

# 大庆地区给水管道的合理埋深的数值研究

白莉<sup>a</sup>, 王炎<sup>b</sup>

(吉林建筑大学 a. 松辽流域水环境教育部重点实验室; b. 市政与环境工程学院, 长春 130118)

**摘要:** 大庆地区村镇给水管道的冬季运行时常发生冻胀危害,为此提出了一种 PPR-PVC 管道浅埋外加保温层的综合防冻胀技术。为更好地确定采用该技术的管道最佳埋深,首先通过数值计算和实测结果的对比分析研究土壤的冻胀性参数;利用 Matlab 软件,建立给水管道的周围土壤非稳态传热物理模型,分别模拟了不同埋深处管道周围的土壤温度场,通过对比分析得到了大庆地区采用 DN50 的 PPR-PVC 新型保温给水管道的最佳浅埋深度为 1.5 m,此处管道受到大气温度扰动小,融化圈范围大,土壤的冻胀性较弱。在考虑水分迁移和冰水相变因素影响下,通过模拟认为埋深在 1.5m 的 PPR-PVC 给水管道的运行是安全可靠的。

**关键词:** 给水管; 冻胀; 融化圈; 冰水相变; 水分迁移; 含水量

中图分类号:TV52

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)05-0028-04

## Numerical investigation of optimal buried depth of water supply pipe in Daqing region

BAI Li<sup>a</sup>, WANG Yan<sup>b</sup>

(a. Key Laboratory of Songliao Aquatic Environment, Ministry of Education; b. School of Municipal & Environmental Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** Frost heave often causes damage to rural water supply pipe in Daqing region. Therefore, the paper proposed a kind of comprehensive anti-freezing technology of shallow buried pipe with insulation layer. In order to better determine the optimal buried depth of pipeline, it studied the parameters of frost heave by comparison analysis of numerical calculation and measuring result. ;secondly, it established the unsteady heat transfer model with Matlab software and simulated the soil temperature field around different pipe depths. The optimal depth used by PPR-PVC type thermal material of DN50 pipe is 1.5 meters in Daqing region. The pipeline here is less disturbed by atmospheric temperature, the range of thaw is large, the frost heave of soil is weak. Considering the effect of moisture migration and glacial phase factor, The simulation indicated that the operation of PPR-PVC type water supply pipeline which is buried under ground depth of 1.5 meters is safe and reliable.

**Key words:** water supply pipeline; frost heave; thaw bulb; ice water phase transition; moisture migration; moisture content

## 1 研究背景

穿越季节性冻土区的管道工程、道路工程和地基工程都会受到冬季土壤冻结带来的冻胀作用影响。随着大气温度的降低,土壤的温度也会降低,但是相对于大气温度降会有明显的滞后。随着土壤温度的降低,土壤中的水分会发生迁移和相变。水分的迁移是

沿着温度负梯度方向向冻结锋面迁移,并在冻结锋面不断累积结冰,发生相变<sup>[1]</sup>。同等质量的水冻结成冰时,体积会增加 1/9,这也就造成了土壤体积增加,这种冻胀变形会导致埋地构筑物在竖直方向受力不均继而发生断裂。浅层土壤冻胀现象发生的原理复杂,主要是因为土壤中存在水分迁移引起的热量传递和冰水相变释放的相变潜热<sup>[2]</sup>。因此,研究浅层土壤温

收稿日期:2014-03-27; 修回日期:2014-05-29

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAJ25B10); 国家自然科学基金面上项目(51376080)

作者简介:白莉(1964-),女,吉林长春人,博士,教授,主要从事污水资源化利用、饮水安全保障、建筑节能等方面的研究。

通讯作者:王炎(1988-),女,山东潍坊人,在读研究生,研究方向:农村饮水安全保障。

度场,可以为研究埋地管道工程、道路工程和地源热泵系统地下换热器性能等提供重要的理论依据。

大庆地区位于北纬 46°,地处松嫩平原中部,是典型的冬季严寒型气候地区。大庆地区大部分属于波状平原地区,土壤主要是由细砂,轻亚粘土和亚粘土构成,其最高地下水位为 1.00~2.50 m<sup>[3]</sup>。土壤的年冻结时间长达 6 个月,冬季最低月平均温度为 -19.60℃,并在来年三月中旬达到最大冻深(2.30 m 左右),大庆地区地下水位在 1.00~1.50 m,属于季节性冻土地区。大庆地区村镇由于经济发展水平的制约,设施简陋,冬季时常发生给水管道的冻胀现象。给水管道的发生冻胀的原因,除了土壤冻结引起的管壁受力不均以外,还有村镇采用间歇式给水模式,当地施工条件与施工质量限制,不能按规范要求保证给水管道的埋深等原因。为了解决严寒地区村镇给水管道的冻胀问题,作者以大庆为例,研究提出了一种浅埋外加保温管道的综合防冻胀技术。

## 2 最佳埋设深度的研究

### 2.1 数值计算

冻土研究界普遍认为冻土冻胀量是沿冻深分布<sup>[4]</sup>。根据《建筑地基基础设计规范 GB5007-2002》季节冻土与季节融化层土冻胀分类可知,粘土的冻胀率为 3.50%~6.00% 为冻胀性土,当冻胀率 1.00%≤ $\eta$ ≤3.50% 为弱冻胀性土。

在自然条件下,冻胀量,冻胀率和土壤冻结速率计算公式如下:

$$h = \bar{f}z \tag{1}$$

$$\bar{f} = \alpha(w - w_p) \tag{2}$$

$$f_i = 2\bar{f}(1 - \frac{z_i}{z}) \tag{3}$$

$$\eta = \frac{h}{z_i} \tag{4}$$

$$v = \frac{\Delta Z}{T} \tag{5}$$

式中: $h$  为自然条件下的冻胀量,m; $z$  为设计冻深,m,大庆地区设计冻深为 2.14 m; $\bar{f}$  为平均冻胀系数; $w$  为冻结前土壤的含水率,%,本文认为冻结前含水率 50%; $w_p$  为土的塑限含水率,%;粘土  $w_p$  为 25%; $f_i$  为冻结层某点冻胀强度; $z_i$  为冻结层内某点到地表的距离,m; $\eta$  为冻胀率,%; $\alpha$  为系数,一般取值为 0.2; $v$  为土壤冻结速率,m/d; $\Delta Z$  为土壤的冻结深度,m; $T$  为土壤冻结时间,d。

本文以大庆地区为例,经过计算,埋设在 1.20,

1.50,1.80 m 处的冻胀率计算如表 1。由表 1 可知,在大庆地区 1.50 m 处土壤冻胀率为 2.90%,因此 1.50 m 处于冻土层的弱冻胀带。因此将给水管道的埋设在这个位置,可以有效避免冻害发生。

| 表 1 不同埋深冻胀量 |      |        | m, %, m/d |
|-------------|------|--------|-----------|
| $Z_i$       | $h$  | $\eta$ | $V$       |
| 1.20        | 0.09 | 4.40   | 0.05      |
| 1.50        | 0.06 | 2.90   | 0.07      |
| 1.80        | 0.04 | 1.60   | 0.00      |

### 2.2 实测结果

为了更加准确地掌握大庆地区地温随时间变化,试验采用土壤温度测定仪测定不同深度的土壤的温度。在深度方向每隔 30 cm 设置一个测点,观测从 0.60~2.40 m 的土壤温度变化,通过实验收集大庆地区红旗镇 2013-12-20~2014-03-15 的土壤温度数据,根据数据发现土壤在凌晨五点达到最小值,在中午一点达到最大值,将平均值绘制如图 1。根据数据显示 1.20 m 处土壤的冻结时间为 33 d,1.50 m 处土壤的冻结时间为 21 d,1.80 m 处土壤并未出现冻结。土壤的冻结速率反映了冻结锋面侵入土体的时间变化特征<sup>[5]</sup>,经过计算发现土壤冻结速率随着土壤冻结深度增加而减小,1.20 m 处土壤冻结速率为 0.05 m/d,1.5 m 处土壤的冻结速率为 0.07 m/d,1.80 m 处为 0.00 m/d。土层处于相变区时,冻结速率越小,土中水分迁移的条件越充分,可以形成更大的冻胀<sup>[6]</sup>,因此埋深 1.5 m 处的土壤冻结速率虽然快,仍是适宜的管道埋设深度。

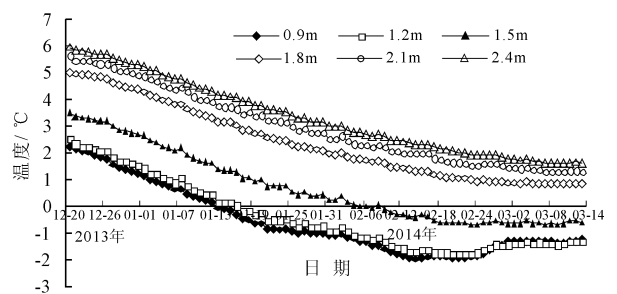


图 1 不同观测点土壤温度

## 3 模型建立与求解

### 3.1 物理模型

浅埋外加保温层的管道防冻胀技术,首先是采用了一种具有良好防水性能和保温性能的新型给水管——外管采用聚丙烯管材(PPR),内管采用聚氯乙烯管材(PVC)的给水管材,其中间层采用发泡的聚

氨酯硬质泡沫作为保温层的双层管道。根据二维非稳态传热理论建立的浅埋保温给水管道与周围土壤非稳态传热以及土壤自身导热物理模型。

### 3.2 边界条件

大地表面即边界 1, 是属于第二类边界条件:

$$q_1 = 0 \quad (6)$$

绝热边界 2 属于第一类边界条件:

$$t_2 = t_0 \quad (7)$$

绝热边界 3 属于第二类边界条件:

$$q_3 = 0 \quad (8)$$

边界 4 属于第三类边界条件:

$$\lambda_4 \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_4 = h(t_4 - t_e) \quad (9)$$

$$t_e = t_0 + A \cos(\omega \tau + \varphi) \quad (10)$$

边界 9-13, 属于第三类边界条件:

$$\lambda_{9-13} \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{9-13} = \alpha_i(t_{5-8} - t_{9-13}) \quad (11)$$

式中:  $\lambda_4$  为土壤导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $h_4$  为土壤表面与空气的换热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_0$  为地表空气年平均温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_e$  为不同深度的土壤温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $A$  为地表空气年温度波幅,  $^\circ\text{C}$ ;  $\omega$  为以年为周期的角速度,  $\text{rad/a}$ ;  $\tau$  为累计时间,  $\text{a}$ ;  $\varphi$  为初相角,  $\text{rad}$ ;  $t_0$  为地表土壤年平均温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\lambda_{9-13}$  为管道保温层的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha_i$  为内表面换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_e$  为周围土壤温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{5-8}$  为管道保温层内壁的温度,  $^\circ\text{C}$ 。由于给水管道内管壁, 相对于温度影响区域而言非常小, 因此忽略给水管道内管(聚丙烯管材)管壁的传热, 并且近似的认为保温层内壁的温度即为管道内流体的温度, 认为管道内水流速度不为零。同理, 因为给水管道外壁厚度相对于温度影响区域而言

非常小, 因此忽略给水管道外管(聚氯乙烯管材)管壁的传热, 认为保温层外壁的温度即为土壤温度。

### 3.3 控制方程

为了便于理论分析简化模型, 认为土壤是一个各向同性的均匀物体, 且内部不存在内热源; 忽略管壁、管道保护层对给水管道周围土壤温度场的影响, 认为管内水温在管道截面上的分布一致; 并且认为管内流速恒不为 0, 并且忽略水温沿管道轴向热损失, 不考虑边界上的水分补给和排泄作用<sup>[7]</sup>。土壤中温度  $T$  应满足热传导微分方程, 如下:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho c_p v \Delta T = \lambda \nabla (\nabla T) \quad (12)$$

### 3.4 浅埋管道最佳埋深的探究

DN50 mm 的给水管道外加传热系数为 0.03  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  的聚氨酯硬质泡沫保温层, 保温层厚度为 50 mm, 保温层的密度为 45.00  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 比热容约为 2 380.00  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 给水管道中水温为 10.00  $^\circ\text{C}$ , 认为土壤是均匀一致的无限大物质, 密度取值为 1 840.00  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 认为土壤比热容为 990.00  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 导热系数为 1.80  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

为了更好地确定浅埋保温给水管道的最佳埋度, 分别将管道埋深设为: 1.20、1.50、1.80 m; 假定地表土壤温度为 26.00  $^\circ\text{C}$ , 埋深为 1.8 m 处温度为 -2.00  $^\circ\text{C}$ , 埋深在 1.50 m 时, 土壤温度为 -4.00  $^\circ\text{C}$ , 埋深为 1.20 m 时, 土壤温度为 -6.00  $^\circ\text{C}$ 。

利用 Matlab 软件的 PDE 工具箱求解出该浅埋保温给水管道与周围土壤非稳态传热物理模型在不同埋深条件下, 运行 30 d 的土壤温度场分布<sup>[8]</sup>, 如图 2。

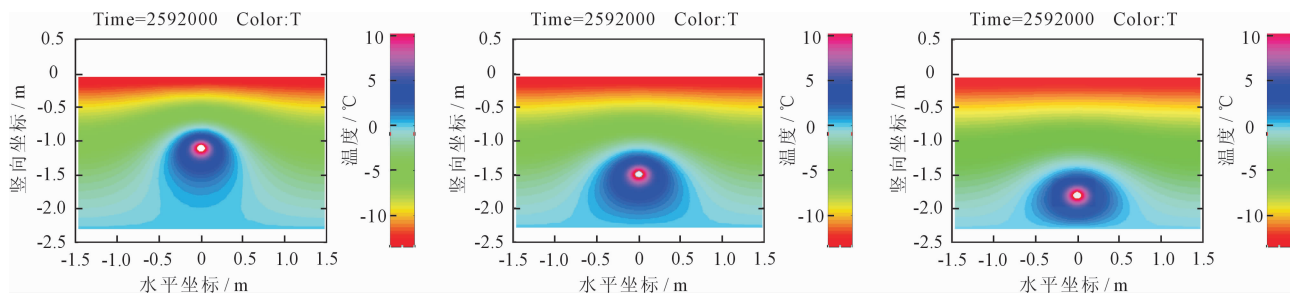


图2 埋深在 1.20、1.50、1.80 m 给水管道运行 30 d 周围土壤温度场分布图

模拟结果分析:

(1) 给水管道上方温度曲线密集, 下方的曲线较为疏散。这主要是因为管道上方土壤的温度低于管道底部土壤温度, 因此, 管道上方温度梯度更大, 热量传递更多。从 3 个图的对比可以发现, 浅埋在

1.20 m 的给水管道上方曲线比浅埋在 1.50 和 1.80 m 明显更密集, 这说明: 浅埋在 1.20 m 的管道, 受到大气温度影响的程度大于后两者, 浅埋在 1.50 和 1.80 m 的管道受大气温度影响均较小。

(2) 在冻土层中敷设的给水管道, 由于管内水

温高于周围土壤温度,因此会在管道周围形成具有一定焓值的融化圈。融化圈的半径与关内外介质温度有关,它的存在有利于缓解土壤冻胀力,其影响断面半径越大,管道运行越安全<sup>[9]</sup>。对比发现:浅埋在 1.50 m 处的冻融圈断面面积最大,浅埋在 1.80 m 次之,1.20 m 处的冻融圈断面面积最小。这主要是因为浅埋在 1.20 m 处的给水管道受到大气温度影响程度大,冻融圈与外界传热较多,使得融化圈缩小,而深埋在 1.80 m 处管道介质与周围土壤温差较小,形成的融化圈断面面积较小。

综上所述,管道浅埋在 1.50,1.80 m 时,运行都是较为安全可靠的。处于施工工期、工程土方量等综合因素考虑,认为浅埋深度为 1.50 m 为最佳。

3.5 在冻结状态和冻融状态下的给水管道周围土壤温度场分布

因为土壤温度的变化必然会引起土壤中含水量、导热系数和比热容的变化,影响浅埋给水管道与周围土壤的传热过程。在考虑含水量变化和相变潜

热的因素下,在控制方程计算中,土壤比热容和导热系数应满足下式<sup>[10]</sup>:

$$c_p = c_f + \frac{c_u - c_f}{\Delta T}(T - T_1) + \frac{L}{1 + w} \frac{\Delta w_i}{\Delta T} \tag{13}$$

$$\lambda = \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{\Delta T}(T - T_1) \tag{14}$$

式中: $T$  为土壤温度,℃;  $L$  为冰水相变潜热, $T_1$  为完全冻结温度, $w$  为土壤含水量, $\Delta w_i$  为冰水相变引起的含水量变化。将大庆地区的土壤组成看做为粉质粘土和亚砂土,当土壤含水量为 0.50 时,土壤在完全冻结状态和冻融状态下的  $c_p$  分别为 990.00 J/(kg · K),1 600.0 J/(kg · K);  $\lambda$  分别为 1.80 W/(m · ℃),1.15 W/(m · ℃)。

为了验证埋深 1.5 m 的保温给水管道在冬季运行的安全可靠,进一步模拟了含水量为 50% 的土壤,在完全冻结和冻融两种状态下的给水管道周围土壤温度场分布,如图 3 所示。

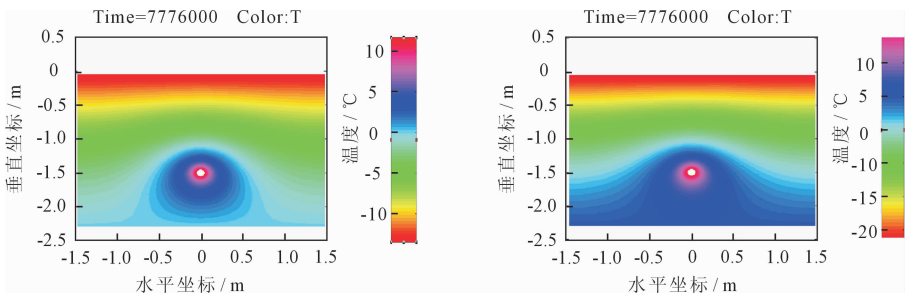


图 3 埋深在 1.5 m 冻土状态和冻融土状态保温给水管道运行 90 d 土壤温度场分布

模拟结果分析:

(1)冻土状态和冻融土状态下的土壤温度场差异较大,因此在分析土壤温度场时,应该考虑水分迁移和冰水相变的因素的影响。

(2)对比两图发现,冻土中浅蓝色零度线相对于融土中浅蓝色零度线发生了明显向下的位移,而且具有明显的冻胀变形,这就说明冻土中管道周围土壤的体积发生膨胀。假定,冻土状态和融土状态在 0℃ 土层处就发生冰水相变且外部压力认为不变,此时土壤膨胀,释放出外潜热,但是由于冻土和融土中 0℃ 土层的焓值是相同的,说明在冰水相变的状态下,内潜热是降低的。

外加保温层的给水管道浅埋在 1.50 m 深的冻结土和冻融土中,在 90 d 模拟运行期间,保温层外壁温度基本保持在零下 3.00 ~ 5.00℃,远离冰冻温度。这说明,采用浅埋保温防冻胀综合技术的给水管道,在严寒地区冬季完全可以安全运行。

4 结 语

(1)根据计算发现土壤冻胀率随深度增加而减小,1.2 m 处冻胀率最大,不利于管道运行安全稳定,其次是 1.5 m 处和 1.8 m 处。

(2)根据实测数据发现土壤温度冻结时间受大气温度影响呈现出沿深度的变化,根据数据显示 1.20 m 处土壤的冻结时间为 33 d,1.50 m 处土壤的冻结时间为 21 d,1.80 m 处土壤并未出现冻结。

(3)根据实测数据计算结果发现土壤冻结率分布随深度增加而增加,1.2 m 处冻胀速率最小更有利于冰水相变,其次是 1.5 m 处和 1.8 m 处。

(4)利用 Matlab 软件模拟不同埋深处管道周围土壤温度场,发现 1.5 m 处管道周围温度场的温度梯度变化小,管道周围融化圈作用半径较大,运行较为安全。

时常出现在吉迈站,分别向上下游解冻。近几年来玛曲首先开河的次数增多,从下向上解冻。

(2)近年来,受到冬季平均气温升高、冬季平均流量增加的影响,黄河源区稳定封冻天数整体呈减少趋势,黄河沿站的冬季最大冰厚也呈减小趋势。而对于吉迈站和玛曲站的冬季最大冰厚虽然 MK 趋势检验结果有上升,但近年冰厚均值整体小于历史时段均值,故认为其总体是减小的。

(3)影响黄河源区凌情特征的主要因素有纬度产生的气温地带性、冬季气温的寒冷程度以及各站的流量,这些因素与封冻天数、冬季最大冰厚均有较好的相关关系。在日后建立凌情预报模型的过程中,可从这些因素中选择代表性的因子,进行进一步的讨论。

#### 参考文献:

- [1] 刘吉峰,杨健,霍世青,等. 黄河宁蒙河段冰凌变化新特点分析[J]. 人民黄河, 2012,34(11):12-14.
- [2] 孟闻远,郭颖奎,王璐. 黄河冰凌特点及防治措施[J].

华北水利水电学院学报, 2010,31(6):27-29+42.

- [3] 李伟玲. 气候变化下黄河上游凌情特征分析及预报[D]. 南京:河海大学,2009.
- [4] 王云璋,康玲玲,陈发中,等. 近 30a 气温变化对黄河下游凌情影响分析[J]. 冰川冻土, 2001,23(3):323-327.
- [5] 郭卫华,王哲,王友强,等. 黄河梁山段近 46 年凌情变化特征分析[J]. 安徽农业科学, 2011,39(13):7782-7960.
- [6] Dong X N, Li X M, Lin Y P et al. Characteristics of ice regime in the lower Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2008,19(6):882-887.
- [7] 李凤玲,高瑞忠,冯国华,等. 两种改进的 BP 模型预报黄河内蒙段冰情信息及效果分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(7):69-71+75.
- [8] 陆晓静,苏占胜,谭志强. 黄河宁夏段凌汛期气温变化特征[J]. 干旱气象, 2014,32(1):120-122+127.
- [9] Du Y H, Hao Z C, Ju Qin. Feature analysis and prediction of ice regime in the source region of the Yellow River [C]// IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothen-burg, Smeden, 2013. 6.

(上接第 31 页)

(5)在考虑水分迁移和冰水相变因素影响下,通过模拟埋深在 1.5 m 冻土状态和冻融土状态保温给水管道运行 90 d 土壤温度场分布,此时的 PPR-PVC 给水管道运行是安全可靠的。

浅埋保温给水管道是解决在严寒地区冬季给水管道冻胀问题的综合性创新技术,这项技术减少了管线敷设的施工土方量,缩短了施工工期,尤其适用于因高地下水位给水管网敷设困难的地区。技术经济合理,运行完全可靠。为了更好的保障此项技术的实施效果,给水管道的防腐保温要严格按照设计要求施工;避免保温材料在储运、施工过程中受潮,并加强施工过程的质量监管。

#### 参考文献:

- [1] 郑平. 冻土区埋地管道周围土壤水热力耦合作用的数值模拟[D]. 北京:中国石油大学,2011.
- [2] 付在国,宇波,朱洁,等. 多年冻土区埋地输油管道热力影响研究[J]. 工程热物理学报, 2012,33(12):2163-2166.

- [3] 姜洪举,程恩远. 大庆地区土壤冻胀性研究[J]. 冰川冻土, 1993,15(2):272-277.
- [4] 张喜发. 冻土试验与冻害调查[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [5] 吴礼舟,许强,黄润秋,等. 冻土中冻结锋面移动的影响因素[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2010,25(4):51-53.
- [6] 叶万军,杨更社,李喜安,等. 冻结速率对 Q2 黄土性状影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2011,30(9):1912-1917.
- [7] 顾锦彤,马贵阳. 埋地热油管道启输过程土壤温度场三维数值模拟[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2009,29(4):53-56.
- [8] 苏金明,王永利. Matlab7.0 实用指南(下册)[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [9] 何建平. 青藏铁路冻土环境下浅埋给水管道保温分析研究[D]. 成都:西南交通大学,2005.
- [10] 马茂艳,程桦. 深厚土层冻结过程的水热力耦合分析[J]. 煤矿安全, 2012,43(4):139-142.