

水听器用高性能弯曲不敏感光纤

张心贲 喻建刚 杨晨 汪松 童维军

摘要：抗弯光纤是一种波导增强型光纤，适用于小弯曲半径使用领域，如光纤水听器。本文从应用需求出发，阐述了抗弯光纤的设计理念、技术现状及基本性能。

关键词：水听器 弯曲不敏感光纤 宏弯 机械强度

1. 引言

光纤水听器是一种新型光纤传感器，用于检测水下声信号，被称为光纤声纳，是建立海洋生态环境、海底观测网的先进手段，可用于渔业、地震预测及洋流等信息的收集。光纤水听器根据原理分类有强度型、偏振型、相位干涉型等。其中，相位干涉型光纤水听器因其精度高、稳定性好、体积小以及易于大规模组成阵列等优势，已成为目前研究和开发使用的主要对象。相位干涉型光纤水听器基于 Michelson 和 Mach-Zehnder 干涉原理制成，其干涉结构已进入成熟的产品化阶段。两者基本原理相同，均为首先由光电探测器探测传感臂（接受声压信号发生相位波动）和参考臂（密封保护作为参考基底）中光波干涉条纹的变化，然后经信号处理器提取声压信号。其关键部件是由光纤绕制的光纤环，同时基于追求小型化的目的，这种环的尺寸一般比较小，直径最低可达到 10mm。因此光纤水听器对光纤提出了两个特殊要求：弯曲损耗低及机械可靠性高。

长飞光纤光缆股份有限公司（股票代码 HK6869,以下简称长飞公司）基于以上要求，为水听器应用专门开发了高强度弯曲不敏感光纤，用以绕制关键部件光纤环，使用该光纤绕制的小弯曲直径光纤环仍能保持低损

耗，为大型水听器阵列组网提供了性能和可靠性保障。

2. 技术原理

2.1 弯曲不敏感光纤的宏弯损耗

光纤波导由纤芯和包层组成，纤芯折射率高于包层，其导光原理为全内反射，即光线由纤芯射向包层时，当入射角大于界面的临界角，光线完全反射回纤芯。而当光纤弯曲（这里指弯曲半径远大于光纤直径，即宏弯）时，有一部分光线在界面的入射角发生变化，小于临界角，这部分光将穿透界面形成消逝场，造成损耗（如图 1 所示）。此外，弯曲所导致的折射率变化也会影响光纤的损耗。

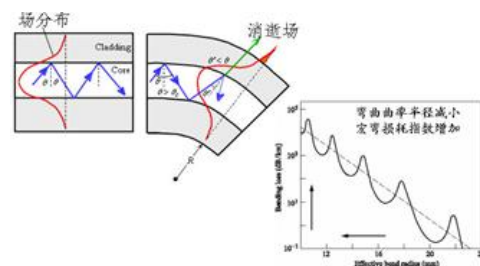


图 1 弯曲导致的光纤损耗原理图

提高光纤抗弯曲损耗能力的方法是减小临界角，具体到光纤上是提高芯包边界两侧的折射率差，即提高光纤数值孔径（NA）。

目前，国内最佳水平可以做到在 25 匝弯曲半径为 5mm 时的损耗在 0.02dB 以下（长飞公司的 BI1015 型号）。

2.2 弯曲不敏感光纤的机械可靠性

光纤在制备过程中不可避免的会在玻璃包层表面形成微裂纹，在外界应力或活性环境下，微裂纹会生长，最终导致光纤断裂。在大张力下，裂纹没来得及生长，无明显镜面，断面无规则形状，有尖角。断裂原因：a) 光纤弯曲；b) 光纤侧面受力过大；c) 排线不好，压线。

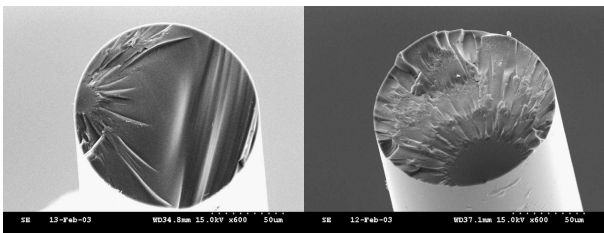
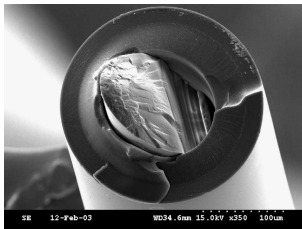


图 2 光纤在不同应力下的断裂端面图
(应力从左到右变小)

光纤在低应力下疲劳断裂，存在裂纹扩展、升速、失稳几个阶段，有明显镜面，镜面上有显著特征（mirror 区，mist 区和 hackle 区）。断裂原因：a) 光纤表面存在较大外部颗粒或应力突变点；b) 预制棒或光纤与外界摩擦，表面形成微裂纹；c) 光纤存放条件不妥，水分子等腐蚀性物质进入。图 2 显示的是光纤在外界应力作用下光纤的断裂端面图。

对光纤水听器而言，其极小的弯曲半径是导致光纤断裂的主要原因，例如，125 μm

光纤在 R=7.5mm 的弯曲半径下，外侧表面所受拉应力约为 585MPa（大约对应 85kpsi）。而相同条件，80 μm 光纤所受拉应力约为 374MPa，为 125 μm 光纤的 64%，因此光纤外径越小，优势越明显。

提高光纤抗弯曲断裂的方法主要是减少光纤包层表面缺陷，具体措施包括采用高纯合成石英原材料，大尺寸预制棒及高洁净度生产车间。另外采用特殊工艺，在光纤表面形成压应力也可以提高光纤的抗弯曲断裂能力（原理类似钢化玻璃）。同时在存储和使用上，避免光纤涂覆层损伤，避免活性环境，绕制时避免光纤压线等都是重要手段。

3. 技术现状

长飞公司是国内最早一批研制弯曲不敏感光纤的企业，筛选强度从 100kpsi 到 150kpsi 再到 200kpsi，抗弯直径目前最小设计为 10mm，覆盖普通 125/250 光纤和细径 80/165 光纤。在几何上，涂覆层外径公差可控制在 ±2 μm 以内，而包层公差在 ±1.5 μm 以内（如图 3 所示），这对精确排线和降低熔接损耗至关重要。

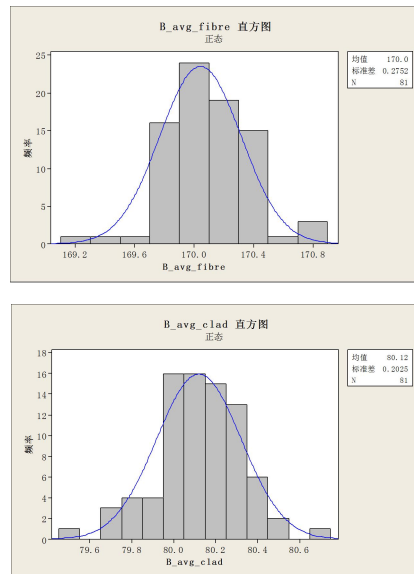


图 3 长飞公司 BI1015-B 系列光纤涂覆层和包层统计数据

在强度上，除了满足 200kpsi 筛选，在抗拉和抗老化方面也表现良好（如图 4 所示）。对客户所关心的弯曲半径下的使用寿命，我们也进行了比较验证（如图 5 所示），所得验证数据根据行业内默认公式推导得出的使用寿命结果远超过了客户要求。

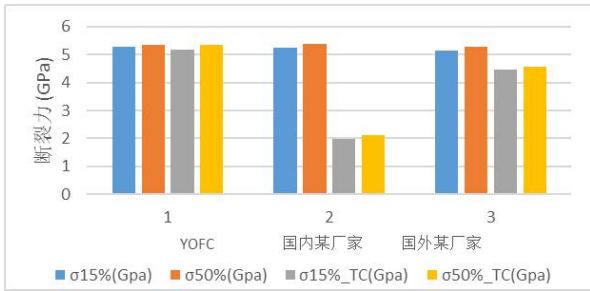


图 4 老化前后弯曲不敏感光纤的断裂力测试数据 (TC 表示老化)

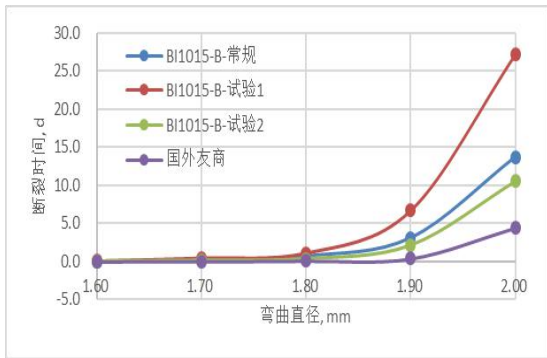


图 5 极小弯曲半径下，国内外弯曲不敏感光纤断裂时间对比

除宏弯损耗低和机械强度高外，长飞公司生产的弯曲不敏感光纤也具备良好的拉锥和研磨性能，并提供配套的水听器器件，如光纤耦合器、隔离器、DWDM、环形器及法拉第旋镜等。在新技术方面，长飞公司已成功实现了表面呈压应力和特殊涂层涂覆的高强度弯曲不敏感光纤的研制开发与产业化，并且该光纤易于成缆，为光纤水听器系统的整体可靠性提供了有力保障，为中国海洋事业做出新的贡献！

4 总结

随着海洋信息网的需求越来越明显，抗弯光纤的市场前景广阔，目前国产抗弯光纤可满足相应的要求，但从长期看，更小的尺寸和更高的可靠性是总体趋势，这对抗弯光纤的设计和工艺提出新的挑战。