

# 承荷探测电 / 光缆聚四氟乙烯绝缘综合性能的探讨

陶明, 沈爱红

江苏华能电缆股份有限公司, 江苏 扬州 225699

DOI:10.61369/EPTSM.2026010017

**摘 要 :** 聚四氟乙烯 (PTFE) 凭借其优异的绝缘性、耐高温性和化学稳定性, 已成为承荷探测电缆和光缆理想的绝缘材料。本文系统梳理了 PTFE 的基本物理与化学性能, 分析其在实际电缆 / 光缆结构中的应用优势, 通过电气、光学、机械及环境适应性等多维度性能评估, 总结 PTFE 在结构健康监测中的工程价值。研究表明, 聚四氟乙烯绝缘层能显著提升承荷探测系统的可靠性和运行寿命。最后提出, 随着监测技术的发展, PTFE 绝缘材料有望在智能化、绿色化方向实现进一步推广与应用。

**关 键 词 :** 聚四氟乙烯; 承荷探测; 电缆; 光缆; 绝缘性能; 结构健康监测

## A Discussion on the Comprehensive Properties of Polytetrafluoroethylene Insulation for Load-bearing Detection Electric/Optical Cables

Tao Ming, Shen Aihong

Jiangsu Huaneng Cable Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225699

**Abstract :** Polytetrafluoroethylene (PTFE), with its excellent insulation, high-temperature resistance, and chemical stability, has become the preferred insulation material for load-bearing detecting cables and optical cables. This paper systematically reviews the fundamental physical and chemical properties of PTFE, analyzes its application advantages in practical cable and optical cable structures, and evaluates its comprehensive performance from electrical, optical, mechanical, and environmental adaptability aspects. The study shows that PTFE insulation significantly enhances the reliability and service life of load-bearing detection systems. Finally, it is suggested that with the development of monitoring technology, PTFE insulation materials are expected to be further promoted and applied toward smarter and greener engineering solutions.

**Keywords :** Polytetrafluoroethylene; load-bearing detection; cable; optical cable; insulation performance; structural health monitoring

## 引言

随着现代工程技术的发展, 电缆和光缆在承荷探测系统中扮演着至关重要的角色。承荷探测作为监测结构安全与评估工程状态的重要手段, 其对传输介质的可靠性和稳定性提出了更高要求。其中, 绝缘材料的性能直接影响电缆和光缆的信号传输、使用寿命及安全性。目前, 聚四氟乙烯 (PTFE) 因其优异的绝缘性、耐高温性和化学稳定性, 逐渐成为承荷探测电缆及光缆绝缘层的优选材料。

国内外科研与工程实践表明, 聚四氟乙烯在复杂环境下具有良好的耐腐蚀能力和稳定的物理性能, 能够有效防止潮湿、化学品及温度波动等外部因素对电缆 / 光缆绝缘层的破坏。此外, 聚四氟乙烯本身的低介电常数和高绝缘阻抗赋予其卓越的信号保护能力, 满足承荷探测对高精度数据传输的需求。

随着承荷探测技术向智能化、精细化方向发展, 电 / 光缆绝缘性能已经成为保障系统正常运行和安全可靠的技术基础。因此, 系统梳理聚四氟乙烯绝缘在承荷探测用电缆及光缆中的应用机理及性能优势, 对于工程设计、材料选型和工艺优化具有重要的理论与现实意义。本论文基于聚四氟乙烯的材料特性, 深入探讨其在相关领域中的综合性能表现, 旨在为承荷探测电 / 光缆技术进步提供参考和支持。

## 一、聚四氟乙烯绝缘材料的物理与化学性能

1. 结构与基本特性：聚四氟乙烯（Polytetrafluoroethylene，PTFE），俗称“塑料王”，是一种由四氟乙烯单体聚合而成的高分子材料。其分子结构具有高度对称性，每个碳原子均被两颗氟原子包裹，这种特殊结构赋予了PTFE极高的化学惰性和稳定性。PTFE分子链在空间的大量氟原子的排布形成强大的屏障，几乎不与任何物质发生反应，因此表现出极强的耐腐蚀性和优异的耐候性能。此外，PTFE的分子间作用力较弱，使其呈现出非常低的表面能，具有极佳的疏水性与防污染能力。

2. 绝缘性能分析：作为绝缘材料，聚四氟乙烯具有非常低的介电常数（约为2.1），这意味着其电流通过时损耗极小，有效地减少能量损耗并提高信号传输的表现。PTFE的介质损耗因数极低，能够提供稳定的电性能，对于高频、高压电缆尤其适用。此外，PTFE具有极高的绝缘强度，平均绝缘击穿电压可达60~120 kV/mm，远高于传统的聚乙烯材料。因此，在承荷探测及长距离信号传输过程中，其优异的绝缘性能可有效防止信号泄漏、干扰及电弧击穿，极大提升传输可靠性和安全性。聚四氟乙烯还具有良好的耐静电积累能力，即使在高湿环境下也能维持优良的绝缘状态，不易发生缘表面放电。此外，其独特的分子结构使其在极端工作环境下（如高温、强腐蚀）依然能保持稳定的绝缘性能，为承荷探测电缆和光缆在严苛工程环境下应用提供了保障。

3. 耐环境性与稳定性：聚四氟乙烯因其高度的氟化学性质表现出卓越的耐化学腐蚀能力，可耐受多种强酸、强碱、氧化剂和有机溶剂的侵蚀，极少发生老化现象。在承荷探测的实际应用过程中，电缆和光缆常常需要面对复杂多变的环境，包括高温、低温、潮湿以及土壤或水体中的腐蚀性介质。PTFE的稳定性使电/光缆绝缘层可以长期运行而不发生性能退化，极大延长了设备的使用寿命，有效降低维护成本和工程风险。在耐热方面，聚四氟乙烯可在-180℃到+260℃的温度范围内稳定工作，不易变形、熔融或脆裂。此外，这种材料在高温条件下不会释放有害气体，绿色环保，安全性极强。即使在剧烈温度变化和机械压力作用下，PTFE绝缘层也能维持极低的热膨胀性和高稳定性，从而保证电缆和光缆的整体结构完整性。PTFE还具有优异的耐紫外线性能，对于长期暴露在户外环境中的电/光缆，可有效抵御太阳辐射造成的老化和降解。在防水防潮方面，聚四氟乙烯绝缘层表现突出，能够防止湿气和水分渗透，对信号传输及绝缘安全形成坚实保护；同时其表面极难附着灰尘和有害物质，有助于保持设备清洁和稳定运行。

4. 机械性能：聚四氟乙烯虽然属于软性高分子材料，但在拉伸、弯曲和压缩等力学作用下表现出良好的稳固性和适度柔韧性。其弯曲疲劳寿命较长，不易出现断裂和变形，有利于电缆和光缆在安装和运行过程中应对机械应力。PTFE的极低摩擦系数（约为0.04）也为电缆穿管、拉动及部署过程提供便利，减少外力损伤，提升使用安全性。

5. 其他综合性能：除了传统的物理、化学性能外，聚四氟乙烯还具有极低的吸水率、优良的阻燃性以及优越的耐低温冲击

性。在实际应用中，其独特的综合性能不仅满足了电/光缆严苛环境下的技术需求，还显示出材料的可持续利用优势和多元发展潜力。采用聚四氟乙烯作为承荷探测电缆/光缆的绝缘层材料，能够有效提升信号稳定性与整体系统性能，为结构安全监测和智能探测技术提供坚实的材料保障。

综上所述，聚四氟乙烯凭借其优异的结构、绝缘、耐环境和机械性能，成为承荷探测电/光缆绝缘材料的理想选择，为相关领域提供了强大的材料支撑和技术支持，也为工程设计和应用创新开辟了更广阔的空间。

## 二、聚四氟乙烯绝缘在电缆/光缆中的应用

1. 承荷探测电缆结构设计：在承荷探测系统中，电缆不仅负责信号的传递，更承担着为探测设备供能和数据反馈的重要任务。针对这种复合功能需求，电缆结构设计必须兼顾电性能、力学强度及环境适应性。聚四氟乙烯因其优异的绝缘和耐环境性能，成为承荷探测电缆绝缘层的理想选择。常见的承荷探测电缆结构包括内芯导体、聚四氟乙烯绝缘层、加强填充材料、屏蔽层及保护外套。聚四氟乙烯绝缘层通常包覆在导体外部，能够有效隔绝外界电磁干扰和环境影响，保障内部信号传输的稳定性。其柔性和耐弯曲性能，使电缆能够适应桥梁、隧道等复杂工程结构的布设，有效减少因机械应力或环境变化导致的绝缘破损。此外，聚四氟乙烯材料的超低摩擦系数，也便于电缆在管道或狭窄空间内顺利穿设和后期检修。

2. 光缆绝缘层适配性：随着光纤技术的广泛应用，承荷探测光缆逐渐成为结构安全监测的新趋势。光纤对绝缘层的性能同样有要求，聚四氟乙烯的低介电常数和高分子稳定性能够有效降低光信号损耗，提升光缆的数据传输效率。与传统塑料绝缘相比，PTFE更具耐紫外线、防水防潮和抗微生物侵蚀等优势，适用于恶劣户外及特殊环境。光缆结构通常由光纤芯层、缓冲层、聚四氟乙烯绝缘层、加强元件及外护套组成，其中PTFE层能够为光信号提供良好屏蔽，同时对温度和湿度变化具备优异适应能力，极大提升光缆在特殊工况下的稳定性。特别是在需要长期埋地敷设或水下布设的场景，聚四氟乙烯的高疏水性和抗压能力能够抑制绝缘层老化和信号衰减，保障光纤通信的高可靠性。

3. 实际工程案例分析：聚四氟乙烯绝缘层在电缆和光缆应用的显著优势已在众多重大工程项目中得到验证。例如，某大型桥梁健康监测系统采用聚四氟乙烯绝缘电缆，数年运行后，绝缘层无显著老化，无水汽、化学侵蚀导致的绝缘性能下降，数据传输保持高质量。该系统在长距离、高传输速率以及复杂环境下展现出卓越稳定性，有效推动了桥梁承荷探测技术升级。在地铁隧道结构监测工程中，聚四氟乙烯绝缘光缆被广泛用于传输激光和光纤传感数据。面对高湿、高温以及潮湿腐蚀性环境，PTFE绝缘层表现出良好的密封防水和抗老化能力，确保光信号稳定传输，提升了隧道结构安全监测的效率和精准性。此外，一些水下结构健康评估项目，例如港口码头基础沉降监

测，使用了聚四氟乙烯绝缘光缆。结果显示，绝缘光缆长期浸泡在海水中依然保持良好绝缘和低损耗，光信号未受海水离子侵蚀影响，有效支持了水下结构承荷数据的实时采集和远程传输。这些实际案例充分说明，聚四氟乙烯绝缘层能够帮助提升承荷探测电缆和光缆的整体性能，满足长期、安全、可靠运行的高标准要求。

综上所述，聚四氟乙烯绝缘材料在承荷探测电缆和光缆中的应用展现出极高的技术适应性和工程优势。其独特的物理、化学以及力学性能为结构安全监测提供了坚实保障，也推动了智能承荷探测技术在基础设施安全领域的持续创新与发展。面向未来，聚四氟乙烯绝缘应用有望进一步融合智能传感器、物联网等新兴技术，助力工程设施迈向更高水平的健康监测和安全管理。

### 三、聚四氟乙烯绝缘综合性能评估

1. 电气性能测试：聚四氟乙烯作为电缆及光缆的绝缘材料，其电气性能是评估其应用价值的核心。电气性能测试主要包括介电强度、介电常数、漏电流及绝缘击穿电压等参数。试验结果显示，PTFE绝缘层的介电常数约为2.1，在高频信号传输中表现极佳，能有效减少信号损耗。此外，聚四氟乙烯的击穿电压高达60~120 kV/mm，远超绝大多数商用塑料材料，在高压环境下依然能确保电缆的绝缘性和安全性。此外，PTFE的介质损耗因数极低，能够长期维持优良的绝缘性能，极大提升承荷探测系统的数据可靠性和传输效率。通过标准绝缘测试和环境应力状态下的老化测试发现，聚四氟乙烯绝缘材料在潮湿、高温以及腐蚀环境下仍展现稳定的绝缘性质，为工程长期安全运行提供保障。

2. 光学性能考察：光缆的绝缘层不仅需要保证电气安全，还需兼顾光学性能。聚四氟乙烯绝缘层的内在光学稳定性及低损耗特性使其成为光缆理想材料。在结构光缆中，PTFE能够有效降低外部光干扰，并为光纤信号传导提供稳定的隔离环境。实际测试表明，PTFE绝缘层具有极低的光吸收率和散射损耗，能减少信号在长距离传输过程中的衰减，强化数据传输的准确性和及时性。在高温或强紫外环境下，PTFE绝缘层依然展现出卓越的光学稳定性，不易发生光衰减和色变，为复杂环境下的光纤监测系统提供持久可靠的性能保障。

3. 机械与热性能综合分析：机械和热性能同样是影响电 / 光缆使用寿命和工程适应性的关键因素。聚四氟乙烯具备优良的力学稳定性，其绝缘层在拉伸、压缩及弯曲测试中表现出高柔韧性及耐疲劳性。应用于承荷探测电缆时，无论是安装拉动、结构变形还是地震等特殊工况，PTFE都能有效防止断裂或绝缘层损伤，保障系统结构的完整。其极低摩擦系数不仅便于电缆敷设，也减少了外力磨损风险。热性能方面，聚四氟乙烯可在-180℃至+260℃温度区间稳定工作，具有极佳的耐热冲击和低温脆性。即使在高温或极寒环境下，绝缘层的体积变化和力学性能变化极小，能抵抗环境应力导致的老化、冷裂及热胀冷缩。高温下，PTFE不会产生有害挥发物，安全环保，适合隧道、桥梁等特殊环境下连续监测与维护。此外，聚四氟乙烯还具备阻燃特性和优异的化学稳定性，对酸碱、盐雾及工业污染物均有良好抵抗力，有效提升工程结构的安全和延寿。

4. 综合评估与可靠性分析：整体来看，聚四氟乙烯在电气、光学、机械及热性能上的优异表现，为承荷探测电 / 光缆的高可靠性和高安全性提供了坚实保障。多维度性能测试表明，PTFE绝缘层不仅在静态环境下性能突出，更能应对动态、恶劣和长期服役的复杂工况。经实际工程应用及实验室加速老化测试证实，其绝缘性能、信号传输稳定性和设备运行寿命均高于行业常用绝缘材料，成为智能监测技术和结构健康评估领域的首选。

### 四、结论

聚四氟乙烯作为承荷探测电 / 光缆的绝缘材料，在电气、光学、机械以及环境适应性能上都表现出卓越的性能优势。本论文系统分析了PTFE的分子结构及基本特性，并结合实际工程应用，证实聚四氟乙烯绝缘层无论在高压、强腐蚀、长距离传输还是苛刻的温湿环境下，均能有效保障电 / 光缆的绝缘安全和信号稳定。其低介电常数、高击穿电压和优异耐化学性显著提升了设备运行的可靠性和寿命，为现代结构健康监测系统提供了坚实的技术保障。同时，随着监测系统智能化和多功能集成的需求增加，PTFE绝缘层与新型传感技术、智能芯片融合的适配性也亟待深入研究。

### 参考文献

- [1] 张成；谢继凯；郭家杏；郝智；罗筑；陈禹霖. 聚四氟乙烯改性研究进展 [J]. 中国塑料, 2024(11).
- [2] 殷小明. 聚四氟乙烯垫片的密封性能研究现状及展望 [J]. 橡塑技术与装备, 2023(04).
- [3] 耿焕；乐雨晨；王常明；项菲；滕子豪；张石愚. 聚四氟乙烯的成型加工技术及国内外研究进展 [J]. 有机氟工业, 2023(02).