

光学学报

基于FBG-FPI光纤传感器的岩石含水率光纤超声检测

康弯弯^{1,2}, 邵志华^{1,2*}, 周旷羽^{1,2}, 乔学光^{1,2}¹西北大学物理学院, 陕西 西安 710127;²陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西 西安 710065

摘要 提出了一种基于光纤超声传感技术的岩石含水率检测新方法。在实验中,以压电换能器(PZT)发出的1 MHz超声波作为声源,采用超声波透射法,通过刻写在细芯光纤中的一对光纤光栅检测岩石的超声波信息(包括时域以及频域的结果),并与相同条件下的PZT接收结果进行比较。随着岩石含水率的增加,光纤传感器表现出与PZT相似的响应趋势,且测得的含水率绝对偏差较小,充分证明了光纤探测岩石含水信息的可行性和优越性。

关键词 光纤光学; 红砂岩; 含水率; 超声波; 光纤检测

中图分类号 O349

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231773

1 引言

岩石具有水理性,水对岩石力学参数有显著影响^[1]。例如,在油气勘探领域中,储层岩石的含水率直接影响岩石密度、强度等物理力学性能,进而改变弹性波在岩层中传播的振幅、波速等特征参数,最终对弹性波资料评价、地下岩层结构分析以及储层特征识别过程产生重要影响;在岩体工程领域中,如溶浸采矿、长距离隧洞、库岸边坡等工程,水与岩石之间复杂的物理化学作用^[2-3]可能会导致岩体刚度、硬度等物理力学性质降低,这是岩体工程破坏的根本原因,也严重威胁工程建设的安全与稳定。因此,检测岩石含水率尤为重要。

超声检测具有检测范围广、测量精度高、无损害、速度快等特点,已广泛应用于岩石物理模型含水率的研究。多年来,该技术已取得了一些研究成果。林睦曾^[4]使用岩石参数测定仪及超声波换能器探究了干燥和饱水条件下岩石裂隙中含水量对纵波速度的影响;刘祖沅等^[5]建立了超声波衰减和波速测量系统,研究了单轴压缩下干燥和饱水的小浪底砂岩和房山大理岩的纵波衰减特征及衰减机制;陈旭等^[6]采用智能声波仪分析了不同岩性及含水率的岩石声波传播特性,得出饱水状态下岩石的纵波速度高于干燥状态,此外,纵波速度还受孔隙度、硬度等因素的影响;廖文博^[7]使用声波参数测定仪探究红砂岩饱水过程中的超声波传播特性,重点分析了各声学参数对岩石饱水度、单轴抗压

强度、弹性模量的敏感性等的影响。在上述工作中,超声的激发与接收主要是通过电磁型、电容型、压电型等电类换能器来实现的,但该类超声换能器存在激励及响应频带窄、空间分辨率低、动态范围小、声耦合效果差、稳定及可靠性不足等本质缺点,难以满足复杂岩石含水率精细研究的需求。

光纤传感器由于其尺寸紧凑且具有灵敏度高、频率响应宽、抗电磁干扰能力好等优点,常被用于超声检测^[8]。超声波检测中最常用到的是光纤法布里-珀罗干涉仪(FPI),其具有制作简单、灵敏度高、宽频响应等优点,但其额外的保护性封装通常会对检测分辨率和响应幅度造成一定的影响。光纤布拉格光栅(FBG)具有结构紧凑、工艺成熟、一致性和稳定性较好等优点,在声学-超声波检测领域中是一种常用的优选方案。带有FBG反射器的光纤FPI(FBG-FPI)兼具FPI和FBG的优势,即光谱质量高、结构稳定性好、易于制造和调优等^[9]。因此,本文提出基于FBG-FPI光纤传感器的岩石含水率光纤超声检测方法,得到岩石的含水率与超声纵波的波速、幅值、频率等参数之间的关系。实验表明,光纤传感器与压电换能器(PZT)测出结果相吻合,且具有更优的测量偏差度。

2 基本原理

2.1 方法模型

由于红砂岩具有良好的声透性,选其岩石样本(编

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2024-01-21; 录用日期: 2024-02-05; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2024JC-YBMS-482)、国家自然科学基金(62005214, 61927812, 61735014)、西北大学2023年研究生创新项目(CX2023104)

通信作者: *zhshao@nwu.edu.cn

号为 zsy) 以建立含水红砂岩超声波传播数值模型, 模拟超声纵波在含水红砂岩中的传播特性。此模拟考虑固体力学与压力声学两个物理场的相互作用^[10], 建立的仿真模型如图 1(a) 所示。该岩石样本的直径为 100 mm, 高为 80 mm, 并设置 200 个孔隙单元随机分布于模型内, 模拟岩样孔隙。在干燥情况下, 将所有孔隙单元设置为空气; 在不同含水率情况下, 根据含水率所需的孔隙单元数量, 随机将孔隙单元设置为水, 分别

计算含水率为 0、25%、50%、75%、100% 情况下的纵波特征。

图 1(b) 为波速随含水率变化的模拟结果, 随着岩石含水率的增大, 纵波波速呈非线性上升趋势。图 1(c) 和图 1(d) 分别展示了含水率为 0 和 50% 时纵波传播过程 (位于同一时刻 $t=14 \mu\text{s}$), 相较而言, 含水率为 50% 时的主波传播距离要大于含水率为 0 时的情形。

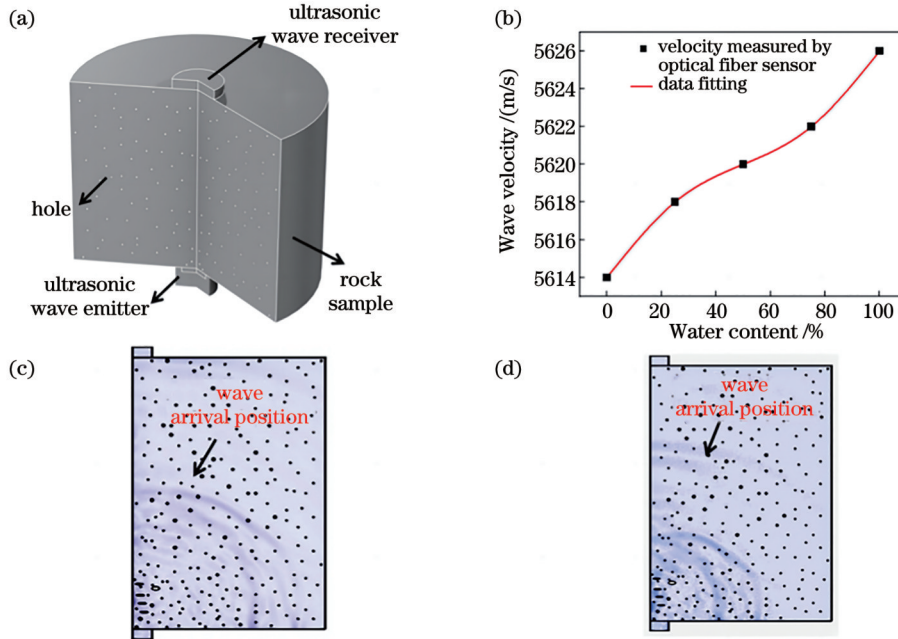


图 1 仿真模拟图。(a) 含水岩石声传播仿真模型; (b) 波速随含水率变化的模拟结果; (c) 含水率为 0 时纵波传播过程; (d) 含水率为 50% 时纵波传播过程

Fig.1 Simulation diagram. (a) Simulation model of water content in rock mass; (b) simulation result of wave velocity variation with water content; (c) propagation process of longitudinal wave with 0 water content; (d) propagation process of longitudinal wave with 50% water content

将超声波接收器分别设置为 PZT 与光纤传感器并进行模拟, 在同样的超声激发源条件下, 计算得到 PZT 与岩石之间的耦合系数为 0.14, 光纤传感器与岩石之间的耦合系数为 0.36。由此可见, 超声波在岩石与光纤传感器之间传播时, 具有更优的耦合效果。超声波从岩石传递到光纤传感器, 光纤应变与光纤传感器的长度、直径、杨氏模量等物理参数相关。通过模拟计算可知, 随着光纤直径及长度的减小, 光纤传感器的应变增大; 随着杨氏模量的增大, 光纤传感器的应变减小。

2.2 光纤传感

所提光纤传感器的结构示意图如图 2(a) 所示, 光纤传感器的制作过程主要包括光纤熔接和光纤光栅刻写^[11]。将单模光纤 (SMF) 和细芯光纤 (TCF) 进行芯对芯熔接, 传感区域为刻写在 TCF 上的双 FBG, 所用 TCF 的纤芯和包层直径分别为 $9 \mu\text{m}$ 和 $80 \mu\text{m}$, 由此构建光纤内 FBG-FPI 结构。双 FBG 具有相同的写制参数, FBG 的长度为 1 mm, 中心波长

λ_B 约为 1550 nm, 两个 FBG 之间的间隔为 $400 \mu\text{m}$, 以上结构参数均可按需调整。沿 SMF 导入的传感光沿 TCF 向前传播, 而后分别被双 FBG 反射, 最后再重新耦合至 SMF。光纤传感器输出的谐振光谱存在明显的干涉条纹^[12], 这是因为光源发出的光经光环形器传输至光纤传感器, 经两个 FBG 反射, 再次经过光环形器导出, 这两束反射光的频率和传播方向均相同且存在光程差, 因此输出光出现干涉, FBG-FPI 反射光谱包络上出现近似于双光束干涉的特征, 优化后的反射光谱如图 2(b) 所示。在实验测试中, 将可调谐连续激光器 (TSL) 输出波长定位于 FPG-FPI 光谱上的工作点 1 处。将工作点 1 附近光谱放大, 可观察到清晰的干涉光谱, 其中虚线框标记区域为线性边带区, 用于岩体超声信号的光谱边带滤波解调^[13]。此 FBG-FPI 结构兼具 FPI 的灵敏度和 FBG 的稳定性, 而刻写于 TCF 的双短栅利用应力集中效应, 提高光纤超声传感器的响应灵敏度, 且保障传感结构的完整性与稳定性^[14-15]。

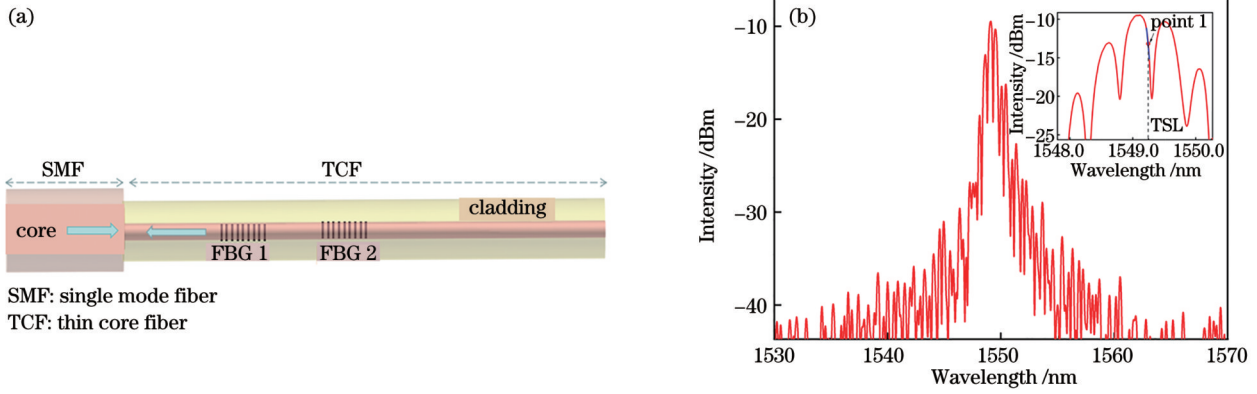


图 2 光纤传感器。(a) 光纤传感器结构示意图；(b) 光纤传感器反射光谱图(插图为工作点 1 附近的光谱图)

Fig. 2 Optical fiber sensor. (a) Schematic diagram of optical fiber sensor structure; (b) reflective spectrum of optical fiber sensor (inset is reflective spectrum of word point 1)

一般情况下,FBG 的超声响应特征取决于光栅长度与超声波波长之间的比值^[16],具体表达式为

$$S_{\lambda}(\lambda_s/L, \epsilon_m) = \frac{\Delta\lambda_s(\lambda_s/L, \epsilon_m)}{\lambda_B \epsilon_m} = \frac{\Delta\lambda_s[v/(f_s L), \epsilon_m]}{\lambda_B \epsilon_m}, \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_s$ 为超声波的波长变化量; λ_s 为超声波波长; L 为 FBG 长度; ϵ_m 为超声波的位移幅值; v 为超声波的传播速度; f_s 为超声波的频率。

光纤传感器灵敏度是 λ_s/L 的函数,其值主要分为三个区域:当 $v/(f_s L) \ll 1$ 时,灵敏度趋近于 0;当 $v/(f_s L) \approx 1$ 时,灵敏度随着 $v/(f_s L)$ 的增加而增加;当 $v/(f_s L) \gg 1$ 时,灵敏度达到最大。在本测试中,超声波的工作频率为 1 MHz(在岩石中的波长为 4 mm),FBG-FPI 结构的有效长度为 1.4 mm, $v/(f_s L)$ 处于上述区域的灵敏度增加区域,因此可高灵敏检测岩石内部的超声信号。

以 PZT 发射的纵波为超声源,因超声波工作波长大于有效传感区域,施加在传感器上的超声波可理想化为平面波,而超声波作用下的 FBG-FPI 传感器可等效于单自由度的质量-弹簧振动系统。相应地,FBG-FPI 结构以轴向拉伸或压缩的形式发生周期的形变。PZT 产生的超声压力场 ΔP 可表示为

$$\Delta P = \frac{\pi D^2 E \Delta L}{4 L_{\text{FBG-FPI}}}, \quad (2)$$

式中: $L_{\text{FBG-FPI}}$ 为 FBG-FPI 传感器的原始长度; ΔL 为 FBG 长度的变化量; E 和 D 分别为传感光纤的杨氏模量和直径。

基于耦合模理论和光束传输方法,弱反射条件下的 FBG-FPI 反射率可表示为

$$R_{\text{FBG-FPI}} = 2 \left| r_g \right|^2 \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi n_{\text{eff}} L_{\text{FBG-FPI}}}{\lambda_s} \right) \right], \quad (3)$$

式中: r_g 为光栅反射率; n_{eff} 为传感光纤的有效折射率; $L_{\text{FBG-FPI}} = L + d$, d 为 FBG-FPI 的腔长。

当外界环境发生改变时,光纤中的热光效应、热膨胀效应以及弹光效应等会使 FBG-FPI 的反射光谱发

生变化^[17]。在中心波长 λ_B 处,FBG-FPI 受超声压力场作用产生的相位变化为

$$\Delta\varphi(\lambda_B) = \frac{4\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_B} \Delta(L + d) + \frac{4\pi(L + d)}{\lambda_B} \times \Delta n_{\text{eff}} \frac{4\pi n_{\text{eff}}(L + d)}{\lambda_B} \Delta\lambda_B, \quad (4)$$

式中: $\Delta(L + d)$ 、 Δn_{eff} 、 $\Delta\lambda_B$ 分别对应为 $L + d$ 、 n_{eff} 、 λ_B 的变化量。

光纤长度的变化、折射率的变化以及光纤中心波长的变化是导致相位改变的三个主要因素,通过相位的变化对相位进行求导即可计算相位的相对变化量,具体表达式为

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} \Big|_{\lambda_B} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} - \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \alpha\Delta P + \zeta\Delta P - (\alpha + \zeta)\Delta P = 0, \quad (5)$$

式中: α 为光纤的热膨胀系数; ζ 为光纤的热光系数。

由式(5)可知,受超声作用的影响,光波相对相位变化恒等于零,即 FBG-FPI 的反射谱只在光谱域发生整体移动,其基本形状不发生改变,因此可以通过检测其光谱的波长移动量来感测外界物理量^[18]。本实验中使用边带滤波法来解调超声信号,光谱边带可以对入射光功率进行调制,将超声波作用下光纤传感器光谱的变化转换为输出光功率的变化,从而实现对超声波信号的解调。

3 分析与讨论

岩石含水率光纤超声检测的实验系统包括三个部分,如图 3(a) 所示:第一部分为 PZT 激发超声波源,第二部分为光纤传感器接收超声波,第三部分为超声信号的解调与分析。岩石测量采用超声透射法,声源为 PZT 发出的频率为 1 MHz 的超声波。采用线宽为 100 kHz 和分辨率为 0.1 pm 的可调谐激光器作为光源,光通过环形器发射到光纤传感器中,被超声调制的传感光信号反射至光电探测器(PD),最后使用示波

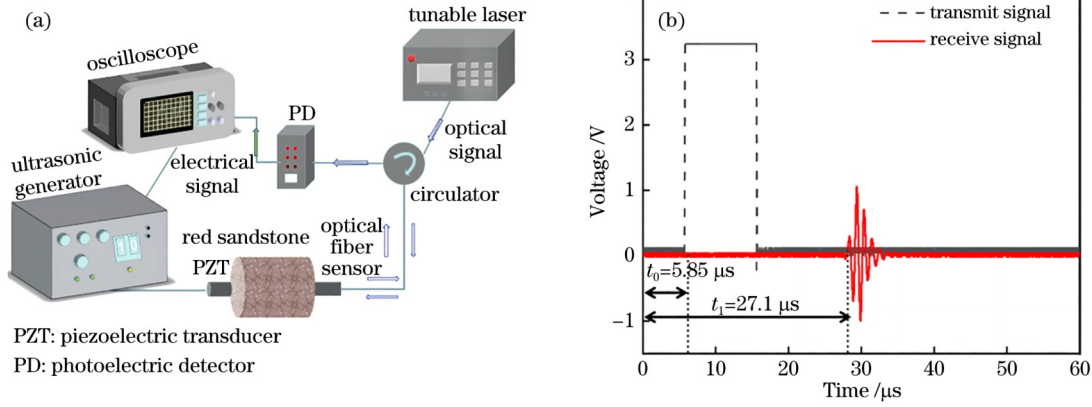


图 3 岩石含水率光纤超声检测。(a)实验系统;(b)时域信号

Fig. 3 Optical fiber ultrasonic detection of water content in rock mass. (a) Experimental system; (b) time-domain signals

器记录和分析超声信号。图 3(b)为 PZT 发射和光纤传感器接收到的时域信号,通过测量声波穿过岩样的距离与传输时间,可计算得到超声波速。在光信号解调中采用光谱边带滤波法,采集的超声信号幅值正比于解调时所选取的光谱边带斜率(即滤波工作点,位于光谱 -3 dB 处)。在实验测试中,将窄线宽激光器的输出波长定位于滤波工作点,以提升采集信号的幅值。

如图 4 所示,得到光纤传感器和 PZT 接收超声波的灵敏度表征,经过线性拟合,可计算得到光纤传感器的灵敏度为 36.63 mV/kPa, PZT 的灵敏度为 21.04 mV/kPa。实验中使用红砂岩作为检测岩样(编号为 zsy),此岩样取自山东省日照市莒县。先将岩石进行 24 h 烘干,之后对其进行 48 h 的含水检测^[18-20]。起初,在 0~3 h 内,由于岩石进水速度较快,每隔 30 min 检测一次,记录超声波在岩石中的传播速度;在 3~8 h 内,每隔 1 h 检测一次,记录数据;在 8~16 h 内,每隔 3 h 检测一次,记录数据;在 16~48 h 内,由于岩石浸水趋于饱和,每隔 8 h 测量一次,记录数据。如图 3(a)所示,采用脉冲透射法^[21-22],即使用 PZT 激发超声波,光纤传感器检测岩石透射的超声波;与此同时,记录了相同条件下的 PZT 检测结果(PZT 激发,PZT 接收),以

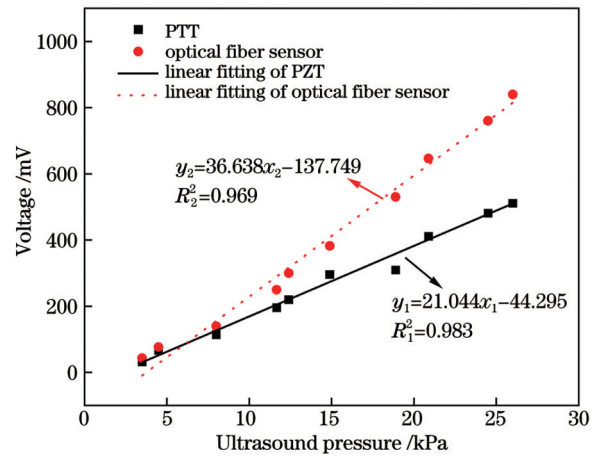


图 4 光纤传感器与 PZT 灵敏度表征

Fig. 4 Sensitivity characterization of optical fiber sensor and PZT

进行比较。

图 5(a)为用 PZT 测得的含水率与波速的关系,图 5(b)为用传感器测得的含水率与波速的关系。结果表明,在纵波条件下,用光纤传感器和 PZT 测量得到的结果相似,即红砂岩的波速随含水量的增加呈先减小后增大的变化趋势。当岩石刚开始吸水时,水分

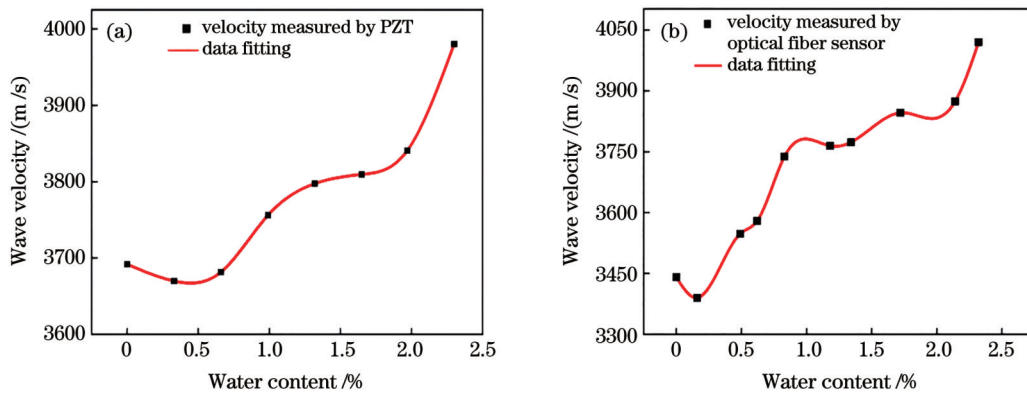


图 5 不同传感器测得的含水率与波速的关系。(a)PZT;(b)光纤传感器

Fig. 5 Relationship between water content and wave velocity measured by different sensors. (a) PZT; (b) optical fiber sensor

会附着在孔隙和岩石矿物颗粒表面,形成的水膜会减小岩石的弹性模量,导致波速减小;随着含水率的继续增大,孔隙被水溶液充满,此时的超声波会沿着水-固耦合体进行传播^[23],声波在空气中的传播速度小于在水中的传播速度,因此波速增大。

在研究岩石的声波特性时,常常将接收到的时域

信号经快速傅里叶变换(FFT)转换为频域信号。利用FFT技术将PZT与光纤传感器测得的时域信号转换为频域信号,并提取相关信息。图6(a)和图6(b)分别为PZT测得的主频率及其幅值随含水率的变化情况;图6(c)和(d)分别为光纤传感器测得的主频率及其幅值随含水率的变化情况。

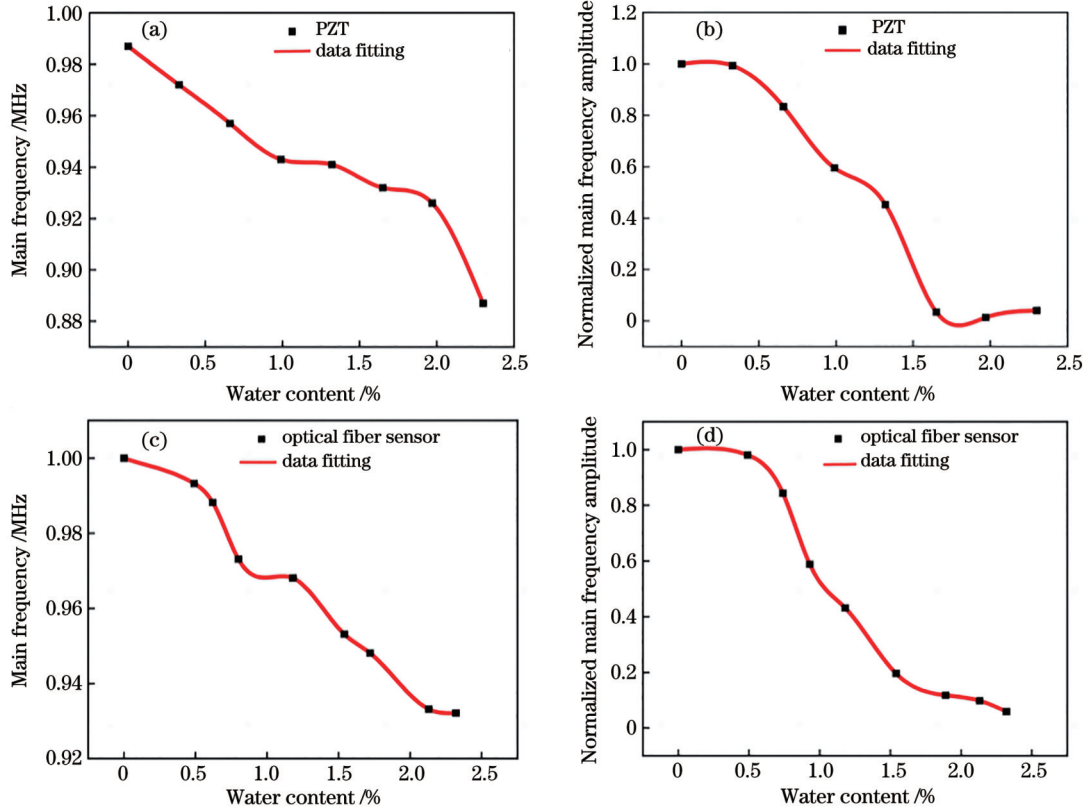


图6 主频率及归一化幅值随含水率变化图。(a)PZT测得主频率随含水率的变化;(b)PZT测得归一化主频率幅值随含水率的变化;(c)光纤传感器测得主频率随含水率的变化;(d)光纤传感器测得的归一化主频率幅值随含水率的变化

Fig. 6 Change of main frequency and normalized main frequency amplitude with water content. (a) Change of main frequency with water content measured by PZT; (b) change of normalized main frequency amplitude with water content measured by PZT; (c) change of main frequency with water content measured by optical fiber sensor; (d) change of normalized main frequency amplitude with water content measured by optical fiber sensor

在从完全干燥状态到吸水 48 h 的过程中,可以看出纵波信号的频率特征随着岩体含水率的改变而发生显著变化。红砂岩在干燥状态下,纵波信号的能量主要集中在较高频部分;在吸水状态下,纵波信号的能量集中于较低频率部分。随着岩体含水率的增大,主频逐渐向低频靠近,即出现“频率漂移”的现象。同时,随着含水率的增加,主频幅值在降低。这种变化的原因主要有两个:一方面,在吸水过程中,水分的增加能够增大岩样本身的粘滞性,使其成为粘弹性体;另一方面,岩石内部的矿物成分可能会溶解于水中,使其内部结构发生变化,其骨架强度减弱且弹性模量降低,从而增加了岩石对高频信号的吸收,产生“频率漂移”和主频幅值衰减等现象^[24-25]。

利用波速随岩石含水率变化的关系,分别对光纤传感器和PZT测量得到的含水率进行还原处理,并计

算其绝对偏差度,具体计算过程为

$$g = \frac{\sum (N_i - N_i')}{n}, \quad (6)$$

式中: g 为绝对偏差度; N_i' 为第*i*组数据的测量值; N_i 为第*i*组数据的标定值; n 为数据组数。

含水率经重构后,光纤传感器的测量值与实际含水率的关系如图7(a)所示,其平均绝对偏差值约为0.055。PZT的测量值与实际含水率的关系如图7(b)所示,其平均绝对偏差值约为0.069。PZT与超声波的耦合基于正压电效应,而光纤传感器与超声波耦合可等效为单自由度的质量-弹簧振动系统。PZT和光纤传感器的响应存在差异主要是因为二者耦合超声波的机制不同,相比于PZT,光纤超声传感器具有体积小、灵敏度高、不受电磁影响等优点。因此,光纤传感器测量的偏差较小,结果更准确。

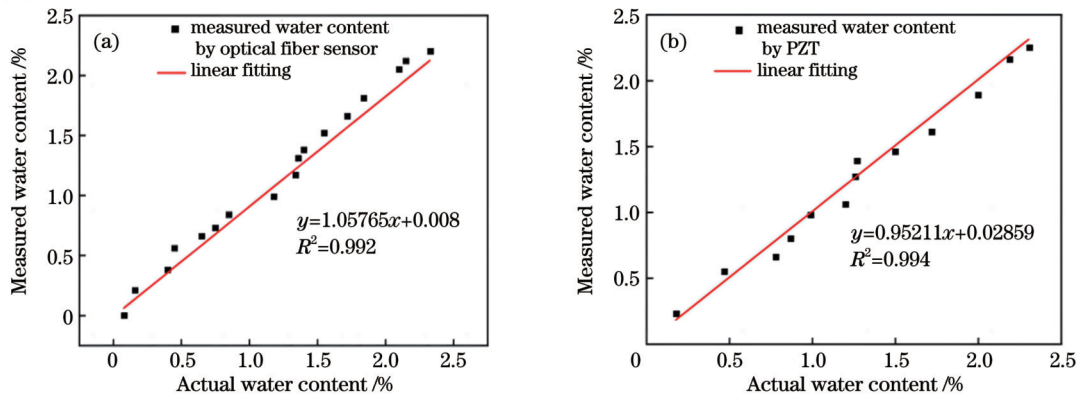


图7 含水率重构。(a)光纤传感器测量值与实际含水率的关系;(b)PZT测量值与实际含水率的关系

Fig. 7 Water content reconstruction. (a) Relationship between optical fiber sensor measurement values and actual water content; (b) relationship between PZT measurement values and actual water content

4 结 论

所提FBG-FPI光纤超声传感器可用于岩体的超声波检测和含水率分析,采用超声波透射法得到的时域和频域结果与PZT所测结果具有相似的响应趋势。在纵波条件下,随着含水量的增加,红砂岩波速先减小后增大,同时出现主频漂移及幅值衰减现象。与电类传感器检测方法相比,光纤超声波技术具有更高的分辨率和更小的偏差度。

因此,在后期研究中可使用激光超声作为宽带光源来替代PZT发射源,结合所设计的高灵敏宽频光纤超声传感器,可实现岩石物理模型含水率的低偏差精准检测。

参 考 文 献

- [1] 段天柱, 任亚平. 不同含水率砂岩单轴压缩力学特性及波速法损伤[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 153-158.
Duan T Z, Ren Y P. Study on uniaxial compression mechanical properties of sandstone with different moisture content and wave velocity method[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 153-158.
- [2] 牛新团. 非饱和煤样浸水软化性的超声波试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010: 5-8.
Niu X T. The study on ultrasonic experiment of unsaturated coal samples of water immersion softening[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010: 5-8.
- [3] 王桂莲, 李德建, 何满潮, 等. 岩石吸水特性及其孔隙结构变化研究[C]//中国软岩工程与深部灾害控制研究进展: 第四届深部岩体力学与工程灾害控制学术研讨会暨中国矿业大学(北京)百年校庆. 北京: 中国岩石力学与工程学会软岩工程与深部灾害控制分会, 2009.
Wang G L, Li D J, He M C, et al. Study on water absorption characteristics of rock and its pore structure change[C]// Research Progress of China Soft Rock Engineering and Deep Disaster Control: The proceedings of the 4th Deep Rock Mechanics and Engineering Disaster Control Symposium and the centennial Anniversary Conference of China University of Mining and Technology (Beijing). Beijing: Soft Rock Engineering and Deep Disaster Control Branch of Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, 2009.
- [4] 林睦曾. 岩石裂隙中的含水量对岩石声速度的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1983, 6(4): 71-80.
Lin M Z. Effects of water content in cracks on the sound wave velocity in rock[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1983, 6(4): 71-80.
- [5] 刘祖沅, 胡毓良, 陈颢. 单轴压缩下干燥和饱和岩石中超声P波的衰减[J]. 地球物理学报, 1984, 27(4): 349-359.
Liu Z Y, Hu Y L, Chen Y. Ultrasonic P wave attenuation in dry and saturated rocks under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1984, 27(4): 349-359.
- [6] 陈旭, 俞缙, 李宏, 等. 不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2527-2533.
Chen X, Yu J, Li H, et al. Experimental study of propagation characteristics of acoustic wave in rocks with different lithologies and water contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2527-2533.
- [7] 廖文博. 红砂岩饱水过程中超声波传播特性研究及应用[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022: 10-33.
Liao W B. Study and application of ultrasonic propagation characteristics in red sandstone saturation process[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022: 10-33.
- [8] 邵志华. 新型高性能光纤超声波传感器研究[D]. 西安: 西北大学, 2019: 19-25.
Shao Z H. Novel high-performance fiber-optic ultrasonic sensors [D]. Xi'an: Northwest University, 2019: 19-25.
- [9] Shao Z H, Zhou K Y, Yin H H, et al. Advanced suspended-core fiber sensor for seismic physical modeling[J]. Optics Express, 2022, 30(10): 16384-16395.
- [10] 周丹坤, 李晓昭, 常晓军. COMSOL平台在城市地下多种资源相互影响分析中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 526-532.
Zhou D K, Li X Z, Chang X J. Application of COMSOL platform in analysis of interaction of urban underground multiple resources[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 526-532.
- [11] Chen F Y, Li X Y, Wang R H, et al. Sensitivity enhancement of fiber-optic accelerometers using thin-cladding fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(18): 5988-5994.
- [12] 乔学光, 邵志华, 包维佳, 等. 光纤超声传感器及应用研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 074205.
Qiao X G, Shao Z H, Bao W J, et al. Fiber-optic ultrasonic sensors and applications[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 074205.
- [13] 范成磊, 罗彬彬, 吴德操, 等. 基于微纳光纤的柔性仿生微结构触觉传感器研究[J]. 光学学报, 2023, 43(21): 2106004.
Fan C L, Luo B B, Wu D C, et al. Flexible bionic microstructure tactile sensor based on micro-nano optical fiber[J].

- Acta Optica Sinica, 2023, 43(21): 2106004.
- [14] Rong Q Z, Shao Z H, Yin L X, et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using fiber Bragg grating Fabry-Perot probe[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 223-228.
- [15] 胡凯, 葛益娟, 孙萌萌, 等. 基于多模-细芯-多模光纤结构的双参数测量传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 1928002.
- Hu K, Ge Y X, Sun M M, et al. Dual-parameter measurement sensor based on multi-mode-thin-core-multi-mode fiber structure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(19): 1928002.
- [16] Minardo A, Cusano A, Bernini R, et al. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(2): 304-312.
- [17] 武彪, 刘云东, 陈海良, 等. 基于保偏光子晶体光纤的 Sagnac 干涉温度与应变传感特性[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1006005.
- Wu B, Liu Y D, Chen H L, et al. Temperature and strain sensing characteristics of polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Sagnac interference[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 1006005.
- [18] 张诚, 马雪慧, 赵军发, 等. 基于虚拟游标增敏的法布里-珀罗温度传感器[J]. 中国激光, 2023, 50(13): 131002.
- Zhang C, Ma X H, Zhao J F, et al. Fabry-Perot temperature sensor based on virtual vernier sensitization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(13): 131002.
- [19] 徐青, 黄少奇, 李馨馨. 水泥基材料含水量评价方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(2): 125-130.
- Xu Q, Huang S Q, Li X X. Study of water content evaluation method for cement-based materials[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(2): 125-130.
- [20] 李造鼎, 赵毅军, 位亚娜. 双轴压缩下干燥与饱水岩石中超声波衰减的实验研究[C]//1990年岩土混凝土声测技术新进展学术与信息交流会. 北京: 中国声学学会检测声学分会, 中国岩石力学与工程学会测试专业委员会, 1990.
- Li Z D, Zhao Y J, Wei Y N. Experimental study on ultrasonic attenuation in dry and saturated rocks under biaxial compression [C]//New Progress of Academic and Information Exchange Meeting Special Report and Paper Abstract Compilation. Beijing: Scientific Society of Acoustic Detection of Chinese Society of Acoustics, Testing Committee of Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, 1990.
- [21] 吴刚, 刘松, 陈虎传, 等. 水对岩石超声性能影响的试验研究 [C]//第十届全国岩石力学与工程学术大会, 2008年10月15日, 威海, 中国. 中国电力出版社, 2008.
- Wu G, Liu S, Chen H C, et al. Testing study on influence of water on ultrasonic properties of rocks[C]//Proceedings of the 10th National Rock Mechanics and Engineering Academic Conference. Beijing: China Electric Power Publishing House, 2008.
- [22] 王大兴, 辛可锋, 李幼铭, 等. 地层条件下砂岩含水饱和度对波速及衰减影响的实验研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 908-914.
- Wang D X, Xin K F, Li Y M, et al. An experimental study of influence of water saturation on velocity and attenuation in sandstone under stratum conditions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(3): 908-914.
- [23] 于超云. 水对岩石力学性质影响的试验及数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019: 87-92.
- Yu C Y. Experimental study and numerical simulation on the effect of water on rock mechanical properties[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 87-92.
- [24] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1625-1631.
- Deng H F, Yuan X F, Li J L, et al. Experimental research on influence of saturation degree on sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1625-1631.
- [25] 卜靖. 不同含水率红砂岩单轴受压状态下超声波参数变化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016: 42-55.
- Bu J. Study on the variation of ultrasonic parameters of red sandstone with different water content under uniaxial compression[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016: 42-55.

Ultrasonic Detection of Water Content in Rock Mass Based on FBG-FPI Optical Fiber Sensor

Kang Wanwan^{1,2}, Shao Zhihua^{1,2*}, Zhou Kuangyu^{1,2}, Qiao Xueguang^{1,2}

¹School of Physics, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China;

²Shaanxi Provincial Engineering Technology Research Center of Oil-Gas Resource Detection with Optical Fiber, Xi'an 710065, Shaanxi, China

Abstract

Objective Rocks have both mechanical and acoustic properties, and there exist inherent relations among them. The characteristics of ultrasonic waves (UWs) change when passing through rocks, and the UWs carry the structural information of rocks. Thus, the interior properties of rocks can be obtained by analyzing the received UWs. Nowadays, the hydraulic properties of rocks have become a new focus in the engineering field. For example, in oil and gas exploration, the water content affects the density and strength of reservoir rocks. The analysis results of the reservoir structure are directly affected by the varied amplitude and velocity of exploration waves. In rock engineering, such as solution mining, long-distance tunnels, and reservoir bank slopes, the pore water affects the stability of rocks and even threatens the safety of engineering projects. Therefore, it is significant to study the ultrasonic propagation characteristics of rocks during water

absorption and softening.

At present, a common method to detect the water content is to employ the piezoelectric transducer (PZT). However, the PZT has some inherent drawbacks, such as large size, narrow bandwidth, and low resistance to electromagnetic disturbance, which decreases the detection resolution and brings large deviations. Optical fiber sensors feature compact size, high sensitivity, broadband response, and sound resistance to electromagnetic interference. The most commonly employed optical fiber sensors in ultrasonic detection are Fabry-Perot interferometer (FPI) and fiber Bragg grating (FBG). The FPI sensors usually suffer from the low-reflection reflectors and the FBG encounter difficulties when utilized with high-frequency UWs. Fortunately, the optical fiber FPI constructed with two FBGs combines the advantages of both FPI and FBG and becomes the preferred solution in ultrasonic rock water content detection.

Methods We propose a new ultrasonic method based on an FBG-FPI optical fiber sensor for water-content detection in rocks. In experiments, red sandstone is employed as the detecting object (cylinder, 80 mm×100 mm). The 1 MHz longitudinal pulsed wave emitted by PZT is adopted as the ultrasonic source. The transmitted UWs are detected by a pair of fiber gratings inscribed into a thin core fiber (TCF). The UWs velocity can be calculated by measuring the transmission distance and flight time inside the rock. The method of fast Fourier transform (FFT) is leveraged to convert time-domain signals into frequency-domain ones. For the frequency-domain results, the main frequency and the normalized amplitude are extracted respectively. By employing the fitted curve between the measured UWs velocity and the rock water variation, the water content is reconstructed, and an average detection deviation is obtained simultaneously. Additionally, the results measured by PZT are also recorded for comparison in identical conditions.

Results and Discussions The experiment results show that in the longitudinal wave conditions, the wave velocity of the red sandstone first decreases and then increases with the rising water content, while the main frequency and corresponding amplitude both decrease with the increasing water content. When the water content increases from 0 to 0.16%, the wave velocity measured by the optical fiber sensor (or PZT) decreases from 3440.86 m/s (or 3691.74 m/s) to 3389.83 m/s (or 3681.55 m/s). When the water content rises from 0.16% to 2.33%, the wave velocity measured by the optical fiber sensor (or PZT) increases from 3389.83 m/s (or 3681.55 m/s) to 4020.10 m/s (or 3980.10 m/s) (Fig. 5). When the water content increases from 0 to 2.33%, the main frequency measured by the optical fiber sensor (or PZT) decreases from 1.000 MHz (or 0.987 MHz) to 0.933 MHz (or 0.887 MHz), and the normalized amplitude reduces from 1.000 (or 1.000) to 0.058 (or 0.040) (Fig. 6). The optical fiber sensor and PZT are found to exhibit the similar response tendency with the changing water content. After water content reconstruction, an average absolute deviation between the optical fiber sensor (or PZT) measurement results and the actual values is approximately 0.055 (or 0.069) (Fig. 7). It is shown that the deviation of the FBG-FPI optical fiber sensor is smaller, which proves the optical fiber ultrasonic detection feasibility of rock water.

Conclusions A new optical fiber method is proposed for the ultrasonic detection of water content in rock mass. The time-domain and frequency-domain results are obtained using an FBG-FPI optical fiber sensor by ultrasonic transmission method. In the comparative experiments, the FBG-FPI optical fiber sensor presents a similar response tendency to PZT with increasing water content. Additionally, the FBG-FPI optical fiber sensor has a smaller detection deviation than that of PZT. Furthermore, laser ultrasound can be employed as a broadband source to replace piezoelectric excitation and helps to improve the detection resolution with the broadband response of optical fiber sensors.

Key words fiber optics; red sandstone; water content; ultrasonic wave; optical fiber detection