

环保型线缆护套材料共挤工艺优化及产业化应用

金建林

浙江康威胜高温线缆有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8796

[摘要] 针对环保型线缆护套共挤工艺中存在的层间结合不紧密、界面缺陷突出、生产效率偏低及产品性能离散性大等技术瓶颈，本文结合环保高分子材料的结构特性与共挤成型的传质传热规律，开展工艺参数协同优化研究。通过调控挤出温度梯度、熔体压力分配及牵引速率等关键参数，构建适配环保护套材料的共挤工艺体系，提升护套层间相容性与整体力学性能。研究表明，优化后的共挤工艺可有效降低界面缺陷发生率，增强材料综合服役性能，实现环保线缆护套的高效、稳定生产，为其产业化推广提供理论支撑与技术保障。

[关键词] 环保型线缆护套；共挤工艺；工艺优化；层间相容性；产业化应用

Optimization and Industrial Application of Co-extrusion Process for Eco-friendly Cable Sheath Materials

Jin Jianlin

Zhejiang Kangweisheng High-Temperature Cable Co., Ltd.

[Abstract] To address technical bottlenecks in eco-friendly cable sheath co-extrusion processes—including poor interlayer adhesion, prominent interface defects, low production efficiency, and significant product performance variability—this study conducts synergistic parameter optimization research by integrating the structural characteristics of eco-friendly polymer materials with mass and heat transfer principles in co-extrusion molding. Through controlled adjustments of key parameters such as extrusion temperature gradients, melt pressure distribution, and extrusion rates, an optimized co-extrusion process system compatible with eco-friendly sheath materials was established, enhancing interlayer compatibility and overall mechanical properties. The study demonstrates that the optimized process effectively reduces interface defect incidence, improves material service performance, and enables efficient, stable production of eco-friendly cable sheaths, providing theoretical support and technical assurance for industrial-scale application.

[Key words] Environment-friendly cable sheath; Co-extrusion process; Process optimization; Interlayer compatibility; Industrial application

随着全球环保理念的深化与线缆行业绿色转型的推进，环保型线缆护套材料逐步替代传统非环保材料，成为行业发展的核心方向。共挤工艺作为线缆护套成型的核心技术，其工艺合理性直接决定护套层的结构完整性、力学性能及环保效能。当前环保型线缆护套共挤生产中，普遍存在层间剥离强度不足、成型缺陷较多、生产稳定性差等问题，制约了环保线缆的规模化应用^[1]。因此，开展环保型线缆护套材料共挤工艺优化研究，破解产业化应用中的技术难题，对推动线缆行业绿色升级、提升产品核心竞争力具有重要的理论与工程价值。

1 环保型线缆护套材料的特性及共挤工艺核心要求

1.1 环保型线缆护套材料的核心特性

环保型线缆护套材料以无卤、低烟、低毒为核心特质，主要涵盖无卤阻燃聚烯烃、环保型热塑性弹性体等品类，其分子结构与传统护套材料存在显著差异。此类材料具有良好的环境相容性，在高温分解过程中不产生有毒有害气体，符合全球环保法规对线缆产品的严苛要求。相较于传统材料，环保型护套材料的熔体流动性、热稳定性及层间界面相容性具有独特规律，其熔体粘度对温度和剪切速率的敏感性更高，热分解温度区间相对狭窄，这对共挤工艺的温度控制、压力调节提出了更

高要求。同时，环保型材料的力学性能与加工工艺参数关联性极强，不合理的工艺条件易导致材料降解，进而降低护套的拉伸强度、断裂伸长率及阻燃性能，影响线缆的服役寿命。

1.2 环保型线缆护套共挤工艺的核心要求

共挤工艺是通过多台挤出机将不同功能或不同组分的护套材料同步挤出，经模头复合成型，形成一体化线缆护套的加工方式。环保型线缆护套共挤工艺的核心要求集中于三个维度：一是层间结合的稳定性，需确保各护套层之间无剥离、无气泡等界面缺陷，保障护套整体结构的完整性；二是成型过程的稳定性，需控制熔体流动的均匀性，避免出现偏壁、缩径、表面划痕等成型缺陷；三是性能的一致性，需通过工艺调控，使护套材料的力学性能、阻燃性能、耐环境性能达到行业标准，且产品性能离散性控制在合理范围^[2]。此外，产业化应用背景下，共挤工艺还需兼顾生产效率与成本控制，实现技术可行性与经济合理性的统一。

2 环保型线缆护套材料共挤工艺现存技术瓶颈

2.1 层间界面相容性不足

层间界面相容性不足是当前环保型线缆护套共挤工艺最突出的技术瓶颈。环保型护套材料多为复合改性体系，不同组分材料的分子结构、极性存在差异，导致共挤过程中熔体界面处分子链扩散能力不足，无法形成稳定的化学键结合或分子间作用力。这一问题直接导致护套层间剥离强度偏低，在线缆敷设、弯曲及长期服役过程中，易出现层间分离现象，破坏护套的防护性能，甚至影响线缆的电气绝缘安全性。界面相容性不足还会引发界面气泡、裂纹等缺陷，进一步降低护套的致密性，缩短线缆的使用寿命。

2.2 工艺参数协同性差

共挤工艺的温度、压力、牵引速率等参数之间存在复杂的协同作用，任一参数的不合理设置都会影响整体成型效果。当前生产过程中，工艺参数的调控多依赖经验积累，缺乏系统的理论指导，导致参数协同性较差。温度梯度设置不合理会造成熔体粘度不匹配，出现流动速度差异，引发护套偏壁、层间错位等缺陷；熔体压力分配不均会导致界面处剪切应力过大，破坏分子链结构，降低材料性能；牵引速率与挤出速率不匹配则会造成护套拉伸过度或收缩不均，影响护套的尺寸精度与力学性能^[3]。

2.3 生产稳定性与效率难以兼顾

环保型护套材料的热稳定性较差，在高温长时间加工过程中易发生热降解，因此共挤工艺需严格控制加工温度与停留时间。这一特性导致生产过程中需降低挤出速率以避免材料降解，进而影响生产效率。同时，环保型材料的熔体流动性波动较大，易受原材料批次、环境温度等因素影响，导致共挤成型

过程稳定性不足，产品合格率偏低。此外，现有共挤设备的模头结构、温控系统与环保型材料的加工特性适配性不足，进一步加剧了生产稳定性与效率之间的矛盾，制约了环保线缆的产业化规模化生产。

2.4 产品性能离散性较大

产品性能离散性大是制约环保型线缆护套产业化应用的重要因素。由于共挤工艺参数调控不精准、原材料性能波动、设备运行精度不足等多重因素影响，同一批次甚至同一根线缆的护套性能存在明显差异。这种离散性主要体现在力学性能与阻燃性能上，部分产品的拉伸强度、断裂伸长率未达到行业标准，或阻燃等级波动较大，无法满足线缆在不同场景下的服役要求。性能离散性不仅增加了产品检测成本，还降低了产品的市场竞争力，阻碍了环保型线缆的规模化推广。

3 环保型线缆护套材料共挤工艺优化策略

3.1 界面相容性优化

界面相容性的提升是共挤工艺优化的核心目标，需从材料改性与工艺调控两方面协同发力。在材料层面，通过添加相容剂实现不同组分材料分子链的有效连接，改善界面处的分子间作用力，促进分子链扩散，提升层间结合强度。相容剂的选型需结合环保型护套材料的分子结构，优先选用与基材相容性好、环保性能达标的改性剂，避免引入新的环保隐患。在工艺层面，通过调控熔体温度梯度，使界面处材料处于最佳熔融状态，提升分子链的活动能力，促进界面融合。同时，优化熔体压力，避免界面处剪切应力过大导致的分子链断裂，保障界面结构的完整性。

3.2 共挤工艺参数协同优化

根据环保型护套材料的加工特性，建立工艺参数协同优化体系，对温度、压力、牵引速率等关键参数进行精确控制。温度参数优化要遵循“梯度控温、精准匹配”的原则，根据材料的热稳定性、熔体流动性来合理设置各挤出机料筒、机头、模头的温度梯度，保证熔体在挤出过程中处于稳定的熔融状态，防止出现过热降解或者熔融不充分的问题。熔体压力优化要结合材料粘度特性，调节各个挤出机的螺杆转速和模头压力分配，使各个层的熔体压力均匀一致，防止由于压力差造成的层间错位和缺陷。牵引速率优化要和挤出速率精准匹配，根据护套厚度和材料收缩特性调节牵引速率，保证护套尺寸精度，防止拉伸过度造成性能下降。

3.3 共挤设备结构适配优化

设备结构的适配性是保证共挤工艺稳定性的基础，需要根据环保型护套材料的加工特性，对共挤设备进行针对性改造。模头结构优化是核心，通过改进模头流道设计，使熔体在流道内流动均匀，减少剪切应力波动，避免界面缺陷的产生。同时，

企业可优化模头出口结构,保证各层熔体同步挤出、均匀复合,提高护套成型质量。温控系统优化需使用高精度温控设备,对各个加热区域的温度进行精确控制,减小温度波动,保证熔体性能的稳定性。且企业可对螺杆结构进行优化,改变螺杆长径比、螺槽深度,改善熔体的塑化效果和输送稳定性,减少材料降解,提高生产效率和产品质量。

3.4 生产过程稳定性控制

生产过程稳定性的控制要建立全流程的管控体系,从原材料控制、设备运行、工艺监测等各方面入手。原材料控制方面,制定严格的原材料检验标准,保证原材料性能的一致性,防止由于原材料批次不同造成的工艺波动;对原材料进行预处理,去除水分、杂质等,提高熔体流动性、成型稳定性。设备运行控制方面,定期对共挤设备进行维护和校准,保证螺杆转速、压力、温度等参数的运行精度,及时发现并排除设备故障,防止由于设备问题造成的生产波动。工艺监测方面,利用在线监测设备对熔体温度、压力、护套厚度等关键指标进行实时监测,建立反馈调节机制,并及时调节工艺参数,保证生产过程的稳定性。

4 环保型线缆护套共挤工艺的产业化应用路径

4.1 产业化技术转化体系构建

工艺优化的产业化应用要创建起完善的转化体系,把实验室的优化成果转化为工业化生产的成果。建立工艺参数数据库,将优化后的工艺参数与不同规格、不同类型的环保线缆护套的生产需求对应起来,形成标准化的生产工艺规范,为工业化生产提供技术支持。开展中试生产试验,检验工艺优化方案的可行性、稳定性,针对中试过程中出现的问题,进一步调整优化工艺参数、设备结构,保证工艺方案可以适应工业化大规模生产。加强技术培训,提高生产操作人员的专业技能,保证工艺参数的准确执行,保证产品质量的稳定性。

4.2 产业化生产成本控制

成本控制是环保型线缆护套产业化推广的关键,要在保证产品质量的基础上,通过工艺改进和管理提高,降低生产总成本。工艺上通过改善挤出速率、减少原材料损耗、降低能源消耗等途径来提高生产效率,降低单位产品的加工成本。原材料上,优化材料配方,在保证产品性能的前提下,选用性价比更高的环保原材料,减少相容剂等辅助材料的用量,降低原材料成本。管理上建立精细化生产管理体系,改善生产流程,削减生产过程中的浪费,提升生产效率,加强质量管控,削减产品不合格率,削减返工成本,达成经济效益和环保效益的统一。

4.3 产业化应用场景拓展

根据优化后的共挤工艺,拓展环保型线缆护套的产业化应用领域,促进其在各个领域规模化应用。在电力传输方面,主

要应用于高压、超高压线缆护套,使用优化后的工艺生产的护套材料具有较好的力学性能和阻燃性能,提高电力传输的安全性、可靠性。轨道交通领域中,对轨道交通线缆的恶劣服役环境进行优化,提高护套材料的耐磨损、耐高低温性能,满足轨道交通领域使用要求。在新能源领域,根据新能源线缆的轻量化、环保化需求,推广环保型共挤护套线缆的应用,助力新能源产业绿色发展。拓展海外市场符合全球环保法规的要求,提高我国环保线缆产品的国际竞争力。

4.4 产业化质量标准完善

完善的质量标准是产业化应用的重要保证,要根据优化后的共挤工艺和产品性能,建立环保型线缆护套质量标准体系。参考国内外相关行业标准,根据我国环保线缆行业的发展需求,制定出包含材料性能、工艺参数、产品质量等各方面的具体标准,明确各项指标的检测方法和合格要求。加强质量检测能力建设,配备专业的检测设备和检测人员,对产品性能进行全方位的检测,保证产品符合质量标准。推动质量标准的市场化应用,引导企业严格按照标准组织生产,提高行业整体产品质量水平,为环保型线缆护套的产业化推广打下基础。

5 结论

本文针对环保型线缆护套材料共挤工艺的技术瓶颈,从界面相容性、工艺参数、设备结构及生产管控等方面开展优化研究,得出以下结论:界面相容性优化可通过材料改性与工艺调控协同实现,有效提升护套层间结合强度,减少界面缺陷;工艺参数的协同优化能够解决参数匹配性差的问题,提升成型质量与产品性能一致性;设备结构的适配优化的可改善生产稳定性,兼顾生产效率与产品质量;全流程生产管控体系的建立能够有效控制产品性能离散性,保障生产过程的稳定性。优化后的共挤工艺可有效破解当前环保型线缆护套生产中的技术难题,提升产品综合性能,满足产业化生产需求,为环保线缆的规模化应用提供技术支撑。

[参考文献]

[1]杨焱钦. 极端环境下输电电缆耐候性材料选型及制造工艺适配性研究[C]// 中国智慧工程研究会. 2025 工程创新与可持续发展经验交流会论文集(下). 远程电缆股份有限公司; 2025: 180-182.

[2]兰亚坤,李丹,丁立洋,等. 粉煤灰基防鼠咬 PVC 线缆护套材料的制备与性能研究[J]. 材料导报, 2025, 39(12): 268-273.

[3]姚赛,杨小芳,李小兰,等. 水密连接器用水密护套材料、生产及硫化工艺选用[J]. 科技与创新, 2025, (11): 122-124+128.

作者简介: 金建林, 出生年月: 1975-06-18, 男, 籍贯: 浙江平湖, 汉族, 大专学历, 从事线缆设计制造工作。