文章编号:1001-4888(2025)06-0692-08

剪切增稠材料增强涂覆的高灵敏抗冲击光纤*

钟翔[1], 刘珂[1], 郭文博[1], 马孟超[1], 邓华夏[2], 刘冰[2], 龚兴龙[2]
(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230027)

摘要: 在通感一体光网络中,光缆作为核心传输介质,需兼具微小振动敏感性与强冲击防护性。然而,传统材料的固有特性难以调和这 2 个矛盾,成为制约通感一体光网络性能提升的瓶颈。为此,本文提出剪切增稠材料增强涂覆方法,在光纤表面交替涂覆剪切增稠液(STF)与剪切变硬胶(SSG),以同步提升敏感性与防护性。光纤涂覆实验将 STF 和 SSG 交替涂覆 6 次,光纤直径从初始的 240.599 μm 增至 279.032 μm;增强涂覆后光纤的平均测量灵敏度提升了 75.1%,且抗冲击性能提高了 40.6%。该结果表明,剪切增稠材料增强涂覆方法能有效解决光纤测量灵敏度与抗冲击性能的矛盾,将促进通感一体光网络的发展。

关键词: 通感一体光网络; 剪切增稠材料; 灵敏度; 抗冲击性能
中图分类号: TP212 **文献标志码**: A DOI: 10.7520/1001-4888-25-031

0 引言

分布式光纤传感(Distributed Optical Fiber Sensing,DOFS)技术利用光纤作为传感介质,能够实现光纤全长范围内物理量的实时监测[1]。DOFS 技术通过检测光纤中光的散射现象(如瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射)[2-4]来获取沿光纤路径的温度、应变和振动等数据。DOFS 技术通过发射光脉冲并接收沿光纤传输的回波信号,分析回波信号的时间延迟或频率变化,实现对光纤沿线外部参量的连续分布式测量[5],从而能够精确检测光纤每个区段的物理状态,并支持长达数十千米的连续监测[6]。DOFS 技术具有测点密度高、间距可控、质量轻、耐腐蚀、电绝缘、精度高及重复性好等特点,在应力应变、振动和声波测量方面展现出了优势[7],能够实现高分辨率、长距离的实时监测[8],特别适用于隧道[9]、电力系统[10]等基础设施的健康监测。此外,DOFS 技术在油气勘探、运输管道监测、航空航天装备监测及周界安防等领域也得到了广泛应用[11-14],展现出在高精度、大范围监测场景中的价值和应用潜力。

随着 DOFS 技术的发展,通感一体光网络逐渐成为一种重要的技术架构。该网络将通信与感知功能紧密结合,通过光纤传输实现实时数据传输和对外部环境的精准监测。通感一体光网络不仅能够提供高效的通信服务,还可利用 DOFS 技术进行长距离、广范围的物理量监测。近年来,DOFS 技术已通过波分复用(Wavelength Division Multiplexing,WDM)和频分复用(Frequency Division Multiplexing,FDM)与相干光通信网络集成在一起,实现了数据传输与分布式振动检测的双重功能[15-17]。基于这些集成后的技术,现有光纤网络已在交通监测和道路粗糙度检测中得到初步应用,并有望进一步拓展 DOFS 技术的应用场景,包括城市结构成像、城市燃气管道安全监测、海洋探测等[18]。

在通感一体光网络中,光缆面临着相互冲突的性能要求。一方面,光缆需要具备优异的机械强度和抗冲击能力,以承受外部物理冲击和机械应力,确保在恶劣环境下能够长期稳定运行;另一方面,光缆还

* **收稿日期**: 2025-02-11; **修回日期**: 2025-04-14
基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器专项(12427802);安徽省自然科学基金面上项目(2208085ME138)
通信作者: 钟翔(1985—),男,博士,副教授。主要研究领域:光纤传感技术、单像素成像技术。Email: zhx0325@hfut.edu.cn

需具备高灵敏度和测量稳定性，以实现对温度、应变、振动等物理量的高精度传感。

为了提高光纤的力学性能，可以采用多种优化策略。例如，可以采用双包层或多层防护结构设计，通过缓冲作用增强光纤的抗冲击性能，从而有效保护光纤免受潜在损伤[19]。此外，将金属套管或高强度聚合物等增强材料作为光纤的外层包层，已被证明是一种行之有效的方法。这些包层材料能够起到屏蔽作用，显著减少外部机械力对光纤纤芯的直接影响，从而避免因外部冲击或压缩导致的断裂或损坏[20-21]。上述 2 种方法均可显著提升光纤在复杂环境中的耐久性与稳定性。

然而，在实现高灵敏度传感方面，光纤面临新的挑战。为实现对微小振动的探测，光纤需增强灵敏度，但为提高机械强度而采取的保护措施会显著降低其对振动的响应性，从而导致测量精度下降，因此，在传统的通感一体光网络中，如何在抗冲击能力与传感灵敏度之间实现有效平衡成为关键问题。为确保光缆既能承受恶劣环境条件，又能提供高精度的传感能力，必须对其结构设计和材料选择进行精细优化与权衡。这种平衡的达成对通感一体光网络的性能提升至关重要。

剪切增稠材料是一类智能材料，其力学性能与剪切速率[22]密切相关。剪切增稠材料为提高光纤的灵敏度和力学性能提供了新的解决方案。通常情况下剪切增稠材料呈现出类似流体的柔软特性，具有较低的弹性模量。然而，当受到猛烈的冲击时，其分子结构会迅速调整，导致弹性模量增加几个数量级，从而转变为坚硬保护层，有效吸收和分散冲击力。当外力消散时，材料能够迅速恢复至流体状态，展现出“液-固”状态的快速转换特性[23-24]。得益于这种应变率相关的力学性能，剪切增稠材料在冲击防护、振动控制和阻尼结构等领域展现出了优势[25-26]。同时，剪切增稠材料为光纤在复杂环境中的性能优化提供了新的可能。

本文提出了一种在光纤表面涂覆剪切增稠材料的方法，以同时提高光纤的灵敏度和力学性能。通过精确调整剪切增稠材料的相变点，使其在振动或声探测时具有较低的弹性模量，从而提高传感灵敏度；而当受到强冲击时，剪切增稠材料的杨氏模量会增加几个数量级，形成保护层，从而有效吸收冲击能量并保护光纤。

1　材料与方法

1.1　剪切增稠液(STF)和剪切变硬胶(SSG)的制备

STF 和 SSG 是 2 种典型的剪切增稠材料。STF 通常是由极性溶剂(如水或有机溶剂)及纳米或微米颗粒(如硅胶、二氧化硅等)组成的颗粒悬浮液。在低剪切速率下，颗粒间通过范德华力或静电作用形成弱相互作用，STF 表现为低黏度流体；当受到高速冲击或高剪切力时，颗粒的惯性效应占据主导，颗粒间碰撞加剧，形成紧密的颗粒簇或链状结构，阻碍液体流动，导致黏度急剧升高(甚至固化成类固体状态)[25]。SSG 是一种低交联度的聚硼硅氧烷材料，在自然状态下呈现黏流态胶体特性，受到高应变率载荷刺激(剪切、压缩、拉伸等)时，其储能模量和应力等力学特性大幅度增强，呈现出坚硬的固态，可实现由黏流态向橡胶态，甚至玻璃态的相转变[23]。在高剪切速率下，STF 和 SSG 均能对光纤起到防护作用。

在初步实验中发现，当光纤只重复涂覆 STF 且涂覆量过多时，干燥后涂覆层容易出现“掉粉”现象。这是因为过多的液体涂层在固化过程中，未能有效与光纤表面结合，导致一些颗粒状物质从表面脱落，从而影响涂覆效果和表面光滑度。同样，当光纤表面仅涂 SSG 时，会产生涂覆不均匀的问题。这是因为 SSG 溶液的黏度较高，涂覆过程中可能会出现液体流动不均匀的现象，导致涂层表面出现厚薄不一的情况。为了解决这些缺陷，本文将 STF 和 SSG 交替涂覆在光纤上。该方法结合了 2 种材料的优势，有效克服了单独使用时的局限性，从而提高了光纤整体涂层的质量和性能。

STF 的制备方法：将质量分数为 65%的二氧化硅颗粒 6.5 g 和 35%的聚乙二醇 200(PEG200) 3.5 g 放入容器中，先用搅拌棒搅拌使二氧化硅颗粒和 PEG200 充分接触，再将容器放入球磨机中球磨 24 h。质量分数为 65%的 STF 剪切速率与黏度的关系如图 1(b)所示，STF 在低剪切速率下通常表现为流动性良好的液体，但当施加较大的剪切应力时，液体的黏度会显著增加，甚至变得像固体一样。图 1(b)中绿色标注的点剪切速率较小(彩色图参见 http://sylx.ustc.edu.cn)，对应的剪切应力

为 0.316 Pa,在参考声压为 20 μPa 的情况下,对应的分贝数为 83.98 dB。图 1(b)中红色标注的点黏度最大,对应的剪切应力为 2 259.9 Pa。

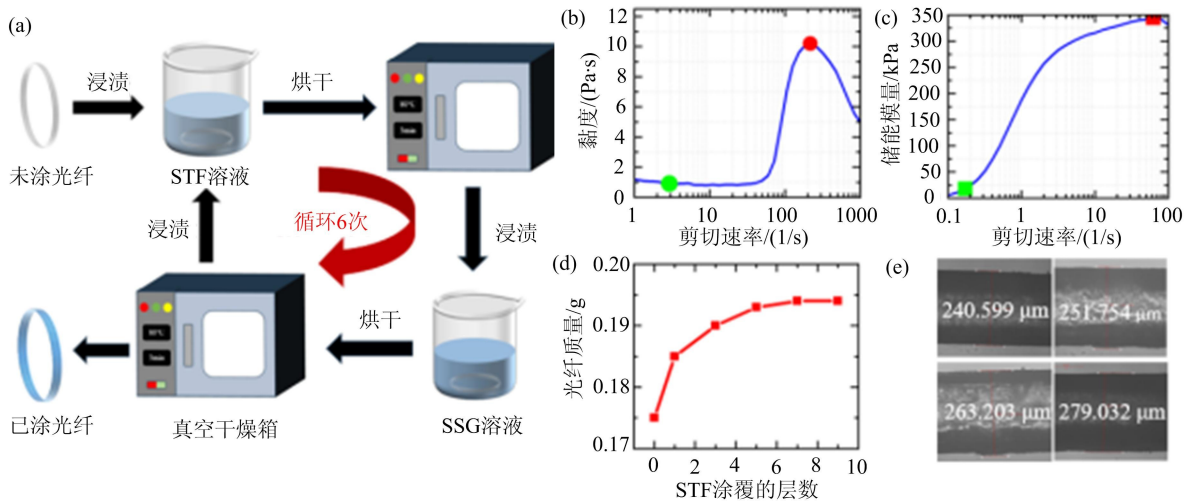

图 1 (a)光纤涂覆过程图;(b)STF 剪切速率与黏度关系图;(c)SSG 剪切速率与储能模量关系图;(d)不同涂覆层数与光纤质量关系图;(e)不同涂覆次数的光纤直径显微图

Fig. 1 (a)diagram of optical fibre coating process;(b)STF shear rate versus viscosity;(c)SSG shear rate versus energy storage modulus;(d)relationship between the number of different coating layers and fiber quality;(e)optical fiber diameter micrographs with different coating times

SSG 的制备方法:将硼酸 5 g 加入二甲基羟基硅油 150 g 中混合均匀(质量比为 1∶30),在 180~200 ℃下加入正辛酸 375 μL 进行催化反应(正辛酸的添加量为 1 g 二甲基羟基硅油加入 2.5 μL 正辛酸),保持搅拌使物料充分反应,直至形成 SSG。图 1(c)为 SSG 剪切速率与储能模量的关系图。储能模量表示材料在经历剪切变形时,能够恢复的能量大小,即材料的弹性部分。储存模量越大,材料恢复力越强,意味着该材料在受剪切力作用后变形越小,材料表现出较强的弹性。图 1(c)中用绿色标注出的点剪切速率较小,对应的剪切应力为 38.98 Pa,对应的分贝数为 125.8 dB。图 1(c)中用红色标注出的点所对应的剪切应力为 347.95 Pa。

值得注意的是,所制备的 STF 和 SSG 都显示出双重性质。在较低的声压下,它们的杨氏模量极低,这种特性非常有利于增强光纤对微小振动或声波的高灵敏度检测。当受到较大的外力时,STF 和 SSG 可迅速硬化,在强烈的冲击下为光纤提供有效的保护。这种独特的双重功能使 STF 和 SSG 成为通感一体光网络的理想材料,能够同时满足高灵敏度传感和高抗冲击性能的需求,因此,涂覆 STF 和 SSG 可为光纤在复杂环境中的可靠运行提供重要保障。

1.2 方法

光纤涂覆过程如图 1(a)所示,STF 在浸渍前需要稀释。首先加入 2 倍体积的无水乙醇,放入球磨机中球磨 20 min;再用移液枪将液体移到 500 mL 烧杯中记录总体积 V,加入 $2V$ 无水乙醇稀释,超声处理 30 min。稀释完成后,将普通光纤在 STF 溶液中浸渍 3 min,将浸渍后的光纤放入真空干燥箱中干燥。将干燥后的光纤浸渍在 SSG 溶液中 3 min,再放入真空干燥箱中干燥。稀释 SSG 的方法为将质量比为 1∶1 的 SSG 与乙醇混合均匀形成 SSG 溶液。这种交替浸渍和干燥过程重复 6 次,以获得最终的光纤。需要注意的是,重复上述过程 6 次以上,光纤的直径增加不明显,所以本文选择 6 次循环的涂覆。

图 1(d)为不同涂覆次数与光纤质量的关系图,由于实验中第 1 层和最后 1 层涂覆的都是 STF,交替涂覆 2 次实际上涂覆了 3 层 STF,所以图 1(d)中的横坐标采用的是 STF 涂覆的层数。从图 1(d)可以看出,交替涂覆 6 次之后光纤的质量已经很少增加甚至不增加。图 1(e)分别为未涂覆光纤、交替涂覆 2 次、交替涂覆 4 次和交替涂覆 6 次的光纤直径显微图,其中未涂覆光纤直径为 240.599 μm,交替涂覆 2 次光纤直径为 251.754 μm,交替涂覆 4 次光纤直径为 263.203 μm,交替涂覆 6 次光纤直径为 279.032 μm。从图 1(e)可以看出,涂覆后光纤直径从 240.599 μm 增加到 279.032 μm,对应单边涂

覆厚度为 19.271 μm。

2　结果与讨论

2.1　探测灵敏度

2.1.1　实验系统装置

本文采用相位敏感光时域反射计(Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer,Φ-OTDR)对光纤涂覆 STF 和 SSG 前后的灵敏度进行测量。作为一种典型的基于后向散射的 DOFS 技术,Φ-OTDR 利用光纤固有的瑞利后向散射(RBS)特性来测量沿光纤的动态应变(声波、振动或入侵事件)[27]。由于 Φ-OTDR 具有高灵敏度、快速响应和全分布式测量等优势,使其在需要远程监测和实时检测动态应变的应用场景中表现出色,例如安全监测、结构健康监测和地震检测等领域[28-29]。

为了对比用 STF 和 SSG 涂覆过的光纤与未涂覆光纤的灵敏度,搭建了基于马赫曾德干涉仪的 Φ-OTDR 系统。实验装置示意图如图 2 所示。首先,采用美国 RIO 公司的激光源,输出稳定的 1 550.92 nm 连续光,输出功率为 10 mW,线宽小于 3 kHz。连续光经过声光调制器(Acousto-Optic Modulator,AOM)产生重复频率为 50 kHz、脉冲宽度为 104 ns 的脉冲光。随后,使用平均增益为 23 dB 的掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier,EDFA)放大光功率。由于 EDFA 会引入放大器自发辐射噪声(Amplifier Spontaneous Noise,ASN),因此通过光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)滤除噪声。放大后的脉冲光通过环形器送入 1 100 m 长的单模光纤中。在传感光纤 500 m 处接入一个压电陶瓷,其上缠绕 2 m 长涂覆 STF 和 SSG 的光纤、2 m 长未涂 STF 和 SSG 的光纤及 2 m 长的光纤跳线。光纤跳线是用来连接光纤设备之间的光纤连接线,通常用于光纤通信、局域网(LAN)或其他光纤传输系统,具有高速、长距离、抗干扰等优点,因此用光纤跳线与涂覆光纤作对比。由数字信号发生器驱动压电陶瓷,该信号发生器可以输出不同幅值和频率的周期信号。传感光纤的尾端熔接一个隔离器以防止尾端反射光返回到光纤中。光纤中的瑞利散射光通过环形器后被另一个 EDFA 放大,输出通过马赫曾德干涉仪后,连接到 3 个光电探测器(Photoelectric Detector,PD),并输入采样率为 125 MS/s 的数据采集卡(Data Acquisition,DAQ)。

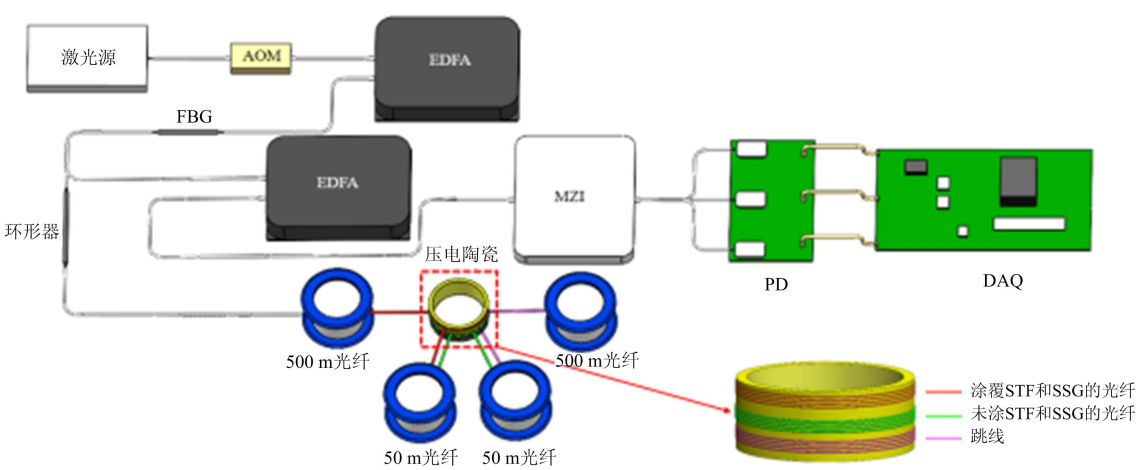

图 2　Φ-OTDR 系统装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of Φ-OTDR system device

2.1.2　实验结果

将一个幅值为 10 V,频率为 1 000 Hz 的正弦信号施加到压电陶瓷上,三通道信号被 3 个 PD 收集并馈送到 DAQ 卡。图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)分别显示了涂覆光纤、未涂覆光纤和跳线收集的原始数据。从图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)中显示的波形可以看出,涂覆和未涂覆的光纤都可以有效地探测压电陶瓷的振动,而跳线的信号表现出明显的噪声干扰。

均方根(RMS)值反映了信号的“有效幅度”或“能量幅度”,可用来比较声探测的灵敏度。在压电陶

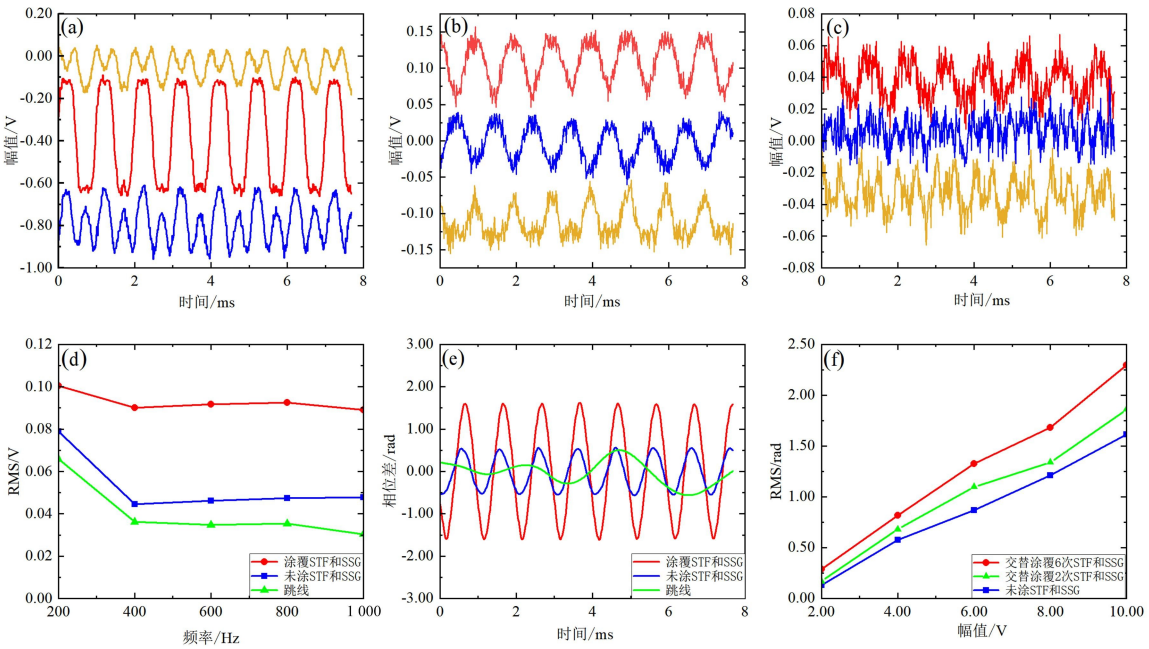

图 3 (a)涂覆 STF 和 SSG 光纤的三路原始波形;(b)未涂覆 STF 和 SSG 的三路原始波形;(c)跳线的三路原始波形;(d)原始信号 RMS 值对比图;(e)解调信号对比图;(f)解调信号 RMS 值对比图

Fig. 3 (a)three raw waveforms of coated STF and SSG fibres;(b)three raw waveforms of uncoated STF and SSG;(c)three raw waveforms of patchcord;(d)comparison of RMS values of raw signals;(e)comparison of demodulated signals;(f)comparison of RMS values of demodulated signals

瓷上施加不同频率的 10 V 正弦信号时所采集数据的 RMS 值如图 3(d)所示,其中每个点为 200 次重复实验的平均值。从图 3(d)中可以得出,涂覆光纤的平均灵敏度分别为未涂覆光纤的 175.1%和跳线的 229.1%。

基于图 3(a)~(c)所示的原始数据,可以使用 3×3 耦合器解调算法恢复驱动压电陶瓷的信号,该算法在光纤传感器中已得到广泛使用。涂覆光纤、未涂覆光纤和跳线恢复的波形如图 3(e)所示。需要注意的是,光纤和跳线都是用普通胶带固定在压电陶瓷上的,然而,涂覆和未涂覆的光纤都与压电陶瓷保持了良好的接触,并成功地恢复了原始信号。相比之下,跳线非常容易弯曲,未能与压电陶瓷建立适当接触,因此无法恢复原始信号。

由于通过跳线采集的 200 多个数据中几乎没有成功解调出信号,因此本文比较了交替涂覆 6 次光纤、交替涂覆 2 次光纤和未涂覆光纤不同幅值解调结果的 RMS 值,如图 3(f)所示,横坐标的幅值是信号发生器给定的幅值,纵坐标是不同输入幅值下光纤灵敏度的统计结果。由图 3(a)~(f)可见,与未涂覆光纤相比,涂覆光纤的声探测灵敏度大大提高。

光纤涂覆层的灵敏度增强可以用文献[30-32]中提出的理论来解释。光纤的灵敏度与它的物理参数有内在的联系,比如几何结构和材料特性。值得注意的是,光纤涂覆层对其性能有显著影响,较低弹性模量的涂覆层有利于向纤芯传递应力,从而可增加光纤的灵敏度。相反,较高的弹性模量涂覆层限制了应力向纤芯的传递,增强了其抗冲击性。在动态应变测量过程中,剪切速率相对较低时,剪切增稠材料在图 1(b)和图 1(c)所示的绿色点附近运行,此时,材料表现出柔韧的特性,从而提高了光纤的检测灵敏度。当遇到强烈冲击时,剪切速率增加,剪切增稠材料在图 1(b)和图 1(c)所示的红点附近运行,此时,弹性模量或黏度迅速增加几个数量级,材料表现出刚性特性,从而增强了光纤的抗冲击性能。

2.2 冲击响应实验

为了测试用 STF 和 SSG 涂覆过的光纤的防护和抗冲击性能,使用配备了力传感器的落锤试验机进行测试。图 4(a)为落锤试验机的示意图,落锤的锤头质量为 0.3 kg,锤头在导轨的引导下,以自由落体的形式作用在试样上。试样固定在力传感器上,再将力传感器安装在金属基底上,通过电荷放大器来

采集力传感器的电信号，进行有关试验分析。光纤所受到的力与锤头的下落高度之间的关系可以由式(1)得出

$$F=\frac{m\sqrt{2gh}}{t}+mg \tag{1}$$

式中：F 为光纤所受的力；m 为锤头的质量；g 为重力加速度；h 为锤头下落的高度；t 为锤头和光纤的接触时间，大约为 1 ms。

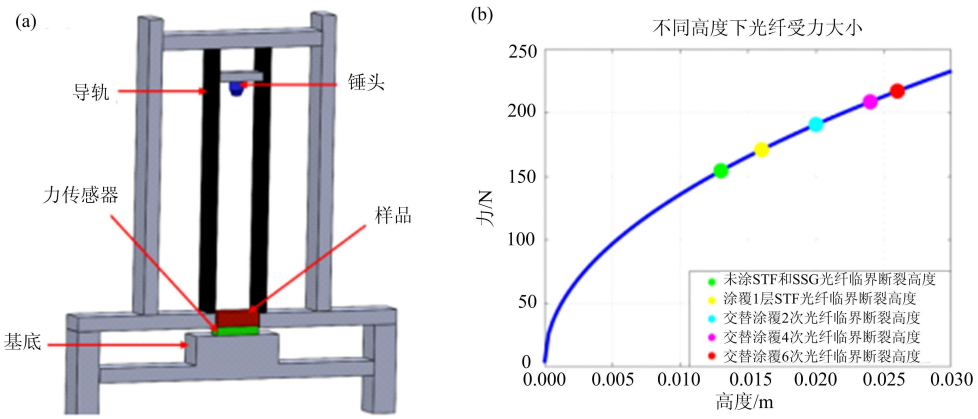

图 4　(a)落锤试验机示意图；(b)锤头下落不同高度与光纤受力大小关系图

Fig. 4　(a)schematic diagram of the hammer test machine；(b)plot of the force on the fibre optic at different heights of the hammer drop

根据式(1)可推导出施加于光纤的力与锤头下落高度之间的关系，如图 4(b)所示，图中红色点标记了交替涂覆 6 次光纤的临界断裂高度，为 2.6 cm，对应力值为 217.1 N；图中粉色点标记了交替涂覆 4 次光纤的临界断裂高度，为 2.4 cm，对应力值为 208.7 N；图中蓝色点标记了交替涂覆 2 次光纤的临界断裂高度，为 2.0 cm，对应力值为 190.8 N；图中黄色点标记了只涂覆 1 层 STF 光纤的临界断裂高度，为 1.6 cm，对应力值为 170.9 N；绿色点代表未涂覆光纤的临界断裂高度，仅 1.3 cm，对应力值为 154.4 N。落锤实验结果表明，交替涂覆 6 次光纤的临界断裂高度与未涂覆光纤相比提升了 100%，抗冲击力提升了约 40.6%，实验结果展现了涂覆剪切增稠材料所带来的增强保护及抗冲击性能。

样品所受力为剪切应力与接触面积的乘积，当 STF 黏度最大时样品所受的力为 1.41 N，SSG 储能模量最大时样品所受的力为 0.22 N。当落锤从预设高度下落时，剪切增稠材料能够显著吸收和分散冲击能量，从而对光纤提供保护作用。

3　结论

1)本文提出一种在光纤表面涂覆剪切增稠材料的方法，目标是同时提升光纤的灵敏度与抗冲击性能，通过 STF 和 SSG 交替涂覆光纤 6 次，使光纤单边涂层厚度达到 19.271 μm。

2)为评估涂覆后光纤的灵敏度，搭建了 Φ-OTDR 系统并开展实验，实验结果显示，经过 STF 和 SSG 涂覆处理后光纤的平均灵敏度是未涂覆光纤的 175.1%。

3)为评估涂覆后光纤的抗冲击性能，采用落锤试验机进行实验，实验结果表明，交替涂覆 6 次 STF 和 SSG 的光纤抗冲击性能与未涂覆光纤相比提升 40.6%。

4)综合灵敏度与抗冲击性能的实验结果，可初步验证本文提出的在光纤表面涂覆剪切增稠材料的方法，在实现光纤高灵敏度与强抗冲击性能兼具方面具备可行性。

参考文献：

[1] HARTOG A H. An introduction to distributed optical fibre sensors[J]. Contemporary Physics, 2017, 59(1):82-83.

[2] PALMIERI L, SCHENATO L, SANTAGIUSTINA M, et al. Rayleigh-based distributed optical fiber sensing

[J]. Sensors, 2022, 22(18):6811.

[3] 尚盈, 王昌. 分布式光纤传感技术综述[J]. 应用科学学报, 2021, 39(5):843-857 (SHANG Ying, WANG Chang. Review of distributed optical fiber sensing technology[J]. Journal of Applied Sciences, 2021,39(5):843-857 (in Chinese))

[4] SUN X Z, YANG Z S, HONG X B, et al. Ultra-long brillouin optical time-domain analyzer based on distortion compensating pulse and hybrid lumped-distributed amplification[J]. APL Photonics, 2022, 7(12):126107.

[5] MARIE T F B, YANG B, HAN D Z, et al. Principle and application state of fully distributed fiber optic vibration detection technology based on Φ-OTDR:a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(15):16428-16442.

[6] QIN J, ZHANG L, XIE W L, et al. Ultra-long range optical frequency domain reflectometry using a coherence-enhanced highly linear frequency-swept fiber laser source[J]. Optics Express, 2019, 27(14):19359-19368.

[7] LINDSEY N J, DAWE T C, AJO-FRANKLIN J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing[J]. Science, 2019, 366(6469):1103-1107.

[8] LI J, WANG C Y, CAO K Y, et al. Breakthrough the physical barrier on spatial resolution in Raman distributed fiber sensing using chaotic correlation demodulation[J]. APL Photonics, 2023, 8(7):076105.

[9] 方忠强, 王皓宇, 胡慧江, 等. 基于主动加热方法的隧道积水分布式光纤传感器[J]. 激光与红外, 2024, 54(3):473-480 (FANG Zhongqiang, WANG Haoyu, HU Huijiang, et al. Distributed optical fiber sensor for tunnel waterlogging based on actively heated method[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(3):473-480 (in Chinese))

[10] DING Z W, ZHANG X P, ZOU N M, et al. Phi-OTDR based on-line monitoring of overhead power transmission line[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(15):5163-5169.

[11] YU G, XIONG J L, WU J J, et al. Enhanced surface seismic data processing using simultaneous acquired DAS-VSP data[J]. First Break, 2020, 38(6):29-36.

[12] DU Y K, SHANG Y, WANG C, et al. Intrusive and non-intrusive microflow measurement based on distributed optical fiber acoustic sensing[J]. Measurement, 2023, 210:112513.

[13] LI J C, WANG Y, WANG P F, et al. Pattern recognition for distributed optical fiber vibration sensing: a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(10):11983-11998.

[14] LI G, ZENG K H, ZHOU B, et al. Vibration monitoring for the West-East Gas Pipeline Project of China by phase optical time domain reflectometry (phase-OTDR)[J]. Instrumentation Science & Technology, 2021, 49 (1):65-80.

[15] HUANG M F, SALEMI M, CHEN Y H, et al. First field trial of distributed fiber optical sensing and high-speed communication over an operational telecom network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(1):75-81.

[16] GUERRIER S, BENYAHYA K, DORIZE C, et al. Vibration detection and localization in buried fiber cable after 80 km of SSMF using digital coherent sensing system with co-propagating 600 Gb/s WDM channels[C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway, NJ: IEEE, 2022:1-3.

[17] IP E, HUANG Y K, HUANG M F, et al. DAS over 1007-km hybrid link with 10-Tb/s DP-16QAM co-propagation using frequency-diverse chirped pulses[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(4):1077-1086.

[18] HE H J, JIANG L, PAN Y, et al. Integrated sensing and communication in an optical fibre[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12(1):25-25.

[19] ZHANG X P, WANG X. The study of chromatic dispersion and chromatic dispersion slope of WI- and WII-type triple-clad single-mode fibers[J]. Optics & Laser Technology, 2005, 37(2):167-172.

[20] MEI W J, PAN W L, CHEN T, et al. Research and design of DC500 kV optical fiber composite submarine cable [C]//2017 4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS). Piscataway, NJ: IEEE, 2018:1-6.

[21] XIE S H, CHEN Z Z, YAN Z Y, et al. Blending modification technology of insulation materials for deep sea optoelectronic composite cables[J]. Energies, 2024, 17(4):820.

[22] 马宇, 雷振坤, 白瑞祥, 等. 剪切增稠液改性软织物的 SHPB 冲击测试研究[J]. 实验力学, 2020, 35(3):384-396 (MA Yu, LEI Zhenkun, BAI Ruixiang, et al. SHPB impact test of shear thickening liquid modified soft fabric [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(3):384-396 (in Chinese))

[23] ZHAO C Y, GONG X L, WANG S, et al. Shear stiffening gels for intelligent anti-impact applications[J]. Cell Reports Physical Science, 2020, 1(12):100266.

[24] 龚立平，王胜，尹冠生，等. 磁流变剪切变硬胶的“磁力”耦合效应研究[J]. 实验力学，2017，32(6):751-759 (GONG Liping, WANG Sheng, YIN Guansheng, et al. Investigation on the “magnetic-mechanic” oupling performance of magnetorheological shear stiffening polymer composite[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6):751-759 (in Chinese))

[25] GÜRGEN S, KUŞHAN M C, LI W H. Shear thickening fluids in protective applications: a review[J]. Progress in Polymer Science, 2017, 75:48-72.

[26] PINTO F, MEO M. Design and manufacturing of a novel shear thickening fluid composite (STFC) with enhanced out-of-plane properties and damage suppression[J]. Applied Composite Materials, 2017, 24(3):643-660.

[27] LIPOVAC A, LIPOVAC V, HAMZA M, et al. Extending OTDR distance span by external front-end optical preamplifier[J]. Electronics, 2021, 10(18):2275.

[28] ZHANG H L, DONG H, HU D J J, et al. Analysis of field trial results for excavation-activities monitoring with Φ-OTDR[J]. Sensors, 2024, 24(18):6081.

[29] VERMA S, KUMARI J, MONDAL A, et al. Modeling and simulation of Φ-OTDR system suitable for underwater intrusion detection and classification[J]. Optik, 2024, 311:171876.

[30] LAGAKOS N, BUCARO J A. Pressure desensitization of optical fibers[J]. Applied Optics, 1981, 20(15):2716-2720.

[31] BUDIANSKY B, DRUCKER D C, KINO G S, et al. Pressure sensitivity of a clad optical fiber[J]. Applied Optics, 1979, 18(24):4085-4088.

[32] LAGAKOS N, SCHNAUS E, COLE J, et al. Optimizing fiber coatings for interferometric acoustic sensors[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 30(4):529-535.

Coating optical fiber with shear-thickening materials for sensitivity and impact resistance enhancement

ZHONG Xiang[1], LIU Ke[1], GUO Wenbo[1], MA Mengchao[1], DENG Huaxia[2], LIU Bing[2], GONG Xinglong[2]

(1. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: In an integrated sensing and communication optical network, the optical cable serves as the core transmission medium. It must be sensitive to minor vibrations yet robust enough to withstand strong impacts. However, it is difficult to reconcile these two contradictory properties in traditional materials, which restricts the performance improvement of the integrated sensing and communication optical network. This paper proposed a method of enhancing the coating with shear thickening material, whereby shear thickening fluid (STF) and shear stiffening gel (SSG) were alternately applied to the surface of the optical fibre to enhance both sensitivity and protection simultaneously. In the experiment, STF and SSG were coated alternately six times, increasing the diameter of the optical fibre from 240.599 μm to 279.032 μm. The average measured sensitivity of the fibre increases by 75.1% and its impact resistance improves by 40.6% after enhancement coating. These results demonstrate that the shear thickening material enhancement coating method can effectively overcome the contradiction between optical fibre measurement sensitivity and impact resistance, promoting the development of integrated sensing and communication optical networks.

Keywords: integrated sensing and communication optical network; shear thickening material; sensitivity; impact resistance