

文章编号:0559-9350(2018)05-0588-10

## 季节性冻土区管道浅埋换填防冻模式研究

白静<sup>1</sup>, 谢崇宝<sup>1</sup>, 吴志琴<sup>2</sup>

(1. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054; 2. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 输水管道是节水灌溉工程建设的重要组成部分, 管道铺设模式不仅直接影响到节水灌溉工程的投资和施工进度, 同时还影响工程的直接效益和使用寿命。本文中通过在低温实验室进行PE管浅埋模型试验, 获得了不同管道埋深、保温措施、回填措施和换填措施等条件下管道内温度和管道变形的动态变化过程。试验结果表明: 不同换填措施、保温措施对管道内温度影响不大, 而管道埋深和回填措施对管道内温度影响显著, 适当增加管道埋深, 管内温度升高, EPS轻质土回填的保温效果好于珍珠岩散料轻质土回填措施。在管道变形方面, 炉渣换填措施略优于砂土换填措施, 适当增加管道埋深, 管道变形明显减小。与设置换填措施、回填措施和保温层的复杂工况处理相比, 采用炉渣换填和回填措施的裸管, 可以达到较好的防冻效果。综合考虑冻土区机械耕作等需要和防冻措施的经济可行性, 推荐80 cm埋深的炉渣换填回填模式作为季节性冻土区(冻深<2.3 m)PE管道的浅埋模式。

**关键词:** 季节性冻土区; PE管道; 浅埋模式; 换填方式

**中图分类号:** TV93

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20170842

## 1 研究背景

我国是一个水资源严重短缺的农业灌溉大国, 发展喷灌、微灌及管道输水等节水灌溉是我国农业发展的长期战略需求。在节水灌溉工程建设中, 无论是喷灌、微灌, 还是管道输水灌溉均需铺设大量的管道。因此, 管道铺设模式不仅直接关系到灌溉工程的投资和施工进度, 同时直接影响灌溉工程的效益和使用寿命。

高寒地区由于土壤冻深较大, 传统的铺管需要将管道埋在冻深以下, 以避免管道受冻胀和融沉的影响<sup>[1-2]</sup>, 但因施工成本过高影响了节水灌溉的发展。因此, 管道的埋深是季节性冻土区管道埋设的关键问题之一, 探讨高寒地区管道适宜埋深已成为节水灌溉领域的重要研究方向。如: 陈宝明和陈若霆<sup>[3]</sup>利用多年平均地面最低温度和不同温度对应的深度进行相关分析, 得出了针对PVC管、PP管、PE管、混凝土管等4种管道的适宜埋深公式, 初步确定PE管的埋深为0.7 m, PVC管的适宜埋深为1.0~1.2 m, PP管的适宜埋深为1.2~1.8 m; 郭新禧、解放庆等<sup>[4-5]</sup>进行了PE管道的大田试验研究, 结果表明在没有安装伸缩节的情况下, PE管道在埋深0.7 m中的冻土层中越冬, 力学性能没有明显降低。管内及周围土体的温度是衡量管道工作状态最重要的指标, 数值模拟是分析温度分布一个重要手段, 如: 张科亮<sup>[6]</sup>采用数值模型模拟了不同埋深不同土质中给水管道以及周围土体的温度分布, 确定管道可以在-4~-5℃的冻土层内安全运行; 管岫峰等<sup>[7]</sup>采用类似的模拟方法计算了季节性温度变换影响下管道周围的温度场, 并分析得出新疆克拉玛依地区给水管道埋深可以减小到1.5 m。

收稿日期: 2017-07-04; 网络出版日期: 2018-04-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180413.1430.003.html>

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAD12B05)

作者简介: 白静(1986-), 女, 河南安阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事农田水利和河流动力学方面的研究。

E-mail: 625540202@qq.com

通讯作者: 谢崇宝(1965-), 男, 湖北襄阳人, 教授级高级工程师, 主要从事农田水利与饮水安全方面的研究。

E-mail: xchb@263.net

但现有的研究仅仅关注了管道埋深或者管内温度分布情况，并没有考虑管道埋设方式涵盖的其他防冻措施。在本文中采用物理模型试验的方法对比研究不同防冻措施(包括管道埋深、保温措施、回填措施和换填措施)条件下管内温度和管道变形情况，鉴于土壤含水量、地表温度是管道水温的影响因素<sup>[8-9]</sup>，在试验中严格控制土壤初始含水量和环境温度变化过程。由于在节水灌溉工程中，管道系统常在最低位置设置排水阀以排空水体，但受到地面不均匀沉降或者施工的影响，管道局部仍存在满管水的情况，这是季节性冻土区管道受冻破坏的常态。因此，本文中通过开展满管水冻融循环实验，分析不同因素对管道工作状态的影响，从而对比得出适宜的管道铺设模式。

2 试验管材遴选

在节水灌溉工程中使用的管道，根据材质的不同可以分为塑料管道、金属管道、混凝土管道、复合材料管道(如玻璃夹砂管道)和生物基质管道(如竹缠绕压力管道<sup>[10]</sup>)等。其中，塑料管道具有轻质高强、耐腐蚀、内壁光滑不结垢、施工和维修简便、使用寿命长等优点，在农业领域得到广泛应用。塑料管道的密度介于 0.95 ~ 1.4 g/cm<sup>3</sup> 之间，仅为钢管的 1/5 ~ 1/7，摩阻系数为 0.009 ~ 0.012 左右，使用寿命长达 50 年<sup>[6-7]</sup>。根据《中国塑料管道行业“十三五”期间(2016—2020)发展建议》中统计的数据，塑料管道在农业领域的应用量最大，2015 年应用量达到 400 万 t，应用比例达到 29.0 %<sup>[11]</sup>，见图 1。

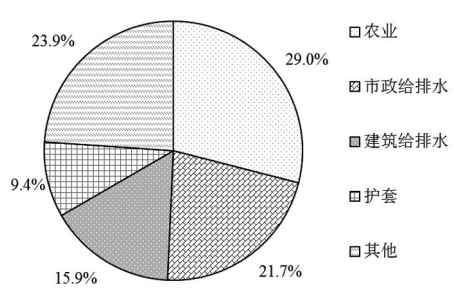


图1 2015年塑料管道应用领域

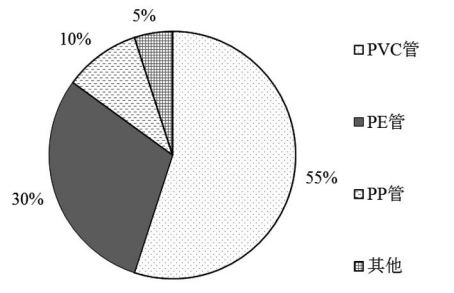


图2 塑料管道的分类及占比

根据塑料的种类可以分为：聚氯乙烯(PVC)管、聚乙烯(PE)管、聚丙烯(PP)管等，分别占塑料管道总用量的 55 %，30 %和 10 %，见图 2。因此可考虑在 PVC 管和 PE 管两大主流管道中确定管道选材。根据近几年我国节水灌溉建设与管理经验，在季节性冻土区，PE 管因其适应的工作温度范围比 PVC 管的更大，管材性能优越<sup>[12-14]</sup>，应用数量逐渐超过 PVC 管。因此，本文选择 PE 管道作为试验研究对象。

3 管道浅埋室内试验

3.1 试验方案设计 管道浅埋试验在黑龙江省水利科学研究院季节冻土区工程冻土重点实验室 1<sup>#</sup>低温试验室进行<sup>[15]</sup>。室内模型试验箱体尺寸(长×宽×高)为 4.5 m×3.0 m×1.5 m。

3.1.1 管道试验模型搭建 利用冻土热工模型的微分控制方程和边界条件，应用积分类比法进行相似分析，根据相似理论得到的相似准则有<sup>[16-17]</sup>

$$\pi_1 = \frac{l^2}{aT} \tag{1}$$

$$\pi_2 = \frac{Ql^2}{\lambda tT} \tag{2}$$

式中： $l$ 为几何尺寸； $a$ 为导温系数； $T$ 为时间； $Q$ 为单位体积水的潜热； $\lambda$ 为导热系数； $t$ 为温度。

则相似比尺需满足

$$\frac{c_l^2}{c_a c_T} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{c_Q c_l^2}{c_\lambda c_i c_T} = 1 \quad (4)$$

当模型和原型采用相同的介质情况下(原状土), 式(3)、式(4)可以进一步简化为<sup>[18-19]</sup>

$$c_i = 1 \quad (5)$$

$$c_l^2 / c_T = 1 \quad (6)$$

即模型试验中, 温度比尺 $c_i=1$ , 时间比尺 $c_T$ 是几何比尺 $c_l$ 的平方。考虑模型中PE管的长度和模型试验箱的尺寸, 确定模型试验的几何比尺为 $c_l=3$ , 则时间比尺为 $c_T=9$ 。

根据实际调查发现, 在东北地区建设的节水灌溉工程中, 埋管管道的尺寸主要有Dn63, Dn75, Dn90和Dn110等。在管道试验中选用原型尺寸为Dn90的PE管道, 其模型尺寸为Dn30。

根据2014—2015年哈尔滨室外的气温数据可知<sup>[20-21]</sup>, 冻融发展期(2014.11.12—2015.5.14)共计180 d, 期间日平均气温如图3中的散点所示。综合考虑实际气温的变化过程和可能不利因素, 室外概化日均温度曲线如图3中的黑实线所示, 温度变化范围为 $-20 \sim 20^\circ\text{C}$ , 分为4个不同的温度变化阶段: 降温阶段、持续低温阶段、升温阶段和持续高温阶段, 见表1。由于温度比尺 $c_i=1$ , 时间比尺 $c_T=9$ , 经过比尺变换后, 模型试验中环境温度设计变化过程见表2, 温度范围为 $-20 \sim 20^\circ\text{C}$ , 温度变化过程持续20 d, 共计480 h。

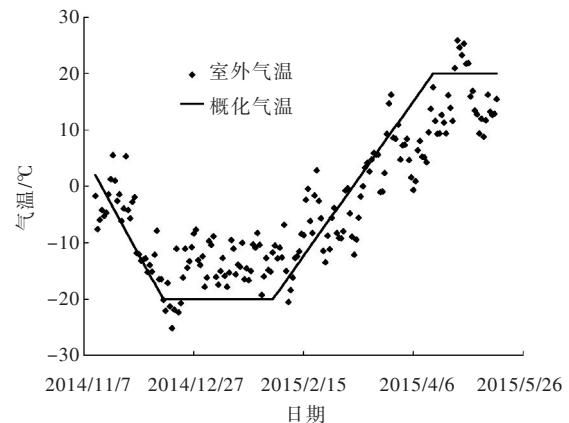


图3 野外冻土场日平均气温和概化曲线

表1 野外冻土场日均气温概化变化过程

| 编号 | 日期                    | 温度/ $^\circ\text{C}$ | 温度变化阶段 | 持续时间/d |
|----|-----------------------|----------------------|--------|--------|
| 1  | 2014.11.12—2014.12.13 | 2~-20                | 降温     | 32     |
| 2  | 2014.12.14—2015.1.31  | -20                  | 持续低温   | 47     |
| 3  | 2015.2.1—2015.4.15    | -20~20               | 升温     | 72     |
| 4  | 2015.4.16—2015.5.14   | 20                   | 持续高温   | 29     |

表2 模型试验设计环境温度变化过程

| 编号 | 时间/h        | 温度/ $^\circ\text{C}$ | 温度变化阶段 | 持续时长/h |
|----|-------------|----------------------|--------|--------|
| 1  | 0~85.3      | 2~-20                | 降温     | 85.3   |
| 2  | 85.3~210.7  | -20                  | 持续低温   | 125.4  |
| 3  | 210.7~402.7 | -20~20               | 升温     | 192    |
| 4  | 402.7~480   | 20                   | 持续高温   | 77.3   |

**3.1.2 试验方案** 管道温度相关研究表明, 管道的埋深、保温措施、地质条件是影响管道温度的最重要的因素<sup>[8]</sup>, 在地质条件确定的情况下, 管道的温度和变形量与管道的埋深、保温措施、管沟处理(包括管沟回填材料和管沟换填材料)有关。现有的研究成果中, 在山西西北山区和内蒙地区, PE管的推荐深度为 $0.7\text{ m}$ <sup>[3-5]</sup>, 在本文中考虑到田鼠活动深度、承载田间机械的影响和减少埋深降低投资的可能性, 管道的埋深选为2种, 即60 cm和80 cm。由于冻胀量和土体的粒径负相关<sup>[22]</sup>, 管沟考虑炉渣换填和砂土换填方式, 同时结合现有的研究成果确定回填和保温方式<sup>[23-25]</sup>。在试验中共设置6种试验工况(表3), 在试验中不考虑各因素的相关性, 对比不同的管道埋深、保温措施、回填措施、换填措施对管道工作状态的影响。试验中尺寸按照几何比尺3:1进行缩小, 管径均为30 mm, 管道长1.5 m, 首尾密封。考虑管道最不利的工作条件, 管道内为满管水流。试验工况的剖面示意图如图4所示, 管沟剖面自上而下依次是耕作层(地面~6.7 cm深的区域)、回填处理层(6.7 cm深~管道底部的区域)和换填处理层(管道底部~0.5 m深的区域)。除试验工况B6采用裸管外, 其它工况中管道周围包裹保温层, 厚2 cm。试验中土体、回填换填材料的初始含水率根据现场取土的含水量进行控制, 详见表4。

| 编号 | 工况 | 模型管径/mm | 模型管道埋深 $H$ /cm | 管道状态 | 防冻胀保温技术措施               |
|----|----|---------|----------------|------|-------------------------|
| 1  | B1 | 30      | 20             | 满管水流 | 砂土换填+EPS轻质土回填+聚苯乙烯管保温   |
| 2  | B2 | 30      | 26.67          | 满管水流 | 砂土换填+EPS轻质土回填+聚苯乙烯管保温   |
| 3  | B3 | 30      | 26.67          | 满管水流 | 炉渣换填+EPS轻质土回填+聚苯乙烯管保温   |
| 4  | B4 | 30      | 26.67          | 满管水流 | 砂土换填+珍珠岩散料轻质土回填+岩棉管保温   |
| 5  | B5 | 30      | 26.67          | 满管水流 | 砂土换填+珍珠岩散料轻质土回填+聚苯乙烯管保温 |
| 6  | B6 | 30      | 26.67          | 满管水流 | 炉渣换填+田间土回填+裸管           |

表4 模型不同深度处土体初始含水率

| 层号 | 深度/cm     | 含水率/% |
|----|-----------|-------|
| 1  | 0~3.33    | 19.96 |
| 2  | 3.33~6.67 | 21.61 |
| 3  | 6.67~10   | 20.85 |
| 4  | 10~50     | 19.12 |

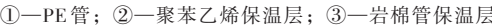


图4 试验工况横断面处理图(单位: cm)

(2)管道变形量: PE管变形监测主要包括管道的轴向变形监测和径向变形监测, 考虑到PE管外径较小, 仅为30 mm, 在每种工况中PE管道首尾0.5 m处布置2个横断面, 每个横断面设置3个测



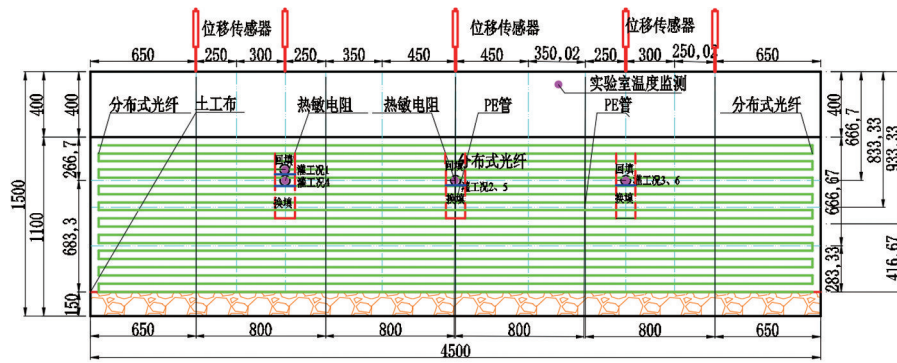


图5 模型试验剖面图 (单位: mm)

点, 每个测点布置3个电阻应变片, 3个电阻应变片的布置角度为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 方向, 管道横断面上电阻应变片的布置见图6。

#### 4 试验数据分析与讨论

实测环境温度变化曲线如图7所示, 从图中可以看出低温实验室内环境温度的控制精度为 $\pm 4^\circ\text{C}$ , 实际环境温度基本按照设计曲线进行变化。为了便于分析和讨论, 在本节中数据均经过比尺换算, 除了特殊说明外, 其大小均代表原型中的数值。试验土体冻深融深变化趋势与天然土体基本相同, 呈阶梯状, 最大冻深出现在持续升温阶段。砂土换填方式的最大冻深为2.19 m, 炉渣换填方式的最大冻深为2.24 m, 两种换填方式冻融发展曲线相近, 由此可见换填方式对冻融曲线的发展过程影响不大。砂土换填和煤渣换填方式中, 土体完全融化点分别位于 $H=1.5\text{ m}$ 和 $H=1.35\text{ m}$ 处, 在管道浅埋的情况下, 不会对灌溉造成影响。

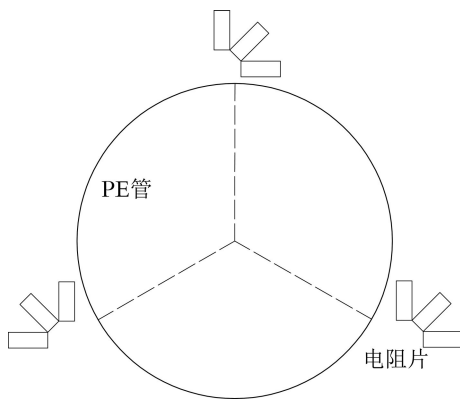


图6 电阻应变片布置示意

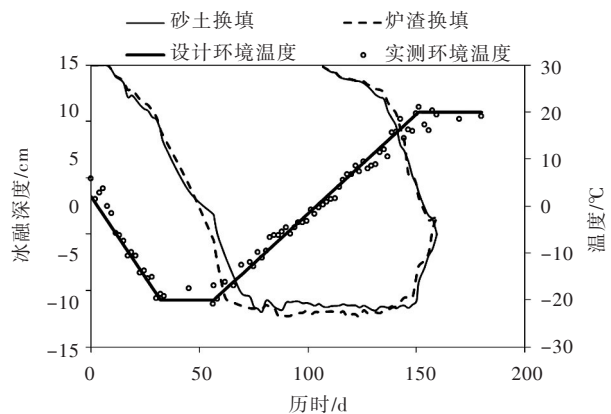


图7 环境温度和冻融深度变化曲线

**4.1 管内温度变化过程分析** 不同试验方案的管内温度变化曲线如图8所示。随着环境温度的变化, 管道内温度都经历先下降后上升的过程。不同试验方案的管内温度变化情况不尽相同。管道中的最低温度及发生时间、管道内的结冰时间将影响管道的性能, 管道内冰完全融化的时间则影响春季灌溉, 文中将采用这4个数值作为管道温度变化特征值进行统计分析, 结果详见表5。

(1)两种埋深的对比研究。通过对比工况B1和工况B2, 分析埋深对管内温度的影响。从图8和表5中可以看出, 在环境降温过程中, 工况B1管道内温度 $T_1$ 的下降速度最快, 表现为管道内温度 $T_1$ 曲线的坡度更陡。B2工况中管道内温度 $T_2 < 0^\circ\text{C}$ 持续100 d, 比B1工况多5 d。B1工况中管道内最低温度 $T_{1\min}$ 为 $-10.52^\circ\text{C}$ , 发生在第66天, B2管道内最低温度 $T_{2\min}$ 为 $-1.86^\circ\text{C}$ , 比 $T_{1\min}$ 高 $8.66^\circ\text{C}$ , 温度提高比

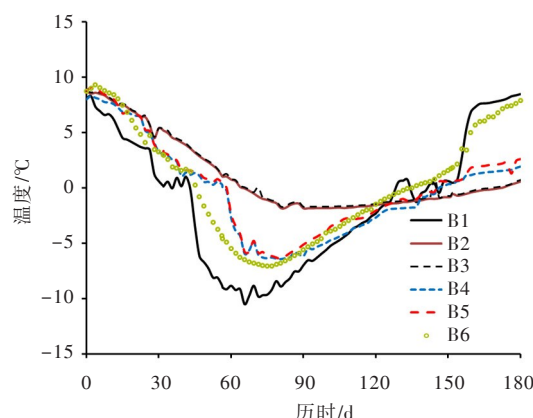


图8 不同管道埋设工况中管内温度变化曲线

表5 不同试验方案管内温度变化特征

| 工况       | 原型埋深<br>H/cm | 防冻措施                    | $T < 0^{\circ}\text{C}$<br>持续时间/<br>d | 最低温度                        |                | $T > 0^{\circ}\text{C}$<br>出现时间/<br>(次/d) |
|----------|--------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------|-------------------------------------------|
|          |              |                         |                                       | $T_{\min}/^{\circ}\text{C}$ | 出现时间/<br>(次/d) |                                           |
| B1       | 60           | 砂土换填+EPS轻质土回填+聚苯乙烯管保温   | 95                                    | -10.52                      | 66             | 148                                       |
| B2       | 80           | 砂土换填+EPS轻质土回填+聚苯乙烯管保温   | 100                                   | -1.86                       | 90             | 173                                       |
| B3       | 80           | 炉渣换填+EPS轻质土回填+聚苯乙烯管保温   | 95                                    | -1.72                       | 90             | 169                                       |
| B4       | 80           | 砂土换填+珍珠岩散料轻质土回填+岩棉管保温   | 84                                    | -6.45                       | 81             | 149                                       |
| B5       | 80           | 砂土换填+珍珠岩散料轻质土回填+聚苯乙烯管保温 | 82                                    | -6.32                       | 81             | 147                                       |
| B6       | 80           | 炉渣换填+炉渣回填+裸管            | 86                                    | -7.05                       | 76             | 137                                       |
| B2—B5 均值 |              |                         | 90                                    | -4.09                       | 86             | 160                                       |

例为 82 %，发生在第 90 天，比 B1 工况中延迟 24 d 出现。B1 管道内温度  $T_1$  持续高于  $0^{\circ}\text{C}$  开始于第 148 天，B2 管道内温度  $T_2$  连续高于  $0^{\circ}\text{C}$  开始于第 173 天，比 B1 工况延迟 25 d。从比较结果可以看出，在当前试验条件下，埋深对管内温度影响显著，当埋深增加时，由于管道上层覆土的保温作用增加，管内最低温度较高，在降温阶段管道内向周围土体传递的热量减少，管道内部温度滞后，在升温阶段周围土体向管道内部传导的热量减少，管道内冰体完全融化时间延迟。因此在实际工程中，为了提高管道最低温度，应考虑适当加大管道埋深。

(2) 不同换填方式的对比研究。通过对比工况 B2 和工况 B3，分析换填方式对管内温度的影响。从图 8 中可以看出，两种工况内管道温度变化趋势类似，只有略微不同。B3 工况中管道内温度  $T_3 < 0^{\circ}\text{C}$  持续时间为 95 d，比 B2 工况少 5 d。B3 工况中管道内最低温度  $T_{3\min}$  为  $-1.72^{\circ}\text{C}$ ，比工况 B2 中  $T_{2\min}$  高  $0.14^{\circ}\text{C}$ ，发生在第 90 天，与工况 B2 发生时间相同。B3 工况中管道内温度  $T_3$  持续高于  $0^{\circ}\text{C}$  开始于第 169 天，比 B2 工况提前 4 d。在当前回填保温措施条件下，炉渣换填方式的保温效果与砂土换填方式相当。

(3) 不同保温方式的对比研究。通过对比工况 B4 和工况 B5，分析保温方式对管内温度的影响。两种工况在降温阶段管道温度大体相当(图 8)。B4 工况中  $T_4 < 0^{\circ}\text{C}$  持续时间为 84 d，而 B5 工况中管道内温度  $T_5 < 0^{\circ}\text{C}$  持续时间为 82 d，与工况 B4 相当。工况 B4 中管道内最低温度  $T_{4\min}$  为  $-6.45^{\circ}\text{C}$ ，工况 B5 管道内最低温度  $T_{5\min}$  为  $-6.32^{\circ}\text{C}$ ，管内最低温度都发生在第 81 天。B4 管道内温度  $T_4$  持续高于  $0^{\circ}\text{C}$  开始于第 149 天，B5 管道内温度  $T_5$  连续高于  $0^{\circ}\text{C}$  开始于第 147 天，比 B4 工况提前 2 d。从比较结果可以看出，在当前试验条件下，聚苯乙烯管与岩棉管的保温效果相当。

(4) 不同回填方式的对比研究。通过对比工况 B3 与工况 B5，分析回填方式对管内温度的影响。工况 B5 中  $T_5 < 0^{\circ}\text{C}$  持续时间为 82 d，比工况 B3 短 13 d。工况 B5 管道内最低温度  $T_{5\min}$  为  $-6.32^{\circ}\text{C}$ ，比工

况 B3 高 4.6 ℃, 工况 B5 管道内温度  $T_3$  连续高于 0 ℃ 开始于第 147 天, 比工况 B3 提前 22 d。在当前试验条件下, EPS 轻质土回填措施比珍珠岩散料轻质土回填措施的管内升温明显。

(5) 保温措施与裸管的对比研究。工况 B6 采用炉渣换填、回填方式, PE 管没有保温措施, 裸管埋深为 80 cm, 参照同样埋深条件下并采取保温措施的工况 B2—B5 的均值进行评价。从图 8 和表 5 中可以看出, B6 工况中管道内温度  $T_3 < 0$  ℃ 持续时间为 86 d, 比工况 B2—B5 的均值少 4 d。B6 工况中管道内最低温度  $T_{6min}$  为 -7.05 ℃, 比工况 B2—B5 的最低温度的均值低 2.94 ℃, 发生在第 76 天, 比工况 B2—B5 的均值提前 10 d。B6 管道内温度  $T_6$  持续高于 0 ℃ 开始于第 137 天, 比工况 B2—B5 的均值提前 23 d。在当前试验条件下, 裸管的保温效果比采取保温层的工况管内最低温度降低了 2.94 ℃, 保温效果略差。

**4.2 管内温度与普通土体温度对比** 同一埋深处管内温度和普通土体温度的对比变化曲线如图 9 所示。通过管内外温度对比情况可以分析管道保温措施的性能, 在保温措施保温效果好的情况下, 管内温度滞后于土体内温度变化, 并且管内最低温度高于同期土体温度。在埋深  $H=60$  cm 处(工况 B1), 管内温度变化趋势与同期普通土体温度大体相当, 由于埋深浅, 管内温度与土体温度变化同步, 管内最低温度比同期土体温度最小值小 2.02 ℃, 管道防冻措施保温效果不大(图 9(a))。工况 B6 中, 由于只对管沟进行了炉渣的换填和回填处理, 在埋深  $H=80$  cm 处, 管内最低温度比普通土体略低, 管内温度变化没有明显滞后现象(图 9(f)), 这可能是由于炉渣粒径比普通土体大, 密度度较差造成的。

工况 B2 和 B3 中, 管内温度的变化过程均有明显的滞后现象, 即在降温 and 升温过程中, 管内的温度的变化速率小于土体温度变化速率, 管内最低温度分别比同期土体温度高 5.14 ℃ 和 6.15 ℃(图 9(b)(c))。在工况 B4 和 B5 中, 降温过程中管内温度的变化略滞后于土体温度, 管内最低温度分别比同期土体温度高 1.09 ℃ 和 0.35 ℃(图 9(d)(e))。对比分析 B3 和 B5 可以发现, 与珍珠岩散料轻质土回填措施相比, EPS 轻质土回填措施的保温效果更加明显。

**4.3 管道变形分析** 管道的变形直接影响到管道的安全。在土体冻融过程中, 管道会经历收缩和拉伸过程, 在初始降温阶段, 由于温度应力的存在, 管道首先表现为收缩变形, 且随着温度降低逐渐增加, 待到管道水结冰后, 由于冰体积膨胀, 管道由收缩变形逆变为拉伸变形, 此时管道变形曲线有一个明显的阶跃, 但受到土体的摩擦力作用和管道自身强度的双重作用, 管道的最大拉伸变形小于理论值, 管道的拉伸变形最大值均发生在环境温度上升的过程中, 见图 10(由于工况 B5 的管道变

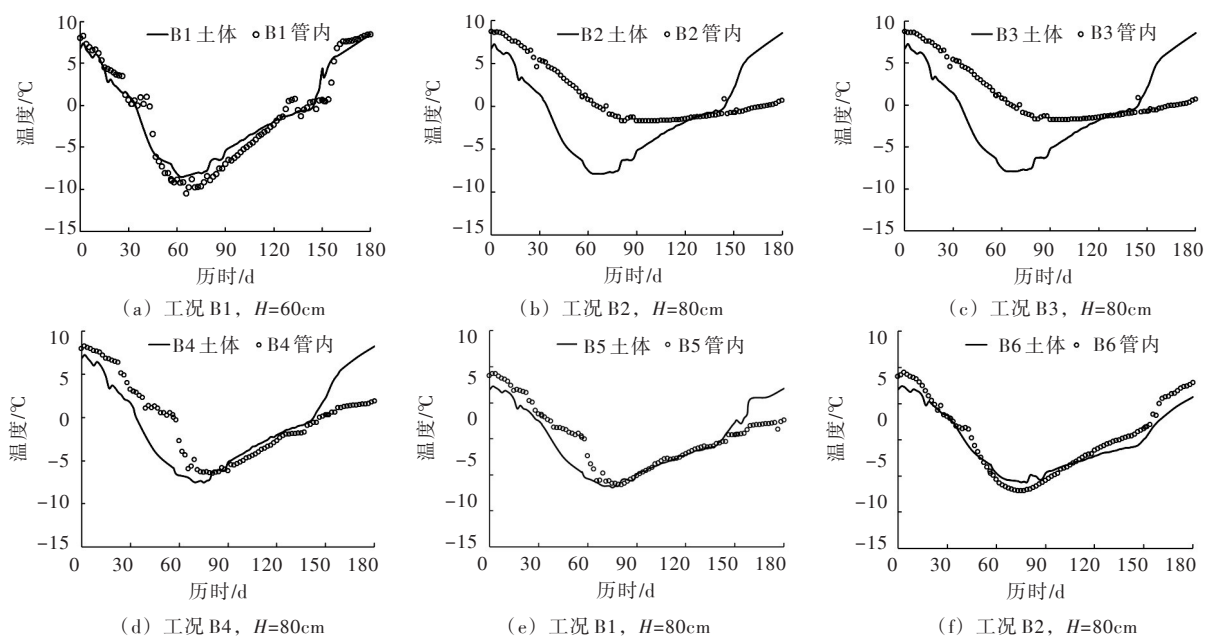


图 9 相同埋深处土体温度与管内温度变化曲线

形数据严重失真, 在分析中不予考虑)。从图 10 中可以看出同一个测点 3 个方向(0°、45°和 90°)的管道变形呈现一致的变化, 证明试验中 PE 管道的变形协调性良好。在现有试验条件下, 管道的变形都在规范要求的 5 % 安全标准内。但在不同的保温防冻措施条件下, 管道的变形各不相同, 将从管道的最大变形值、管道拉伸变形出现时间和持续时间对管道的保温防冻措施进行评价(表 6)。

(1)不同埋深条件下管道变形的对比研究。通过对比工况 B1(埋深 60 cm)和工况 B2(埋深 80 cm), 分析埋深对管道变形的影响。在工况 B1 中, 管道最大变形量为 177.15  $\mu\epsilon$ , 发生在试验中第 116 天, 拉伸变形始于第 45 天, 共持续 98 d。在工况 B2 中, 管道的最大变形为 75.27  $\mu\epsilon$ , 比工况 B1 小了 101.89  $\mu\epsilon$ , 减少比例为 58 %, 发生在试验中的第 124 天。拉伸变形始于第 92 天, 比工况 B1 晚出现 47 d, 共持续 69 d, 比工况 B1 少 29 d。对比结果表明, 在当前试验条件下, 管道埋深对管道的变形影响较大, 当埋深较深时, 管道的变形较小, 因此在实际工程中, 为了减少管道的变形, 应考虑适当加大管道埋深。

(2)不同换填方式条件下管道变形的对比研究。通过对比工况 B2 和工况 B3, 分析换填方式对管道变形的影响。在工况 B3 中, 管道的最大变形为 55.00  $\mu\epsilon$ , 比工况 B2 小了 20.27  $\mu\epsilon$ , 减小比例为 27 %, 发生在试验中的第 133 天。拉伸变形始于第 90 天, 比工况 B2 早出现 2 d, 共持续 83 d, 比工况 B2 多 14 天。在后期虽然拉伸变形持续的时间较长, 但不到 12  $\mu\epsilon$ 。对比结果表明, 在当前试验中相同的保温回填和埋深条件下, 与砂土换填条件相比, 炉渣换填时, 管道的变形较小, 在管道拉伸变形持续过程中, 管道的拉伸变形量增速较小, 没有明显的突变现象, 整体上炉渣换填的效果略好于砂土换填, 可能是炉渣的摩擦力大造成的。

(3)保温措施与裸管的对比研究。将工况 B6 与工况 B2—B4 平均值进行对比分析, 评价只进行炉渣换填和回填的效果。工况 B2—B4 平均情况为: 管道的最大变形为 67.84  $\mu\epsilon$ , 发生在试验中的第 122 天, 拉伸变形始于第 84 天, 共持续 71 d。在工况 B6 中, 管道的最大变形为 97.36  $\mu\epsilon$ , 在管道的允许变形范围内, 比工况 B2—B4 平均大 29.52  $\mu\epsilon$ , 发生在试验中的第 83 天, 拉伸变形始于第 66 天, 比工况 B2—B4 平均早发生 18 d, 共持续 69 d, 比工况 B2—B4 平均短了 2 d。在当前试验条件下, 采用裸管

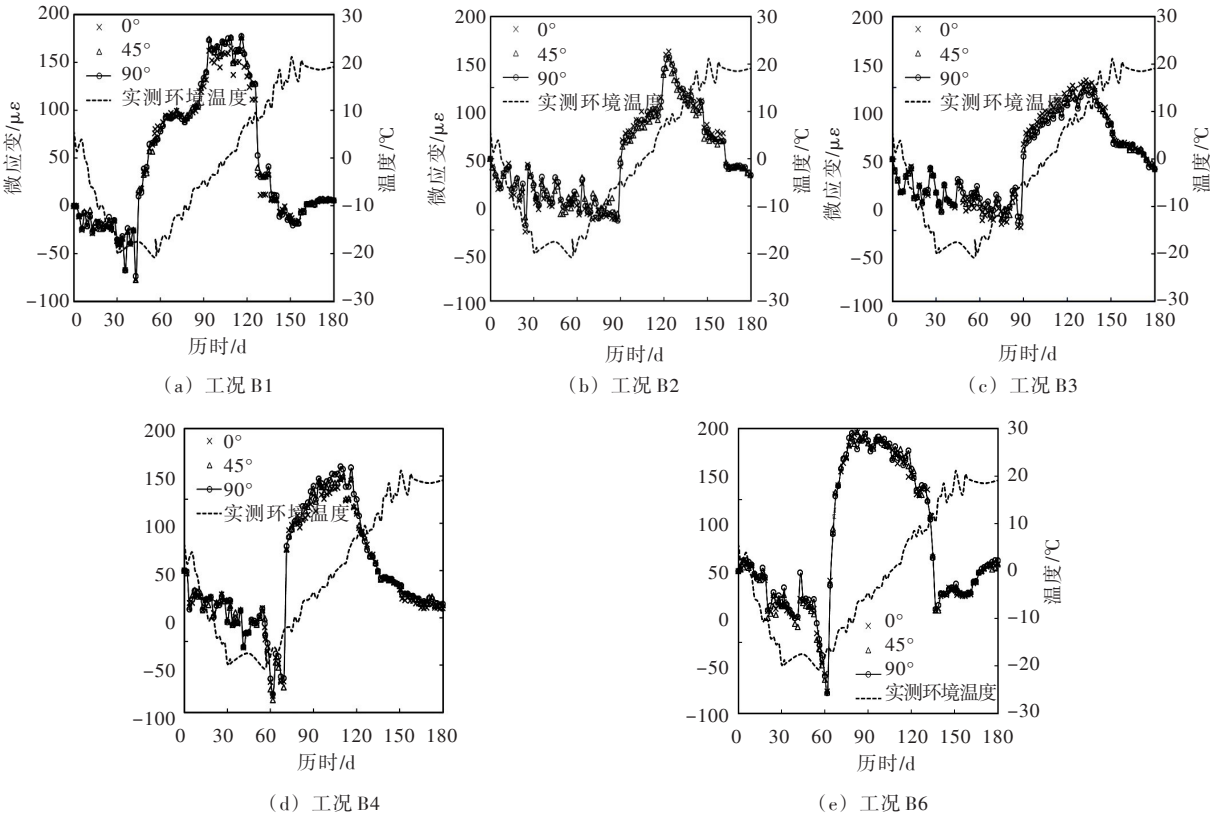


图 10 不同工况条件下管道应变变化曲线



表6 不同试验方案管道中变形变化特征

| 工况      | 原型埋深 $H$ /<br>cm | 防冻<br>措施              | 最大变形                               |                | 拉伸变形<br>出现时间/<br>(次/d) | 拉伸变形<br>持续时间/d |
|---------|------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------|------------------------|----------------|
|         |                  |                       | $\varepsilon_{max}/\mu\varepsilon$ | 出现时间/<br>(次/d) |                        |                |
| B1      | 60               | 砂土换填+EPS轻质土回填+聚苯乙烯管保温 | 177.15                             | 116            | 45                     | 98             |
| B2      | 80               | 砂土换填+EPS轻质土回填+聚苯乙烯管保温 | 75.27                              | 124            | 92                     | 69             |
| B3      | 80               | 炉渣换填+EPS轻质土回填+聚苯乙烯管保温 | 55.00                              | 133            | 90                     | 83             |
| B4      | 80               | 砂土换填+珍珠岩散料轻质土回填+岩棉管保温 | 73.25                              | 109            | 71                     | 62             |
| B6      | 80               | 炉渣换填+炉渣回填+裸管          | 97.36                              | 83             | 66                     | 69             |
| B2-B4均值 | 80               |                       | 67.84                              | 122            | 84                     | 71             |

的效果与工况 B2—B4 平均值相比,保温效果略差,管道的最大变形增加。

## 5 结论

本文进行了一系列室内 PE 管道浅埋试验,通过模拟外界环境温度变化过程,比较不同条件下 PE 管道工作状态。试验结果表明:管道埋深对 PE 管内工作温度和管道变形影响显著,埋深 80 cm 时 PE 管内最低温度为  $-1.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,比埋深 60 cm 时增加 82 %,埋深 80 cm 时 PE 管道拉伸变形量为  $75.27\text{ }\mu\varepsilon$ ,比埋深 60 cm 时减少 58 %,因此实际工程中考虑 80 cm 的埋深。

管道换填方式和保温方式对管道内的温度和结冰时间影响不显著。炉渣换填方式中管道的最大变形为  $55.00\text{ }\mu\varepsilon$ ,比砂土换填减小 27 %,并且管道拉伸变形没有明显突变,推荐炉渣换填方式,管道不设保温层。

回填方式对管内温度影响较大, EPS 轻质土回填时管内最低温度为  $-1.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,比珍珠岩散料轻质土高 72 %。管道在只进行炉渣换填和回填处理时,可以达到较好的防冻效果,与复杂工况(换填措施+回填措施+保温层)相比保温效果略差,管内最低温度减小  $2.94\text{ }^{\circ}\text{C}$  和管道最大变形增加了  $29.52\text{ }\mu\varepsilon$ 。

考虑工程施工便捷性、建设工期和工程投资等因素,田鼠活动层的影响和承载大型农业机械的需要,在黑龙江等季节冻土区(冻深  $<2.3\text{ m}$ ) PE 管推荐采用 80 cm 的埋深。在具有冻胀特征的区域,优先推荐采用炉渣换填和回填措施,也可因地制宜采用砂土换填和回填措施。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] CHENG G . Permafrost studies in the Qinghai-Tibet plateau for road construction[J] . Journal of cold regions Engineering, 2005, 19(1): 19-29 .
- [ 2 ] EIGENBROD K D . Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils[J] . Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(4): 529 - 537 .
- [ 3 ] 陈宝明,陈若霆.寒冷地区低压输水灌溉管道的适宜埋深[J].水利水电技术,1994(7): 47-52 .
- [ 4 ] 郭新禧.晋北地区 PE 塑料管道浅埋试验研究[J].中国农村水利水电,1998(2): 35-36 .
- [ 5 ] 解放庆,白小丹,郭新禧.晋北高寒地区 PE 塑料灌溉管道浅埋方法[J].山西水利,1998(1): 24-26 .
- [ 6 ] 张科亮.寒区地下输水管道合理埋置深度的研究[D].石河子:石河子大学,2013 .
- [ 7 ] 管岫峰,刘建军,李伟,等.季节性冻土区给水管道周围温度场与埋深的数值模拟及分析[J].石河子大学学报(自然科学版),2015, 33(3): 362-367 .
- [ 8 ] 陈继,李昆,盛煜,等.季节冻土区埋地管道水温的变化规律及其影响因素分析[J].冰川冻土,2014, 36(4): 836-844 .
- [ 9 ] 赵树炳,赵振兴,张志强,等.多年冻土区埋地管道保温方案的设计与有限元分析[J].油气储运,2015, 34(1): 86-89 .
- [ 10 ] 王戈,邓健超,陈复明,等.竹缠绕复合压力管的研究与开发[J].林业科学,2016, 52(4): 127-132 .

- [ 11 ] 中国塑料加工工业协会塑料管道专业委员会. 中国塑料管道行业“十三五”期间(2016–2020)发展建议[R]. 2016年4月.
- [ 12 ] 潘刚. 高密度聚乙烯管材(PE管)在节水灌溉中的应用[J]. 浙江水利科技, 2007(5): 85–86.
- [ 13 ] 刘建平, 方廉. PVC热稳定剂的现状与发展[J]. 中国塑料, 2001(1): 15–18.
- [ 14 ] 张巧真, 张晓安, 谢晓宇. 聚氯乙烯管材的发展概况及趋势[J]. 河南化工, 2005, 22(10): 15–16.
- [ 15 ] 钟华, 曲祥民, 张滨, 等. 冻土力学模型试验台的开发与应用[J]. 黑龙江水利, 2015(3): 18–21.
- [ 16 ] 靳德武, 牛富俊, 陈志新, 等. 冻土斜坡模型试验相似分析[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 29–32.
- [ 17 ] 赵刚. 寒区高等级公路路堑边坡春季浅层滑塌机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [ 18 ] 丁德文, 罗学波. 冻土热工模型实验的理论基础[J]. 科学通报, 1979, 24(8): 360–364.
- [ 19 ] 丁德文. 试论冻结过程的物理本质及研究方法[J]. 冰川冻土, 1983, 5(4): 19–26.
- [ 20 ] 钟华, 张滨, 汪恩良, 等. 冻土远程实时监测软件系统的开发与应用[J]. 黑龙江水利, 2015, 1(10): 8–12.
- [ 21 ] 汪恩良, 张安琪, 包天鹅, 等. 寒区不同材质垂直埋管土壤冻结深度测量差异性分析[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 86–95.
- [ 22 ] 周家作, 韦昌富, 李东庆, 等. 饱和粉土冻胀过程试验研究及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 485–495.
- [ 23 ] 赵艳华. 高寒地区给水管道浅埋应用聚苯乙烯保温的实践[J]. 内蒙古水利, 2004(2): 92–93.
- [ 24 ] 姜洪义, 殷仲海. 无机胶粉料聚苯乙烯颗粒保温隔热材料的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(3): 1–3.
- [ 25 ] LI Y, LIU G, ZHANG B. Application of Polyethylene Foam in Hydraulic Engineering of Frigid Regions[C]//Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics GEO Asia. Korea, 2004: 918–923.

## Research on anti-freezing pattern of shallow buried pipe by replacement filling of pipe trench in seasonal frozen area

BAI Jing<sup>1</sup>, XIE Chongbao<sup>1</sup>, WU Zhiqin<sup>2</sup>

(1. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China;

2. Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Pipeline is an important part of water-saving engineering in well irrigation area. The laying mode of pipelines will directly affect investment and construction progress of water-saving engineering, and have significant influence on its efficiency and service life directly. A series of shallow buried pipeline experiments was conducted in a low temperature laboratory in the paper, temperature in pipelines and pipe deformations were obtained dynamically in a cycle of freezing and thawing condition. The influences of different pipeline buried depth, heat preservation measures, replacement filling on pipe working condition were analyzed through comparative study. As for temperatures in pipe, deep replacement mode and heat preservation facilities had little effect on the temperatures within pipelines, while buried depth and backfilling measures temperature had significant influence on the internal temperatures of pipelines. The internal temperatures were increased when pipelines are buried deeper. The heat preservation function of EPS lightweight soil was better than that of perlite powder mixed soil. In terms of pipeline deformation, the performance of deep replacement via slag was superior to that of similar measurement by sand. Pipe deformation decreased obviously after increasing pipeline buried depth. Compared with working condition of complex processing, replacement measures of pipe trench by slag could be achieved similar anti-freezing effect. In view of machinery needs and the operability of anti-freezing measures, the paper recommended 80 cm pipe buried depth and slag replacement in pipes where the frozen depth is less than 2.3m.

**Keywords:** seasonal frozen area; PE pipe; shallow buried mode; replacement filling

(责任编辑: 李福田)