

光纤布拉格光栅在冰声学性能测量中的应用

马科夫·阿列克谢¹ 郭 耀² 常天英^{2,3*} 李 刚¹ 贾成艳² 刘 野² 崔洪亮^{2,3}

古尔巴诺娃·娜塔莉亚¹ 达拉拉伊·帕维尔¹

¹吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130012

²吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130012

³山东省科学院自动化研究所, 山东 济南 250100

摘要 以光纤布拉格光栅检测动态应变为基础,分析了匹配型光纤布拉格光栅波长移动解调方案的基本原理。利用匹配光栅法检测的高灵敏度及光纤光栅传感器本身的优点,将其与超声波检测相结合,创新性地用于研究超声波在冰样中的传播速度随温度的变化关系,通过光纤布拉格光栅检测冰样中纵波、横波传播速度与温度的关系,利用 Matlab 对数据进行拟合及计算,得到了冰样的声学参数随温度变化的规律:温度越低,超声波在冰样中的传播速度越高。并将所测数据与超声波系统所测数据进行对比,结果表明,光纤布拉格光栅所测数据正确可靠,证明了光纤布拉格光栅可用于检测冰的声学性能。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 声学性能; 超声波检测; 冰

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1106001

Application of Fiber Bragg Gratings in the Measurements of Acoustic Properties of Ice

Markov Alexey¹ Guo Yao² Chang Tianying^{2,3} Li Gang¹ Jia Chengyan²

Liu Ye² HongLiang Cui^{2,3} Gurbanova Natalia¹ Talalay Pavel¹

¹College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

²College of Instrumentation Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

³Shandong Academy of Sciences Institute of Automation, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract Based on dynamic strain detection with fiber Bragg gratings, the basic principles of wavelength shift demodulation using matching fiber Bragg gratings are analyzed. The high sensitivity of matching grating demodulation and the advantage of fiber Bragg gratings, which are combined with ultrasonic testing, are innovatively used for studying dependence of the propagation of ultrasonic waves on temperature in the ice. By using the fiber Bragg grating, the relationship between the velocity velocities of the longitudinal wave and shear wave, and temperature of the ice samples are detected. Using Matlab for data processing, the relationship of acoustic parameters with temperature in the ice is obtained, which shows that both the longitudinal wave and the shear wave have an increasing trend with the decrease of temperature. The measured data are also compared with ones measured by ultrasonic system, which demonstrates the accuracy and reliability of the data obtained with the fiber Bragg gratings. Therefore, the present technique can be used to conveniently and proficiently study the acoustic properties of ice.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; acoustic performance; ultrasonic testing; ice

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 060.3735

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(41376185)、国家科技支撑计划项目(2012BAK04B03)、公益性行业科研专项经费项目(201311041)、海洋公益性行业科研专项经费项目(201405026-01)

作者简介: 马科夫·阿列克谢(1963-),男,博士,教授,主要从事地球勘探与南极冰盖方面的研究。E-mail: am100@inbox.ru

*通信联系人。E-mail: tchang@jlu.edu.cn

1 引 言

自然界冰和冻土层的广泛分布对人类的经济活动具有极大的影响。多年冻土带的总面积占到了陆地总面积的 25%。在俄罗斯、加拿大、美国阿拉斯加州和蒙古其比例分别达到 65%、50%、80% 和 25%。在南极、格陵兰、斯堪的纳维亚和中国的一些地区终年冻土带也分布较多^[1]。季节冻土更为广泛分布,它的厚度一般不超过 2 m,但是会给道路和地下交通的建设和使用带来很多问题。利用声波,尤其是通过记录纵波、横波传播速度来分析地球物理方面的参数国内外很早就开始使用了,一般仅用于地层、岩石的物性研究,早期的研究有王思敬等^[2]1974 年发表的《声波技术在工程岩体测试中的初步应用》、姚秀云等^[3]1989 年发表的《纵、横波速度与其它物性参数关系》等。现代的研究应用更加广泛,在无损伤探伤领域已有人用光纤布拉格光栅(FBG)检测超声波的方法进行材料探伤的研究^[4-6],近些年针对 FBG 用于探测微弱振动信号也有许多研究^[7-10]。

目前广泛采用基于磁伸缩及压电原理的各种加速记录器记录声学信号,但是这些传感器外形较大,并且敏感度不够,在海域和南极实地进行实验的所需条件无法保证。另外,通过 FBG 记录声波穿过冰时的传播参数,这在国内外尚未见报道。本文采用 FBG 来测量这些力学参数,FBG 是性能优良的敏感元件,它通过 Bragg 反射波长的移动来感应外界微小应力变化,不仅具有光纤的小巧柔软、抗干扰能力强、集传感与传输于一体、易于制作以及埋入材料内部的优点,而且具有对结构的应力、应变进行高精度的准分布式数字测量的优点^[11-13]。由于本系统最终是用于极地地区深处取出的冰样的测量,并要达到三维测量的目的,因此,设计了 8 个通道来准确测量。利用现有的实验条件,采用低温试验箱模拟了近似极地温度下本系统的实验情况,由于人造冰样尺寸限制,本次研究只用了 2 个通道来记录冰样的一维声学参数。

2 实验原理

实验采用的是单模均匀光纤光栅,其原理如图 1 所示。FBG 像一个窄带光反射滤波器,反射一种波长并传输所有其他波长。Bragg 反射条件由如下布拉格方程决定:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 λ_B 为 FBG 的中心波长, Λ 为光栅周期, n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率^[14]。

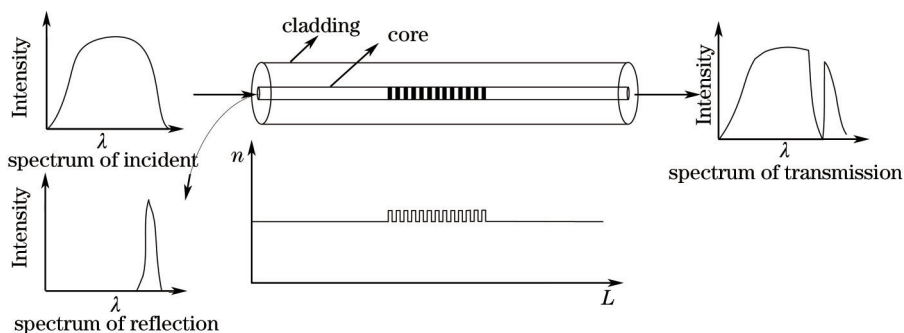


图 1 FBG 原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of FBG

采用 8 通道光纤光栅声学透视仪测试冰样参数,实验原理如图 2 所示。实验采用匹配光栅的解调方式:探测 FBG 和匹配 FBG 光谱的重叠部分面积与它们的中心波长间隔呈对应关系。FBG 的反射谱型一般可用高斯曲线表示,即探测 FBG 和匹配 FBG 的反射谱分布分别为^[15]

$$S(\lambda) = \gamma_{0s} + S_0 \exp\left[-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_s)^2 / \Delta\lambda_s^2\right], \quad (2)$$

$$F(\lambda) = \gamma_0 + F_0 \exp\left[-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_f)^2 / \Delta\lambda_f^2\right], \quad (3)$$

式中 γ_{0s} 和 γ_0 为背景反射, $\Delta\lambda_s$ 和 $\Delta\lambda_f$ 分别为探测 FBG 和匹配 FBG 的 3 dB 带宽, S_0 和 F_0 分别为探测 FBG 和匹配 FBG 的峰值反射率, λ_s 和 λ_f 分别为探测 FBG 和匹配 FBG 的中心波长。由于宽带光源的谱宽远远大于 FBG 的反射谱宽,所以可在 FBG 的反射谱宽内将光源入射光强视为恒定。传感的 FBG 反射光强可以表示为 $I_0 \cdot S(\lambda)$, 其中 I_0 为布拉格中心波长处的宽带光源入射光强。如果由宽带光源进入系统的光功率为 P_0 (单位为 mW), 宽带光源 (ASE) 的 3 dB 带宽为 $\Delta\lambda_0$, 由文献[16]可知:

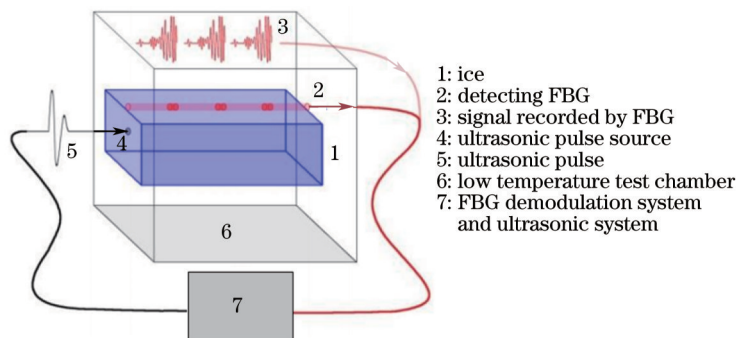


图 2 FBG 系统测试冰样力学参数结构图

Fig.2 Structure diagram for FBG system testing mechanical parameters of the ice

$$I_0 = P_0 \left(\frac{4 \ln 2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} / \Delta \lambda_0, \quad (4)$$

$$\frac{P(\lambda_s)}{\beta} = I_0 F(\lambda) * S(\lambda) d\lambda = I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} F(\tau) \cdot S(\lambda_s - \tau) d\tau = I_0 \left\{ 2a y_0 y_{0s} + y_0 F_0 \frac{\Delta \lambda_F^2}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} + y_0 S_0 \frac{\Delta \lambda_s^2}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} + S_0 F_0 \frac{\Delta \lambda_F \Delta \lambda_s}{\sqrt{\Delta \lambda_F^2 + \Delta \lambda_s^2}} \sqrt{\frac{\pi}{4 \ln 2}} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_s - \lambda_F)^2}{\Delta \lambda_F^2 + \Delta \lambda_s^2} \right] \right\}, \quad (5)$$

式中 β 为考虑光源输出功率、光路损耗的系数,系统确定时 β 为常数;前3项为直流分量,可以通过低通滤波器滤掉;最后1项是随 λ_s 变化而变化的交流分量。当匹配FBG的中心波长 λ_F 保持不变,系统光电二极管(PD)测到的 $P(\lambda_s)$ 与 λ_s 的关系是非线性的。这里选择的探测FBG和匹配FBG的3dB带宽一样,即 $\Delta \lambda_s = \Delta \lambda_F = \Delta \lambda$,光电二极管测到的数据经低通滤波后可简化为

$$\frac{P(\lambda_s)}{\beta} = \frac{S_0 F_0 P_0 \Delta \lambda}{\sqrt{2} \Delta \lambda_0} \exp \left[-2 \ln 2 \frac{(\lambda_s - \lambda_F)^2}{\Delta \lambda^2} \right]. \quad (6)$$

由(6)式可知,反射式匹配光栅法中光电探测器接收到的光功率 $P(\lambda_s)$ 是传感FBG布拉格波长 λ_s 相对于匹配FBG布拉格波长 λ_F 偏移量的函数。由于 λ_F 在系统调节匹配后不再改变,所以,(6)式反映了光电二极管接收的光功率 $P(\lambda_s)$ 与传感FBG的布拉格波长 λ_s 的函数关系。

用Matlab数值仿真该系统中光电二极管接收的光功率 $P(\lambda_s)$ 与传感FBG的布拉格波长 λ_s 的函数关系。仿真所用参数如下: $S_0 = F_0 = 0.95$, $\Delta \lambda = 0.28$ nm, $P_0 = 10$ mW, $\Delta \lambda_0 = 40$ nm, 波长差 $(\lambda_s - \lambda_F)^2$ 取0~1 nm, 匹配光栅中心波长为1549.8 nm,探测光栅中心波长为1550 nm,仿真结果如图3所示。图3(a)为探测FBG和匹配FBG光谱,其中重叠面积为光电二极管接收到的光功率。由图3(b)可知,波长差在0.1~0.3 nm处时接收功率与波长差近似为线性关系,因此调节匹配光栅时将匹配光栅与探测光栅之间的波长差调到0.2 nm,此时探测FBG受到超声波作用并使反射波长左右移动时,光电二极管接收到的光功率与波长长度变化值呈线性关

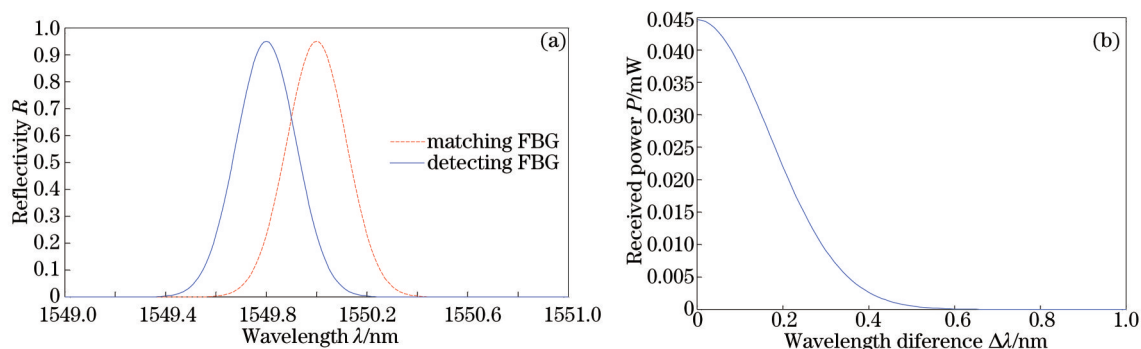


图 3 匹配光栅法仿真图。(a) 探测 FBG 和匹配 FBG 光谱;(b) 光电二极管接收功率随探测 FBG 和匹配 FBG 之间波长差变化

Fig.3 Simulation of matching grating method. (a) Spectra of detecting and matching FBGs; (b) variation of optical power received by photodiode and wavelength difference between detecting and matching FBGs

系。另外考虑到超声波在固体内引起的微应变为几微应变到十几微应变,由此引起光栅反射波长变化为几皮米到几十皮米,由超声波引起的光栅波长变化范围落在检测的线性区域内,同时由图3(b)也可看出本系统的探测灵敏度很高(斜率大),满足检测要求。

下面分析FBG反射谱与所受应力之间的关系。均匀光栅沿光栅轴向 z 的有效折射率调制表示为^[17]

$$n_{\text{eff}}(z) = n_{\text{eff}0} - \Delta n \sin^2\left(\frac{\pi}{\Lambda_0} z\right), z \in [0, L], \quad (7)$$

式中 $n_{\text{eff}0}$ 为FBG未受扰动时的有效反射折射率, Δn 为折射率改变的最大值, Λ_0 为光栅周期。

假设沿光栅轴向存在一个随时间正弦变化的纵向应变(由超声波纵波产生),该应变场可由表示为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_u} z - \omega_s t\right), \quad (8)$$

式中 ε_m 是波数为 $2\pi/\lambda_s$ 超声波的归一化振幅偏移量, ω_s 是其角频率, λ_u 是其波长, t 是传播时间。

当超声波作用在光栅上时,其有效折射率率的分布不能再用 $n_{\text{eff}}(z)$ 来描述,这里用 $n'_{\text{eff}}(z')$ 来描述。一个是力学的作用,由于光栅形变造成的,称为几何效应;另一个是由于弹光效应造成的有效折射率改变,由力学作用下光栅 z 轴方向的坐标 z' 表示为

$$z' = f(z, t) = z + \int_0^z \varepsilon(\xi) d\xi = z + \varepsilon_m \frac{\lambda_s}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_s} z - \omega_s t\right) + \varepsilon_m \frac{\lambda_s}{2\pi} \sin(\omega_s t), z \in [0, L]. \quad (9)$$

(9)式是由(8)式和应变分布的关系导出的, L 表示光栅长度。反向表示该方程为 $z = f^{-1}(z', t)$,结合(7)式,得到仅由力学作用导致的反射率分布为

$$n'_{\text{eff}}(z', t) = n_{\text{eff}0} - \Delta n \sin^2\left[\frac{\pi}{\Lambda_0} f^{-1}(z', t)\right]. \quad (10)$$

为得到整体的反射率变化,考虑到弹光效应,(9)式右端需要加入第3个限制。由于弹光效应导致的折射率变化为

$$\Delta n'(z', t) = -\left(\frac{n_{\text{eff}0}^3}{2}\right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \varepsilon_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_s} z' - \omega_s t\right), \quad (11)$$

式中 P_{ij} 是光致系数, ν 是泊松系数,二氧化硅对应的参数为: $P_{11}=0.12, P_{12}=0.275, \nu=0.17$ 。将(11)式代入(10)式,则

$$n'_{\text{eff}}(z', t) = n_{\text{eff}0} - \Delta n \sin^2\left[\frac{\pi}{\Lambda_0} f^{-1}(z', t)\right] - \left(\frac{n_{\text{eff}0}^3}{2}\right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \varepsilon_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_s} z' - \omega_s t\right). \quad (12)$$

对于 $\lambda_s/L \gg 1$, (12)式可化简为

$$n'_{\text{eff}}(z', t) = n_{\text{eff}0} - \Delta n \sin^2\left\{\frac{\pi}{\Lambda_0 [1 + \varepsilon_m \cos(\omega_s t)]} z'\right\} - \left(\frac{n_{\text{eff}0}^3}{2}\right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \varepsilon_m \cos(\omega_s t). \quad (13)$$

(13)式也可写为

$$n'_{\text{eff}}(z', t) = n'_{\text{eff}0}(t) - \Delta n \sin^2\left[\frac{\pi}{\Lambda'_0(t)} z'\right], \quad (14)$$

式中

$$n'_{\text{eff}0}(t) = n_{\text{eff}0} - \left(\frac{n_{\text{eff}0}^3}{2}\right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \varepsilon_m \cos(\omega_s t), \quad (15)$$

$$\Lambda'_0(t) = \Lambda_0 [1 + \varepsilon_m \cos(\omega_s t)]. \quad (16)$$

新的FBG波长为

$$\lambda_B(t) = \lambda_{B0} + \Delta\lambda_0 \cos(\omega_s t), \quad (17)$$

式中 $\Delta\lambda_0$ 是超声波作用在光栅上导致的波长变化幅值,表示为

$$\Delta\lambda_0 = \lambda_{B0} \varepsilon_m \left\{1 - \left(\frac{n_{\text{eff}0}^2}{2}\right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]\right\}. \quad (18)$$

由(13)式可知对于 $\lambda_s/L \gg 1$ 的情况,FBG 波长变化同静态变化一样。

当 FBG 受横向均匀作用力时,有 2 种特殊情况:1)平面应变[FBG 两端固定,可认为 FBG 的轴向应变 $\varepsilon_z = 0$, 轴向应力 $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$];2)平面应力(FBG 两端为自由端,则 $\sigma_z = 0$)^[18]。

一般的横向应变情况介于平面应变和平面应力之间,可表示为

$$\sigma_z = uv(\sigma_x + \sigma_y), \quad (19)$$

式中 u 为修正系数, $0 \leq u \leq 1$ 。显然,当 $u=0$ 时,为平面应力情况;当 $u=1$ 时,为平面应变情况。

FBG 受到横向均匀分布力时,导致介质波导和折射率的变化从而产生双折射效应,原来的谐振峰在中间产生凹陷,形成 2 个谐振峰,随着载荷的不断增大,劈开的 2 个峰也不断移开^[19-20],由此导致传感光栅和匹配光栅的重叠面积发生变化,引起光电二极管接收的光强变化,从而由此检测到横波波速。

8 路光栅对解调系统的光路图,如图 4 所示。当宽带光源发出的光经过环形器 1 入射到探测光栅 FBG1,FBG2,⋯,FBG8 中去时,FBG1,FBG2,⋯,FBG8 分别将中心波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_8$ 的窄带光谱范围内的光反射回来,反射回来的窄带光再经过匹配光栅 FBG1',FBG2',⋯,FBG8',此时,FBG1',FBG2',⋯,FBG8' 的作用相当于滤波器,分别使中心波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_8$ 窄带光与匹配光栅中心波长为 $\lambda'_1, \lambda'_2, \dots, \lambda'_8$ 窄带光反射区重叠部分的光反射到光电探测器 PD1,PD2,⋯,PD8,声波发生器在冰的一端输入超声波信号时,声波振动信号先后传达 FBG8,FBG7,⋯,FBG1,引起它们反射回来的光谱的中心波长变化,PD1,PD2,⋯,PD8 则先后检测到被 FBG1,FBG2,⋯,FBG8 反射回来的发生变化的窄带光谱信号。经过数据采集和处理,计算出声波振动先后引起 FBG1,FBG2,⋯,FBG8 反射光信号变化的时间差 Δt ,加上预先测量好的探测光栅间距 S ,再通过公式 $V = S/\Delta t$ 得到相应温度下所测超声波在冰样中的传播速度。

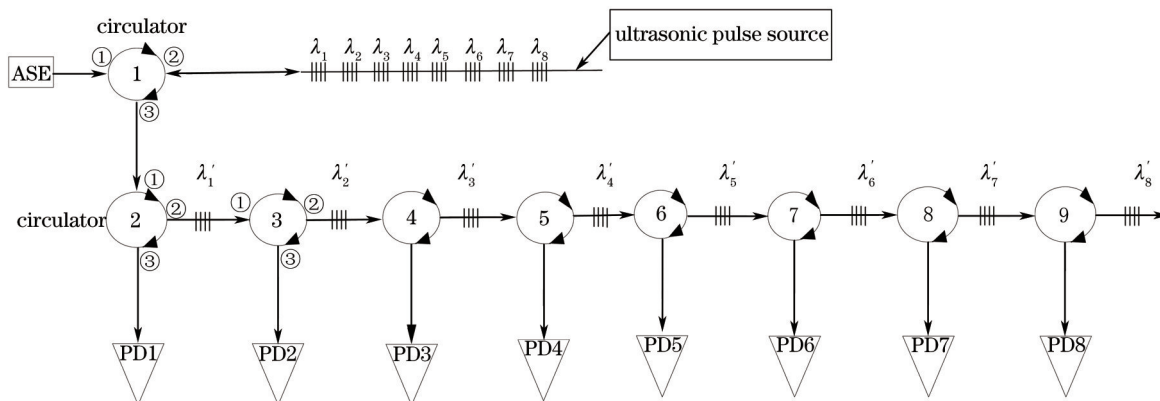


图 4 8 路光栅对解调系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of demodulation system for 8 matching gratings

但是由于地球上的冰处在不同的环境中,现在没有确定声波在冰中的传播速度,而是一个范围值^[21],根据研究,纵波在冰中波速约为 3600~4000 m/s,横波波速为 1500~2000 m/s,这里采用的是山东科学院自动化研究所提供的人造冰样。

3 实验装置

实验装置由超声波发生器 RITEC RAM-5000、8 通道匹配光栅探测主机(实验中只用了其中 2 个通道)、高低温试验箱和高速虚拟示波器及待测冰样组成。

冰样的制备:首先制作了一定大小的长方体冰样,并在其上表面通过注射器以滴 0℃ 水滴的方式将加有适当预应力的 FBG 固定在其上表面[由于冰样事先在低温箱内放置了一段时间,温度很低(约 -20℃),水滴滴在上面几乎是瞬间变成冰,因此将水滴作为粘合剂把 FBG 固定在冰样上],固定后将冰样放回低温试验箱继续冷却,然后隔一段时间打开低温箱往冰面上加适量水(不宜过多,否则冰样会因此产生裂隙),如此反复直至 FBG 上表面覆盖上与基底冰样同样厚度的冰,完成冰样(21 cm×10 cm×10 cm)制备。最后的效果如图 5 所示。图 6 分别展示了整个系统机箱的结构图、实物图,以及实际的冰样,机箱内的 PD 是通过 Sub-Miniature-A 接口(SMA)与示波器相连的。

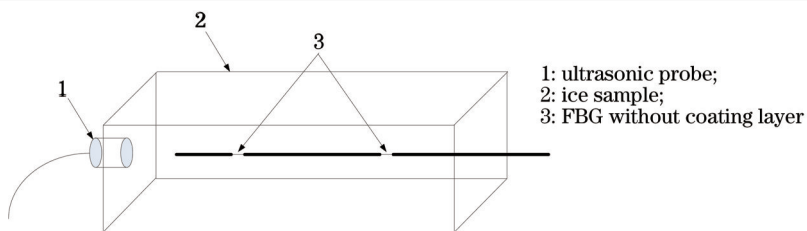


图 5 光纤光栅在冰样中放置示意图

Fig.5 Schematic diagram for FBG placed in the ice sample

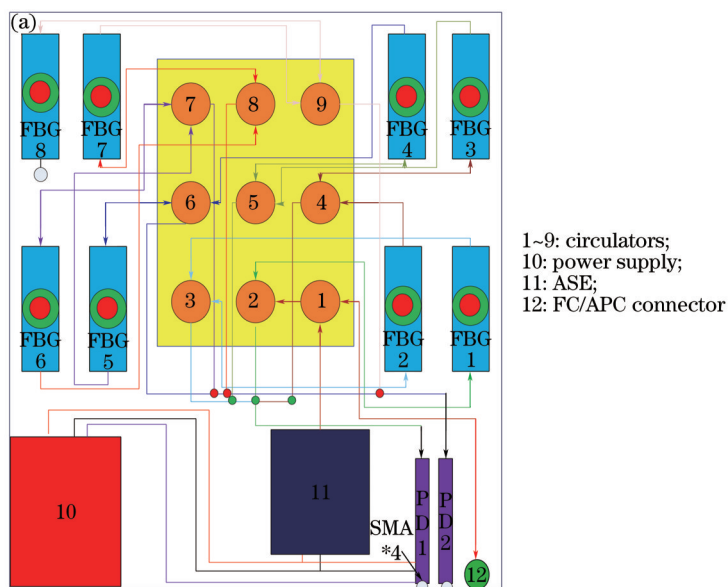


图 6 8 通道匹配光栅主机。(a) 结构图; (b) 实物图; (c) FBG 冻于冰样中

Fig.6 8-channel matching grating hosts. (a) Structure diagrams; (b) physical map; (c) FBG frozen in the ice samples

实验主要分为以下 3 步: 1) 将探测光纤光栅冻在冰样内部, 精确每个探测光栅间及光栅与声发射探头的直线距离, 并记录, 通过法兰盘将待测光纤光栅与仪器主机相连, 主机输出端与 8 通道虚拟示波器相连。2) 开启主机以及示波器, 查看示波器显示屏上信号的显示状况, 由于温度、应变的关系影响到探测 FBG 光栅的中心波长漂移, 使得其与标称值出现误差, 因此需要通过调节微调螺杆来改变匹配光光栅的中心波长, 使得对应的两光栅中心波长间隔 0.2 nm, 此时信号灵敏度最强, 结束调节, 完成准备工作。3) 通过声波发生器在待测物一端产生振幅、频率一定的声波信号, 在示波器显示屏上观察记录信号图像, 导出数据资料, 重复多次实验, 分析数据, 得到每个光栅之间信号出现的时间, 通过代入公式计算, 得出数据结果及结论。

4 实验结果与分析

纵波和横波的产生是分别通过超声波发生器接超声波纵波直探头和横波直探头的方式单独产生,2种探头产生的都是1 MHz主频的超声波信号,由超声波系统先发一个电脉冲触发,隔10 μs后由探头产生对应频率超声波,测量脉冲信号与测到的超声波信号之间的时间差 t ,再根据事先测量的间距 S ,求得对应温度下超声波波速 V 。

图7是FBG系统中第2路在-14.3℃时分别接收到的超声波纵波及横波信号。波形成分很多的原因是由于超声波在冰内传播路径不同,存在一些经过界面反射后达到探测FBG的超声波,这给实验结果带来了一定的误差。

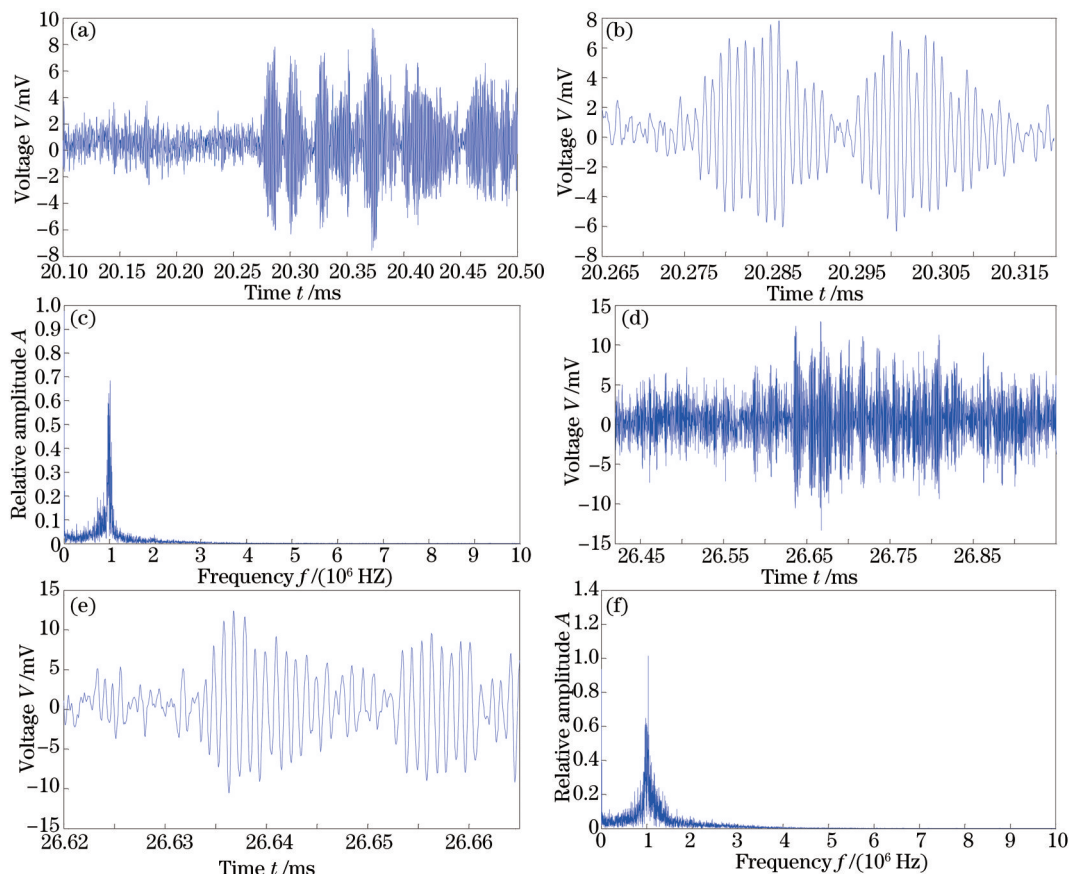


图7 FBG系统测得的1 MHz超声波纵波及横波信号。(a)纵波信号时域图;(b)纵波信号局部细节图;(c)纵波信号傅里叶变换频谱图;(d)横波信号时域图;(e)横波信号局部细节图;(f)横波信号傅里叶变换频谱图

Fig.7 1 MHz ultrasonic longitudinal wave and shear wave signal measured by FBG system. (a) Longitudinal wave signal in time domain; (b) detail view of longitudinal wave signal; (c) Fourier transform frequency spectrum of longitudinal wave signal; (d) shear wave signal in time domain; (e) detail view of shear wave signal; (f) Fourier transform frequency spectrum of shear wave signal

图7(b)[图7(e)]是图7(a)[图7(d)]信号进行局部放大后的细节图,信号展现了非常好的1 MHz频率特征。图7(c)[图7(f)]是图7(a)[图7(d)]信号作傅里叶变换后的频谱图,由图7(c)[图7(f)]可见,信号的主频是1 MHz,可见本系统确可精确测到对应频率的超声波信号。

图8是利用光谱仪对冻在冰样内部光栅波长随温度变化的测量曲线,由图中曲线可知FBG随冰样温度每升高1℃,波长约增加61~64 pm(空气中约为13 pm/℃),该波长变化是由冰样温度、FBG冻在冰样内时受冰样体积随温度变化导致的应变累加的效果,而系统现有的悬臂梁解调装置经测量能大约调节600 pm,由此限制本系统温度测量范围大约在10℃。

$$\Delta\lambda = \Delta T \frac{d\lambda}{dT} + \Delta\mu \frac{d\lambda}{d\mu}, \quad (20)$$

式中 $\Delta\lambda$ 表示冻在冰样内FBG波长的变化, ΔT 表示FBG温度的变化, $\Delta\mu$ 表示冰样体积随温度变化引起光栅应变的变化, $d\lambda/dT$ 可取13 pm/℃,对于中心波长为1550 nm左右的光栅, $d\lambda/d\mu$ 取1.2 pm/μ ϵ ,由图8中

的拟合直线,经推算得到约为 $40 \mu\epsilon$, 即 FBG 在冰内随冰样温度每上升 1°C , 其所受微应变增加约 $40 \mu\epsilon$ 。

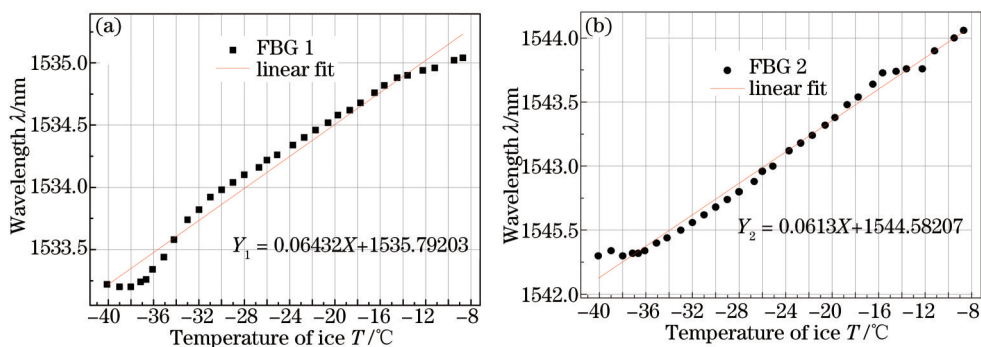


图 8 FBG 波长随冰样温度的变化。(a) FBG1; (b) FBG2

Fig.8 Wavelength of FBG versus temperature of ice. (a) FBG1; (b) FBG2

通过调节高低温试验箱温度多次测量不同温度下超声波纵波和横波的传播速度后,采用 Matlab 进行曲线的二次拟合,所得到的结果如图 9 所示。

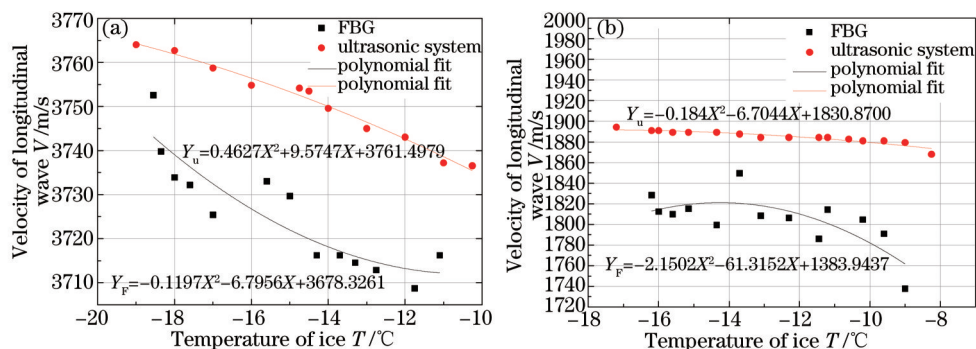


图 9 超声波波速随冰样温度的变化。(a) 纵波波速; (b) 横波波速

Fig.9 Velocity of ultrasonic wave versus temperature of ice. (a) Longitudinal wave; (b) shear wave

得到二次拟合曲线之后,可见纵波和横波在冰样中的传播速度随温度的降低而升高,形成该趋势的原因是随温度降低,冰样的弹性模量升高,例如剪切模量在温度为 $-10^\circ\text{C} \sim -30^\circ\text{C}$ 时, 约由 $3.0 \times 10^9 \text{ Pa}$ 升至 $3.4 \times 10^9 \text{ Pa}$, 且随温度的逐渐降低,弹性模量的增加幅度变缓^[21]。在 0°C , 一个标准大气压下淡水冰的密度约为 $916.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 虽然随着温度的降低,冰的密度会有所升高,其幅度约为每降 10°C 大约增加 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[23], 但其增加的相对幅度远远小于冰样剪切模量增加的相对幅值, 因此整体上表现的趋势就是随着温度的降低, 声波在冰样中的传播速度升高: 初始状态下波速增加较快, 几乎为线性上升, 而随着温度继续下降, 波速增加的幅度逐渐变缓, 波速趋于稳定。由超声波系统所得纵波的传播速度在 $3795 \sim 3736 \text{ m/s}$ 区间变化, 横波在 $1904 \sim 1881 \text{ m/s}$ 区间内变化; 由 FBG 系统所得纵波的传播速度在 $3753 \sim 3708 \text{ m/s}$ 区间变化, 横波在 $1845 \sim 1740 \text{ m/s}$ 区间内变化, 两者相比较而言, 所测波速随温度变化趋势是一致的, 但 FBG 所测波速小于超声波系统所测波速, 所测纵波波速相比超声波系统所测波速误差大约为 0.7% , 而横波波速误差大约为 4.3% , 造成该误差的主要原因是裸光栅灵敏度很高, 加上冰样体积小, 导致超声波在传播过程中容易发生反射, 从而 FBG 接收到的含高噪声水平的超声波信号致使判断信号起振点延后, 这现象在横波波速测量中表现比较明显, 因为横波探头发出的横波在界面会产生发射, 导致纵波出现, 而纵波波速高于横波波速, FBG 会先感受到纵波带来的扰动, 加上 FBG 横向应力灵敏度相对较低, 因此测量横波时噪声水平会比较高, 带来的测量误差由此升高, 另外 FBG 之间的距离测量也带了一定误差, 实验所用栅间距是采用栅区两侧厂家标记所用的蓝墨水点作为参考点来测量的。在误差允许的范围, FBG 系统较为准确地测量到了超声波纵波、横波在冰样中的传播速度, 下一步需要对所提出的误差来源进行消除, 提高 FBG 测量精度, 此外拟采用“一组探测光栅, 多组解调光栅”的方式来增加 FBG 系统的可测温度范围。

5 结 论

本文搭建了匹配光栅法测冰样中超声波的实验系统, 阐述了匹配光栅法测量超声波信号的原理和测量

步骤,证明匹配光栅法能够较准确测得超声波信号,测量了不同温度下FBG测得的超声波纵波和横波在冰样中的传播速度,并将所测结果与基于压电原理的超声波系统的测量结果进行了对比。结果表明,FBG系统所测的超声波纵波和横波在冰样中的传播速度随温度上升而下降,所测纵波波速误差较小,而横波波速误差相对较大,由此充分验证了本实验结果在误差允许范围内的正确性和可靠性。本系统采用的光纤探测器体积小,灵敏度高,抗电磁干扰性强,采用匹配光栅解调方式方便在大范围温度变化环境下实现温度补偿,使得系统可探测的温度范围大,因此适用于极其恶劣环境地区,例如极地地区,本文的研究有助于FBG匹配光栅法在测量冰样声学性质中的应用。

致谢 感谢山东省科学院自动化所超宽带与太赫兹实验室提供的超声波探测系统,感谢崔洪亮教授对论文提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- 1 Dolgushin L D, Osipova G B. *Glaciers*[M]. Moscow: Thought, 1989: 419-420.
- 2 Wang Sijing, Tang Darong, Yang Zhifa, *et al.*. The application of ultrasonic technology in engineering preliminary test of rock[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1974, (3): 269-282.
王思敬, 唐大荣, 杨志法, 等. 声波技术在工程岩体测试中的初步应用[J]. *地质科学*, 1974, (3): 269-282.
- 3 Yao Xiuyun, Zhao Debin, Zhao Hongru. The relationship between velocity of longitudinal and shear wave and other physical parameters [J]. *Progress in Geophysics*, 1989, (2): 7-20.
姚秀云, 赵德斌, 赵鸿儒. 纵、横波速度与其它物性参数关系[J]. *地球物理学进展*, 1989, (2): 7-20.
- 4 Perez I, Cui H L, Udd E. Acoustic emission detection using fiber Bragg gratings[C]. *SPIE*, 2001, 4328: 209-215.
- 5 Hiroshi Tsuda, Kenji Kumakura, Shinji Ogihara. Ultrasonic sensitivity of strain-insensitive fiber Bragg grating sensors and evaluation of ultrasound-induced strain[J]. *Sensors*, 2010, 10(12): 11248-11258.
- 6 Meng Lijun. *Theory and Application of Detection Technology Based on Ultrasonic Excitation and Fiber Bragg Gratings Sensing*[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013: 43-101.
孟丽君. 超声激励-光纤光栅传感检测技术的相关理论与应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013: 43-101.
- 7 Zhao Peng, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, *et al.*. Fiber optical acoustic vibration sensor for the monitoring of water sublimator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106003.
赵 鹏, 刘铁根, 江俊峰, 等. 用于水升华器监测的光纤声振动传感器研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106003.
- 8 Zhang Guihua, Chai Jing, Li Xujuan, *et al.*. Research on strain transfer of surface fiber grating sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 010601.
张桂花, 柴 敬, 李旭娟, 等. 晶片式光纤光栅应变传感器的应变传递研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 010601.
- 9 Yang Mu, Liu Xiuhong, Liu Wei, *et al.*. Applied research of optical fiber sensor in oil and gas pipe corrosion monitoring[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 020604.
杨 牧, 刘秀红, 刘 伟, 等. 光纤光栅传感网络在油气出地管内腐蚀监测的应用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 020604.
- 10 Tian Shizhu, Zhang Guoqing, Wang Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 27(8): 0805005
田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. *中国激光*, 2014, 27(8): 0805005.
- 11 Liang Lei, Luo Pei, Zhou Xuefang, *et al.*. Application of fiber Bragg grating sensing technology in strain mode detection[J]. *Journal of Henan University of Science & Technology(Natural Science)*, 2003, 24(3): 54-57.
梁 磊, 罗 裴, 周雪芳, 等. 光纤 Bragg 光栅传感技术用于应变模态检测[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(3): 54-57.
- 12 Fomitchov P A, Krishnaswamy S. Fiber Bragg grating ultrasound sensor for process monitoring and NDE applications[J]. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluations*, 2002, 615(1): 937-944.
- 13 Fomitchov P A, Krishnaswamy S. Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(4): 956-963.
- 14 Wu Min. *Fiber Fence Alarm System Based on Long-Distance and Quasi-Distributed FBG Sensors*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007: 16-17.
吴 敏. 基于长距离准分布式FBG传感器的光纤围栏报警系统[D]. 重庆: 重庆大学, 2007: 16-17.
- 15 Zhang Jian. *Research on FBG Wavelength Demodulation Technology for Dynamic Strain Measurement*[D]. Harbin: Harbin University

- of Science and Technology, 2007: 16–20.
- 张 剑. 用于动态应变测量的光纤布拉格光栅波长解调技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2007: 16–20.
- 16 Liu Yunqi, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun, *et al.*. Theoretical and experimental researches on tunable filtering detection technique of fiber grating sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(1): 88–92.
- 刘云启, 刘志国, 郭转运, 等. 光纤光栅传感器的调谐滤波检测技术[J]. *光学学报*, 2001, 21(1): 88–92.
- 17 Aldo Minardo, Andrea Cusano, Romeo Bernini, *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.
- 18 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Sun Lei, *et al.*. Study on transversal strain on fiber Bragg grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(12): 1508–1512.
- 涂勤昌, 张伟刚, 孙 磊, 等. 光纤布拉格光栅横向应变特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(12): 1508–1512.
- 19 Wu Fei, Li Lixin, Li Yaping, *et al.*. Study of fiber Bragg grating characterization by transverse force to a small grating section[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(11): 1270–1273.
- 吴 飞, 李立新, 李亚萍, 等. 光纤 Bragg 光栅横向局部受力特性的研究[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(11): 1270–1273.
- 20 Cai Lulu, Yin Wenwen, Wu Fei. Study of fiber Bragg grating characteristics under local transverse force[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(12): 7737–7746.
- 蔡璐璐, 尹闻闻, 吴 飞. 均匀光纤 Bragg 光栅局部横向受力特性研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(12): 7737–7746.
- 21 Cui Huayi. The method for measuring ice interface using non-linear acoustics[J]. *Ocean Technology*, 2005, 24(3): 58–60.
- 崔华义. 利用非线性声学测量冰厚的方法研究[J]. *海洋技术*, 2005, 24(3): 58–60.
- 22 Vojtkovsky K F. *The Mechanical Properties of Ice*[M]. Moscow: Publishing House Academy of Sciences of the USSR, 1960: 564.
- 23 Vojtkovsky K F. *Basics of Glaciology*[M]. Moscow: Publishing House Academy of Sciences of the USSR, 1999: 255.

栏目编辑: 王晓琰