以满足电缆实际使用需求，但在生产实践过程中原料改性环节极易出现两大突出问题：其一为改性配方精度欠缺，这一问题会直接导致绝缘层在低温环境下发生开裂现象，或是在高温高电场工况下出现加速老化的情况；其二为改性原料与挤出工艺的适配性偏差，聚丙烯改性料的熔融指数、熔体强度与常规挤出设备的螺杆转速、模头温度等关键参数无法实现精准匹配，进而容易造成挤出过程中熔体出现断裂、破裂的状况，使得绝缘层表面产生麻点、气泡等各类缺陷，最终影响电缆绝缘层的整体均匀性。

1.2 绝缘层成型质量控制难度大

聚丙烯绝缘电缆的绝缘层主要依靠挤出成型工艺制备，该核心环节的质量控制工作存在诸多明显难点。首先，聚丙烯熔体的热稳定性本就较弱，在挤出过程中若温度控制措施不当，过高的温度会引发原材料发生热降解反应，导致绝缘层的机械强度与电气绝缘性能同步下降，而过低的温度则会造成熔体流动性不足，最终引

发绝缘层厚度不均匀的问题；其次，挤出速度与牵引速度的协同性难以实现精准把控，两者之间的速度一旦出现不匹配的情况，就会引发绝缘层产生竹节状变形或是拉伸过度的现象，进而导致绝缘层厚度偏薄的问题；此外，冷却定型环节容易产生温差应力，由于聚丙烯材料的热收缩率相对较高，若冷却水温与挤出温度之间的温差过大，绝缘层就会因快速收缩而产生内部应力，这类内部应力会使电缆在长期使用过程中极易引发绝缘层开裂，最终降低电缆的整体使用寿命。

2 聚丙烯绝缘电缆生产制造策略

2.1 优化原料改性体系，提升工艺适配性

2.1.1 原料特性的分析

在聚丙烯绝缘电缆的生产制造过程中，工程师需以优化原料改性体系为核心抓手，切实提升原料与生产工艺的适配性。要实现这一目标，工作人员需先系统分析聚丙烯基材的分子结构特性与加工性能瓶颈，须知聚丙烯作为半结晶性聚合物，其结晶度、分子量及分布情况、支链结构等关键指标直接影响熔体流动性、力学性能与耐热稳定性，因此工程师需借助差示扫描量热法、凝胶渗透色谱等专业分析手段，精准测定原料的熔融温度、结晶速率以及分子量等核心参数，为改性体系的科学设计提供扎实的基础数据支撑；同时工作人员要重点关注原材料中低分子量组分的含量与杂质分布情况，因为这类物质极易导致加工过程中出现熔体破裂或绝缘层缺陷的问题，所以必须通过原料预处理工艺，诸如干燥过滤、纯度提升等手段，确保原料质量完全满足改性环节的使用需求。

例如，工程师需借助差示扫描量热法（DSC）测定聚丙烯基材的结晶度范围为 25%~35%、熔融温度 160~170℃、结晶速率 0.8~1.2℃/min，通过凝胶渗透色

谱 (GPC) 精准测定数均分子量 $3.5 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4$ 、分子量分布指数 2.0~3.0, 这些核心参数为改性体系的科学设计提供扎实的基础数据支撑; 同时工作人员要重点关注原材料中低分子量组分含量需控制在 0.5% 以下、杂质粒径不超过 $5 \mu\text{m}$, 因为这类物质极易导致加工过程中出现熔体破裂或绝缘层缺陷的问题, 所以, 要通过原料预处理工艺, 采用热风循环干燥方式在 $80 \sim 90^\circ\text{C}$ 条件下干燥 4~6 小时, 搭配 $5 \mu\text{m}$ 精度的熔体过滤装置进行纯度提升, 确保原料质量完全满足改性环节的使用需求。

2.1.2 构建多组分协同改性体系

基于原料特性的分析结果, 工作人员需构建多组分协同改性体系, 以此破解工艺适配性不足的限制: 针对聚丙烯熔体流动性不足的问题, 可引入低分子量聚乙烯或乙烯-辛烯共聚物作为增塑剂, 通过降低熔体粘度提升挤出成型效率, 但需严格控制增塑剂的添加量, 避免因过度增塑导致绝缘层力学性能下降; 为增强绝缘层的耐热老化性能, 需添加受阻胺类光稳定剂与酚类抗氧化剂, 这类物质可通过捕获自由基中断氧化链式反应, 显著提升电缆在高温环境下的使用寿命, 其添加比例需根据原料氧化诱导期的测试结果优化确定; 针对绝缘层表面粗糙度超标的问题, 可添加纳米级二氧化硅或碳酸钙作为成核剂, 通过细化晶粒尺寸改善绝缘层表面光洁度, 其添加量则需通过熔体流动速率与表面粗糙度的联合测定进行标定。

例如, 针对聚丙烯熔体流动速率 (MFR) 低于 $1.5\text{g}/10\text{min}$ 导致的流动性不足问题, 可引入低分子量聚乙烯 (LMWPE) 或乙烯-辛烯共聚物 (POE) 作为增塑剂, 其中 LMWPE 添加量控制在 1%~3%、POE 添加量控制在 2%~4%, 通过降低熔体粘度使 MFR 提升至 $2.5 \sim 3.5\text{g}/10\text{min}$, 进而提升挤出成型效率, 同时需通过拉伸试验验证绝缘层拉伸强度不低于 20MPa 、断裂伸长率不低于 300%, 避免因过度增塑导致力学性能下降; 为增强绝缘层的耐热老化性能, 需添加受阻胺类光稳定剂 (HALS) 与酚类抗氧化剂复配体系, 其中 HALS 添加量 0.3%~0.5%、酚类抗氧化剂添加量 0.2%~0.4%, 这类物质可通过捕获自由基中断氧化链式反应, 使电缆在 120°C 老化条件下的氧化诱导期从 40min 提升至 120min 以上, 显著提升高温环境下的使用寿命, 其添加比例需根据原料氧化诱导期的测试结果优化确定; 针对绝缘层表面粗糙度 R_a 超 $0.8 \mu\text{m}$ 的问题, 可添加纳米级二氧化硅或碳酸钙作为成核剂, 成核剂粒径控制在 20~50nm, 添加量通过熔体流动速率与表面粗糙度的联合测定进

行标定, 一般为 0.5%~1.2%, 添加后可使绝缘层表面粗糙度 R_a 降至 $0.3 \mu\text{m}$ 以下, 细化晶粒尺寸改善表面光洁度。

2.1.3 工艺适配性的提升

工艺适配性的提升还需实现工艺参数优化与在线质量监控。在挤出成型环节, 工程师需根据改性后原料的熔体流动特性, 分段调整挤出机各区段的温度, 确保熔体实现均匀塑化; 螺杆转速需与牵引速度协同控制, 维持 1:1.05~1:1.1 的线速比, 避免绝缘层出现偏心问题; 冷却水槽温度需严格控制在 $40 \sim 60^\circ\text{C}$, 防止因冷却速度过快导致绝缘层内残留应力。在线监测环节, 需集成激光测径仪、红外光谱仪与 X 射线衍射仪等设备, 实时监测绝缘层的直径偏差、洁净度分布以及改性剂的分散均匀性等关键指标, 当检测数据超出工艺窗口范围时, 系统需自动触发工艺参数修正程序。在此过程中, 还需建立改性原料分批次追溯系统, 详细记录每次原料改性时的改性剂添加量、加工工艺参数以及成品性能测试数据, 为持续优化改性体系提供全面的数据支撑, 最终形成从原料改性到产品制造的全链条工艺适配性提升体系。

2.2 构建全流程成型质量管控体系

2.2.1 锚定工艺重点

相关单位需在聚丙烯绝缘电缆生产制造过程中构建全流程成型质量管控体系, 该体系的构建需依托标准化作业框架推进实施, 此框架要以电缆绝缘层成型的关键工序, 诸如挤出、交联、冷却等, 作为核心管控节点, 明确各工序的操作规范与质量标准。其中挤出工序需严格规定熔体温度波动范围、螺杆转速与牵引速度的匹配关系; 交联工序则需精准设定辐射剂量或化学交联剂的添加精度; 冷却工序需合理控制水温梯度与冷却时间。通过编制标准化作业文件并开展全员培训, 保证操作人员全面理解并统一执行质量管控要求, 为全流程管控奠定坚实基础。

例如, 挤出工序需严格规定熔体温度波动范围 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、螺杆转速波动 $\pm 3\text{r}/\text{min}$, 牵引速度与螺杆转速的匹配偏差不得超过 $\pm 2\%$, 绝缘层厚度偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内; 交联工序若采用辐照交联方式, 需精准设定辐射剂量 $25 \sim 35\text{kGy}$, 辐射均匀性变异系数不超过 8%, 若采用化学交联方式, 需控制交联剂 DCP 添加精度 $\pm 0.1\%$, 交联温度控制在 $180 \sim 190^\circ\text{C}$ 、交联时间 15~20min, 确保交联度达到 70%~80%; 冷却工序需合理控制水温梯度与冷却时间, 采用三段式冷却水槽, 水温分别设定为 70°C 、 55°C 、 40°C , 水温梯度控制在 $10 \sim 15^\circ\text{C}/\text{段}$, 冷却时间总计 20~30min, 确保绝缘层冷却后结晶均匀, 残留应力

不超过 3MPa。

2.2.2 引进多参数协同监控与动态调整系统

全流程质量管控体系构建的核心要点在于引进多参数协同监控与动态调整系统,该系统需集成温度传感器、压力传感器、激光测径仪等在线检测设备,实时采集挤出机各区温度、熔体压力、绝缘层直径等关键工艺参数,再通过数据采集系统将各类参数传输至中央控制台,控制台内预设质量预警模块。当参数偏离工艺窗口时,系统需自动触发报警并向操作端发送调整指令,操作人员则需根据指令及相关指标及时调整工艺参数。同时,系统要完整记录参数调整时间、调整幅度以及调整后的质量数据,形成闭环控制回路。

例如,温度传感器分别安装在挤出机各区段缸体、机头及交联设备关键位置,测量精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,实时采集温度数据;压力传感器安装在挤出机机头熔体通道,测量范围 0~50MPa、精度 $\pm 0.1\text{MPa}$,实时采集熔体压力;激光测径仪安装在冷却水槽出口,测量范围 0~50mm、精度 $\pm 0.01\text{mm}$,实时采集绝缘层直径;在线绝缘电阻测试仪通过高压电极与电缆导体形成回路,实时检测绝缘电阻值不低于 $1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ 。各类参数通过数据采集系统以 10Hz 的频率传输至中央控制台,控制台内预设质量预警模块,当熔体压力偏离设定值 $\pm 5\text{MPa}$ 、温度偏离 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、直径偏离 $\pm 0.1\text{mm}$ 或绝缘电阻低于阈值时,系统需自动触发声光报警并向操作端发送调整指令。操作人员需根据指令及时调整工艺参数,如熔体压力过高时可适当提升均化段温度 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 或降低螺杆转速 $5\sim 10\text{r/min}$,直径偏小时可提升牵引速度 $2\%\sim 3\%$ 。

2.2.3 质量追溯与数据分析

全流程质量管控体系的持续优化依赖于完善的质量追溯与数据分析机制,每批次电缆生产完成后,需通过条码识别系统将原料批次信息、工艺参数、在线检测数据与成品性能测试结果进行关联绑定,建立完整的质量追溯数据库;质量管理部门需定期对数据库数据进行系统分析,识别质量波动的主要来源,借助鱼骨图、帕累托图等专业工具定位问题根本原因,针对根本原因制定针对性改进措施,通过小批量试验验证改进效果,最终将有效改进措施纳入标准文件,形成持续优化的良性循环。

例如,通过条码识别系统可将原料批次信息、挤出机编号、操作人员编号、各工序工艺参数、在线检测数

据与成品性能测试结果进行关联绑定,其中成品性能测试包括拉伸强度、断裂伸长率、绝缘电阻、击穿电压(不低于 25kV/mm)等项目,建立完整的质量追溯数据库。质量管理部门需每周对数据库数据进行系统分析,采用鱼骨图从人员、设备、原料、工艺、环境五个维度识别质量波动的主要来源,借助帕累托图定位问题根本原因,如通过分析发现 30%的质量问题源于原料水分含量超标、25%源于螺杆转速波动。针对根本原因制定针对性改进措施,如原料干燥时间从 4h 延长至 6h、对螺杆传动系统进行定期润滑维护,通过小批量(500m/批次)试验验证改进效果,当改进后原料水分含量稳定在 0.05%以下、螺杆转速波动降至 $\pm 1\text{r/min}$ 时,将有效改进措施纳入标准文件。同时每月开展一次质量复盘,总结管控体系运行效果,优化工艺窗口参数,形成持续优化的良性循环。

3 结束语

总体来说,聚丙烯绝缘电缆生产质量的提升核心在于实现原料改性与工艺的精准适配及全流程质量的闭环管控。研究提出的多组分协同改性体系与全流程质量管控方案,有效破解了现有生产中的核心痛点,为行业提供了可落地的技术路径。这些优化策略不仅能够提升产品稳定性与使用寿命,更推动了聚丙烯绝缘电缆生产从经验型管控向数据驱动型管控的转型。未来可进一步探索改性剂长效性提升与智能化监控系统的深度融合,为高性能聚丙烯绝缘电缆的规模化生产提供更全面的技术保障。

参考文献

- [1] 夏云海,黄上师,余欣,等. 110kV 接枝聚丙烯绝缘电缆运行温度提升可行性分析[J]. 电线电缆,2025,68(10):36-40. DOI:10.16105/j.dxd1.1672-6901.20250072.
- [2] 罗玉鹤,白文博. 改性聚丙烯电缆绝缘材料性能研究进展[J]. 塑料助剂,2025,(05):66-70.
- [3] 张涛,刘源禧,张晋源,等. 氧化锆对共混聚丙烯电缆绝缘料力学及电气性能的影响[J]. 工程塑料应用,2025,53(08):189-197.

作者简介:胡君臣(1966 年 09 月—)工程师,扬州光明电缆有限公司副总经理。