

承荷探测电缆双层绝缘材料的选择与探讨

邹安明

江苏华能电缆股份有限公司，江苏高邮，225699；

摘要：承荷探测电缆在深海、极地等极端环境中扮演着至关重要的角色，其双层绝缘材料的选择直接关系到电缆的性能和寿命。本文首先阐述了双层绝缘材料的基本特性与要求，包括构成、电气性能和机械性能等方面。接着，对传统双层绝缘材料如聚乙烯-聚丙烯、交联聚乙烯-乙丙橡胶等进行了深入分析，指出了它们的优缺点及改进方向。同时，探索了新型双层绝缘材料，如纳米复合、热塑性弹性体和环保型材料，展望了它们在承荷探测电缆中的潜在应用。最后，提出了双层绝缘材料的选择策略与方法，并通过实验验证与性能测试，为材料选择提供了科学依据。

关键词：承荷探测电缆；双层绝缘材料；材料选择策略；性能测试

DOI：10.69979/3060-8767.24.05.017

引言

承荷探测电缆作为深海、极地等极端环境下数据传输的重要载体，其性能稳定性与可靠性至关重要。双层绝缘材料作为电缆的核心组成部分，不仅承担着电气隔离的任务，还需具备优异的机械性能和耐环境性能。随着探测技术的不断发展，对双层绝缘材料的要求也日益提高。本文旨在深入探讨双层绝缘材料的基本特性、传统材料的优缺点、新型材料的探索与发展，以及材料的选择策略与方法。通过综合分析，为承荷探测电缆双层绝缘材料的选择提供科学依据，推动探测技术的进一步发展。

1 双层绝缘材料的基本特性与要求

1.1 双层绝缘材料的构成

双层绝缘材料通常由内层和外层两层不同材质的绝缘层构成，各自承担着特定的功能，并相互协同作用，以确保电缆的整体性能。

内层绝缘材料通常选用具有高电气绝缘性能的材料，如聚乙烯（PE）、交联聚乙烯（XLPE）等。这些材料具有优异

的绝缘电阻和击穿电压，能够有效隔离电缆内部的导体与外部环境，防止电流泄漏和短路现象的发生。同时，它们还具备良好的耐温性能，能够在较高的温度下保持稳定的电气性能。外层绝缘材料则更注重机械保护和耐环境性能。例如，聚丙烯（PP）、乙丙橡胶（EPR）等材料因其良好的抗拉强度、耐磨损和抗疲劳性能而被广泛应用。外层材料还需具备优异的耐腐蚀性，以抵御深海、极地等极端环境下的腐蚀介质对电缆的侵蚀。

两层绝缘材料之间的配合也至关重要。内层材料需紧密贴合导体，确保电气绝缘的连续性；外层材料则需紧密包裹内层，形成坚实的保护层。两层材料之间的相互作用应保证电缆在弯曲、扭转等机械变形下仍能保持良好的电气和机械性能。同时，两层材料的选择还需考虑它们的相容性和加工性，以确保电缆的制造质量和使用寿命。

1.2 双层绝缘材料的电气性能

双层绝缘材料的电气性能是衡量其质量的重要指标，直接关系到电缆的传输效率和安全性。以下是对双层绝缘材料电气性能的详细分析，通过表格形式呈现：

表 1 双层绝缘材料电气性能参数表

参数名称	衡量标准/影响因素	内层材料要求	外层材料要求
绝缘电阻	单位长度电阻值，越高越好	需具有高绝缘电阻，减少电流泄漏	辅助提高整体绝缘电阻，增强电气隔离效果
击穿电压	材料能承受的最大电压，越高表示耐压性能越好	需具备较高的击穿电压，防止电压击穿	增强电缆的耐压能力，提供额外保护
介电常数	反映材料对电场的响应能力，影响信号传输速度	需保持适中的介电常数，确保信号稳定传输	对介电常数要求相对较低，但需与内层匹配
介电损耗	材料在电场作用下能量损耗的程度，越低越好	需具有低介电损耗，减少信号衰减	介电损耗需控制在一定范围内，避免过热
极端环境稳定性	在高温、低温、高压、腐蚀等极端环境下的性能保持能力	需保持良好的稳定性，确保长期可靠运行	需具备优异的耐环境性能，增强电缆耐久性

在双层绝缘材料的选择中，内层材料需具备高绝缘电阻、高击穿电压、适中的介电常数和低介电损耗，以确保信号的稳定传输和减少能量损耗。外层材料则需在保持一定电气性能的基础上，更注重机械保护和耐环境性能，以增强电缆的整体耐久性和可靠性。同时，两层材料的电气性能需在极端环境下保持稳定，以确保电缆在各种恶劣条件下的正常运行。

1.3 双层绝缘材料的机械性能

双层绝缘材料的机械性能是确保电缆在各种复杂环境中稳定运行的关键。对于内层绝缘材料，其抗拉强度需达到一定标准，以承受电缆在敷设和使用过程中可能受到的拉力。例如，某些高性能绝缘材料的抗拉强度可达数十兆帕，确保电缆在拉伸时不易断裂。同时，延伸率也是重要指标，它反映了材料在受力时的形变能力，高延伸率材料能更好地适应电缆的弯曲和扭转。外层绝缘材料则需具备优异的耐磨损和抗疲劳性能。在深海、极地等恶劣环境中，电缆可能受到海流冲击、岩石摩擦等物理磨损，耐磨损材料能有效延长电缆使用寿命。抗疲劳性能则关乎电缆在长期使用下的稳定性，良好的抗疲劳性能可减少因材料疲劳导致的断裂风险。总体而言，机械性能直接影响电缆的使用寿命和可靠性，选择具有高抗拉强度、高延伸率、耐磨损和抗疲劳性能的双层绝缘材料，是确保承荷探测电缆性能稳定的关键。

2 传统双层绝缘材料的分析与评价

2.1 聚乙烯-聚丙烯复合绝缘材料

聚乙烯（PE）与聚丙烯（PP）作为两种常用的热塑性树脂，其复合绝缘材料在承荷探测电缆中展现出独特的应用价值。聚乙烯具有优良的耐低温性能、化学稳定性和电绝缘性，而聚丙烯则以其良好的耐热性、机械强度和化学稳定性著称。将两者复合，可结合两者的优点，提升电缆的综合性能。

在承荷探测电缆中，聚乙烯-聚丙烯复合绝缘材料被广泛应用于深海、极地等极端环境。例如，某型深海探测电缆即采用此材料作为绝缘层，其抗拉强度达到 40MPa 以上，延伸率超过 300%，有效保障了电缆在复杂环境下的稳定运行。然而，该材料也存在一定局限性。聚乙烯的耐热性相对较弱，在高温下易发生变形；聚丙烯则耐候老化性较差，易受光照和氧气作用而老化。因此，未来改进方向可聚焦于提升材料的耐热性和耐候性，如通过添加耐热、抗氧化剂或采用共混、共聚等改性手段，进一步提升聚乙烯-聚丙烯复合绝缘材料的综合性能。

2.2 交联聚乙烯-乙丙橡胶复合绝缘材料

交联聚乙烯（XLPE）通过化学交联反应，将聚乙烯分子链形成三维网状结构，显著提升了其耐热性、机械强度和电气性能。乙丙橡胶（EPR）则以其出色的耐温、耐腐蚀性能闻名，能够在极端环境下保持稳定的物理和化学性质。将交联

聚乙烯与乙丙橡胶复合，形成双层绝缘结构，为承荷探测电缆提供了卓越的综合性能。例如，某型高压海底电缆即采用此材料，其耐热温度可达 120℃，远高于普通聚乙烯的耐热上限。乙丙橡胶的耐腐蚀性则有效抵御了海水中的盐分和其他腐蚀性物质的侵蚀。与其他传统绝缘材料相比，交联聚乙烯-乙丙橡胶复合绝缘材料在耐热性、耐腐蚀性以及机械强度等方面均表现出明显优势。其独特的双层结构，内层 XLPE 提供优异的电气性能，外层 EPR 则负责机械保护和耐环境性能，二者相得益彰，为承荷探测电缆在极端环境下的稳定运行提供了坚实保障。

2.3 其他传统双层绝缘材料

除了聚乙烯-聚丙烯和交联聚乙烯-乙丙橡胶复合绝缘材料外，聚氯乙烯（PVC）-尼龙和氟塑料-硅橡胶复合绝缘材料也是常见的传统双层绝缘材料选择。聚氯乙烯-尼龙复合绝缘材料结合了 PVC 的良好绝缘性和尼龙的耐磨、高强度特性，广泛应用于低压电线电缆领域。例如，某型工业控制电缆即采用此材料，其绝缘电阻稳定，抗拉强度可达 50MPa 以上。氟塑料-硅橡胶复合绝缘材料则以其卓越的耐高低温、耐化学腐蚀性能著称。氟塑料如聚四氟乙烯（PTFE）具有极低的摩擦系数和优异的电绝缘性，硅橡胶则具备良好的弹性和耐温性能。两者复合后，适用于高温、腐蚀环境下的特殊电缆需求。然而，传统双层绝缘材料在极端特殊环境下，如深海超高压、超低温等，仍面临一定的应用局限性，需要不断探索新型材料以突破技术瓶颈。

3 新型双层绝缘材料的探索与发展

3.1 纳米复合绝缘材料

纳米复合绝缘材料通过引入纳米粒子，对传统绝缘材料进行改性，显著提升了其电气与机械性能，为承荷探测电缆的发展带来了新的机遇。以下是对纳米复合绝缘材料的简要介绍与性能分析：

表 2 纳米复合绝缘材料性能分析表

性能/特点	内容描述
纳米粒子引入	通过化学或物理方法，将纳米尺度的无机填料（如二氧化硅、氧化铝等）引入绝缘材料基体
改性原理	纳米粒子的小尺寸效应和界面效应，有效阻碍电荷传输和积聚，提升材料性能
电气性能提升	显著提高绝缘电阻、击穿电压，降低介电常数和介电损耗，增强电气绝缘效果
机械性能提升	增强材料的抗拉强度、延伸率、耐磨损和抗疲劳性能，提高电缆使用寿命
潜在应用前景	在承荷探测电缆中，纳米复合绝缘材料可应用于高压、高温、深海等极端环境，提供卓越的性能保障

纳米复合绝缘材料凭借其独特的改性原理和优异的性能提升，在承荷探测电缆领域展现出广阔的潜在应用前景。随着技术的不断进步，纳米复合绝缘材料有望成为未来电缆绝缘材料的重要发展方向。

3.2 热塑性弹性体复合绝缘材料

热塑性弹性体 (TPE) 作为一种兼具橡胶弹性和塑料加工性能的新型材料,在绝缘材料领域展现出独特的优势。TPE 具有出色的弹性、耐磨性和耐候性,且加工便捷,可通过注塑、挤出等塑料加工工艺进行成型,大大提高了生产效率。以某型承荷探测电缆为例,其采用 TPE 复合绝缘材料,抗拉强度达到 45MPa,延伸率超过 350%,同时具有良好的电绝缘性和耐候性。TPE 与传统绝缘材料如聚乙烯、聚氯乙烯等具有良好的兼容性,可通过共混、共挤等方式实现复合,进一步提升电缆的整体性能。在复杂环境下,如深海、极地等极端条件,TPE 复合绝缘材料展现出优异的适应性。其耐低温、耐海水腐蚀性能显著,能够有效保障电缆在恶劣环境中的稳定运行。此外,TPE 材料的可回收性也符合环保要求,为电缆产业的可持续发展提供了新的解决方案。

3.3 环保型双层绝缘材料

环保型双层绝缘材料,作为电缆行业的新兴趋势,正逐步满足日益严格的环保要求。以下是对一种环保型双层绝缘材料的关键参数概览:

表 3 环保型双层绝缘材料参数数据表

参数类别	具体描述与数据
环保趋势与要求	符合低 VOC、可回收、生物降解等环保标准,推动绿色电缆发展
生物基/可降解材料	含有 $\geq 30\%$ 生物基聚合物(如 PLA、PHA 等),或添加可降解成分
电气性能	绝缘电阻 $>10^{12} \Omega \cdot m$,击穿电压 $\geq 40kV/mm$,保证电缆安全传输
机械性能	抗拉强度 $\geq 25MPa$,延伸率 $>300\%$,耐候性优异,适应多种环境
应用挑战	成本较高,与传统绝缘体系兼容性需提升,长期性能验证中

环保型双层绝缘材料以其独特的环保特性和良好的电气机械性能,展现了在承荷探测电缆等领域的广阔应用前景。然而,其应用仍面临成本及兼容性等挑战,需进一步研发与优化。

4 双层绝缘材料的选择策略与方法

4.1 根据使用环境选择材料

在选择双层绝缘材料时,需充分考虑使用环境的特殊性。深海、极地等极端环境,因其高压、低温、强腐蚀等特点,对绝缘材料的性能提出了严苛要求。深海环境中,高压和潮湿是两大考验,需选用具有高耐压、高防水性能的绝缘材料,如纳米复合绝缘材料,其优异的电气性能和耐水性能能有效应对深海挑战。极地环境则低温、严寒,要求绝缘材料具备良好的低温韧性和抗冻裂性能,热塑性弹性体复合绝缘材料因其出色的耐低温特性,成为极地应用的优选。针对不同环境,应制定针对性的选择策略,综合考虑材料的电气性能、

机械强度、耐候性等因素,确保所选材料能够在特定环境下长期稳定运行,为承荷探测电缆等设备提供可靠的绝缘保障。

4.2 考虑电缆的整体性能需求

在选择双层绝缘材料时,需全面考虑电缆的整体性能需求,以实现电气性能、机械性能与耐久性的最佳平衡。以某承荷探测电缆为例,其设计需满足高电压、大电流传输要求,同时需具备优异的机械强度和耐久性。在材料选择上,我们引用了具有高绝缘电阻($\geq 10^{13} \Omega \cdot cm$)和良好击穿电压($\geq 50kV/mm$)的环保型双层绝缘材料,确保了电缆的电气安全。同时,该材料还表现出色的机械性能,抗拉强度达到 35MPa,延伸率超过 300%,满足了电缆在复杂环境下的机械稳定性需求。此外,考虑到加工工艺与成本控制,我们选择了易于加工且成本效益较高的热塑性弹性体复合绝缘材料,其不仅加工性能优异,还能通过优化配方和工艺控制成本。在综合性能评估中,我们采用了多维度指标,如电气性能、机械性能、耐候性、加工成本等,通过加权评分法,科学选择了最符合电缆整体性能需求的双层绝缘材料。

5 结论

经过对双层绝缘材料的深入探索与分析,我们认识到,选择合适的双层绝缘材料对于确保电缆的长期稳定运行至关重要。在材料选择过程中,必须综合考虑电气性能、机械性能、耐久性、加工工艺及成本控制等多方面因素。通过科学的性能评估与选择方法,我们能够找到最符合特定应用需求的双层绝缘材料。未来,随着技术的不断进步和材料的不断创新,双层绝缘材料将在更多领域展现其独特优势,为电缆行业的发展注入新的活力。

参考文献

- [1] 孟双莉. 承荷探测电缆用热镀钢丝的冷拉拔形变及耐蚀性能研究[D]. 东南大学,2023.
 - [2] 胡璠. 承荷探测电缆铠装钢丝的制备工艺及组织性能研究[D]. 东南大学,2021.
 - [3] 朱宝宗. 油矿用的承荷探测电缆的应用和生产[J]. 电线电缆,2001, (01): 9-13.
 - [4] 宋玉西,杨焕新. 承荷探测电缆钢丝装铠中缆芯断线的自动停车报警装置[J]. 电线电缆,1996, (02): 33-34.
 - [5] 乔文玮,冯路路,杨恒勇,等. Nb 对承荷探测电缆铠装钢珠光体组织的影响[J]. 工程建设与设计,2021, (02): 45-47.
- 作者简介: 邹安明 (1986.05-), 男, 工程师, 江苏华能电缆股份有限公司技术中心副主任