

柴敬,刘奇,张丁丁,等. 基于光纤系统的物理相似模型温度分布与演化特征[J]. 煤炭学报,2017,42(5):1146-1155. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1705

Chai Jing, Liu Qi, Zhang Dingding, et al. Temperature distribution and its evolution characteristics of physical similarity model by optical fiber sensing system[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1146-1155. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1705

基于光纤系统的物理相似模型温度分布与演化特征

柴敬^{1,2}, 刘奇¹, 张丁丁^{1,2}, 宋军¹, 李毅^{1,2}, 袁强¹

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 教育部西部矿井开采与灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:为减小水分因素引起的模型试验相似误差,提出了用温度特征确定模型干燥过程的干燥时间(判断模型试验开挖)的方法。建立了光纤传感测温系统,提出克里金空间插值法的估值公式计算模型温度,给出物理模型的温度变异函数表达式。开展了3.0 m×1.2 m×0.2 m二维模型和3.6 m×2.0 m×2.0 m三维模型温度监测试验,监测时间分别超过65,310 d,绘制出模型温度分布云图,探讨了模型干燥(试验开挖)的判断方法。研究表明,模型干燥存在水化放热和液-气相态转变的不同过程,模型温度场演化具有明显的阶段特征,最大温差分别为3.0,4.8℃。干燥后期呈现出竖直方向上高下低的温度梯度,水平方向大致相同的特征,其中低温核区下移并消失是判断模型干燥完成的标志,可作为试验开挖的判断指标。二维模型干燥时间为47 d左右,三维模型干燥时间为213 d左右。

关键词:相似物理模型;干燥过程;光纤测温系统;克里金;温度场

中图分类号:TD326 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2017)05-1146-10

Temperature distribution and its evolution characteristics of physical similarity model by optical fiber sensing system

CHAI Jing^{1,2}, LIU Qi¹, ZHANG Ding-ding^{1,2}, SONG Jun¹, LI Yi^{1,2}, YUAN Qiang¹

(1. College of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to reduce errors that are caused by moisture content changing during physical model simulation tests, a method is proposed for determining the model's drying process time using temperature-distribution characteristics. A fiber optic temperature-sensing system is used to measure temperature distributions within the physical model. A Kriging space interpolation formula is presented to calculate temperature values between the measured temperature locations and a function expressing the variation of temperatures in the physical model is given. Temperature monitoring experiments of model drying process were carried out in a two-dimensional model with the size of 3.0 m×1.2 m×0.2 m and a three-dimensional model with the size of 3.6 m×2.0 m×2.0 m, and the monitoring time were each beyond 65 days and 310 days. Subsequently, the temperature distribution map of model drying was drawn and the distinguishing method of model drying completing was analyzed. The results of these tests show that the drying process in the physical model consists of hydration heat release and liquid-gas phase state change, and found a maximum temperature difference of 3.0℃ and 4.8℃ for the two-dimensional and three-dimensional models, respectively. In the later stage of the drying process, the vertical temperature gradient presents a high and low form model's up to down, and the hori-

收稿日期:2016-12-01 修回日期:2017-03-22 责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41027002);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20126121110003)

作者简介:柴敬(1964—),男,宁夏平罗人,教授,博士生导师,博士。Tel:029-85583059, E-mail:chaij@xust.edu.cn

zontal direction is approximately the same form model's right to left. The nucleus of the low temperature zone moved downward and then disappeared signaling the completion of the drying process, and thus can be used as the judgment of a model excavation experiment. The drying time of two-dimensional model is about 47 days in the winter season, and the drying time of the three-dimensional model is about 213 days in the spring and summer seasons.

Key words: similar physical model; drying process; optical fiber temperature measuring system; Kriging; temperature field

相似物理模型试验是矿业工程、岩土工程和实验岩石力学中重要的研究手段^[1]。为提高物理模型试验的准确度,增强模型试验在不同工况下的适用性,许多学者从相似材料配比、模型装置和测试手段等方面对其进行了研究^[2-4]。模型试验的基础是相似理论,模型湿度变化将引起模型材料强度变化,导致模型与原型力学条件的相似误差^[5]。而多孔介质(模型材料)中的水分运移(湿度变化)决定了自身的温度场分布,通过温度场的时空分布能反演其水分分布特征^[6]。模型试验养护时间判定的准确性将直接影响到模型试验结果的准确性,但是目前主要依靠观察或经验推测来判定模型是否养护结束。模型的养护干燥过程也必然伴随着温度变化,温度特征可以反映模型的干燥状态。有些学者研究了模型温度变化规律并用于指导现场工程问题。张庆松将光纤传感方法用于监测内置水体的物理模型温度变化,研究采场上覆岩层中含水构造的岩体温度判别方法^[7]。陈智强通过红外热像技术研究模型试验中岩层破断前后的温度变化特征,揭示深埋隧道变形破坏规律和岩爆灾变过程^[8]。模型的温度变化规律除受特殊因素外还受自身干燥的影响,研究模型干燥过程中的温度变化规律可用于确定模型试验的养护时间和消除由于干燥引起的温度误差。

温度测量方法有多种,其中光纤温度测量具有实时监测、长距离、耐腐蚀、传感传输一体化等优点。随着光纤传感技术的发展,越来越多的光纤光栅和分布式光纤传感技术应用于物理模型试验^[9-11]。光纤测温技术还应用在渗漏监测和含水率测量等领域,用以监测坝体、土壤等多孔介质的温度场,研究其渗流(水分分布)规律。谷艳昌通过分布式光纤传感连续监测土坝模型的温度场,建立了土坝模型温度场反馈渗流场的数学模型^[12]。施斌提出碳纤维加热方法用于提高分布式光纤测温技术的敏感性,实现了渗流速率的分布式监测^[13]。董海洲在渗漏定位方面利用光纤测温方法,采用热量平衡理论建立了集中渗漏通道流速计算模型^[14]。John S. Selker对加热式测温光纤进行研究,提出了原位异构土壤含水率的光纤测量方法^[15]。把光纤测温方法引入到物理模型试验中,

研究模型在干燥过程中的温度变化规律,利用克里金法对温度监测曲线进行插值,得到温度场分布特征,确定养护时间,提高模型试验的准确度,研究模型温度场变化规律有现实必要性。

本文提出了模型干燥过程的温度场监测方法,开展了干燥过程温度场监测的物理模型试验,通过对模型养护干燥全过程的实时监测,得到了模型的温度场分布特征,利用该特征划分模型干燥的3个阶段,分析了模型开挖之前和试验过程中干燥的主要因素,得到了一种新的模型干燥完成的判断指标。

1 温度监测系统

1.1 拉曼型 DTS 系统组成及测温原理

拉曼型 DTS 测温系统是利用拉曼散射效应和光时域反射技术测定温度和距离的一种方法。光脉冲进入光纤会产生一束斯托克斯光(Stokes)和一束反斯托克斯光(Anti-Stokes),这种散射被称为拉曼散射。根据拉曼散射理论,在自发拉曼散射条件下,忽略斯托克斯光与反斯托克斯光在光纤中传播时损耗系数的差异,可得

$$R(T) = I_{as}/I_s = \left(\frac{v_{as}}{v_s}\right)^4 \exp(-hc\Delta v/kT) \quad (1)$$

式中, h 为普拉克常数; k 为玻尔兹曼常数; Δv 为拉曼频移波数; c 为光速; T 为绝对温度; v_s 为斯托克斯光传播速度; v_{as} 为反斯托克斯光传播速度; I_s 为斯托克斯光强度; I_{as} 为反斯托克斯光强度。式中 $R(T)$ 为反斯托克斯光与斯托克斯光的强度比,仅与温度有关,光纤受外部环境温度的影响,导致其反斯托克斯光和斯托克斯光强度发生变化,用反斯托克斯光强与斯托克斯光强的相比(消除光源信号波动、光纤弯曲等非温度因素影响)可得到环境温度。

拉曼型分布式光纤测温系统由光源(高功率脉冲半导体激光器)、光纤波分复用器(由 2×4 光纤耦合器和波分复用器系统组成)以及光电接收和放大模块构成。本系统的采样间隔为 0.1 m ,采用外径 3.0 mm 的多模(62.5/125)光纤作为传输和传感光纤,测量精度为 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 光纤光栅及热电偶测温方法

光纤光栅温度传感器是一种波长调制型光纤传感器,外界温度变化会影响光纤材料的热胀冷缩和热光效应,进而影响其反射波长 λ_B 。光纤光栅温度传感器中心波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 和温度变化量 ΔT 成线性关系

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \alpha\Delta T + \beta\Delta T \quad (2)$$

式中, $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T}$ 为光纤的热膨胀系数; $\beta = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$ 为

光纤的热光系数; Λ 为光纤光栅的周期; n_{eff} 为有效折射率; T 为温度。监测系统所用的是双层钢管封装的光纤光栅,外层直径为3 mm,内层直径为1.1 mm,裸光纤光栅封装在内层的1.1 mm钢管中,两层钢管内部的光纤均采用环氧树脂胶固定,双层钢管结构有效地增强了传感器的传热导热性能,隔绝光纤的轴向应变,减弱了外界应变的干扰。在埋入模型前对光纤光栅的温度参数进行标定,光纤光栅温度传感器的温度测量精度可达0.05℃。

热电偶温度计可直接测量温度,其测量时将温度信号转换成热电势信号,利用信号处理得到被测对象的温度值。本试验采用的是镍铬-镍硅热电偶,可测量0~1 000℃范围内的温度,其线性度较好,测量精度为0.1℃。试验中用做光纤测温的对照。

模型温度场测量系统由拉曼型分布式光纤测温(DTS)、光纤光栅温度传感器、热电偶组成。以光纤光栅温度传感器测量点作为已知温度值样点,结合DTS的温度测量数据,由空间插值获取整个模型温度,最终得到模型的温度场云图。

2 温度场空间插值法

2.1 克里金法

克里金法是一种空间插值方法,是根据已知样点的参数值及其空间分布规律,利用外推和内插方法来估算整个研究区域范围内未知点的参数值的过程。样点与样点在空间位置上越靠近,其参数值就越接近,反之亦然。其在地学领域的许多研究中得到了应用,以卫星影像云覆盖地表区域的温度估算为应用较多^[16],利用了地表温度空间分布具有连续性和相关性的特点,通过空间插值推算出云覆盖区的地表温度。

物理相似模型的温度场特征符合空间分布连续性和相关性的假设,故可借鉴克里金法得到没有传感器位置的温度值。克里金法的估值公式为

$$T^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i T(x_i) \quad (3)$$

式中, $T^*(x)$ 为在 x 位置的温度估计值; $T(x_i)$ 为 x_i 位置的温度测量值; λ 为分配给 $T(x_i)$ 的残差的权重; n 为用于估计过程的温度测量值的个数。以估计值的方差最小和无偏性作为选取标准,推导出计算权重的克里金法的线性方程组

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{01} \\ \vdots \\ \lambda_{0n} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\gamma_{ij} = \gamma(x_i - x_j)$ 为距离为 x_i 和 x_j 之间的变异函数值; μ 为求估计值方差极小值时引入的拉格朗日乘数。通过求解式(4)可得到所有的权重 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$,进而通过式(3)求得估计值 T^* 。

2.2 物理模型温度变异函数及插值精度验证

借助克里金插值法,利用7个已知温度点来计算某一未知点的温度值,其位置点编号、坐标和温度值见表1,空间位置关系如图1所示。

表1 采样点的位置坐标及温度测量值

Table 1 Position coordinates of sampling points and temperature measurements

位置编号	X/m	Z/m	温度/℃
1	1.0	1.1	11.57
2	1.5	1.1	12.13
3	2.0	1.1	12.84
4	1.5	0.8	13.51
5	1.0	0.6	14.85
6	1.5	0.6	14.91
7	2.0	0.6	14.62
8	1.5	1.0	估值点

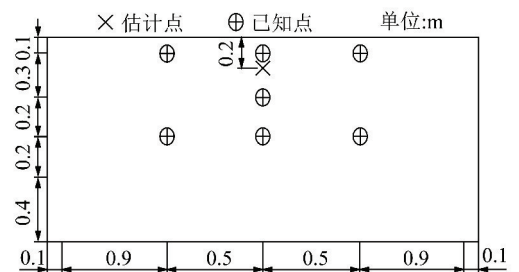


图1 模型中已知点和估计点的样本位置

Fig. 1 Sample location of known point and estimated point in the model

通过计算已知温度点在不同分离距离下的样本函数值,将其拟合得到物理模型的温度变异函数

$$\begin{cases} \gamma = 2.3 + \frac{8}{1 + 10^{(68-x)0.066}} \\ R^2 = 0.86 \end{cases} \quad (5)$$

其温度变异函数曲线如图2所示。

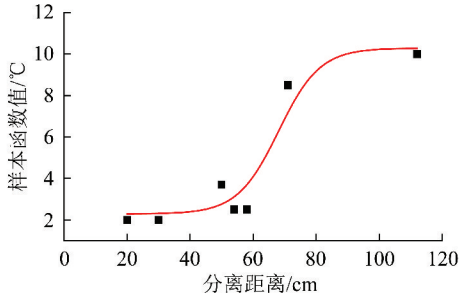


图2 相似物理模型的温度变异函数曲线

Fig. 2 Physical model of the temperature variogram

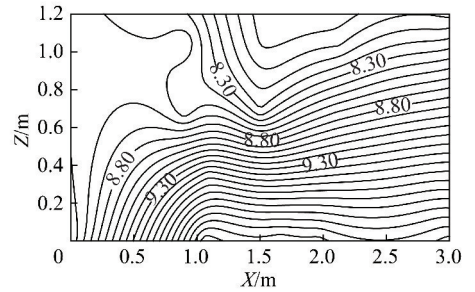
联立式(4)和(5),可得所有的权重和拉格朗日数矩阵式(6),通过求解式(6)可得 $\lambda_1 = -0.11$; $\lambda_2 = -0.19$; $\lambda_3 = -0.37$; $\lambda_4 = 2.98$; $\lambda_5 = -0.42$; $\lambda_6 = -0.41$; $\lambda_7 = -0.48$ 。最终,将权重和已知点的温度值代入式(3),即可得到待确定位置的温度估计值为 $12.56\text{ }^\circ\text{C}$ 。

$$\begin{matrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \gamma_{14} & \gamma_{15} & \gamma_{16} & \gamma_{17} & 1 & \lambda_1 & \gamma_{01} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} & \gamma_{24} & \gamma_{25} & \gamma_{26} & \gamma_{27} & 1 & \lambda_2 & \gamma_{02} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} & \gamma_{34} & \gamma_{35} & \gamma_{36} & \gamma_{37} & 1 & \lambda_3 & \gamma_{03} \\ \gamma_{41} & \gamma_{42} & \gamma_{43} & \gamma_{44} & \gamma_{45} & \gamma_{46} & \gamma_{47} & 1 & \lambda_4 & \gamma_{04} \\ \gamma_{51} & \gamma_{52} & \gamma_{53} & \gamma_{54} & \gamma_{55} & \gamma_{56} & \gamma_{57} & 1 & \lambda_5 & \gamma_{05} \\ \gamma_{61} & \gamma_{62} & \gamma_{63} & \gamma_{64} & \gamma_{65} & \gamma_{66} & \gamma_{67} & 1 & \lambda_6 & \gamma_{06} \\ \gamma_{71} & \gamma_{72} & \gamma_{73} & \gamma_{74} & \gamma_{75} & \gamma_{76} & \gamma_{77} & 1 & \lambda_7 & \gamma_{07} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \mu & 1 \end{matrix} =$$

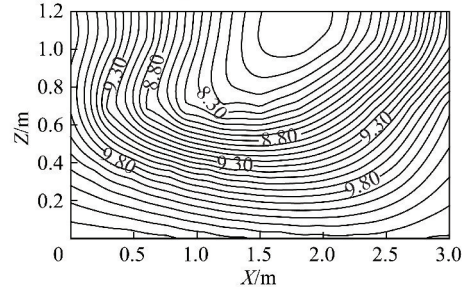
(6)

图3(a)是光纤光栅温度测量得到的模型温度分布,图3(b)是DTS分布式光纤测量结合光纤光栅温度测量得到的模型温度分布。从图3可以发现,仅有光纤光栅测量时,得到的模型温度分布较为粗略,温度信息分辨率低,尤其是模型左上部。当结合DTS分布式光纤测试以后,模型温度分布信息更精细,特别是细化了模型左上部的温度分布,更全面的反映了模型温度分布规律。由此可知,DTS分布式光纤测量数据对于提高模型测温的准确性,获取模型全场温度分布规律具有重要作用。

本试验中采用的插值方法结合克里金法,已知点采用动态选取,这是由于所选参与插值计算的已知点范围是动态变化的,其方法是,以估计精度控制为目标,利用误差对比的结果进行反馈优化,选取不同范围测量值用以估计,估测点在模型中部的,以估测点为中心,选取半径为0.6 m范围内的光纤光栅、分布式光纤的测试数据;估测点在模型四周的,选取半径为1.0 m范围内的测试数据。当分布式光纤和光纤



(a) 光纤光栅温度测试



(b) 分布式光纤和光纤光栅温度测试

图3 不同数据源插值法绘制温度

光栅与被估计点距离相同时,对光纤光栅的测量数据分配更大的权重,利用这种动态选取法能够有效的把光纤光栅的高精度和分布式光纤的高密度相结合,提高整体的测试准确度。

利用7个光纤光栅测得编号1~7的温度值,通过这些已知点的温度,利用插值法计算出估测点(编号8)的温度,再利用编号8位置的热电偶得到所在位置的实测值,比较不同时间同一位置处的计算估计值和实测值的误差见表2。可得插值精度小于2.0%。

3 物理模型及试验过程

3.1 试验概况

为了研究模型干燥过程中的温度变化规律,分别搭建了二维和三维相似物理模型^[17],二维模型的尺寸为3 000 mm×1 200 mm×200 mm,几何相似比1:200,容重相似比1.6;三维模型的尺寸为3 600 mm×2 000 mm×2 000 mm,几何相似比1:400,容重相似比1.6。模型铺装过程采用石膏、大白粉作为胶结料,以河沙作为骨料,按照配比搅拌均匀后分层铺入模型并夯实,层与层之间铺设云母粉用以模拟岩层层理。

二维模型模拟的井田地质概况:大水头井田位于靖远煤田的中部,煤系地层平均厚度64.75 m,其上部为紫红色、杂色、鲜紫红色的砂质泥岩与灰绿色粉砂岩互层,平均厚度22.23 m,下部为灰色、深灰色、灰黑色砂质泥岩及粉砂岩,平均厚度32.18 m。含煤

表2 温度估测的误差分析

Table 2 Errors analysis of temperature estimation

已知点(光栅实测值)/°C							编号8		相对误差/%
编号1	编号2	编号3	编号4	编号5	编号6	编号7	估计值/°C	热电偶实测值/°C	
14.70	14.73	14.78	14.99	15.16	15.21	15.20	14.81	14.59	1.51
10.53	10.55	10.61	9.75	8.80	8.66	8.48	10.30	10.44	1.34
12.39	12.33	12.39	12.13	11.53	11.39	11.31	12.28	12.10	1.49
12.73	12.70	12.72	11.58	11.28	11.23	11.28	12.50	12.71	1.65
13.55	13.51	13.55	13.65	12.98	12.98	12.95	13.56	13.35	1.57
11.54	11.43	11.47	11.75	11.65	11.67	11.61	11.53	11.69	1.37

两层,自上而下分别为1层煤和2层煤,其中1层煤为主采煤层,平均厚度10.34 m,倾角小于 25° ,密度为 1.41 t/m^3 ,其结构简单,局部地段夹有1-4层泥岩类夹矸。

三维模型模拟的井田地质概况:千秋煤矿主采煤层为2号煤层,厚度为15 m;煤层及其上覆岩层总厚度805.32 m;煤层上方209.5 m处发育有巨厚砾岩,该段砾岩总厚度410.2 m,分为上下两组,上组厚250 m,下组厚160 m,中间存在0.2 m的软弱夹层;砾岩弹性模量平均32 GPa,抗拉强度5.5 MPa,平均抗压强度75 MPa,最大抗压强度95 MPa,属于典型的坚硬岩层。

3.2 监测仪器布置及试验过程

二维模型试验分为模型搭建完成后的带模养护、拆除侧护槽钢的无模板下养护和试验等环节。模型于2015-11-19搭建完成,带模养护至12月10日共计21 d,无模板下养护至2016-01-05共计26 d,6至10日进行模型试验,共经历51 d。

利用分布式光纤、光纤光栅温度传感器及热电偶监测物理模型干燥过程中的内部温度变化。二维模型中DTS测温光纤的铺设共分为5层,光纤光栅温度传感器(FBG)共15个,分别埋设在模型的不同高度;热电偶作为光纤测温对照和误差分析,故只埋设了2支,其布置如图4所示。保证传感器在模型中准确埋设在指定位置,试验采用了夯实成型稳定、开孔埋入技术。

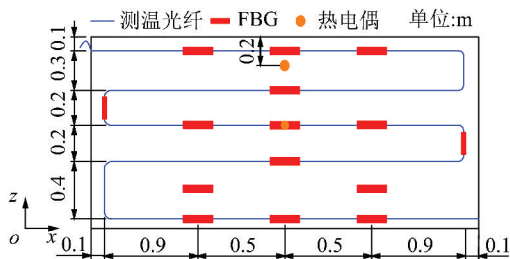
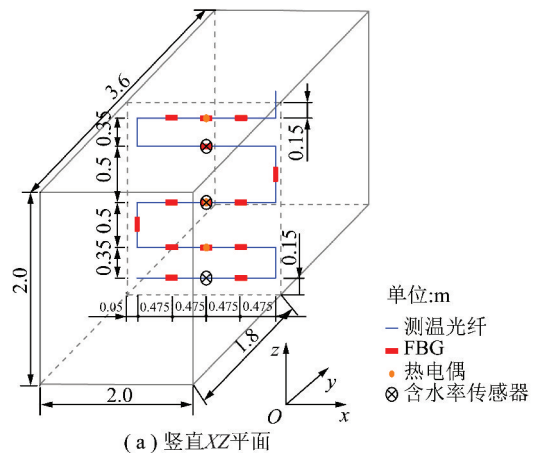


图4 二维模型温度传感布置

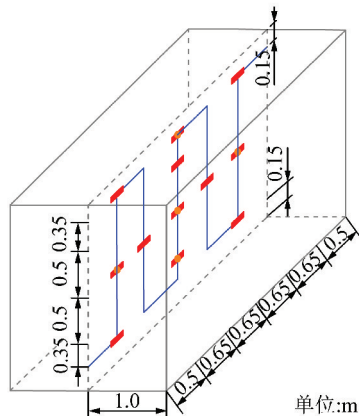
Fig. 4 Layout of temperature sensors in the plane model

三维模型试验过程分为模型搭建、带模养护和试验等环节。模型于2015-09-19搭建完成,带模养护至2016-04-20,共计213 d,模型试验于4月21日至5月16日进行,共计25 d,三维模型试验共经历238 d。

三维模型采用预埋式布置。在竖直XZ平面, DTS分布式测温光纤共分5层布置,共埋设14个光纤光栅温度传感器(FBG),3个热电偶和3个体积含水率传感器,分别位于模型不同高度上,其布置位置如图5(a)所示。



(a) 竖直XZ平面



(b) 竖直YZ平面

图5 三维模型温度传感布置

Fig. 5 Layout of 3D model temperature test

在竖直YZ平面,分布式测温光纤共分5层布置,共埋设12个光纤光栅温度传感器(FBG),5个热电偶,其布置位置如图5(b)所示。

4 测试结果与分析

4.1 二维模型温度场

二维模型试验温度测试结果可分为初期、中期和后期3个阶段。

(1)模型干燥初期。模型铺装完毕,侧护槽钢拆卸之前,其温度场分布如图6(a)所示,温度等值线层间梯度约为0.07℃。温度分布为模型四周温度低,中部形成高温核区,高温核区为一个类椭圆形,最高温度点处于0.7m处,温度由中心向模型上下两边界逐渐降低。这主要是模型材料中含有石膏,处于水化放热阶段,模型中部与周围环境的热交换较弱,放出的热量聚集,导致中间位置温度高,上下边界温度低。

(2)模型干燥中期。模型侧护槽钢拆除之后,到开挖试验之前,干燥27d时的温度场分布如图6(b)所示,内部四周温度高,中部出现低温核区,低温区呈近似椭圆,温度由中心向模型四周边界逐渐升高,最

低温度点处于1.0m处,整个模型的最大温度差为2.4℃。干燥38d时的温度场分布图6(c),较图6(b)所示,类椭圆低温核区明显下移,内部最低温度点移动至0.25m处,模型中上部温度有明显的水平分层,中上部温度高于中下部,最大温度差为2.5℃。干燥47d后的温度场分布如图6(d)所示,模型的低温核心区消失,形成水平方向各层温度趋于相等,竖直方向呈上高下低的温度梯度特征,整个模型的最大温度差为2.4℃。模型内部水分向下迁移,伴随着水分变化较快的蒸发面向下移动,水从液态转变为气态,需要大量能量用于蒸发潜热,造成其温度比周围温度低,表现为低温核区向底部移动。

(3)模型干燥后期。试验及开挖结束后,模型第65天的温度场分布如图6(e)所示,呈水平方向各层温度趋于相等,竖直方向为上高下低的温度梯度特征,与图6(d)的特征相似,分布相比之前更均匀。模型内部水分逐渐减少,伴随着蒸发过程的减弱,热量传递转为以固体颗粒导热为主,热传导在热量变化中起主要作用,竖直方向上逐渐形成明显的温度梯度,水平方向温度大致相同。

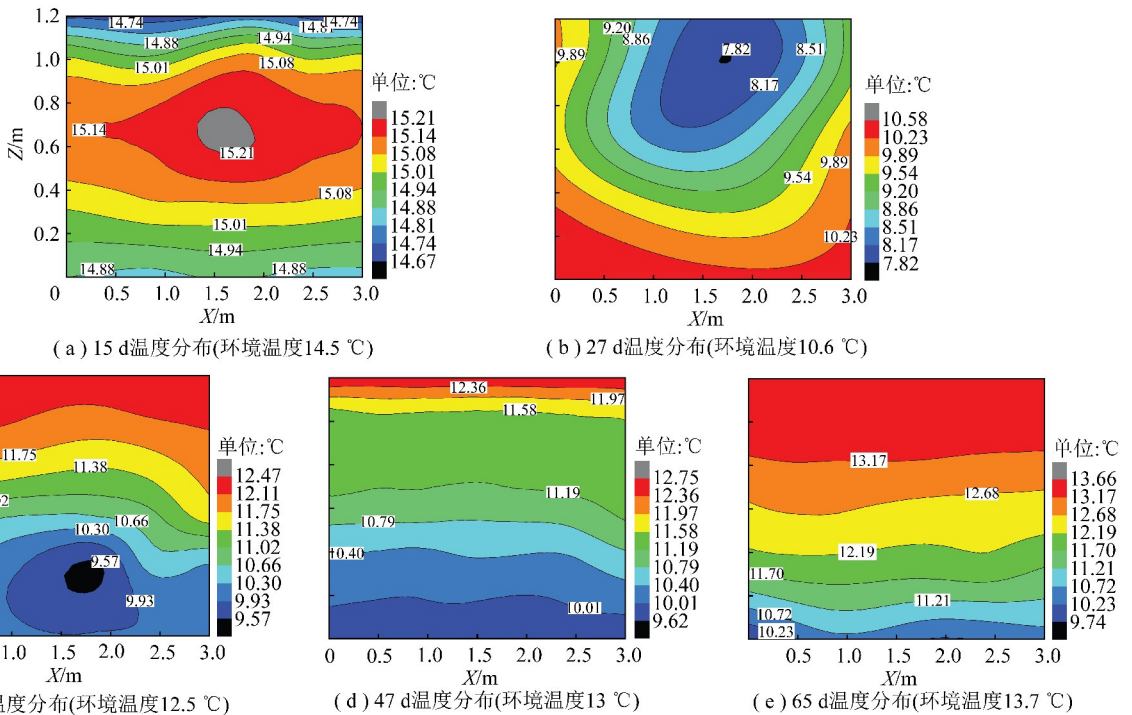


图6 二维模型温度场分布云图

Fig. 6 Temperature field of plane model

由光纤测得模型中不同位置的温度变化如图7所示,图7(a)为模型竖直方向不同位置的温度变化,图7(b)为模型水平方向不同位置的温度变化。

初期水平和竖直方向的温度变化规律大致相同;中后期水平方向各位置温度基本相等,而竖直方向各

位置温度差异较大,最大温度差为3.1℃。这是由于重力的作用,水分向下迁移,水分变化较快的蒸发面附近,蒸发潜热消耗热量相对更多,造成低温核心区的下移所致。与文献[18]得出的含水率较高的蒸发面附近有明显低温的特征相一致。

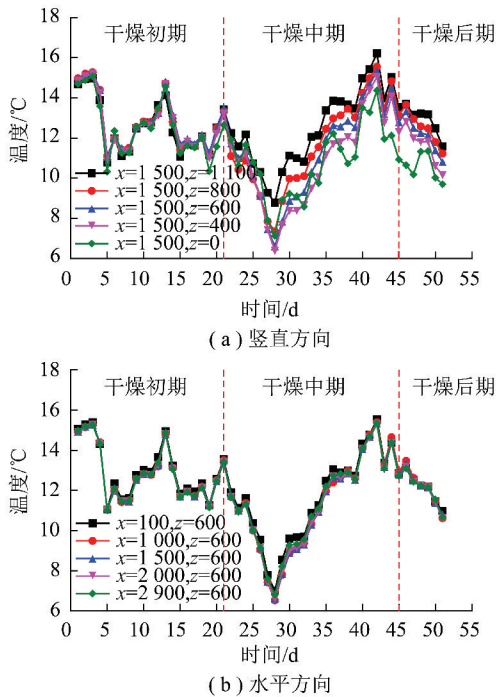


图7 二维模型温度随时间变化曲线

Fig. 7 Temperature variation of plane model

模型温度场由低温核心区下移,转变为竖直方向温度梯度分层,此时模型内部的水分分布大致是均匀的,模型中各处的力学强度相对稳定,因此温度场特征的变化可作为模型试验开挖的判断指标之一。得到二维模型干燥时间约为47 d。

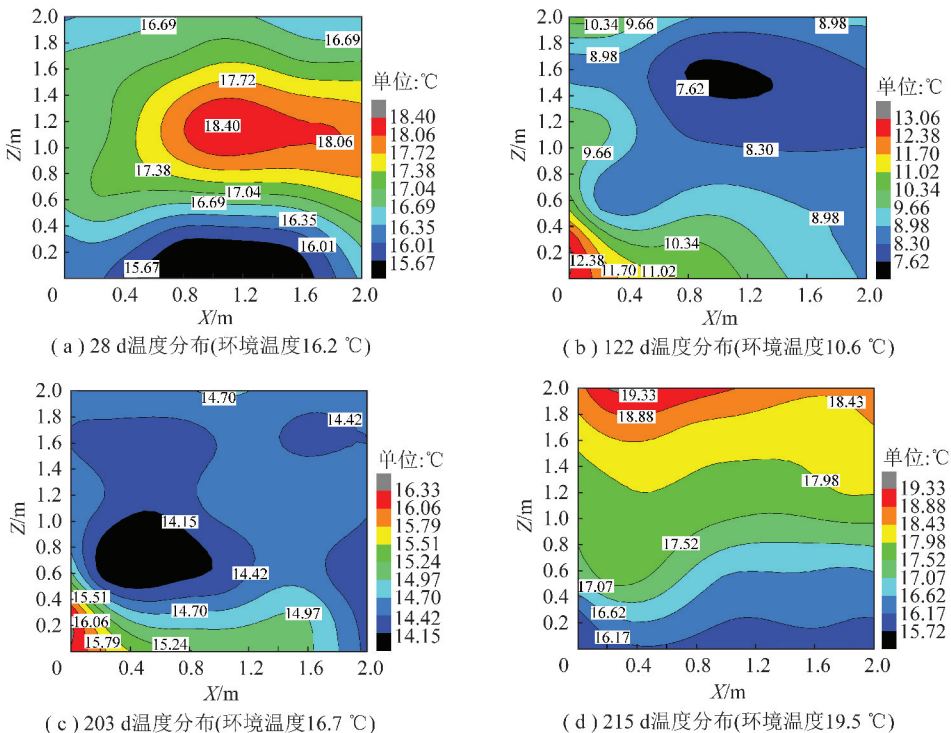


图8 三维模型XZ面温度场分布云图

Fig. 8 Temperature field of 3D model of XZ plane

4.2 三维模型温度场

(1) 三维模型XZ面温度场

三维模型铺装完28 d的XZ面温度场分布如图8(a)所示,温度等值线层间梯度约为0.34 °C,中间位置形成高温核区,高温核区呈近似椭圆形,高温核区位于1.1 m处,中上部温度略高于中下部。同样是模型材料中石膏水化放热,模型内部中间位置处与周围环境的热交换较弱,放出的热量聚集,导致中间位置温度明显高于周围温度。此时的温度场分布特征与二维模型在干燥初期的温度场类似。

干燥122 d的温度场分布如图8(b)所示,此时为2016年1月中旬,环境温度为10.6 °C。模型四周温度高,中部偏右出现低温核区,温度由中心向模型四周边界逐渐升高,右上部温度略低于左下部,最低温度点位于1.5 m处附近,最大温度差为4.8 °C左右。干燥203 d的温度场分布如图8(c)所示,环境温度为16.7 °C,中部低温核区明显的下移,并且温度向四周逐渐升高,最低温度点相较之前移动至0.8 m处。干燥215 d的温度场分布如图8(d)所示,此时为2016年4月,环境温度为19.5 °C,可看出,低温核区消失,形成自上而下逐渐降低的温度梯度。温度场水平方向各层温度趋于相等,垂直方向存在的温度梯度0.45 °C,但也趋于稳定。

(2) 三维模型 YZ 面温度场

三维模型铺装完 25 d 的 YZ 面温度场分布如图 9(a) 所示, 温度等值线层间梯度约为 0.36 °C, 中间

位置形成高温核区, 高温核区呈近似椭圆形, 最高温度点处于 1.0 m 处, 中上部温度略高于中下部。与二维模型在干燥初期的温度场类似。

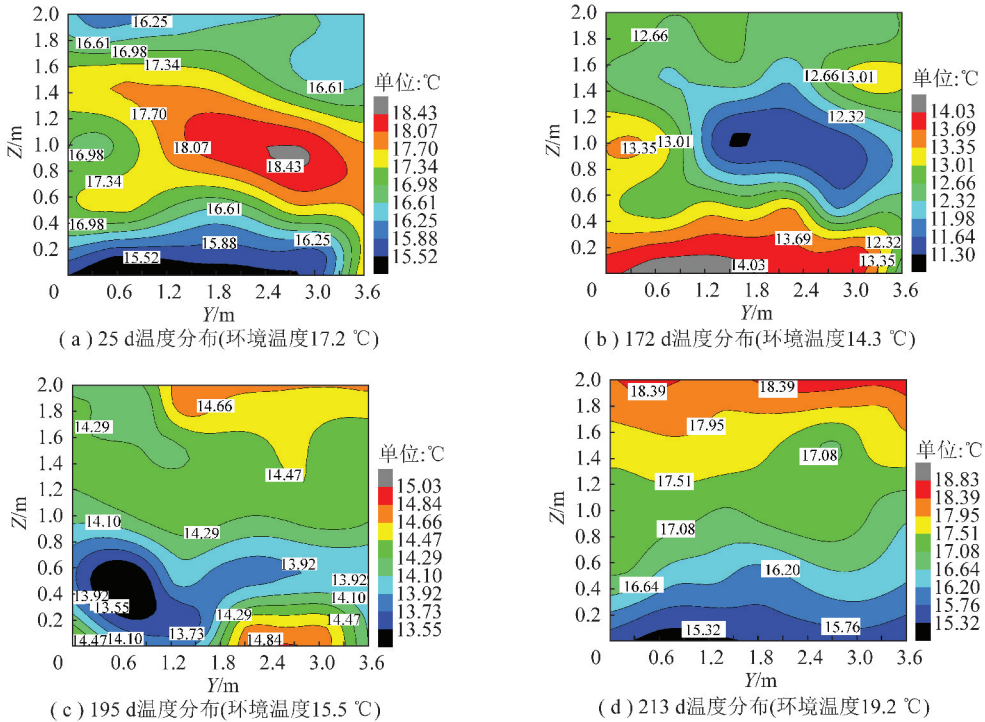


图9 三维模型 YZ 面温度场分布云图

Fig. 9 Temperature field of 3D model of YZ plane

干燥 172 d 的温度场分布如图 9(b) 所示, 此时为 2016 年 3 月, 环境温度为 14.3 °C。四周温度高, 中部出现低温核区, 低温核区位于中部 1.0 m 处, 并且温度向四周逐渐升高。

干燥 195 d 的温度场分布如图 9(c) 所示, 此时为 2016 年 4 月, 环境温度为 15.5 °C。四周温度高, 中部出现低温核区, 低温核区向左下方移动, 四周温度高于核区, 最低温度点相较之前移动至 0.4 m 处。

干燥 213 d 的温度场分布如图 9(d) 所示, 此时为 2016 年 5 月, 环境温度为 19.2 °C。呈水平方向各层温度趋于相等, 竖直方向为上高下低的温度梯度特征, 与图 6(d) 的特征相似, 分布相比之前更均匀。模型内部水分变化较快的蒸发面逐渐向下迁移, 随着整个模型含水率的降低, 热量传递的主要方式由水分蒸发潜热转为固体颗粒导热, 热传导在热量变化中起主要作用, 竖直方向上逐渐形成明显温度梯度, 水平方向温度大致相同。

4.3 三维模型体积含水率

含水率测量使用的是 FDR 体积含水率传感仪, 其传感原理是利用电磁脉冲, 通过电磁信号传播频率得到的表观介电常数, 进而得到体积含水率。FDR 传感单元由主体和 3 根探针组成, 探针长度为

60 mm, 直径为 3 mm, 测量区域是以中央探针为中心, 直径 6 cm、高 6 cm 的圆柱体, 可测量的体积含水率范围是 0 ~ 100%, 精度是 ±2%。

2015-09-20—2016-07-01 期间, 三维模型体积含水率变化如图 10 所示。干燥初期(2015-09-20—12-24), 上部的含水率一直处于降低状态, 中间和下部的含水率先升高再降低, 下部的含水率升高速率快于中部。主要原因是模型顶部暴露在空气中, 上部的水分向空气蒸发, 又在自身重力的作用下向下移动, 致使上部含水率降低的最快, 同时使中部和下部的含水率增加。干燥中期(2015-12-25—2016-04-22), 模型整体含水率降低并最终达到稳定状态, 中部和下部的含水率变化速率相较前一个阶段减缓。含水率从模型上部往下部逐次稳定, 上部的含水率最先稳定在 6.5% 附近, 其次是中部含水率稳定在 7.0% 附近, 最后是下部含水率稳定在 7.5% 左右, 并与图 8(b), 8(c) 低温核心区下移的顺序相吻合。干燥后期(2016-04-23—07-01), 上中下的含水率保持稳定状态, 上部含水率最低, 下部含水率最高。含水率与温度有一定的相关性, 水分蒸发潜热时, 含水率变化较快的蒸发面周围对应的温度低, 温度特征的转变与模型内部含水率变化有关系。

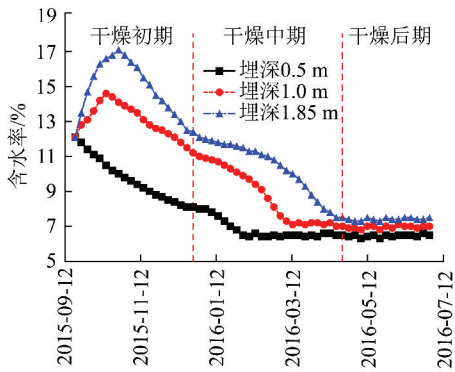


图10 三维模型体积含水率变化曲线

Fig. 10 Volumetric water content variation of 3D model

4.4 物理相似模型光纤测温讨论

物理相似模型为了确定合适的模型试验开挖时间,一般做法是通过观察模型材料的外观性状来估计干燥时间,这样的粗放预估将给试验结果造成影响,影响试验准确性。根据固液气三相介质温度与含水率(热-湿)耦合性,通过测量模型温度或含水率变化规律来预估模型开挖时间成为一种可行的研究思路。

然而,可以用于物理相似模型的含水率测试方法(如介电法)受制于材料的孔隙率、容重、质地、应力环境等因素^[19],如在相似模型干燥过程中,材料通常会出现结块板结现象,这样会显著影响孔隙率和容重进而影响到含水率的测量结果。从含水率测试仪器设备上看,在模型试验中存在测量元器件较大,传感器布置较多,导致影响模型物性,引起试验误差。含水率测试在模型干燥问题上的应用目前尚无很好的解决手段。

本文提出的方法通过较少量的测量值实现整个面的数据信息的获取,进而减少对模型物性的影响;而且利用温度场去反演水分特征的方法已在水利(坝体)、农业(土壤)领域有广泛的应用,通过温度特征研究其渗流、含水率以及水分分布问题,可实现大面积、实时监测,相信这种方法有实际应用价值。

5 结 论

(1)模型干燥过程中的温度变化分为3个阶段,即干燥初期的水化热阶段、干燥中期的养护阶段和干燥后期的试验阶段,其温度特征为,干燥初期模型的四周温度低,中部形成高温核区;干燥中期模型的四周温度高,中部出现低温核区以及低温核区渐次下移;干燥后期模型的竖直方向呈上高下低的温度梯度;干燥过程中模型在水平方向温度大致相同。

(2)模型干燥存在水化放热和水从液态转为气态的不同过程,温度与含水率相关,含水率变化较快的蒸发面周围对应的温度低,模型温度分布特征反映

出模型的干湿状态。随着模型内部水分下移,含水较多、不均匀且蒸发速率较快时以水分蒸发潜热为主的干燥(能量传递)方式转变为含水较少、均匀且蒸发速率较慢时的固体颗粒导热为主,表现是低温核区下移并消失,可作为模型试验开挖的判断指标之一。

(3)避光的室内,二维模型(3 000 mm×1 200 mm×200 mm)和三维模型(3 600 mm×2 000 mm×2 000 mm),石膏、大白粉作为胶结料,以河沙作为骨料,试验开始时间是秋季和夏季,二维模型沿竖直方向温度梯度较大,养护阶段最大温度差约为2.5℃,试验阶段最大温度差约为3.0℃,冬季铺装干燥时间为47 d;三维模型最大温度差约为4.8℃,干燥时间为213 d。

(4)光纤光栅和分布式光纤相结合的联合测温监测法能够提高模型内部的温度测试精度,克里金法可应用于物理相似模型的温度特征的演化分析。

参考文献 (References):

- [1] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003:176-196.
- [2] 郭惟嘉,王海龙,陈绍杰,等. 采动覆岩涌水溃砂灾害模拟试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(7):1415-1422.
Guo Weijia, Wang Hailong, Chen Shaojie, et al. Development and application of simulation test system for water and sand inrush across overburden fissures due to coal mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1415-1422.
- [3] 史小萌,刘保国,肖杰. 水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法[J]. 岩土力学,2015,36(5):1357-1362.
Shi Xiaomeng, Liu Baoguo, Xiao Jie. A method for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding agents [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1357-1362.
- [4] 洛锋,杨本生,郝彬彬,等. 相似材料单轴压缩力学性能及强度误差来源分析[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(1):93-99.
Luo Feng, Yang Bensheng, He Binbin, et al. Mechanical properties of similar material under uniaxial compression and the strength error sources [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 93-99.
- [5] 崔希民,缪协兴,苏德国,等. 岩层与地表移动相似材料模拟试验的误差分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(12):1827-1830.
Cui Ximin, Miao Xiexing, Su Deguo, et al. Error analysis in similar material simulation test of the movement of rock strata and surface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1827-1830.
- [6] 吴志伟,宋汉周. 基于流-热耦合模型的土石坝渗流热监测研究[J]. 岩土力学,2015,36(2):584-590.
Wu Zhiwei, Song Hanzhou. Numerical simulation of embankment dam seepage monitoring with temperature based on thermal-hydro coupling model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,

- 36(2):584-590.
- [7] 张庆松,高阳,李术才,等. 矿井含水构造附近采动岩体的温度响应特征相似模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1356-1362.
Zhang Qingsong, Gao Yang, Li Shucui, et al. Similarity simulation study of temperature response feature of rock mass affected by mining around water-bearing structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(7):1356-1362.
- [8] 陈智强,张永兴,周检英. 开挖诱发隧道围岩变形的红外热像试验研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(7):1271-1277.
Chen Zhiqiang, Zhang Yongxing, Zhou Jianying. Experimental study on infrared photographs of deformation and failure of surrounding rock of tunnels procession induced by excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(7):1271-1277.
- [9] 冯现大,李树忱,李术才,等. 矿井突水模型试验中光纤传感器的研制及其应用[J]. 煤炭学报,2010,35(2):283-287.
Feng Xianda, Li Shuchen, Li Shucui, et al. The development of fiber optic Bragg grating sensors and their applications to the mine water-inrush model test [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(2):283-287.
- [10] 柴敬,汪志力,刘文岗,等. 采场上覆关键层运移的模拟实验检测[J]. 煤炭学报,2015,40(1):35-41.
Chai Jing, Wang Zhili, Liu Wengang, et al. Monitoring movement laws of overlying key strata for coal mining in similar model [J]. Journal of China Coal Society,2015,40(1):35-41.
- [11] 柴敬,刘奇,张渤,等. 基于聚酰亚胺的FBG湿度传感特性及微观特征研究[J]. 光电子·激光,2016,27(3):239-246.
Chai Jing, Liu Qi, Zhang Bo, et al. Research on characterization and substructure morphology of a polyimide-coated fiber Bragg grating humidity sensor [J]. Journal of Optoelectronics · Laser,2016,27(3):239-246.
- [12] 谷艳昌,王士军,庞琼,等. 土坝温度场反馈渗流场可行性研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(9):1721-1726.
Gu Yanchang, Wang Shijun, Pang Qiong, et al. Feasibility of temperature field feeding back seepage field for earth dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(9):1721-1726.
- [13] 严珺凡,施斌,曹鼎峰,等. 基于碳纤维加热光缆的砂性土渗流场C-DTS分布式监测试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(2):430-436.
Yan Junfan, Shi Bin, Cao Dingfeng, et al. Experiment study of seepage field monitoring in sandy soil using carbon coated heating optical fiber-based C-DTS [J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(2):430-436.
- [14] 董海洲,寇丁文,彭虎跃. 基于分布式光纤温度监测系统的集中渗漏通道流速计算模型[J]. 岩土工程学报,2013,35(9):1717-1721.
Dong Haizhou, Kou Dingwen, Peng Huyue. Computational model for dam leakage velocity in concentrated passage based on distributed optic fiber temperature sensing system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(9):1717-1721.
- [15] Benítez Buelga Javier, Rodríguez Sinobas Leonor, Calvo Raul Sánchez, et al. Calibration of soil moisture sensing with subsurface heated fiber optics using numerical simulation [J]. Water Resources Research,2016,52(4):2985-2995.
- [16] 张军,覃志豪,刘梅,等. 利用空间插值法估算云覆盖像元地表温度的可行性研究[J]. 地理与地理信息科学,2011,27(6):45-49.
Zhang Jun, Qin Zhihao, Liu Mei, et al. Estimating of land surface temperature under the cloud cover with spatial interpolation [J]. Geography and Geo-Information Science,2011,27(6):45-49.
- [17] 宋军. 相似材料模型温度场监测试验研究[D]. 西安:西安科技大学,2016.
Song Jun. Experimental study on temperature field monitoring of similar material model [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology,2016.
- [18] 熊义,高抗. 蒸发条件下非饱和土水分迁移的数值模拟[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2014,36(1):46-50.
Xiong Yi, Gang Kang. Numerical simulation of water evaporation and transfer in unsaturated soil [J]. Journal of China Three Gorges Univ. (Natural Sciences),2014,36(1):46-50.
- [19] 李旺霞,陈彦云. 土壤水分及其测量方法的研究进展[J]. 江苏农业科学,2014,42(10):335-339.
Li Wangxia, Chen Yanyun. Research progress of soil moisture and its measurement methods [J]. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences,2014,42(10):335-339.