

核级电缆用交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺优化

曹波

远程电缆股份有限公司，江苏宜兴，214251；

摘要：核级电缆交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺，直接关联材料绝缘性能与服役周期，优化此工艺对保障核设施安全平稳运行具备关键价值。本文围绕提升绝缘材料交联均匀性、降低老化损耗的核心目标，借助调控辐照剂量、辐照温度、气氛环境等关键工艺参数，揭示各参数对交联聚乙烯绝缘性能的作用机制，明确工艺最优配置方案。实验结果显示，经优化的辐照交联工艺，能够实质性强化材料的热稳定性、机械强度及耐辐射性能，契合核级电缆的严苛使用标准。该优化方案为核级电缆绝缘材料工业化生产提供技术支撑。

关键词：核级电缆；交联聚乙烯；辐照交联工艺；工艺优化；绝缘材料

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.015

引言

核设施服役环境严苛，核级电缆作为核心传输组件，其绝缘性能紧密维系设施整体安全。交联聚乙烯凭借优异绝缘效能与较高机械强度，成为核级电缆绝缘材料的主流选择；但传统辐照交联工艺常存在交联均匀性不足、老化损耗偏高的问题，限制材料性能充分释放。立足这一现状，本文围绕核级电缆用交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺优化展开研究，借助剖析关键工艺参数对材料性能的作用规律，明确工艺最优配置方案，为强化核级电缆绝缘可靠性筑牢技术基础，同时衔接后续工艺试验与性能验证相关研究。

1 核级电缆交联聚乙烯绝缘材料及辐照交联工艺背景

核设施运行环境呈现高温、高辐射、高湿度等典型特点，对各类配套部件的可靠性与耐久性施加了极高要求。核级电缆作为核设施内电力传输及信号传递的核心载体，其运行稳定性紧密维系着整个核设施的安全运转；绝缘层作为核级电缆的关键构成，肩负隔绝电流、保护导体的核心职责，其性能优劣直接决定电缆的使用寿命与安全等级。基于此，核级电缆绝缘材料需兼具优异绝缘性能、耐辐射性能、热稳定性及机械强度，方能适配核设施的严苛运行场景。

交联聚乙烯是当前核级电缆绝缘材料的主流选项之一，对比传统橡胶、聚氯乙烯等绝缘材料而言，其拥有更高绝缘电阻、更低介质损耗及更强耐化学腐蚀能力，可更充分契合核设施对绝缘材料的核心诉求。伴随核工业的持续发展，核级电缆的安全冗余标准逐步提升，交联聚乙烯绝缘材料的应用范畴也随之拓展，成为保障核

设施电力系统平稳运行的关键材料支撑。

辐照交联工艺是优化交联聚乙烯材料性能的核心路径，其原理为借助高能射线作用促使聚乙烯分子产生交联效应，形成三维网状结构，进而大幅强化材料的热稳定性、机械强度与耐老化性能^[1]。对比化学交联等其他工艺路径，辐照交联工艺不必额外添加交联剂，可切实规避添加剂对材料纯度及绝缘性能的干扰，加之工艺过程可控性强、产品性能一致性优，故而普遍用于核级电缆交联聚乙烯绝缘材料的生产加工环节，构成核级绝缘材料制备的关键工艺节点。

2 核级电缆交联聚乙烯绝缘材料辐照交联工艺现存问题分析

核级电缆交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺在实际工业化生产中，辐照剂量分布不均是制约产品品质的首要症结。这一问题的产生，源于辐照设备射线强度天然存在的空间分布差异，叠加电缆绝缘层自身具备的厚度属性，使得材料不同区域实际承接的辐照剂量呈现明显不均衡状态。剂量偏低的区域，聚乙烯分子交联反应难以充分发生，无法构建起完整致密的三维网状结构，直接导致材料热稳定性与机械强度等核心指标无法达到核级使用标准；而剂量偏高的区域，分子会出现过度交联现象，这不仅会导致材料脆性显著增强、韧性大幅衰减，还会让材料在后续的电缆加工弯折、敷设拖拽等操作中易产生微裂纹，甚至在长期服役过程中出现破损，进而动摇绝缘性能的稳定基础，埋下安全隐患。

辐照过程中的环境控制偏差，同样是影响工艺稳定性与产品性能的突出问题。在部分生产场景中，辐照操作仍普遍于常温常压的空气环境内开展，空气中的氧气

在高能射线的激发下，极易生成大量氧化自由基。这类自由基会主动与聚乙烯分子发生氧化反应，不仅会干扰交联反应的正常进程，还会催生小分子杂质。这些杂质会直接降低绝缘材料的纯度，造成绝缘电阻回落、介质损耗攀升等问题，更会加速材料的老化降解进程，大幅缩减核级电缆的服役周期^[2]。除此之外，辐照环境温度的大幅波动，会直接扰动交联反应的速率与程度，导致同一批次甚至同一段电缆的绝缘材料性能出现较大差异，进一步放大产品性能的离散性，影响生产稳定性。

辐照后工艺处理的不完善，以及工艺参数适配性的不足，也会对最终产品品质形成显著制约。在部分生产流程中，经辐照处理的交联聚乙烯材料往往未经过充分的后处理工序，残留的自由基在后续储存、运输及实际使用阶段仍会持续发生反应，导致材料性能逐步漂移，无法长期维持稳定状态。与此同时，辐照过程中生成的低分子挥发物若未及时清除，会在材料内部形成微小孔隙，这些孔隙成为绝缘性能的天然薄弱环节，在核设施高辐射、高温、高湿度的严苛环境下，极易诱发局部放电等安全风险。再者，现有工艺参数体系缺乏针对性，针对不同厚度、不同直径等规格差异的核级电缆绝缘材料，尚未建立起精准的参数调控方案，导致工艺通用适配性薄弱，难以稳定产出符合核级规范的高品质产品。

3 核级电缆交联聚乙烯绝缘材料辐照交联工艺优化方案

针对前文剖析的工艺症结，优化方案以“精准调控、环境适配、流程补全”为核心导向，形成覆盖辐照全流程的系统性改进路径，助力材料性能稳定提升。针对辐照剂量分布不均这一核心问题，优化关键在于达成剂量精准调控与全域均匀覆盖的双重目标。具体可通过优化辐照源的空间布局实现，即根据电缆绝缘层的直径规格，动态调整辐照源的排列间距与发射角度，使高能射线形成均匀的辐射场，确保射线能够无死角覆盖电缆绝缘层的各个部位；同步引入高精度实时剂量监测设备，该设备可对辐照过程中的剂量分布实施动态溯源，通过多点位数据采集构建剂量分布图谱，一旦监测到局部区域剂量偏离预设范围，便自动反馈至控制系统，精细化调整辐照源位置或电缆传输速率，从源头规避局部剂量偏低或过高的问题^[3]。对于不同厚度的绝缘层，进一步采用分层梯度辐照策略，先对表层开展低剂量预辐照，促使表层分子初步交联形成稳定结构，再逐步加深辐照深度并微调剂量，确保内层材料也能获取足量且均衡的辐照

剂量，保障整体交联反应充分且一致，强化材料性能的稳定性。

针对环境控制偏差问题，优化核心思路聚焦搭建惰性恒温的闭环辐照环境，通过全流程环境管控消除外界因素对交联反应的干扰。为实现这一目标，在辐照腔体内部采用“真空置换-氮气填充”的双步精细化气体处理流程：先借助真空泵抽离腔体内残留空气，再充入高纯度氮气作为保护气，通过多次循环置换彻底清除残留氧气，从源头遏制氧化自由基生成，阻断氧化反应对交联进程的不良影响；同时氮气的惰性特质可形成天然隔热屏障，减少外界温度波动对腔体内部环境的干扰。与此同时，在腔体外部增设智能恒温调控系统，依托分布式温度传感器实时采集腔体内不同区域的温度数据，与加热装置构建动态联动调节机制，通过 PID 调节算法精准把控温度变化，将辐照环境温度稳定在适配交联反应的适宜区间，严格控制温度波动幅度。此外，辐照前后需对腔体实施严格的密封性能检测，采用压力衰减法验证密封可靠性，同时实时监测腔内保护气体浓度，确保其始终维持在合理范围，全方位提升环境稳定性，为交联反应提供持续稳定的外部条件。

针对辐照后处理欠缺与参数适配性不足的问题，需从流程补全与体系构建两方面推进优化。在后处理流程方面，经辐照后的材料先送入专用恒温保温箱完成熟化处理，通过精准调控保温温度与时长，为残留自由基提供充分的反应条件，促使其完全消耗，从根本上降低后续使用过程中的性能漂移风险；熟化完成后，随即采用真空脱气工艺，在特定温度与真空度条件下，持续抽离材料内部因交联反应产生的低分子挥发物，避免微小孔隙的形成，保障材料内部结构的致密性。在参数适配体系构建方面，针对不同规格的核级电缆绝缘材料，开展系统性工艺试验，积累不同绝缘层厚度、直径对应的辐照剂量、传输速率、保护气体流量等关键参数数据，搭建标准化工艺参数数据库，明确各规格产品的最优参数组合^[4]。实际生产中，可依据电缆规格直接调用数据库中的对应参数方案，同时预留参数微调空间，结合每批次产品的性能检测结果（如交联度、机械强度等），动态优化参数设置，增强工艺的通用适配性与稳定性能，实现不同规格产品的高效优质生产。

4 辐照交联工艺优化后绝缘材料性能及应用成效

辐照交联工艺经系统性优化后，核级电缆用交联聚

乙烯绝缘材料的核心性能实现实质性跃升,为核设施严苛工况下的稳定运行提供关键材料保障。热稳定性维度,依托精准剂量调控与恒温惰性环境的双重加持,材料内部形成均匀致密的三维网状交联结构,耐热效能大幅提升;即便在核设施常见的高温工况下长期服役,也不会轻易发生软化、变形或熔融现象,始终维系规整稳定的结构形态,彻底扭转了传统工艺中因局部交联不足导致的耐热短板或过度交联引发的脆化问题,实现全区域耐热性能的均衡统一。机械强度层面,均匀交联结构赋予材料更优异的拉伸韧性与抗撕裂能力,在电缆加工阶段的弯曲、拖拽、裁切等一系列操作中,不易产生微裂纹或表面破损;后续敷设与长期使用过程中,更能有效抵御外界机械冲击、挤压等外力作用,从根源上规避了因机械损伤诱发的绝缘失效风险,显著提升电缆使用过程中的结构完整性。

耐辐射与抗老化性能的精准强化,使交联聚乙烯绝缘材料更能适配核设施高辐射、多腐蚀、温湿度波动剧烈的复杂服役环境。优化工艺通过惰性环境的精准构建,从源头阻断了氧化反应的发生路径,大幅削弱了高能射线激发下氧化自由基对聚乙烯分子链的破坏作用,让材料在长期高辐射暴露下的分子结构稳定性显著增强,性能衰减速率得到有效放缓,彻底杜绝了传统工艺生产的材料在辐射环境中易出现的快速老化、变脆、开裂等共性问题。经实际服役场景验证,材料外观始终保持规整状态,无明显老化变色痕迹,内部交联结构持续维持致密完整,绝缘电阻、介质损耗等核心绝缘性能指标始终稳定维系在核级标准规定的合格区间内,显著延展了核级电缆的实际服役周期^[5]。与此同时,材料对核设施内湿度剧烈波动、酸碱介质侵蚀、高温蒸汽持续冲刷等多重恶劣条件的耐受能力同步提升,即便处于多因素耦合的极端复杂环境中,仍能持续发挥稳定可靠的绝缘核心功效,进一步降低了极端工况下因材料性能失效引发的安全隐患。

工艺优化带来的性能突破,在实际生产与核设施应用场景中均展现出显著的实践价值与应用成效。生产环节,标准化的参数适配体系与稳定的工艺环境,大幅缩减了产品性能的离散性,合格产出率显著提高,有效减少了因性能不达标造成的原料浪费与返工损耗;同时稳定的工艺流程降低了生产过程中的能耗与人工调试成本,显著提升了核级电缆绝缘材料的工业化生产效益。应用于核设施后,采用优化后绝缘材料的核级电缆,运

行可靠性实现质的提升,在反应堆周边、高温蒸汽区域等关键部位的长期服役中,未出现任何因绝缘失效导致的电力传输中断、信号紊乱或安全告警等故障,切实保障了核设施电力系统与控制信号传输的平稳高效。这一成效不仅降低了核设施的维护频次与运维成本,更筑牢了核设施安全运行的第一道防线,使核级电缆的安全冗余得到进一步强化,精准契合核工业对关键部件“高可靠、长寿命、强适配”的严苛规范,为核工业高质量发展提供了重要技术支撑。

5 结语

本文聚焦核级电缆用交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺优化开展研究,首先系统梳理了材料及工艺的应用场景与价值,进而深度剖析了实际生产环节存在的辐照剂量分布不均、环境控制偏差、后处理流程欠缺等核心症结,在此基础上靶向提出剂量精准调控、惰性恒温环境搭建、后处理流程补全及参数适配体系构建等优化路径。实践验证结果显示,经优化的工艺能够实质性强化绝缘材料的热稳定性、机械强度、耐辐射性等核心性能,同时明显提升生产合格产出率、压缩成本投入,为核设施安全平稳运行筑牢可靠支撑。后续研究可依托现有优化成果,进一步精化不同规格产品的工艺参数设置,推动该优化工艺在核级电缆生产中的规模化应用,为核工业关键部件的性能保障夯实根基。

参考文献

- [1]陈雅波.辐照交联聚乙烯材料的形状记忆行为研究[D].北京化工大学,2023.
- [2]徐杰,付栋梁,李广富,等.导电型辐照交联聚乙烯发泡材料的制备及其性能[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2022,43(02):90-94.
- [3]古振宏.交联聚乙烯在供电通信电缆中的应用研究[J].塑料科技,2021,49(05):111-114.
- [4]沈晰,布仁孟都.改进核级电缆材料对核电运行安全性的影响[J].电工技术,2020,(12):66-67+69.
- [5]成琦,冯佩云.交联聚乙烯电缆绝缘材料热老化作用下引发电树枝特性研究[J].江苏建材,2025,(05):31-33.

作者简介:曹波,1979年4月生,工程师,远程电缆股份有限公司技术研发部副部长;从事电力电缆及新能源系列电缆的研究、开发和应用。