

DOI: 10.11779/CJGE201912018

# 基于光纤光栅的冻土含冰量监测可行性试验研究

吴 冰<sup>1</sup>, 朱鸿鹄<sup>\*1, 2</sup>, 曹鼎峰<sup>3</sup>, 魏广庆<sup>4</sup>, 施 斌<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 519082; 4. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏 苏州 215123)

**摘要:** 含冰量是冻土研究的一项重要参数。针对现有含冰量测量的局限性, 提出了一种基于光纤布拉格光栅 (FBG) 的冻土含冰量监测方法。结合冻土温度场, 应用内加热 FBG 刚玉管传感器, 通过室内标定试验验证该方法的可行性; 基于传统导热系数模型推导出温度特征值与含冰量之间相应函数模型, 并应用试验数据进行验证。研究结果表明: 试验所得温度特征值随冻土含冰量增加而减小, 可以通过该规律初步判断含冰量范围; 在温度特性值与含冰量数值关系的拟合中, 指数函数模型与本次试验数据拟合度最高, 含冰量测量误差小于 2%, 在可接受范围内; 本方法实现冻土含冰量监测具有可行性。

**关键词:** 冻土; 含冰量; FBG; 函数模型

**中图分类号:** TU445      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2019)12-2323-08

**作者简介:** 吴 冰(1995—), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事地质工程方面的研究工作。E-mail: wb@mail.nju.edu.cn。

## Feasibility study on FBG-based monitoring method for ice content in frozen soil

WU Bing<sup>1</sup>, ZHU Hong-hu<sup>1, 2</sup>, CAO Ding-feng<sup>3</sup>, WEI Guang-qing<sup>4</sup>, SHI Bin<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Lanzhou 730000, China; 3. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 519082, China; 4. Nanzees Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou 215123, China)

**Abstract:** The ice content is an important parameter in frozen soil research. Aiming at the limitation of the existing ice content measurement, a method based on fiber Bragg grating (FBG) for monitoring the ice content in frozen soil is proposed. Based on the temperature field of frozen soil, a series of indoor calibration tests are performed using the FBG corundum tube sensor with internal heating. The corresponding function model between characteristic value of temperature and ice content is deduced and verified using the experimental data. The results show that the proposed method is feasible to monitor the ice content in frozen soil, the characteristic value of temperature decreases with the increase of ice content in frozen soil, and the approximate range of ice content can be preliminarily judged by this law. In the fitting of the function model, the exponential function model has the highest fitting degree with the experimental data, and the measurement error of ice content is less than 2% within the acceptable range.

**Key words:** frozen soil; ice content; FBG; function model

## 0 引言

冻土是一种由土颗粒、冰、未冻结的液态水和气体共同组成的四相共存体<sup>[1]</sup>。冻土中未冻水和冰之间的相互转化是导致冻土性质不稳定的重要因素之一<sup>[2-3]</sup>。在冻结和融化过程中, 起到胶结颗粒作用的冰的含量的增减会使得冻土结构稳定性和抗剪强度等发生相应的变化<sup>[4-5]</sup>。自 20 世纪 30 年代冻土力学研究开始以来, 国内外诸多研究团队展开了对冻土各项性质的研究, 其中关于含冰量的测定一直以来就广受关注。

目前, 冻土含冰量的主要测量方法有膨胀法、介

电谱法、核磁共振法 (NMR) 和传统热脉冲法等<sup>[6]</sup>。膨胀法利用张力计和毛细管测定土样冻结过程中由于体积膨胀引起的液态水渗出量, 由此计算冰的体积<sup>[7]</sup>。介电谱法通过测定冻土的介电常数来间接反映含冰量, 通常需要测量两个频率下的介电谱, 并结合一定的介电混合模型<sup>[8-9]</sup>实现测量。NMR 法利用无线电脉

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2018YFC1505104); 国家自然科学基金优秀青年基金项目 (41722209); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目 (SKLFSE201814)

**收稿日期:** 2019-02-26

**\*通讯作者** (E-mail: zhh@mail.nju.edu.cn)

冲测量土样中固态冰的氧原子量, 从而测出冻土中的含冰量<sup>[10]</sup>。传统热脉冲法则是通过热脉冲测定冻土的热导率, 再利用理论公式计算出含冰量<sup>[11]</sup>。

但是上述方法都有各自的局限性: 膨胀法局限于实验室环境下的饱和土含冰量测量, 容易破坏冻土原有结构<sup>[6]</sup>; 介电谱法快速高效, 但土的介电常数易受土质、温度、重度等物理因素的影响, 当冻土中孔隙水分布不均时测试误差较大<sup>[9]</sup>; NMR 法可快速、准确、无损测定未冻水含量<sup>[12]</sup>, 但设备庞大、价格昂贵、安装使用复杂, 难以在野外广泛使用<sup>[13]</sup>; 传统热脉冲法只适用于较低温度下的砂土测量<sup>[14]</sup>, 而且该方法属于点式测量, 测量数据不连续, 不能获得冻土含冰量的动态变化。随着中国冻土区基础设施建设的快速发展, 急需对沿线冻土地基含冰量进行高精度、分布式的测量, 在此基础上掌握冻土含冰量的时空变化规律。

本文以冻土温度场为基础, 设计一种基于光纤光栅 (FBG) 的冻土含冰量测试传感器, 并提出了一套含冰量测量方法。该方法考虑了传统冻土热响应模型, 通过测定温度特征值得到冻土的含冰量大小。本文通过一系列室内试验, 初步验证了该方法的可行性。

## 1 基本原理

### 1.1 FBG 测温原理

FBG 是一类成熟的光纤传感器, 已广泛应用于岩土体应变、位移和含水率等参量的监测中<sup>[15-17]</sup>。紫外激光通过相位掩膜板照射光纤纤芯, 被照射部位的折射率会沿光纤轴向发生周期性变化, 形成 FBG<sup>[18]</sup>。如图 1 所示, 当宽带光通过 FBG 时, 特定中心波长为  $\lambda_B$  的入射光无法透射, 该波长可表示为

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

式中,  $n_{\text{eff}}$  为光纤纤芯有效折射率,  $\Lambda$  为 FBG 周期。

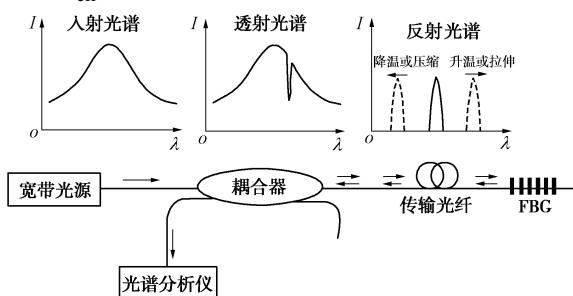


图 1 光纤布拉格光栅工作原理

Fig. 1 Working principle of FBG

$\lambda_B$  在外界温度和应变的影响下会发生相应的变化, 该关系式为

$$\frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \cdot \Delta\epsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中  $\delta\lambda_B$  为 FBG 中心波长变化量;  $\Delta\epsilon$  为光纤轴向应变;  $\Delta T$  为外界温度变化量;  $P_e$ ,  $\alpha$  和  $\xi$  分别为光

纤有效弹光系数、热膨胀系数和光纤光热系数<sup>[19-20]</sup>。

消除光纤轴向应变干扰后, 根据式(2)可知,  $\delta\lambda_B$  与  $\Delta T$  存在线性关系, 利用解调装置检测  $\delta\lambda_B$  的变化可以测出温度的变化, 即

$$\Delta T = \frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B \cdot (\alpha + \xi)} \quad (3)$$

### 1.2 冻土含冰量测量原理

借助主动加热法实现冻土含冰量的测量, 其基本原理是: 采用具有内加热功能的 FBG 刚玉管传感器, 对预埋在冻土中的传感器进行通电加热, 由传感器内部的 FBG 监测管体的温度变化过程; 冻土的热传导性能随含冰量的增加而增强, 在含冰量越高的部位, 传感器管体升温速率越慢; 根据相同加热时间内传感器的升温特征参数与含冰量之间的定量关系, 可以计算出冻土含冰量。

以下介绍基于 FBG 的冻土含冰量测量的推理过程:

冻土质量含冰量的定义为冻土中冰与冻土土颗粒的质量之比<sup>[2]</sup>, 即

$$w_i^m = \frac{m_i}{m_s} \times 100\% \quad , \quad (4)$$

式中,  $m_i$  和  $m_s$  分别为冻土中冰和土颗粒的质量。

Cao 等<sup>[21]</sup>、段超喆等<sup>[22]</sup>对温度特征值进行了定义, 在温度时程曲线稳定阶段取特征区间, 并对该时间区间内所记录温度数据进行平均处理得到  $\Delta T_t$ , 即

$$\Delta T_t = \frac{\sum_{i=1}^{i+n} T_i}{n} - T_0 \quad , \quad (5)$$

式中,  $T_0$  为测量初始温度。

假设待测冻土具有均匀性, FBG 刚玉管传感器位于初始温度一致的无限土层中。基于热传导过程中的傅里叶定律, 将冻土中的热量传递简化成一维问题(图 2), 根据欧姆定律和能量守恒, 通电加热一定时间内, 传感器管体单位面积的散失热量<sup>[23]</sup>:

$$Q = Q_1 - Q_2 = I^2 R t - c_m \Delta T_t \quad (6)$$

式中  $Q_1$  和  $Q_2$  分别为传感器产生总热量和管体升温所需热量;  $t$  为传感器通电加热时间;  $I$  为电流;  $R$  为电阻丝的电阻;  $c_m$  为传感器管体的比热容;  $\Delta T_t$  为传感器管体周围扩散热流密度恒定后管体的平均温度与通电加热前管体的温度差值, 即为温度特征值。

将作为热源的 FBG 刚玉管传感器看作是无限长线热源。无限长线热源模型将钻孔内外岩土体视为整体, 适用于长时间运行的小直径加热管<sup>[24]</sup>。假设管体稳态导热, 则加热后管体与周围冻土层交界面处温度为

$$T = \frac{q}{4\pi L \lambda} \ln t + \frac{q}{4\pi L \lambda} \left( \ln \frac{4\lambda}{r_w^2 c_s} - \gamma \right) + \frac{R' q}{L} + T_\infty \quad (7)$$

式中  $T$  为  $t$  时刻距管体与冻土层交界处温度;  $q$ ,  $L$  和  $r_w$  分别为管体换热量、长度和半径;  $\lambda$  和  $c_s$  分别为冻土导热系数和单位体积热容;  $R'$  为管体与钻孔壁面之间的热阻;  $T_\infty$  为距管体中心无穷远处冻土体温度(即地层初始温度);  $\gamma$  为欧拉常数, 取 0.577216。

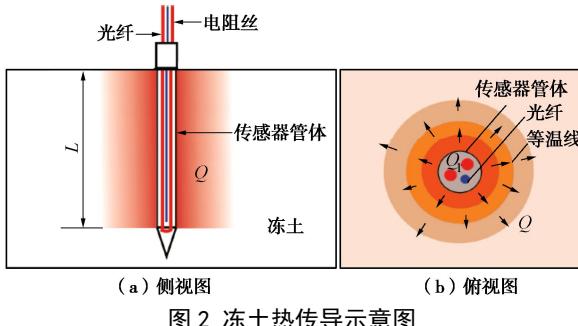


图 2 冻土热传导示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heat conduction in frozen soil

式(7)中  $\lambda$ ,  $c_s$ ,  $R'$  3 个热物性参数未知, 需通过估算法求解, 本研究选用了线性推导法<sup>[25]</sup>。由式(7)可知, 管体温度  $T$  与时间  $t$  的对数呈线性关系, 因此可将式(7)简化为线性方程:

$$T = k \ln t + m \quad (8)$$

式中,  $k$  和  $m$  为基于最小二乘法拟合得到的  $T-t$  关系直线的斜率和截距, 其表达式如下:

$$k = \frac{q}{4\pi L \lambda} \quad (9)$$

$$m = \frac{q}{4\pi L \lambda} \left( \ln \frac{4\lambda}{r_w^2 c_s} - \gamma \right) + \frac{R' q}{L} + T_\infty \quad (10)$$

对于含冰量一定的冻土, 当传感器管体周围扩散热流密度恒定时所需加热时间  $t$  为一定值,  $t$  时间内管体换热量  $q = Q$ , 结合温度响应的散热量  $Q$  可以得到冻土导热系数:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi L k} \quad (11)$$

冻土等效导热系数由土骨架、气体、未冻水和冰的导热系数组成<sup>[24]</sup>:

$$\lambda = f(\lambda_g, \lambda_w, \lambda_s, \lambda_i) \quad (12)$$

式中,  $\lambda_s$ ,  $\lambda_g$ ,  $\lambda_w$ ,  $\lambda_i$  为土骨架、气体、未冻水、冰的导热系数。

综合式(6)、(11)、(12), 可以得到管体温度特征值与含冰量之间具有函数关系:

$$\Delta T_t = f(w_i^m) \quad (13)$$

故通过式(13)确定的函数关系以及 FBG 实测管体温度可以求出冻土含冰量。

### 1.3 温度特征值 $\Delta T_t$ 与含冰量 $w_i^m$ 的关系

关于冻土导热系数与含冰量之间的数学关系, 国际上并没有形成统一的认识。土壤热导率模型研究领域的相关文献表明, 考虑到冻土区土壤受冻融循环以及冻土内部水热传输过程的复杂性影响较大, 现存的

冻土区导热系数计算模型适用性有限, 仍是一个需深入研究的课题<sup>[24]</sup>。本文从温度特征值出发, 通过试验建立其与含冰量之间的数学关系, 以避免求解导热系数时引起过大的误差。

若冻土处于完全冻结状态, 冻土中所有液态水均转化为固态冰, 且气体所占体积极小、导热系数小, 可影响忽略不计, 则完全冻结的冻土是只有土壤颗粒和冰共存的两相体系。因此, 根据 Zhu 等<sup>[26]</sup>的研究成果, 有

$$\theta_s + \theta_i = 1 \quad (14)$$

式中,  $\theta_s$  和  $\theta_i$  分别为土颗粒和冰的体积百分数。

根据前述关于含冰量  $w_i^m$  的定义,  $w_i^m$  和  $\theta_i$  关系可以表示为

$$\theta_i = \frac{\rho_d}{\rho_i} w_i^m = M \cdot w_i^m \quad (15)$$

式中,  $\rho_i$  为水的密度, 取值 0.9 g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_d$  为土壤干密度, 取值为 1.4~1.7 g/cm<sup>3</sup>, 两者均为常数, 可以令  $M = \frac{\rho_d}{\rho_i}$ 。

根据各组分纯物质的导热系数对于冻土的贡献形式不同, 冻土导热系数  $\lambda = f(\lambda_g, \lambda_w, \lambda_s, \lambda_i)$  主要有 3 种评价方法: 并联形式体积加权模型、串联形式体积加权模型、指数加权平均模型<sup>[26]</sup>。基于该 3 种已知模型, 可以推导出温度特征值  $\Delta T_t$  与含冰量  $w_i^m$  的 3 种函数模型。

#### (1) 并联函数模型

两相体系的简化并联形式体积加权模型<sup>[26]</sup>为

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\theta_s}{\lambda_s} + \frac{\theta_i}{\lambda_i} \quad (16)$$

综合式(14), (15), (16) 可得

$$\lambda = \frac{\lambda_s \lambda_i}{\lambda_i + (\lambda_s - \lambda_i) M w_i^m} \quad (17)$$

联立式(6), (11), (17), 可得

$$\Delta T_t = \frac{I^2 R t}{c_m} - \frac{4 k L \pi \lambda_s \lambda_i}{c_m \lambda_i + c_m M (\lambda_s - \lambda_i) w_i^m} \quad (18)$$

在相同测量条件下,  $I$ ,  $R$ ,  $c_m$ ,  $\lambda_s$ ,  $\lambda_i$ ,  $M$  均为常数, 式(18)可以简化为

$$\Delta T_t = a_1 - \frac{b_1}{c_1 + w_i^m} \quad (19)$$

式中,  $a_1 = \frac{I^2 R t}{c_m}$ ,  $b_1 = \frac{4 k L \pi \lambda_s \lambda_i}{c_m M (\lambda_s - \lambda_i)}$ ,  $c_1 = \frac{c_m \lambda_i}{c_m M (\lambda_s - \lambda_i)}$ 。

式(19)即为温度特征值  $\Delta T_t$  与含冰量  $w_i^m$  的并联函数模型。

#### (2) 串联函数模型

两相体系的简化串联形式体积加权模型<sup>[26]</sup>为

$$\lambda = \theta_s \lambda_s + \theta_i \lambda_i \quad (20)$$

综合式(14)、(15)、(20)可得

$$\lambda = \lambda_s + (\lambda_i - \lambda_s) M w_i^m \quad (21)$$

联立式(6)、(11)、(21), 可得

$$\Delta T_t = \frac{I^2 R t - 4kL\pi\lambda_s}{c_m} - \frac{4kL\pi M(\lambda_i - \lambda_s)}{c_m} M w_i^m \quad (22)$$

同理, 简化式(22)可以得到温度特征值  $\Delta T_t$  与含冰量  $w_i^m$  的串联函数模型:

$$\Delta T_t = a_2 + b_2 w_i^m \quad (23)$$

式中,  $a_2 = \frac{I^2 R t - 4kL\pi\lambda_s}{c_m}$ ,  $b_2 = -\frac{4kL\pi M(\lambda_i - \lambda_s)}{c_m}$ 。

### (3) 指数函数模型

两相体系的简化指数加权平均模型<sup>[26]</sup>为

$$\lambda = \lambda_s^{\theta_s} \cdot \lambda_i^{\theta_i} \quad (24)$$

综合式(14)、(15)、(24)可得

$$\lambda = \lambda_s \left( \frac{\lambda_i}{\lambda_s} \right)^{M w_i^m} \quad (25)$$

联立式(6)、(11)、(25), 可得

$$\Delta T_t = \frac{I^2 R t}{c_m} - \frac{4kL\pi\lambda_s}{c_m} \cdot \left( \frac{\lambda_i^M}{\lambda_s^M} \right)^{M w_i^m} \quad (26)$$

同理, 式(26)可以简化得到温度特征值  $\Delta T_t$  与含冰量  $w_i^m$  的指数函数模型:

$$\Delta T_t = a_3 - b_3 c_3^{M w_i^m} \quad (27)$$

式中,  $a_3 = \frac{I^2 R}{c_m}$ ,  $b_3 = \frac{4kL\pi\lambda_s}{c_m}$ ,  $c_3 = \frac{\lambda_i^M}{\lambda_s^M}$ 。

## 2 试验装置与方法

为了验证基于FBG的冻土含冰量监测方法的可行性, 并对其进行分析评价, 在室内开展了多组标定试验。

### 2.1 试验装置

试验所采用的土样为南京地区典型下蜀土, 将土样风干过2 mm筛以达到颗粒均匀性。利用筛分法得到土样的级配曲线见图3。土的基本物理参数: 液限  $w_L$  为38%, 塑限  $w_p$  为21%, 土粒相对密度  $G_s$  为2.76。

试验中控制土样干密度  $\rho_d = 1.63 \text{ g/cm}^3$ , 配置不同含水率土样并编号#1~#9, #1~#9土样分别对应含水率为7%, 9%, 11%, 13%, 15%, 17%, 19%, 21%, 23%。用直径61.8 mm, 高度40 mm的环刀将土样压制成体积相同的环刀土样。本次试验所采用的传感器为具有内加热功能的FBG刚玉管传感器<sup>[22]</sup>, 基本结构见图4。传感器由四孔刚玉管管体、电阻丝、光纤组成。刚玉管外径4 mm, 孔径1 mm, 有效加热及感测长度40 mm。光纤安置于刚玉管一孔内, 一端保持

松弛以消除外界应变对温度测量的影响; 光纤包括纤芯、包层、涂覆层, 其中纤芯和包层为光纤结构的主体, 对光波的传播起着关键性作用, 涂覆层主要用于隔离杂光。电阻丝呈回路穿过刚玉管的两孔, 阻值为28  $\Omega/\text{m}$ , 其作用主要是通过主动加热, 改变传感器周边冻土体的温度场。

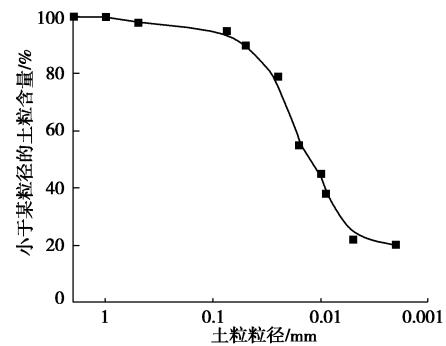


图3 土样颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve of test soil

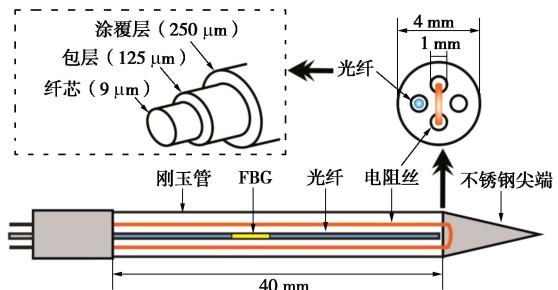


图4 冻土含冰量传感器结构示意图

Fig. 4 Illustration of structure of ice content sensor of frozen soil

将传感器埋置于#1~#9环刀土样中心轴线位置, 并连接直流电源和光纤解调设备(图5)。本试验中采用苏州南智传感科技有限公司生产的A-01型FBG解调仪采集传感器的中心波长数据。试验中传感器及土样放置于高低温箱中, 解调设备和电源位于室内常温中。

### 2.2 试验方法

试验过程分为两个阶段:

第一阶段, 控制高低温箱温度为-20℃, 电流为0.46 A, 对传感器通电加热5 min后关闭电源降温5 min, 解调仪以5 s的采样间隔记录10 min内光纤的波长信息。按照相同的方法每隔2 h通电加热并记录一次波长数据, 从而测得土样冷冻0, 2, 4, 6, 8 h的温度信息。

第二阶段, 保持室内常温状态, 按照第一阶段相同的方法加热, 记录10 min内光纤的波长信息; 控制温度为-20℃, 土样冷冻6.5 h至全部液态水冻结成固态冰并保持土样内部水热平衡, 按照第一阶段相同的方法记录波长数据。

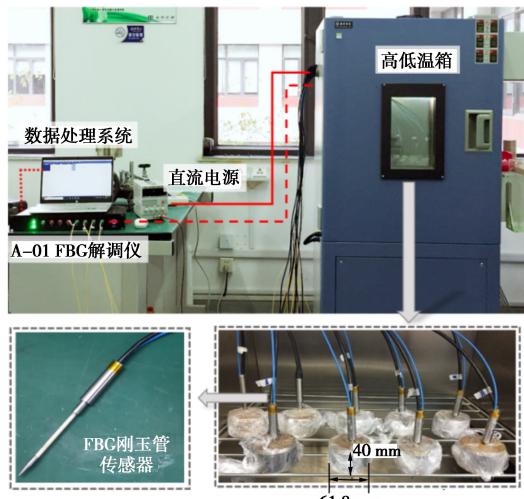


图 5 室内试验装置图

Fig. 5 Setup of experimental equipment in laboratory

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 温度增量时程曲线特征分析

由试验第一阶段 FBG 获得的监测数据可以得到不同土样中传感器管体的温度增量时程曲线。结果显示,在-20℃条件下冷冻不同时间后,所得温度增量时程曲线随含水率的变化趋势具有相同规律性,本文以冷冻4 h的土样监测数据(图6)为例进行阐述。

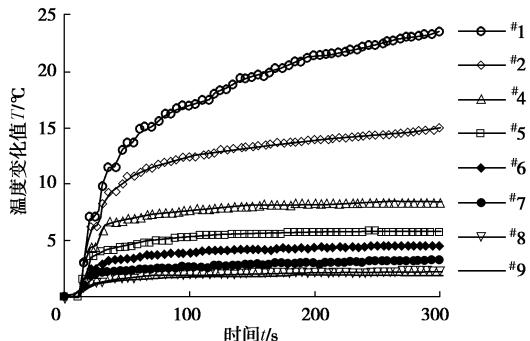


图 6 不同冻土土样温度增量时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of temperature increment of different frozen soil samples

从图6可以看出,在相同初始温度条件下, #1~#9 土样 (#3 土样由于扰动过大出现较大测量误差,故不作分析) 在加热后所得传感器管体温度增量时程曲线变化趋势具有高度相似性: 在加热最初阶段(0~30 s)温度增量时程曲线斜率较大,曲线呈近似线性增加趋势; 加热一段时间(约30 s)后,时程曲线斜率逐渐减小,升温逐渐缓慢并趋于稳定。这是由于加热前传感器管体与周围土体温度一致,加热最初阶段管体与土体之间没有热量传递,电阻丝的热量全部被管体所吸收,管体温度因此快速上升; 管体升温后与周围土体产生温差,部分热量由管体传递至土壤中,管体升温速率降低,时程曲线斜率减小; 当热量传递达到动态平衡,向外传递的热量与产热量持平,管体温度

趋于稳定,时程曲线因此趋于水平状态。

根据式(4)定义的含冰量,在相同的试验条件下, #1~#9 土样的含冰量随编号增大而依次增加,结合图6分析可以得到,冻土土样的最大温度增量随含冰量增加而减小。这是因为冻土中冰的导热系数相对较大,含冰量越高,冻土导热系数越高,在同一加热功率下,电阻丝产生的热量一定,刚玉管与周围环境的换热量越高,所以用于管体升温的热量越少,管体温度就越低。根据这个关系可以由温度增量时程曲线大致判断冻土含冰量的范围。

#### 3.2 温度特征值 $\Delta T_t$ 与冷冻时间 $t$ 的关系

根据式(5),温度特征值  $\Delta T_t$  为温度增量时程曲线稳定阶段的平均温度增量。本文对试验所得温度增量取30 s内  $\Delta T_t/30$  s最小值,认为该最小值所对应的30 s时间内温度达到稳定,取该30 s内的温度增量平均值为温度特征值  $\Delta T_t$ 。根据试验第一阶段监测数据可以得到不同土样的温度特征值  $\Delta T_t$  与冷冻时间  $t$  之间的关系,如图7所示。

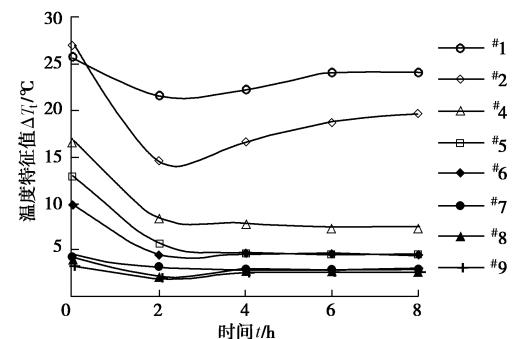


图 7 温度特征值与冷冻时间的关系曲线

Fig. 7 Relationship between characteristic temperature and freezing time

对于#4~#9 土样,在-20℃温度下冷冻0~4 h,温度特征值随冷冻时间增长而下降;冷冻4 h后,温度特征值趋于稳定。这反映了融土在负温下变成冻土的过程:0 h,土样处于融土状态(图8(a));0~4 h,土中水分发生了重分布,并由液态水变为固态冰(图8(b)),液态水以薄膜的形式包裹土壤颗粒,薄膜厚度随含冰量逐渐增大而减小<sup>[27]</sup>,由于单位质量液态水变为固态冰时,导热系数增大,故土壤导热系数随之发生了变化;4 h后,含冰量不随时间发生变化,表明土壤中的液态水此时已经全部冻结成固态冰(图8(c)),冻土中水热处于平衡状态。

对于#1, #2 土样,冷冻4 h后,温度特征值并没有趋于稳定状态,而是随冷冻时间有所上升。这可能是因为#1, #2 土样初始含水率很小,冷冻4 h后土样表现为局部冰胶结,大部分仍然是以未冻水和分子引力联结为主,土样始终处于图8(b)状态。由于土样冻结过程中属于非饱和封闭系统,无外来水源补给,未冻区水分向冻结区迁移,水分成冰作用造成冰水相

变界面的改变<sup>[28]</sup>，而冰水相界面的温度传导问题具有一定的复杂性，因此会造成低含水率土样的温度特征值不能趋于稳定的现状。

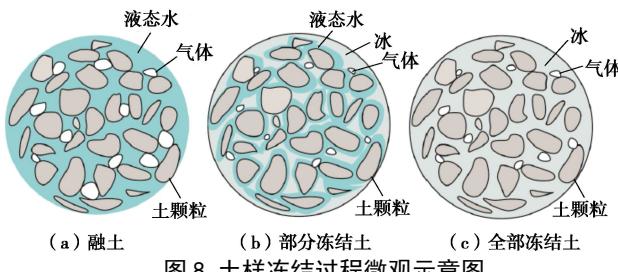


图 8 土样冻结过程微观示意图

Fig. 8 Microscopic sketch of soil freezing process

### 3.3 温度特征值 $\Delta T_t$ 与含冰量 $w_i^m$ 的关系

上述基于试验第一阶段的分析表明，在-20℃温度下冷冻 4 h 后，高含水率土样中所有液态水均转化为固态冰。故在试验第二阶段，可以将冷冻 6.5 h 的冻土土样看作是土壤颗粒和冰共存的两相体系，则<sup>#4~#9</sup> 土样的初始含水率分别对应其冻结后的含冰量。

基于式 (19), (23), (27) 所得并联函数模型、串联函数模型、指数函数模型，结合试验第二阶段监测数据和试验第一阶段冷冻 4 h 所测数据，运用最小二乘法可以得到含冰量与温度特征值之间的拟合关系曲线及函数关系式 (图 9)。图 9 中关系曲线表明，传感器所测管体温度特征值随含冰量增加而呈现明显减小趋势。

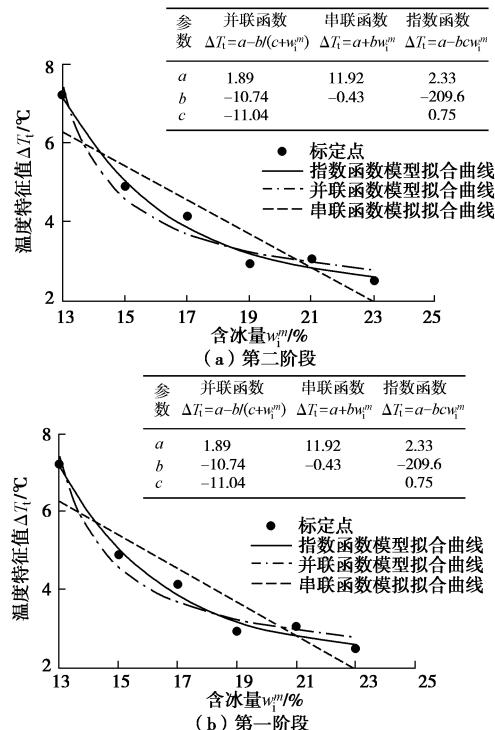


图 9  $\Delta T_t - w_i^m$  拟合曲线

Fig. 9 Fitted curves of  $\Delta T_t$  and  $w_i^m$

图 10 为试验数据与上述 3 种传统函数模型的拟合误差参数：均方根 RMSE、相关系数平方  $R^2$ 。对于第

二阶段数据，由图 10 可以看出，指数函数模型 RMSE 最低， $RMSE=0.199$ ； $R^2=0.974$ ，最接近 1，与本次试验所得数据拟合度较高，在可接受范围内；并联函数模型拟合度一般，误差相对较大；串联函数模型与本次试验数据偏差较大，拟合效果最差。

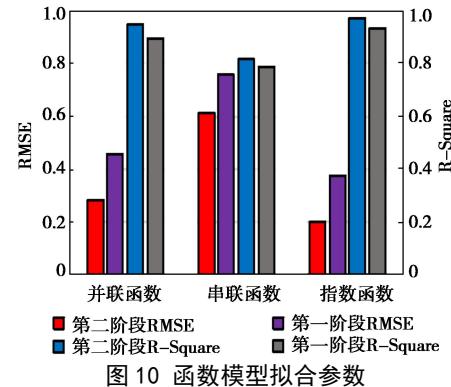


Fig. 10 Fitting parameters of function models

将第二阶段所得温度特征值代入拟合所得指数函数模型中，可以得到含冰量计算值。图 11 为含冰量计算值与烘干法所得含冰量基准值的比较分析，可以看出，含冰量计算值与基准值较为接近，最大误差均小于 2%，可以满足测量精度要求。

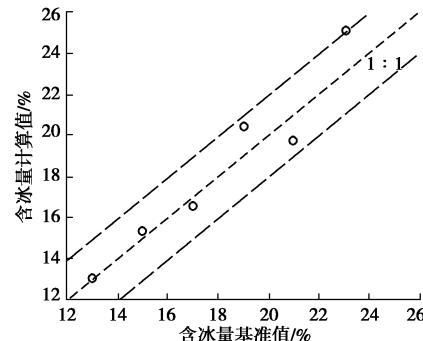


图 11 第二阶段误差分析

Fig. 11 Error analysis of phase II

此结论同样适用于第一阶段数据，相较于其他函数模型，指数函数与该阶段试验数据拟合度最高。然而，与第二阶段试验数据相比，第一阶段试验数据与指数函数模型拟合度低，其原因可能在于第一阶段试验过程中每 2 h 测量一次数据，重复加热造成的冻融循环会影响冻土结构，从而降低测量数据的准确性。因此，为使用本文所述方法准确测量冻土含冰量，应避免重复加热对冻土结构造成扰动。

### 3.4 不确定性分析

本文所提出的基于 FBG 的冻土含冰量测量方法，其本质是对传统热脉冲法测含冰量的一种改进和创新，通过内加热的方式增大冻土与传感器之间的温差，并将光纤传感技术应用于冻土温度场以动态敏锐地感知冻土温度场的温度变化值。通过室内试验和上述分析表明，该方法可以较好地反映出冻土含冰量的变化

趋势, 并在定量确定含冰量方面具有很大可行性。

然而考虑到冻土对于温度的敏感性, 该方法能够精确有效使用的前提是: 在较低的环境温度(远低于冻土近相变区温度)下, 控制加热功率和时间, 不考虑加热对冻土温度场及水分场的影响。

若测量环境温度较高, 冻土中存在大量未冻水, 式(14)不成立; 若温度位于近相变区附近, 加热引起冰水剧烈相变, 冻土成分随之变化, 导热系数不是定值, 式(8)不成立; 上述两种情况下该测量方法都不适用。

若加热功率过大或加热时间过长, 在过高的温度下, 冻土中存在大量冰水相变, 土样中的固态冰会部分甚至全部融化为液态水, 由图8(c)的冻结状态转变为图8(b)或(a)状态, 测量误差过大; 若加热功率过小或加热时间过短, 传感器管体与冻土土样间温度差值过小, 热传导不能顺利有效进行, 也会造成测量不准确。换言之, 如何控制加热功率和加热时间, 有效降低加热对冻土原有结构的影响, 精确测得冻土含冰量, 需对加热引起的含冰量的变化进行定量分析, 并明确传感器加热过程中的影响半径, 保证在能够实现含冰量有效测量的基础上减小测量对于冻土结构的影响, 实现测量结果的最优化。

本次试验环境温度为-20℃, 控制加热电流为0.46 A, 加热时间为5 min, 试验结果显示出较好地规律性, 表明该加热功率和加热时间具有一定的合理性。对于该试验条件是否最优化、加热对含冰量的影响大小, 仍需要进一步研究。

## 4 结 论

本文以冻土热响应模型为基础, 应用主动加热技术, 提出了一种基于准分布式光纤光栅(FBG)的冻土含冰量测试方法, 据此设计了一套含冰量测量传感器, 并通过一系列室内标定试验探讨了温度特征值与含冰量之间的关系, 在传统冻土导热系数计算模型的基础上推导出两者之间的函数模型, 得到以下3点结论。

(1) 不同冻土土样在相同试验条件下加热, 传感器管体温度增量时程曲线的变化趋势具有高度相似性, 所得温度特征值随含冰量增加而减小, 可根据这一经验关系初步判断含冰量范围。

(2) 在-20℃温度下冷冻4 h后, 高初始含水率土样(大于9%)中液态水全部冻结为固态冰, 土体处于水热平衡状态; 低含水率土样(小于9%)不符合此规律。

(3) 相较于并联函数模型和线性函数模型, 指数函数模型的拟合度最高, 含冰量计算值误差小于2%, 可以满足含冰量测量精度要求, 此方法具有可行性。

本文仅证明了基于FBG的冻土含冰量监测方法具有可行性, 但这一方法在现场推广应用前还有很多工作要做, 其中包括: ①室内标定试验中需要使用精确的含冰量信息是该方法有效应用的基础; ②关于该方法的重复性和适用性, 还需要大量的室内和室外原位试验的验证; ③含冰量与热响应之间的函数模型是否适用于其他类型冻土和试验条件, 加热对于含冰量的影响程度, 都需要进一步理论探讨和试验研究。

## 参 考 文 献:

- [1] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 21-29. (XU Xue-zu, DENG You-sheng. Experimental research on water transport in frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 1991: 21-29. (in Chinese))
- [2] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010: 102-103. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of frozen soil[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010: 102-103. (in Chinese))
- [3] 霍托维奇H A. 冻土力学[M]. 张长庆, 等译. 北京: 科学出版社, 1985. (ЧЫЛТОВИЧ Н А. Frozen soil mechanics[M]. ZHANG Chang-qing, et al trans. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese))
- [4] FABBRI A, FEN-CHONG T, COUSSY O. Dielectric capacity, liquid water content, and pore structure of thawing-freezing materials[J]. Cold Regions Science & Technology, 2006, 44(1): 52-66.
- [5] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 37-44. (ZHOU You-wu, GUO Dong-xin, QIU Guo-qing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 37-44. (in Chinese))
- [6] 程 强. 冻土冰/水含量同腔共射原位测定方法创新与冻融模型检验[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. (CHENG Qiang. A Co-Tube-Radiation method of in-situ determination of ice and liquid water content in frozen soil and freeze-thaw model validation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese))
- [7] PATTERSON D E. The measurement of unfrozen water content by time domain reflectometry results from laboratory tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(1): 131-144.
- [8] BITTELLI M, FLURY M, CAMPBELL G S. A thermodielectric analyzer to measure the freezing and moisture characteristic of porous media[J]. Water Resources Research, 2003, 39(2): 1041.
- [9] 王丽萍, 刘 霞, 边海明, 等. 用于估算冻土中液态水分量的 TDR 数据校正[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(1): 208-214. (WANG Li-ping, LIU Xia, BIAN

Hai-ming, et al. Calibration of TDR data for moisture estimation in frozen soil[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2011, **32**(1): 208 – 214. (in Chinese))

[10] TICE A R. Determination of unfrozen water in frozen soil by pulsed nuclear magnetic resonance[C]// *Proceedings of 3rd International Conference on Permafrost*. Ottawa, 1978: 149 – 155.

[11] LIU G, SI B C. Soil ice content measurement using a heat pulse probe method[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, **91**(2): 235 – 246.

[12] WATANABE K, WAKE T. Measurement of unfrozen water content and relative permittivity of frozen unsaturated soil using NMR and TDR[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2009, **59**(1): 34 – 41.

[13] 谭 龙, 韦昌富, 田慧会, 等. 冻土未冻水含量的低场核磁共振试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(6): 1566 – 1572. (TAN Long, WEI Chang-fu, TIAN Hui-hui, et al. Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(6): 1566 – 1572. (in Chinese))

[14] BAKER J. Water relations of frozen soil[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2004, **45**(2): 466 – 72.

[15] ZHU Hong-hu, SHI Bin, ZHANG Cheng-cheng. FBG-based monitoring of geohazards: current status and trends[J]. *Sensors*, 2017, **17**(3): 452.

[16] 徐东升. 一种新型光纤光栅局部位移计在小应变测量中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(7): 1330 – 1335. (XU Dong-sheng. New fiber Bragg grating sensor-based local displacement transducer for small strain measurements of soil specimens[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(7): 1330 – 1335. (in Chinese))

[17] 范成凯, 孙艳坤, 李 琦, 等. 页岩单轴压缩破坏试验的光纤布拉格光栅测试技术研究[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(8): 2456 – 2464. (FAN Cheng-kai, SUN Yan-kun, LI Qi, et al. Testing technology of fiber Bragg grating in the shale damage experiments under uniaxial compression conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(8): 2456 – 2464. (in Chinese))

[18] 李焕强, 孙红月, 刘永莉, 等. 光纤传感技术在边坡模型试验中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(8): 1703 – 1708. (LI Huan-qiang, SUN Hong-yue, LIU Yong-li, et al. Application of optical fiber sensing technology to slope model test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(8): 1703 – 1708. (in Chinese))

[19] XU Dong-sheng. A new measurement approach for small deformations of soil specimens using fiber bragg grating sensors[J]. *Sensors*, 2017, **17**(5): 1061.

[20] 朱鸿鹄, 殷建华, 张 林, 等. 大坝模型试验的光纤传感变形监测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(6): 1188 – 1188. (ZHU Hong-hu, YIN Jian-hua, ZHANG Lin, et al. Deformation monitoring of dam model test by optical fiber sensors[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(6): 1188 – 1188. (in Chinese))

[21] CAO Ding-feng, SHI Bin, ZHU Hong-hu, et al. A distributed measurement method for in-situ soil moisture content by using carbon-fiber heated cable[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, **7**(6): 700 – 707.

[22] 段超喆, 施 斌, 曹鼎峰, 等. 一种准分布式内加热刚玉管 FBG 渗流速率监测方法[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, **38**(3): 504 – 510. (DUAN Chao-zhe, SHI Bin, CAO Ding-feng, et al. A quasi-distributed internal heating seepage velocity monitoring method of FBG embedded in alundum tube[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, **38**(3): 504 – 510. (in Chinese))

[23] 曹鼎峰, 施 斌, 严珺凡, 等. 基于 C-DTS 的土壤含水率分布式测定方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(5): 910 – 915. (CAO Ding-feng, SHI Bin, YAN Jun-fan, et al. Distributed method for measuring moisture content of soils based on C-DTS[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(5): 910 – 915. (in Chinese))

[24] 何瑞霞, 金会军, 赵淑萍, 等. 冻土导热系数研究现状及进展[J]. *冰川冻土*, 2018, **40**(1): 116 – 126. (HE Rui-xia, JIN Hui-jun, ZHAO Shu-ping, et al. Review of status and progress of the study in thermal conductivity of frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, **40**(1): 116 – 126. (in Chinese))

[25] 胡田飞. 冻土热物性参数的确定方法及热响应测试研究进展[J]. *路基工程*, 2015(5): 7-11. (HU Tian-fei. Research progress on determination methods of thermal physical parameters and thermal response test of frozen soil[J]. *Subgrade Engineering*, 2015(5): 7 – 11. (in Chinese))

[26] ZHU M. Modeling and simulation of frost heave in frost-susceptible soils[D]. Michigan: University of Michigan, 2006.

[27] 陈飞熊, 李 宁, 程国栋. 饱和正冻土多孔多相介质的理论构架[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(2): 213 – 217. (CHEN Fei-xiong, LI Ning, CHENG Guo-dong. The theoretical frame of multi-phase porous medium for the freezing soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(2): 213 – 217. (in Chinese))

[28] 韩天一. 正冻土水热力耦合的数值机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008. (HAN Tian-yi. Numerical research on the coupled mechanism of the moisture-heat-stress fields in freezing soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. (in Chinese))