

# A Review and Development of the Technical Application of Intelligent Slope Anchor FBG Sensor Monitoring

Qinbo Wang

School of Civil Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning, Guangxi, 450036, China

## Abstract

Slope stability monitoring is critical for disaster prevention and mitigation. Traditional electrical sensors face limitations such as poor anti-interference capability and insufficient stability, making it difficult to meet the demands for accurate long-term monitoring in complex environments. Fiber Bragg Grating (FBG) sensors, with advantages such as immunity to electromagnetic interference and corrosion resistance, provide an ideal solution for in-situ distributed monitoring of intelligent anchor slopes. This paper reviews the current application status and technical challenges: it first explains the sensing mechanism and technical characteristics of FBG sensors, then discusses the integration process of sensors with anchors and their engineering applicability, analyzes key bottlenecks such as integration reliability and temperature-strain cross-sensitivity, and finally looks forward to future research directions, aiming to promote the large-scale engineering application of this technology.

## Keywords

Fiber Bragg Grating sensor; intelligent anchor; slope monitoring; structural health monitoring; integration process

## 边坡智能锚杆 FBG 传感监测的技术应用综述与发展

王勤博

广西民族大学建筑工程学院, 中国 · 广西 南宁 450036

## 摘 要

边坡稳定性监测是防灾减灾关键,传统电学传感器因抗干扰差、稳定性不足,难以满足复杂环境下精准长期监测需求。光纤布拉格光栅(FBG)传感器凭借抗电磁干扰、耐腐蚀等优势,为智能锚杆边坡原位分布式监测提供了理想方案。本文综述其应用现状与技术挑战:先阐述FBG传感机理与技术特点,再探讨传感器与锚杆的集成工艺及工程适用性,剖析集成可靠性、温-应变交叉敏感等核心瓶颈,最后展望未来研究方向,以期推动该技术规模化工程应用。

## 关键词

光纤光栅传感器; 智能锚杆; 边坡监测; 结构健康监测; 集成工艺

## 1 FBG 传感器的技术原理与应用现状

### 1.1 光纤光栅传感器的技术原理与特点

光纤光栅传感器是一种基于光纤内周期性折射率调制的光学传感器。其核心原理是布拉格(Bragg)反射:当宽带光信号通过光纤光栅时,只有满足布拉格条件的特定波长光会被反射回来,而其他波长则透射通过。布拉格波长  $\lambda_B$  由以下公式决定:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

其中,  $n_{\text{eff}}$  是光纤纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  是光栅的周期。当环境温度或应变发生变化时,  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  会随之改变,导致  $\lambda_B$  发生漂移,通过测量这种波长漂移即可实现对物理量的传感。

FBG 传感器具有以下显著特点和优势:

**抗电磁干扰能力强:** 与传统的电学传感器不同, FBG 传感器基于光信号传输, 不受电磁场干扰, 使其在强电磁环境或雷电多发区域具有独特优势。

**高灵敏度和精度:** 通过优化设计参数, FBG 传感器的灵敏度可以达到很高水平, 例如在边坡监测中, 倾斜传感器灵敏度可达 400 pm/deg。

**复用性强(分布式和点式监测):** FBG 传感器可以通过波分复用(WDM)技术在单根光纤上串联多个传感器, 实现多点甚至分布式监测, 大大简化了布线和系统复杂性。例如, 在智能电池监测中, FBG 可用于单点温度和应变监测, 而瑞利散射则可实现分布式监测。

**耐腐蚀、寿命长:** 光纤本身由石英材料制成, 具有良好的化学惰性, 能够抵抗恶劣环境下的腐蚀, 延长传感器在地下或潮湿环境中的使用寿命。

**尺寸小、重量轻:** 光纤的纤细特性使得 FBG 传感器可

【作者简介】王勤博(2006-), 中国安徽合肥人。本科, 从事土木工程研究。

以集成到各种结构中，如嵌入到锚杆内部进行应力监测。

本征安全性：光纤不导电，无电火花风险，适用于易燃易爆环境。

## 1.2 FBG 传感器在智能锚杆边坡监测中的应用现状与性能表现

在边坡监测中，FBG 传感器被广泛应用于监测边坡的内部变形、锚杆受力、地层沉降和倾斜等关键参数，以评估边坡的稳定性并预测潜在的滑坡风险。

**锚杆力监测：**锚杆是边坡支护结构中的关键组成部分。将 FBG 传感器嵌入锚杆中，可以实时监测锚杆内部的轴向应力变化。研究表明，通过特殊设计的 FBG 应变传感器，可以实现高精度的锚杆力测量。例如，M20 螺栓中嵌入的 FBG 传感器在扭矩监测中获得了 0.00298 nm/N·m 的高灵敏度，R2 值为 0.9984。这种嵌入式监测能够有效评估锚杆的工作状态和支护效果，为边坡的长期安全提供数据支持。

**边坡变形监测：**FBG 传感器可用于监测边坡的整体或局部变形。通过布置在边坡不同深度的 FBG 应变传感器阵列，可以获取边坡土体的多点应变分布，揭示边坡内部的变形模式。离心模型试验结合 FBG 传感器可以实时监测边坡变形过程，为滑坡机制研究提供重要数据。

**隧道衬砌稳定性评估：**在隧道工程中，FBG 传感器与结构变形监测技术相结合，可以实现对隧道衬砌结构稳定性的实时监测。通过监测衬砌的应变变化，可以及时发现裂缝发展等安全隐患，保障隧道整体施工安全。

**铁路焊轨接头应变监测：**FBG 传感器也可用于监测铁路焊轨接头的应变 - 应力行为，这对于铁路运输安全至关重要，因为焊轨接头在火车冲击下最易受损且刚度最低。

## 2 FBG 传感器集成方式

FBG 传感器在智能锚杆中的嵌入方式直接影响其监测性能、耐久性及工程适用性。目前，针对 FBG 传感器的集成主要可分为以下几类，每种方法均有其独特的工艺细节与应用考量。

### 2.1 现有嵌入工程技术与不足

#### 2.1.1 表面粘贴法：实验室友好，但工程中“脆弱”

具体工艺：表面粘贴法是将 FBG 传感器通过环氧树脂胶等粘合剂直接粘贴在锚杆表面。这种方法操作简便，成本较低，在实验室环境下常用于验证 FBG 传感器的基本性能和灵敏度。例如，通过在锚杆表面粘贴 FBG，可以监测锚杆受力后的应变变化，其原理是粘合剂将锚杆的应变传递给光纤，引起 FBG 布拉格波长的漂移。

现有工艺的不足或缺陷：尽管表面粘贴法易于实施，但在实际工程应用中存在显著缺陷。首先，环氧树脂胶的固化过程会引入额外的残余应力，影响测量精度。其次，粘合剂的老化、剥离以及外部环境（如温度变化、湿气侵蚀、化学腐蚀）的影响，都会导致 FBG 传感器与锚杆表面耦合不

稳定，从而降低监测的长期可靠性和准确性。此外，锚杆在实际服役过程中，可能会受到机械冲击、磨损等作用，粘贴在表面的 FBG 传感器极易损坏，使其在复杂恶劣的边坡工程环境中显得尤为“脆弱”，难以满足长期、可靠监测的需求。

#### 2.1.2 编织法：将 FBG 传感器通过纺织编织的方式集成到结构中

具体工艺：编织法是一种将 FBG 传感器巧妙地融入结构材料中的方法，特别适用于需要高精度和准确测量的柔性结构或复合材料。该方法通过纺织编织工艺，将 FBG 传感器作为一根或多根纤维，与其他高性能纤维（如碳纤维、玻璃纤维）一同编织成三维（3D）织物或二维（2D）布料。这种集成方式可以实现传感器在结构内部的分布式布局，并确保传感器与基体材料之间的良好耦合。例如，通过三维编织技术，可以设计出具有自感知功能的复合材料，FBG 传感器可以沿编织路径精确分布，从而实现了对结构内部应变场的细致监测。

现有工艺的不足或缺陷：编织法虽然能够实现 FBG 传感器与材料的紧密集成，但其主要挑战在于工艺的复杂性和成本。首先，编织设备和工艺需要高度的专业化，以避免在编织过程中对脆弱的光纤造成损伤。其次，对于金属锚杆这类刚性结构，直接采用纺织编织方式集成 FBG 传感器存在技术难度，因为金属材料的熔点和加工方式与纤维材料截然不同。此外，编织过程中传感器位置的精确控制和固定也是一个难题，一旦传感器在编织过程中发生位移或受损，将直接影响其监测性能。目前，编织法更适用于复合材料或柔性结构，而对于高强度、高刚性的智能锚杆的应用仍处于探索阶段。

### 2.2 未来可能大规模应用的嵌入工程——超声波嵌入

此工艺将预处理好的 FBG 传感器精确放置到锚杆表面的定位槽中。**超声波压头与频率控制：**使用定制的超声波压头（Sonotrode），对传感器上方的金属表面施加垂直压力，并通过超声波发生器产生高频（如 20 kHz - 40 kHz）振动。超声波能量在传感器与锚杆接触界面处产生剧烈摩擦，导致局部温度升高和金属材料的塑性流动。局部塑性变形包覆：在超声波作用下，锚杆金属槽边缘的材料会发生塑性变形，向内流动，逐步包覆并固定 FBG 传感器。由于超声波作用的局部性，锚杆整体温度升高不明显，避免了对 FBG 传感器的整体热损伤。**参数优化：**超声波功率、振动时间、压力以及压头几何形状等参数的优化至关重要，旨在实现传感器牢固嵌入的同时，最小化对光纤性能的影响。**优势与挑战：**超声波嵌入法的核心优势在于其“冷加工”特性，即在不使锚杆整体高温熔化的前提下实现局部键合，从而有效保护 FBG 传感器不受热损伤。此外，该方法具有快速、高效、无额外填充材料的优点，有望实现传感器与锚杆之间的良好力学耦合。然而，挑战在于如何精确控制超声波能量，避免过度振动对光纤结构造成微损伤，以及如何确保超声波作用

区域的均匀性,防止传感器局部应力集中。同时,需要开发针对光纤材料的超声波嵌入专用设备和工艺参数。

### 3 有关 FBG 技术发展及应用的未来展望

#### 3.1 未解决的问题与技术挑战

尽管 FBG 传感器在智能锚杆边坡监测中取得了显著进展,但仍存在一些未解决的问题和技术挑战:

**温度交叉敏感性:** FBG 传感器对温度和应变都敏感。在实际工程中,温度变化会引起布拉格波长的漂移,这可能与应变引起的漂移混淆,导致测量误差。虽然已有多种温度补偿方法被提出,如使用独立的温度传感器或双光栅结构,但如何在复杂多变的边坡环境中实现精确且鲁棒的温度解耦仍是挑战。

**长期稳定性与可靠性:** 锚杆边坡通常处于恶劣的地下环境中,传感器可能面临潮湿、腐蚀、压实等问题。尽管光纤本身具有耐腐蚀性,但传感器的封装、引线以及与锚杆本体的界面在长期服役下的可靠性和稳定性仍需深入研究和验证。例如,在螺栓中嵌入 FBG 传感器,其封装技术需要保证传感器在受力过程中不受损坏,并能长期稳定工作。

**安装与保护:** FBG 传感器的安装,特别是在既有锚杆或复杂地质条件下的锚杆中,仍然是一个技术难题。如何在保证传感灵敏度的同时,确保传感器在安装和后续使用过程中不受损伤,并有效抵抗外部环境的侵蚀,是工程应用中的关键。

**数据处理与分析:** 随着监测点数量的增加,如何高效、准确地处理和分析海量的 FBG 监测数据,提取有价值的形变信息,并与边坡失稳机制相结合,进行预警和评估,仍需进一步研究。目前的研究多集中于传感器本身的设计和性能优化,而对大数据分析和智能诊断方面的深入探讨相对较少。

**成本与标准化:** 相较于传统监测手段,FBG 传感器系统的前期投入成本可能较高。此外,缺乏统一的行业标准和规范,也限制了其大规模推广应用。

#### 3.2 未来的研究建议

为了克服上述挑战,推动 FBG 传感器在智能锚杆边坡监测中的进一步发展,未来的研究应聚焦以下几个方向:

**多参数集成与解耦技术:** 开发新型 FBG 传感器结构,实现应变、温度、倾斜、渗流等多物理量的集成测量,并创新性地提出多参数交叉敏感性的高效解耦算法,提高测量的精度和可靠性。例如,可以探索基于机器学习或深度学习的数据解耦方法,从复杂多变的监测数据中有效分离不同物理量的影响。

**高可靠性封装与长期服役性能:** 针对恶劣工程环境,

研发新型高强度、耐腐蚀、抗压的 FBG 传感器封装材料和结构,确保传感器在锚杆内部的长期稳定运行。开展加速老化试验和长期现场监测,评估传感器在真实工况下的服役寿命和性能衰减规律。

**智能化安装与自动化监测:** 研究适用于复杂工况的 FBG 传感器自动化安装技术,例如结合机器人或无人机技术进行传感器布设。同时,开发基于物联网(IoT)和云计算的智能监测平台,实现数据的实时传输、远程监控和自动化预警。

**数据驱动的边坡稳定性评估模型:** 将 FBG 监测数据与地质力学模型、数值模拟、机器学习算法相结合,构建数据驱动的边坡稳定性评估和预测模型。例如,利用历史监测数据训练模型,识别边坡失稳前的特征信号,提高预警的准确性和时效性。离心模型试验等方法可用于加速研究边坡失稳过程,并结合 FBG 传感器实时监测变形过程。

**低成本制造与标准化推广:** 通过新材料、新工艺的研发,降低 FBG 传感器的制造成本,使其更具市场竞争力。同时,积极推动行业标准的制定,规范 FBG 传感器在边坡工程中的设计、安装、测试和应用,促进其大规模产业化发展。

### 4 结语

光纤布拉格光栅(FBG)传感器技术与智能锚杆的融合,为边坡工程监测带来革命性突破,其抗电磁干扰、稳定性好等优势,使其在复杂岩土环境中具备不可替代的应用价值。该技术经表面粘贴、内部植入等工艺实现了从实验室到工程实践的落地,可精准感知岩体应变、定位滑移面、评估支护结构健康状态。

但该技术规模化、标准化应用仍面临诸多瓶颈:传感器集成工艺存在存活率、耐久性等缺陷,温变与应变交叉敏感影响精度,低成本高鲁棒性解调技术缺失推高应用门槛,且监测数据的深度挖掘与智能预警能力不足。突破这些挑战,方能推动其成为边坡工程安全保障的核心技术。

#### 参考文献

- [1] 李宏男, 伊廷华, 李东升. 光纤光栅传感技术在土木工程中的研究与应用进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(02): 1-20.
- [2] 张顶立, 王涛, 刘胜春. 智能锚杆技术及在岩土工程监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2601-2615.
- [3] 姜德生, 何伟, 陈益峰. 光纤光栅传感器温度-应变交叉敏感解耦方法研究[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 1106002.
- [4] 朱鸿鹄, 周国庆, 龚辉. 边坡工程中FBG智能监测技术的应用现状与关键问题[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(05): 801-812.
- [5] 王兴国, 李丽, 张旭辉. 光纤光栅传感器嵌入式集成工艺及长期稳定性研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(03): 128-137.