

多层共挤工艺对电线电缆绝缘层界面性能的影响分析

罗少龙

建业电缆集团有限公司，河北石家庄，050000；

摘要：电线电缆在电力传输和通信系统中的广泛应用，对其绝缘层的性能要求不断提高。多层共挤工艺因其能够实现多种材料复合成型，提升绝缘层界面结合强度和整体耐热性，被广泛应用于高性能电缆的生产中。本文从多层共挤的工艺原理出发，分析了共挤层数、熔体流动性匹配以及加工参数对界面性能的具体影响，并通过实验对不同共挤结构电缆的界面剪切强度、热老化性能以及电气性能进行对比。研究表明，合理设计共挤结构和优化加工参数，能够显著提升绝缘层界面粘接质量和电缆综合性能，对提升电缆产品的长期运行可靠性具有重要意义。

关键词：多层共挤；绝缘层；界面性能；热老化；熔体黏度匹配

DOI：10.69979/3029-2727.25.06.058

引言

电线电缆作为现代社会基础设施的重要组成，其绝缘性能直接关系到电力系统和通信系统的稳定性与安全性。传统单层挤出工艺在实际应用中逐渐暴露出界面结合不牢、热老化性能差等问题。为满足更高要求的使用场景，多层共挤工艺成为优化绝缘结构、提升界面粘接质量的有效手段。该工艺通过多种热塑性材料在热熔状态下协同挤出，在提升界面附着力的同时，有效兼顾不同层次材料的功能特性，增强了电缆整体的结构稳定性与电气性能。本文系统分析了多层共挤关键工艺参数与界面性能的内在关系，并通过试验数据验证其优化效果，旨在为电缆制造领域提供理论参考与技术支持。

1 多层共挤工艺在电线电缆绝缘制造中的应用背景

随着电力系统对安全性和高可靠性的要求日益提高，传统单一结构的绝缘层已难以满足复杂环境下的长期运行需要。多层共挤工艺利用两种或多种材料在一次加工过程中同时完成挤出和复合成型，通过协同发挥各自材料的优势，实现电缆绝缘层结构性能的整体提升。该工艺在电缆绝缘层制造中具有较强的柔性和多样性，尤其在高压、特种和环保型电缆产品中应用前景广阔。

多层共挤不仅能够实现机械性能、热性能与电气性能的多维优化，还能够降低生产过程中因分层结构带来的二次粘接问题，减少加工环节，提高生产效率。在保证绝缘质量和运行安全的前提下，共挤工艺还能实现对材料成本和资源利用的有效控制，为电缆产品制造向高

端化、智能化方向发展提供了基础支撑。

2 影响绝缘层界面性能的多层共挤工艺参数

2.1 共挤层数对界面粘接效果的影响

共挤层数的设计对于电缆绝缘结构的功能和性能至关重要。共挤技术在电缆生产过程中通过同时挤出多层材料，这些层通常是不同类型的聚合物或金属，具有不同的物理和化学性质。设计适当的共挤层数可以增强电缆的绝缘性能、屏蔽效果以及机械强度。然而，增加共挤层数也会带来一些潜在的问题，特别是界面之间的粘接效果。当共挤层数过多时，如果界面控制不当，容易导致层间剥离现象，特别是在层间存在较大物理或化学差异的情况下。这种剥离现象会削弱电缆的绝缘连续性和整体可靠性，影响电缆的长时间稳定运行。在实际设计过程中，必须根据电缆的实际使用要求，材料的物理特性以及结构需求合理设计共挤层数。试验研究表明，当共挤层数达到三层以上时，界面不均匀或界面粘接不足的问题较为常见，尤其在对热、力学稳定性要求较高的应用场景中，界面问题可能会严重影响电缆的性能。因此，设计时应注重界面控制技术的优化，确保每一层之间能够均匀且牢固地结合，以避免因层间剥离造成的性能衰减。

2.2 熔体流动性匹配对界面质量的影响

在共挤生产过程中，材料熔体的流动性能对于界面质量有着至关重要的影响。不同材料的熔体具有不同的黏度，这直接决定了共挤过程中材料的流动性及其层间的融合程度。如果不同材料的黏度相差过大，将导致各

层材料的流动不协调，从而产生界面应力集中，甚至导致气泡、分层或其他缺陷的形成。这些缺陷不仅影响电缆的机械性能，还可能导致电气绝缘性能的下降，影响电缆的使用寿命。为此，在共挤过程中，必须精确控制各个材料的熔体黏度，确保不同材料之间能够良好融合。通过调整材料的牌号、改良配方或控制加工温度，可以实现熔体的黏度匹配，改善各层材料的流动性能，避免过大黏度差异带来的问题。此外，熔体流动性不仅影响成型质量，还直接关系到电缆的生产效率和缺陷率。在生产过程中，通过优化熔体的流动性，能够提高界面的融合度和剪切强度，从而确保电缆在使用中的稳定性和可靠性。随着技术的进步，越来越多的先进共挤设备能够通过自动化控制系统精确调节熔体流动性，这为提升电缆的生产质量提供了技术支持。

2.3 温度与压力工艺参数调控

在共挤过程中，加热温度和模具压力是确保层间粘接质量和电缆结构完整性关键工艺参数。通过加热处理，可以增加聚合物链段的活动性，使其能够更加有效地扩散到相邻材料中，增强界面之间的结合力，提高层间的粘接强度。然而，温度过高可能导致材料的热降解，产生有害物质或影响材料的机械性能，进而影响电缆的整体质量和安全性。因此，在实际生产中，温度的控制必须非常精确，以确保每一层材料的最佳熔融状态，并防止过热引起的副作用。同时，模具压力的精确控制也同样至关重要。压力不仅影响材料的压实程度，还决定了不同层材料的接触紧密度，进而影响其成型质量和整体结构的稳定性。若模具压力不稳定，可能导致材料分布不均匀、层间结合不紧密等问题，进一步影响电缆的性能。因此，温压同步控制系统的建立显得尤为重要。通过对温度和压力的精细调控，可以确保共挤工艺稳定运行，提升每一批次产品的一致性和可靠性。随着智能化控制技术的发展，自动化系统能够根据实时反馈调整温度和压力，保证生产过程的精确性，从而显著提升电缆产品的质量和生产效率。

3 多层共挤绝缘结构的性能测试与分析

3.1 界面剪切强度测试结果

界面剪切强度是衡量不同层间结合力的重要指标，决定着电缆在机械应力作用下的稳定性和可靠性。在实验中，通过对不同工艺参数下制备的共挤样品进行界面

剪切强度测试，结果显示，经过优化处理的三层共挤绝缘结构相比于传统的双层结构，其界面粘接强度提升了30%以上。这一性能的提升，主要得益于层间界面扩散程度的加深与压力保持时间的合理延长。优化后的工艺使得不同材料之间的界面接触更加紧密，减少了微观空隙和非结合区域，从而增强了层间的粘接强度。此外，经过改良的共挤工艺能够使不同材料的熔体流动性和界面融合性得到进一步提升，有效增强了整个结构的力学稳定性，确保了电缆在长时间运行和承受外力作用下的可靠性。特别是在长期使用过程中，界面强度的提升能够有效避免因层间剥离或开裂导致的电缆性能下降，因此，优化后的三层共挤结构在实际应用中展现出更高的耐久性与稳定性，适用于要求高强度和高可靠性的电力系统中。

3.2 热老化性能与体积电阻率对比

电缆绝缘层的热稳定性对其长期使用寿命和电气性能至关重要，特别是在高温环境下工作的电缆。为了考察共挤结构在高温环境中的稳定性，实验将不同绝缘结构的样品置于135℃的老化箱中进行72小时的热老化实验。结果表明，多层共挤绝缘样品的体积电阻率下降幅度较小，低于15%，显著优于传统单层挤出结构。这表明，优化后的多层共挤结构能够有效减缓热应力的集中，保持较好的电阻性能和界面稳定性。尤其是在长时间的高温老化过程中，传统单层挤出结构容易出现热老化加剧、电阻下降迅速的问题，而多层共挤结构通过层间界面的协同作用，能够有效阻止热应力的传播和积累，从而提高整体结构的耐高温性能和使用寿命。此外，多层结构在高温环境下能够保持完整的界面无剥离现象，进一步证明了其在高温条件下的优异稳定性。该特性使得多层共挤绝缘结构成为高温、高负荷环境下电力电缆的理想选择，能够确保电缆在恶劣条件下的稳定运行。

3.3 工频击穿电压测试

工频击穿电压是电缆绝缘材料在电场作用下耐压能力的核心指标，它直接影响电缆的安全运行性能。在工频击穿试验中，使用多层共挤结构的电缆样品，其平均击穿电压比普通单层结构高出约12%。这一结果表明，多层共挤结构通过多个层间界面的形成，有效提高了电缆的整体绝缘能力。具体而言，多层共挤结构能够通过

逐层的阻挡和分散作用，延缓电场穿透的速度，减小电场强度的集中，从而提高电缆的击穿电压。每一层材料的存在都在一定程度上分散了电场的能量，防止了电场强度过度集中在某一位置，减少了局部电击穿的风险。这种结构特性使得多层共挤电缆能够承受更高的电压，并有效提高电缆在高压环境下的安全性和稳定性，尤其适用于高压输电和高压配电系统中。通过增强电场分布的均匀性和提升电缆的绝缘水平，确保了电缆在长期运行中的电气安全，从而有效避免因击穿引发的电力系统故障。因此，多层共挤技术在提升高压电缆的安全性和可靠性方面具有重要的应用价值。

4 多层共挤工艺优化路径与界面性能提升措施

4.1 材料兼容性选择与复配设计

在多层共挤工艺中，选择合适的热塑性材料是确保界面质量的关键。材料的兼容性不仅决定了层间粘接的强度，还影响最终产品的稳定性和耐用性。例如，聚烯烃与乙烯-醋酸乙烯酯共混体系因其优异的相容性和易于形成稳定的分子链网络，广泛应用于多层共挤过程中。为了进一步提高层间结合力，常常通过加入界面促进剂和增粘剂，这些添加剂能显著增强分子之间的相互作用力，改善界面粘接效果。适量的增粘剂能够提高热塑性材料之间的粘结强度，避免多层结构中的剥离现象。合理的复配设计使得不同材料之间的界面更加稳定，提升了产品的整体性能，确保其在不同工作环境下的长期使用。

4.2 工艺参数智能控制系统构建

为了提高多层共挤工艺的生产一致性和界面粘接质量，智能控制系统的引入显得尤为重要。通过精确调控温度、压力、熔体流速等关键参数，智能控制系统可以确保生产过程中各项指标始终保持在最优状态。传感器和数据反馈机制的应用，能够实时监测并动态调整加工条件，从而应对原料波动、环境变化及其他不可控因素对生产质量的影响。这种智能化工艺控制不仅能有效提升产品的稳定性，减少生产中的不良品率，还能提高生产效率，降低资源浪费。智能化系统的引入为多层共挤技术的工业化应用提供了强有力的支持，进一步推动了该技术在高要求产品制造中的广泛应用。

4.3 模具结构与流道优化设计

多层共挤模具的设计对熔体流动路径与层间界面形成具有直接影响。合理设计模头结构、优化流道形状与分布，有助于避免因流速不均或交叉污染造成的界面缺陷。在模具设计中可采用 CAE 模拟手段，提前预测材料行为并进行修正，以实现高精度共挤控制。

5 多层共挤在电缆绝缘层领域的应用展望

多层共挤工艺作为提高电缆绝缘性能的有效手段，其发展前景十分广阔。随着新型聚合物材料的不断涌现，共挤技术的功能多样性将进一步拓展，不仅限于传统的机械与电气性能提升，更将兼顾阻燃、环保、智能感应等复合功能。尤其是在高压直流电缆、核电站电缆和深海通信电缆等高端领域，多层共挤将发挥不可替代的关键作用。

未来研究方向应聚焦于新材料界面兼容性机制、纳米填料在共挤中的协同增强效应，以及多功能复合共挤结构的设计与评估。同时，推动共挤设备的自动化与绿色化改造，有助于提升产业化水平，推动电缆行业高质量发展。

6 结论

本文系统探讨了多层共挤工艺对电线电缆绝缘层界面性能的影响，结合理论分析与实验数据，验证了共挤工艺在提升粘接强度、热稳定性及击穿电压等方面的优势。研究表明，通过合理设计材料体系、优化工艺参数及强化模具控制，能够显著改善绝缘层的结构稳定性与运行可靠性。建议在未来电缆制造中积极推广多层共挤技术，进一步探索智能化控制与多功能集成路径，为高端电缆产品的升级提供有力支撑。

参考文献

- [1] 刘志强, 黄昱, 吴旭. 多层共挤技术在电缆绝缘中的应用研究[J]. 电线电缆, 2022(06): 47-51.
- [2] 张超, 陈丽娜. 共挤出工艺对聚合物绝缘材料界面性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2021(04): 89-93.
- [3] 王文博, 邱晓明. 多层共挤模具设计及其对电缆性能的作用分析[J]. 电工材料, 2023(02): 103-107.
- [4] 杨帆, 杜浩. 高压电缆绝缘系统中的多层共挤加工优化研究[J]. 现代塑料加工应用, 2020(10): 67-71.
- [5] 胡建军, 吕宏伟. 聚烯烃复合共挤材料界面结构及电气性能分析[J]. 绝缘材料, 2023(01): 121-125.