Innovative preparation of special cable insulation materials

Chunhe Zhou

Jiangsu Huaneng Cable Co., Ltd., Jiangsu 225699

Abstract

With the rapid development of power transmission and communication technologies, the importance of special cable insulation materials has become increasingly prominent. This paper reviews the performance requirements and development trends of special cable insulation materials and discusses a range of innovative preparation processes, including nanomodification, polymer blending, and crosslinking techniques. Furthermore, the key parameters and standards for material property characterization and verification are analyzed. The findings indicate that innovative preparation techniques tailored to diverse industrial demands significantly enhance the electrical, mechanical, and environmental resistance properties of insulation materials, providing new directions for future research and industrial applications in the cable materials field.

Keywords

special cables, insulation materials, innovative preparation, performance characterization, development trends

特种电缆绝缘材料的创新制备

周春和

江苏华能电缆股份有限公司, 中国·江苏 高邮 225699

摘要

随着电力传输和通信技术的快速发展, 特种电缆绝缘材料的重要性日益凸显。本文综述了特种电缆绝缘材料的性能要求及发展趋势, 探讨了一系列创新制备工艺, 包括纳米改性、高分子共混和交联技术等。同时, 针对材料性能表征和验证, 本文分析了关键参数的测试方法及相关标准。研究表明, 针对不同行业需求定制的创新制备技术显著提升了绝缘材料的电气、机械和环境耐受性, 为电缆材料领域的未来研究和产业化应用提供了新方向。

关键词

特种电缆, 绝缘材料, 创新制备, 性能表征, 发展趋势

1 引言

随着现代工业与科技的飞速发展, 特种电缆在能源、电力、通信、航空航天、海洋工程等领域得到了广泛应用。这些应用场景通常需要电缆能够在高温、极寒、强腐蚀、高压等恶劣环境中长期稳定工作, 而电缆绝缘材料的性能直接决定了电缆能否满足这些苛刻的使用要求。传统绝缘材料(如PVC、PE等)虽然已经在普通环境中得到了良好的应用, 但其在耐高温、耐腐蚀及高电气性能等方面存在明显局限性, 难以满足特种电缆技术日益严苛的需求。因此, 开发新型绝缘材料和创新制备工艺, 成为特种电缆产业发展的关键环节。

2 特种电缆绝缘材料的性能要求与发展趋势

电缆的性能要求在不同应用场景下相差较大, 尤其是特种电缆, 其绝缘材料需要具备针对性的性能表现, 以满足现代复杂环境的需求。本节将从性能需求分析、当前主流绝

缘材料的局限性以及未来技术发展趋势三个方面展开论述。

2.1 性能需求分析

特种电缆的使用环境极具挑战性, 其绝缘材料需满足以下特定性能需求:

高温电缆

高温环境下使用的电缆需要具备优异的耐高温性能和耐热分解能力。其绝缘材料在长时间热暴露条件下不能发生明显分解或性能衰减, 同时必须维持足够的机械强度和电气稳定性。例如, 航空航天电缆以及工业高温设备电缆对材料的温度承载范围提出了极高要求。

低温电缆

低温工况下的电缆需要具有良好的柔韧性和可靠性。在极寒环境中, 传统绝缘材料可能出现脆化或机械性能下降的问题, 因此需要材料在零下几十摄氏度甚至更低的温度下保持柔韧性和电绝缘性, 典型应用包括极地工程和冷链物流领域的电缆。

防腐电缆

在化工厂、海洋工程等存在化学腐蚀性环境的场景中, 电缆绝缘材料需具备极强的耐化学腐蚀性和抗老化能力。材

【作者简介】周春和(1974-), 男, 中国江苏扬州人, 工程师, 从事特种电缆研发研究。

料不仅要长期抵抗酸、碱、盐等介质的侵蚀，还要应对紫外线、高湿度等因素对绝缘层寿命的影响。

高压电缆

高压电缆对绝缘材料的介电性能有极高要求，尤其是介电强度和体积电阻率。绝缘材料需要在高电场作用下保持低的介电损耗，同时避免电场集聚引发的热击穿现象。这对输电系统的稳定运行至关重要。

2.2 当前主流绝缘材料及其局限性

目前，聚氯乙烯（PVC）、聚乙烯（PE）、交联聚乙烯（XLPE）等传统高分子材料仍占据电缆绝缘市场的主导地位。但在一些特种应用场景中，这些材料逐渐暴露出其局限性：

聚氯乙烯（PVC）

作为一种常用材料，PVC具有成本低、易加工的优点。然而，其耐高温性能相对较弱，长期暴露在高温环境中容易出现分解或老化。此外，PVC在燃烧时会释放大量有毒烟雾，不符合绿色环保要求。

聚乙烯（PE）与交联聚乙烯（XLPE）

PE和XLPE材料以其低介电常数和优异的电气性能而被广泛应用。然而，普通PE的耐低温性能较差，容易在极端寒冷条件下变脆。尽管XLPE改性改善了其耐热性，但其抗化学腐蚀性和老化性能仍不足，且XLPE的交联过程不可逆，材料回收利用困难。

其他传统材料

如乙丙橡胶（EPR）和聚酰亚胺（PI）等，在特定性能要求下表现出一定优势，但普遍存在加工复杂、成本较高等问题，限制了其大规模普及应用。

2.3 技术发展趋势

为了满足特种电缆日益复杂的使用需求，并弥补传统材料的不足，未来的电缆绝缘材料正朝着更环保、更高性能和更长寿命的方向快速发展，主要体现在以下几个趋势：

无卤低烟绝缘材料的发展

随着环保法规的逐渐严格，无卤低烟材料受到广泛关注。这类材料在燃烧时产生的烟雾更少且不含卤化物，对环境和人体危害更低。目前，无卤低烟阻燃聚烯烃等已在特定场景中替代PVC材料，前景广阔。

新型高分子复合材料的应用前景

高分子复合材料结合了多种基体和增强组分的特性，可以在提高机械性能、电气性能以及抗老化性能方面实现新的突破。例如，利用导热填料制备的复合绝缘材料可提高高温电缆的散热效率，从而延长其使用寿命。

纳米材料在绝缘性能提升中的潜力

纳米材料的引入为高性能绝缘材料的发展提供了新的方向。纳米填料可以显著改善高分子材料的介电性能和机械性能，提升其击穿强度和体积电阻率。例如，利用石墨烯、碳纳米管等材料开发的纳米复合绝缘材料可以满足高压和超高压电缆的需求，同时在轻量化材料开发中也展现出巨大潜力。

综上所述，特种电缆绝缘材料的研发正进入一个技术革新的关键阶段。通过对材料性能的针对性改进，以及新技术的融入，未来将出现更多满足特定需求的绝缘材料，从而推动特种电缆行业的持续发展。

3 特种电缆绝缘材料的创新制备工艺

特种电缆绝缘材料的性能很大程度上取决于其制备工艺的先进性与创新性。通过新型材料的设计、工艺研究以及绿色技术的应用，不仅能够提升材料的性能，还能显著降低制备过程的环保压力。以下将对相关创新制备工艺进行分析。

3.1 新型材料的设计与开发

随着电缆使用环境和功能需求的日益复杂，传统电缆绝缘材料已经难以满足工业发展的要求。因此，通过对高分子基体的深入改性，以及新型混合材料、复合材料的模块化开发，为特种电缆绝缘材料的性能提升提供了全新的方向。例如，通过对高分子基体的分子结构优化，可显著提高材料的介电性能和耐热性能。

此外，氟塑料和硅橡胶等高级材料的创新应用为材料开发带来更多可能。氟塑料凭借其优异的介电性能、高温耐受性以及耐腐蚀性，成为航空航天和高端工业领域的理想材料。而硅橡胶以其优良的柔韧性、耐温性和电绝缘性能广泛应用于恶劣环境电缆中。结合这些新型材料开展模块化的组合开发，可在满足多功能性的同时，进一步提升特种电缆的可靠性和使用寿命。

3.2 新型制备工艺的研究

为了充分释放新材料的性能潜力，创新制备工艺成为关键研究方向。纳米技术的引入在提升特种电缆绝缘材料的性能方面表现出显著优势。例如，在高分子材料中均匀引入纳米颗粒，不仅能够提高其耐热变形温度，还能增强其电绝缘强度和机械强度。此外，等离子辅助制备技术能够有效改善材料表面结构，从而优化界面性能，解决不同组分之间结合力不足的问题。而高能射线交联技术的应用，则通过改变材料的微观交联结构，大幅提升其耐热性、机械性能和抗老化性能。

双组分共混技术和自交联制备技术是另一类关注的创新工艺，通过不同组合物的分子级均匀混合实现材料性能的综合优化。自交联技术依靠材料内部的活性基团实现化学交联，能够明显减少制备过程中使用的添加剂种类，从而简化工艺流程并提升制备效率。

3.3 绿色制备技术

基于全球可持续发展的要求，绿色制备技术在特种电缆绝缘材料研究中显得尤为重要。在制备绝缘材料时，可通过引入环保型原料和优化工艺配方来降低环境负担，例如采用可再生资源基的高分子单体替代传统石化原料以减少制备过程中的碳排放。同时，通过合理控制能耗和废料排放，不仅能够达到环保目标，还可以有效降低生产成本。例如，利用节能型加工设备和循环利用技术处理废料，将制备过程

的材料损耗降到最低。

4 特种电缆绝缘材料性能表征与验证

在特种电缆绝缘材料的研发与应用过程中，性能表征与验证是评估材料是否能够满足实际需求的关键环节。通过系统的表征方法和严格的测试，可以深入了解材料的性能特点，并为其优化设计和工程应用提供可靠依据。

4.1 表征方法

4.1.1 热性能

热性能是绝缘材料在高温环境下稳定运行的基础。

耐热性：采用热重分析(TGA)和差示扫描量热法(DSC)评估材料的热分解温度和玻璃化转变温度，以判断其在高温环境下的稳定性。

热老化性能：通过在恒定高温环境下长期保存材料，结合拉伸测试和介电性能分析，评价材料失效的速率和行为。

4.1.2 电性能

电性能是衡量绝缘材料在工作电场中的绝缘效果和稳定性的核心指标。

介电常数和损耗角：利用电容法测定不同频率电场条件下的介电常数，以保证信号传输的稳定性和效率。

击穿强度：通过击穿测试仪施加逐步升高的直流或交流电压，测定材料的最大击穿电压，用以确定其绝缘极限。

绝缘电阻：通过绝缘电阻测试评估材料在高电阻状态下的泄漏电流行为。

4.1.3 机械性能

为确保电缆在复杂铺设环境中的稳定性和机械完整性，需严格评估其机械性能指标。

拉伸强度：在拉伸试验机上测试材料的最大承受张力，验证其抗拉能力。

抗弯强度：通过抗弯测试观察材料在受弯曲力作用下的变形和破坏情况，预测其在实际施工中的表现。

抗冲击性能：采用落锤冲击试验检测材料对瞬时冲击力的承受能力，以保证其在恶劣施工环境下的耐用性。

4.1.4 化学稳定性

特种电缆材料通常需要面对腐蚀性化学物质的长期侵蚀，化学稳定性表征尤为重要。

耐腐蚀性：通过浸泡腐蚀性溶液(如酸、碱、盐等)后的性能变化分析，测定其抗化学降解能力。

抗化学降解性：通过红外光谱(FTIR)或色谱分析测试受腐蚀后材料的化学结构变化，以研究其抗分解能力。

4.2 材料性能测试案例分析

特种电缆绝缘材料性能优越性往往依赖于先进的制备工艺，为此需要结合典型测试案例分析不同工艺的影响：

制备工艺与性能提升的案例比较：案例研究表明，辐射交联工艺显著提高了材料的热稳定性，与普通工艺相比，其击穿强度平均提升30%以上，同时耐老化性能得到显著改善。相较于传统化学交联材料，实验测试显示其在

200°C高温下仍可以保持较高的介电强度。

典型应用场景的实际验证：某特定耐极寒电缆绝缘材料在实际低温场景(-50°C)应用测试中显现了优异的柔韧性及低温击穿强度稳定性；而一种专为海洋环境设计的耐腐蚀绝缘材料，在高盐雾腐蚀测试中，其介电性能保持率超过95%。

4.3 应用环境模拟实验

通过高度仿真的环境模拟实验，可以验证材料在极端条件下的可靠性和长期稳定性：

高低温测试：采用热循环实验，将材料暴露于-60°C至+200°C快速转换的环境中，分析其机械性能和绝缘性能的保持情况。

强化学腐蚀测试：在酸、碱及盐溶液中进行长期浸泡实验，结合电性能变化评价材料的抗腐蚀能力。

高压环境测试：通过长期高压耐受实验(例如在50kV以上长时间施压)，验证材料长期暴露在高电场时的电击穿稳定性和耐久性。

综合以上表征方法与验证结果，可以科学地评估特种电缆绝缘材料的性能特点，为进一步的设计优化与实际应用提供科学依据和数据支持。

5 结论与展望

在特种电缆绝缘材料的研究中，创新制备工艺的开发以及性能优化始终是行业发展的关键驱动力。通过本文的研究与分析，我们总结出以下几点结论：特种电缆绝缘材料需要满足更高的介电性能、耐高温性能、机械强度及环境适应性，这对材料的设计与制造提出了严苛的要求。创新制备工艺，例如高分子复合技术、纳米改性技术和交联改性工艺，为提升绝缘材料的综合性能提供了有效的解决方案。通过这些技术能够实现材料在极端环境下的长期稳定性。

先进的性能表征与验证手段，例如微观结构分析、电气性能测试及耐久性评估，在推动材料研发向前发展中起到了不可或缺的作用。这些方法确保了材料性能的精确评估与可靠应用的保障。

参考文献

- [1] 柔性矿物绝缘电缆. 张俊;王勇诚;涂兆钜;徐守森.国家科技成果.
- [2] 矿物绝缘电缆接续安装技术研究. 邹昌元;刘长虹;于小四;朱孔新;钟国宪;赵玲;陈明辉;邓德福;寇元召;马建荣;崔小强;左伟峰.国家科技成果.
- [3] 1000MW级核电汽水分离再热器研制及产业化. 唐伟;杨帆;刘晓鸿;伍龙燕;汪静;梁化;许海伦;陈晓娟;张凯杨;侯敬宏;程怒涛;张玉祯;梁宇;蔡泽波;杨云.国家科技成果.
- [4] Bi系高温超导线材的研制及产业化技术攻关. 韩征和;刘庆;张劲松;刘伟;易汉平;刘梦林;汪国振;刘莉;陈兴品;李明亚;宋秀华;康伟;顾晨;史锴;潘朝阳;刘树立;宗军;刘婷;孟均;陈胜;刘大勇;董宁波;张幼苓.国家科技成果.
- [5] 箱式变电站产业化开发. 文天福;刘振林;冯民权;罗剑锋;旃乔锋;解德荣;师尚疆;许永金.国家科技成果.