

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.008

# U型伴热管输水管道对高寒地区冻土温度影响模拟

贾海锋<sup>1</sup>, 杨宝生<sup>2</sup>, 蔡汉成<sup>1</sup>, 杨晓明<sup>1</sup>, 赵俊光<sup>3</sup>, 付菊平<sup>4</sup>

(1. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国中铁新疆区域工程建设指挥部, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 中铁四局集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘 要:** 为了保证高寒地区分散居民埋地供水管道不冻结,防止周围冻土因管道散热而融化,造成埋地管道下沉损坏,使用U型管作为伴热管,考察其防冻保温效果。通过数值分析方法研究了U型伴热管对输水管和冻土层温度的影响。结果表明,U型伴热管伴热保温效果良好,在所研究的参数范围内,U型伴热管的进出口温差最大约为8℃,最小约为1℃。以管道长度为50 m和120 m的数值模拟数据为基础,通过U型伴热管去程和回程温差,预测U型伴热管出口处温度降到冰点以下时对应的输水管道长度分别为587 m和638 m。最后拟合得到了冻土层的最高温度关联式,通过此关联式可以获得不同的U型伴热管进口温度和进口流速的极限值,从而保证冻土层不被融化。

**关键词:** 高寒地区; 输水管道; U型伴热管; 温度

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0049-07

## Numerical Simulation Analysis of the Effect of U-shaped Heat Tracing Water Pipeline on Permafrost Temperature in Alpine Region

JIA Hai-feng<sup>1</sup>, YANG Bao-sheng<sup>2</sup>, CAI Han-cheng<sup>1</sup>, YANG Xiao-ming<sup>1</sup>,  
ZHAO Jun-guang<sup>3</sup>, FU Ju-ping<sup>4</sup>

(1. China Railway Northwest Research Institute Co. Ltd., Lanzhou 730000, China; 2. China Railway Xinjiang Regional Engineering Construction Headquarters, Urumqi 830000, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 4. China Railway Fourth Bureau Group Co. Ltd., Hefei 230000, China)

**Abstract:** In order to ensure that the buried water supply pipeline for scattered residents in alpine region does not freeze and to prevent the surrounding permafrost from melting due to heat dissipation of the pipeline and causing sinking damage to the buried pipeline, U-type pipes were used as heat tracing pipes to investigate their anti-freezing and heat preservation effects. Through the method of numerical analysis, the influence of U-type heat tracing pipe on the temperature of water pipeline and permafrost layer was studied. The results showed that the U-type heat tracing pipe had good effect of heat tracing and heat preservation; the maximum temperature difference between the import and export of the U-type heat tracing pipe was about 8℃ and the minimum was about 1℃ in the range of the studied parameters. Based on numerical simulation data of pipe lengths of 50 m and 120 m, the corresponding supply pipe lengths

基金项目: 中国中铁新疆区域工程建设指挥部科技研发项目(2019004)

通信作者: 贾海锋 E-mail: 3208034588@qq.com

were predicted to be 587 m and 638 m when the temperature at the outlet of U-shaped heat tracing pipe dropped below freezing point, through the temperature difference between the inlet and outlet of U-shaped heat tracing pipe. The maximum temperature correlation of the permafrost layer was obtained, and the limit values of the inlet temperature and the inlet flow rate of the U-type heat tracing pipe could be obtained by this correlation. Thus, it could ensure that the permafrost layer would not be melted.

**Key words:** alpine region; water pipeline; U-shaped heat tracing pipe; temperature

给排水管道常见的敷设有架空和直接埋地两种方式。在一些特殊场合,如考虑战备安全的车站和营地,管道埋地敷设成为主要方式。在高寒地区,埋地敷设给水管道时常将其埋设于土壤冻土深度之下进行防冻。但在一些冻土深度较大或永久冻土地区,埋地管道的防冻成为一个难题。在永久冻土区,给排水管道埋地敷设会带来两个问题:一是管道中介质通过管道向外界传热会使冻土融化而导致土壤失去承载能力,引发管道下沉破坏;二是由于管道周围土壤处于负温条件,管道不断通过土壤损失热量,造成管道中介质冻结进而丧失输运功能。因此,在永久冻土地区,埋地输水管道既要伴热防冻,又要防止因伴热热量损失造成冻土融沉。目前,管道伴热常见方式为伴管伴热、夹套管伴热、电伴热等<sup>[1-3]</sup>。管道热量损失控制一般采用管道保温技术,针对管道伴热保温方面研究,国内外学者取得了一些成果。周卫红<sup>[4]</sup>对沥青长距离输送过程中的伴热保温设计进行了研究,对比了夹套管伴热、外伴管伴热、蒸汽外管伴热和电伴热4种方法,建议根据现场的实际情况,选择适合项目的伴热保温方法。薛杰华<sup>[5]</sup>和牟元生等人<sup>[6]</sup>对蒸汽伴热与电伴热进行了对比分析,发现相对于电伴热而言,蒸汽伴热的投资较低,但运行成本较高,建议根据当地对伴热方式的运行时间要求进行选择,综合性地降低投资成本。Kayfeci<sup>[7]</sup>对5种不同的保温材料进行测试,发现采用羊毛作为保温材料的效果最好,而玻璃纤维的保温效果最差。赵树炳等人<sup>[8]</sup>建立了冻土区的埋地管道传热物理模型,分析了不同保温材料(聚酚醛、硬质聚氨酯泡沫塑料、软质聚氨酯泡沫塑料)的保温效果,结果表明聚酚醛材料的保温效果最好。白静等人<sup>[9]</sup>在低温实验室进行了PE管浅埋模型试验,结果表明不同换填和保温措施对管道内温度影响不大,而埋深和回填措施对管道内温度影响显著。陈继等人<sup>[10]</sup>采用仿三维数值方

法建立了管道水温的计算模型,讨论了土壤含水量、地表温度、管道埋深等6个主要因素对埋地管道最不利水温的影响。分析结果显示,无论上述因素如何变化,管道最不利水温均随着输送距离的增加而下降。Khoshkhoo等人<sup>[11]</sup>研究发现,埋地管道热损失在瑞利数比较高的情况下,自然对流的影响可以忽略不计。

伴管伴热是与被伴热管路或部件平行或环绕铺设管道,管道内一般以低压蒸汽或热水作为介质,通过热传递对管路或设备进行保温。伴管伴热施工成本较低,但其伴热接触面积较小,加热效果差,热能损失大,利用率低,且要求有较可靠蒸汽源,一般适合对温度要求不高的场合。电伴热是将电能转化为热能,在管道和设备外部通过热传递进行热补偿,从而实现设备的保温防冻。电伴热的优点是运行管理方便,施工便捷,但其以消耗高品位电能产热,热量损失也较大。综上所述,大多数管道伴热研究主要针对石油化工原料和产品的输运,管道保温集中于保温材料效果和管道热量损失影响。然而,针对多年冻土区埋地管道既要求管道防冻又要防止热量散失对冻土稳定造成影响的研究尚未有报道,且高寒冻土地区零散建筑能源供给基础设施往往不完善,很难采用电伴热或蒸汽伴热的方法进行管道伴热防冻。因此,提出采用一种新型U型伴热管对高寒地区分散建筑给排水管道系统进行保温防冻。该技术利用太阳能作为热源,采用U型热水伴热管均匀释热,易于操作,节约化石能源,是一种很有潜力的节能降碳管道伴热技术。

## 1 项目概况及管中管伴热模型

### 1.1 项目基本情况

某实际项目地处青藏高原,海拔4 800 m,属于永久冻土区,冻土温度年平均值为 $-2.7^{\circ}\text{C}$ ,年平均气温为 $-5.8^{\circ}\text{C}$ 。项目最大设计供水能力为 $30\text{ m}^3/\text{h}$ ,输水管道总长度为1 200 m,管道保温外表面设计温

度维持在 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,管内介质温度为 $5\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,设计管道埋深为 $0.5\text{ m}$ 。在最不利情况下(流量为零时),管道不允许冻结,同时管道周围冻土温度不得高于零度。针对项目要求,提出一种新的管中管伴热管道防冻技术。具体如下:输水管采用de110的PPR 硬质发泡聚氨酯保温管,输水管中内置两根de20的PPR 管道,两根伴热管末端连接构成一供一回的U型伴热管;分为4段进行管中管伴热,每段为一个独立伴热单元,长度为 $300\text{ m}$ ,主要包括热水伴热热源——太阳能集热器、储热换热水箱、本段输水管道和U型伴热管、伴热管循环泵。

利用数值模拟的方法详细研究了U型伴热管对输水管道及冻土层温度的影响。在U型伴热管进口温度不变时,分析比较了不同进口流速对U型伴热管温度的影响,并且针对不同管道长度,预测了输水管温度降到冰点以下时对应的管道长度;在不同进口温度和流速下,拟合了冻土层最高温度与U型伴热管流速和进口温度的函数关系式。最后将研究成果应用于实际项目,验证其科学性。

1.2 管中管伴热结构与模型

每段管道伴热几何模型如图1所示。最外侧是管道周围的冻土层,输水管为de110的PPR 保温管,保温层为发泡聚氨酯,厚度为 $30\text{ mm}$ ,以减小输水管散失热量。输水管内部安装一组与本段输水管长度基本相当的U型管作为伴热管(布置角度 $\theta$ 为 $30^{\circ}$ ),管道材料为PPR,管壁厚度为 $2.5\text{ mm}$ 。输水管和U型伴热管中的流体介质均为水。

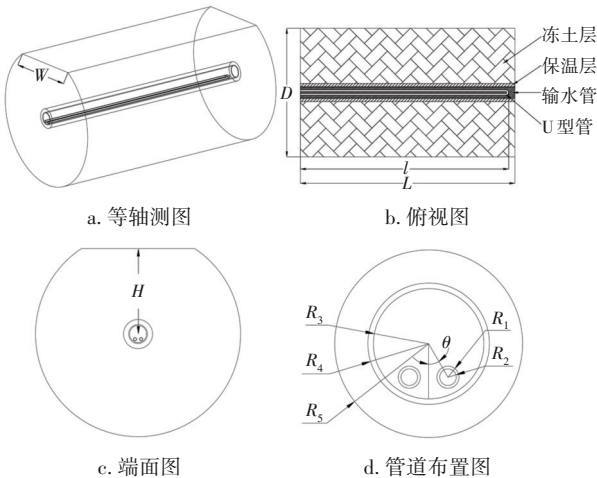


图1 管中管伴热几何模型

Fig.1 Geometric model of pipe-in-pipe heat tracing

考虑模拟计算资源需求问题,将实际工程 $300\text{ m}$ 管道缩短为 $50\text{ m}$ 和 $120\text{ m}$ 进行模拟,因输水管内流体静止时为输水管冻结最不利工况,因此模拟中不考虑输水管道介质流动。模型的具体尺寸见表1。根据相似准则,在 $50\text{ m}$ 和 $120\text{ m}$ 管长基础上得到的数据进行回归分析,其结果同样适用于原模型。

表1 模型尺寸参数

Tab.1 Model size parameters mm

名 称	尺寸	名 称	尺寸
输水管长度 $L$	50 000	U型管内径 $R_1$	7.5
U型管长度 $l$	49 940	U型管外径 $R_2$	10
模拟冻土直径 $D$	600	输水管内径 $R_3$	50
冻土外表面宽度 $W$	500	输水管外径 $R_4$	55
管道埋深 $H$	500	保温层外径 $R_5$	85

项目采用输水管内置的伴热管伴热方式可以最大限度地利用伴热管热量,防止了传统管外伴热热量损失对冻土升温影响;并且一供一回的U型PPR 伴热管与单根直管伴热管相比,U型伴热管回水管仍然在输水管道内,不用单独考虑回水管的保温问题;同时U型伴热管与输水管道内介质的换热较好,热媒出口温度低,减少了热量损失。所用材料的物性参数如表2所示。

表2 各材料的物性参数

Tab.2 Physical parameters of each material

项 目	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	比热/ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	导热系数/ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
水	998	4 183	0.60
PPR	900	1 900	0.21
发泡聚氨酯	42	779	0.025
冻土	2 040	839	1.93

2 网格划分

模型采用多面体网格分多区域划分,整个模型网格数量为 $2\,315\,484$ 。多面体网格生成方便快捷,对复杂外形适应性好。它具有多个相邻单元,与四面体网格相比,能够更好地近似梯度。即使靠近线和角,一个多面体单元也可能有几个相邻的单元,从而可以合理地预测梯度和流动分布。

主要计算区域分为流体区域和固体区域,流体和固体接触面使用共节点的网格方式。由于U型管结构过于细长,长宽比达到上千倍,该部分网格尺寸要控制在管壁厚度以内,且U型管弯管处流体流速变化剧烈,故在弯管处对网格做细化处理,整个



网格如图2所示。

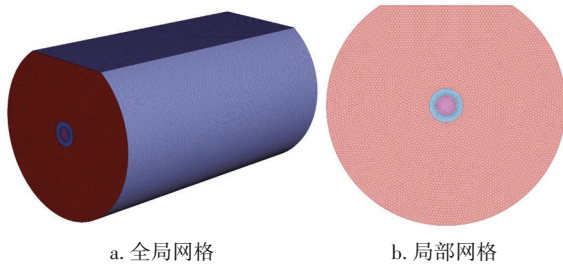


图2 数值模拟模型网格示意

Fig.2 Mesh schematics of numerical simulation model

### 3 控制方程及边界条件

#### 3.1 控制方程

U型伴热管进口为速度入口边界条件,沿 $z$ 方向流动,且设置一定的初始温度;出口为压力出口边界条件,根据流体黏度、流速以及模型的特征长度计算雷诺数,选择层流或湍流模型。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $u_i$ 为流体速度,  $\text{m/s}$ ;  $u_k$ 为流体在三个方向的分速度,  $\text{m/s}$ ;  $C_p$ 为流体比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$ 为流体温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$ 为流体的传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

#### 3.2 边界条件

保温层表面、输水管表面和U型管表面采用耦合换热边界条件,无需指定壁面温度。冻土层外表面和内表面分别设置成等壁温边界条件,考虑到冻土层外表面与空气接触,除了给定壁面温度,还需给定自然对流换热系数。其余端面给定为绝热边界条件即可。

速度进口边界条件:

$$\begin{cases} w(x, y, z)_{\text{in}} = w_{\text{in}} \\ u(x, y, z)_{\text{in}} = v(x, y, z)_{\text{in}} = 0 \\ T(x, y, z)_{\text{in}} = T_{\text{in}} \end{cases} \quad (4)$$

压力出口边界条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} = \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial z} = \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial P(x, y, z)}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

冻土层表面等壁温边界条件:

$$\begin{cases} u(x, y, z) = v(x, y, z) = w(x, y, z) = 0 \\ T(x, y, z)_{\text{w}} = T_{\text{w}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P$ 为压力,  $\text{Pa}$ ;  $u, v, w$ 为 $x, y, z$ 方向上的速度,  $\text{m/s}$ ;  $T_{\text{in}}$ 为进口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{w}}$ 为壁面温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 4 结果与分析

#### 4.1 进口流速对伴热管温度的影响

在进口温度为 $20^{\circ}\text{C}$ 的条件下,随着进口流速的增加,出口温度逐渐上升,U型伴热管进出口温差逐渐减小。当流速为 $0.05 \text{ m/s}$ 时,U型伴热管进出口温差最大,约为 $8^{\circ}\text{C}$ ;当流速为 $0.15 \text{ m/s}$ 时,U型伴热管进出口温差约为 $3.7^{\circ}\text{C}$ ;流速为 $0.3 \text{ m/s}$ 时,U型伴热管进出口温差约为 $1.6^{\circ}\text{C}$ ;流速为 $0.5 \text{ m/s}$ 时,U型伴热管进出口温差最小,约为 $1^{\circ}\text{C}$ 。不同流速下,U型伴热管中心位置处的平均温度变化见图3。

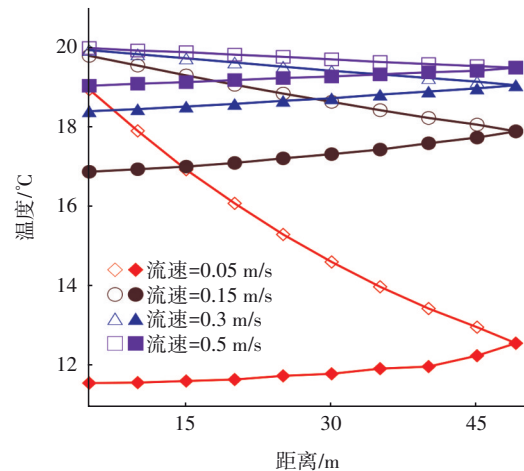


图3 U型伴热管横截面温度变化曲线

Fig.3 Temperature change curve of U-shaped heat tracing pipe cross-section

U型伴热管可以分为去程和回程,不同流速下去程和回程温度沿管道长度增加而逐渐降低,在U型伴热管出口降至最低。此外,随着U型伴热管进口流速的增加,去程和回程温度都增加。流速为 $0.05 \text{ m/s}$ 时,U型伴热管末端温度最低,约为 $12.6^{\circ}\text{C}$ ;流速为 $0.5 \text{ m/s}$ 时,U型伴热管末端温度最大,约为 $19.4^{\circ}\text{C}$ ,两者之间相差了 $6.8^{\circ}\text{C}$ 。随着流速的增加,伴热管单位时间内质量流率增加,提供

的热量增大,去程和回程温差随之减小。当流速为0.05 m/s时,去程和回程最大温差约为7.3℃;当流速为0.15 m/s时,去程和回程最大温差约为3℃;当流速为0.3 m/s时,去程和回程最大温差约为1.5℃;当流速为0.5 m/s时,去程和回程最大温差约为0.9℃。

由图3还可以发现,不同流速下U型伴热管中的温度沿管长近似呈线性下降趋势,所以通过此规律可以预测U型伴热管出口温度降到冰点以下时的管道长度。如果U型伴热管内温度降到冰点以下,则会导致输水管温度降低到冰点以下,进而发生冻结。因此为保证输水管内不结冰,U型伴热管的进口流速及伴热管长度均有一定限制。

#### 4.2 最大伴热距离的确定

U型伴热管进口温度为20℃、进口流速为0.3 m/s时,不同模拟管长条件下的最大伴热距离模拟结果如图4所示。当模拟管道长度为50 m时,通过拟合关系式预测U型伴热管出口处温度降到冰点以下时的管道长度约为587 m;模拟管道长度为120 m时,通过拟合关系式预测U型伴热管出口处温度降到冰点以下时的管道长度为638 m。随着模拟管道长度的增加所预测的管道长度也有所增大,这是因为管道越长,管道后端散失的热量越少,因此长度增大。所以,采用有限的数值模拟管长所预测的管道最大长度要比实际长度小,得到的数值相对保守,在实际工程应用中偏于安全。

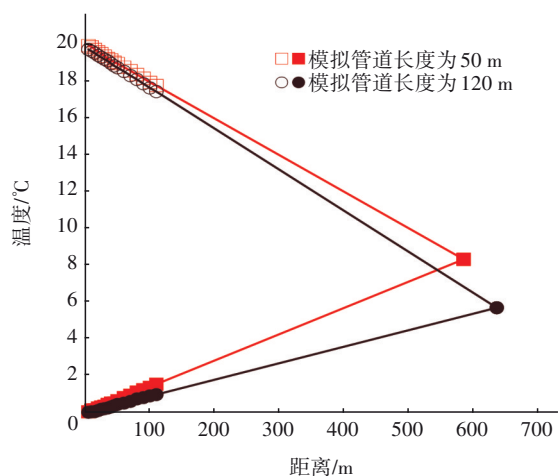


图4 U型伴热管进口温度为20℃时不同模拟管道长度下的最大伴热距离

Fig.4 Maximum heating distance under different simulated pipe lengths at 20℃ inlet temperature of U-type heat tracing pipe

#### 4.3 进口流速对输水管温度的影响

图5是不同U型伴热管进口流速下,输水管内平均温度和最低温度沿长度的变化。输水管内平均温度和最低温度都沿着管道长度逐渐降低,且随着进口流速的增加,温差减小,输水管道内温度均匀度增大。当流速为0.05 m/s时,输水管平均温度和最低温度分别下降了2、1.9℃;当流速为0.15 m/s时,输水管平均温度和最低温度分别下降了0.33、0.26℃;当流速为0.3 m/s时,输水管平均温度和最低温度分别下降了0.09、0.05℃;当流速为0.5 m/s时,输水管平均温度和最低温度仅分别下降了0.04、0.03℃。因此可根据对输水管内温度均匀性的要求,选择不同的U型管进口速度。

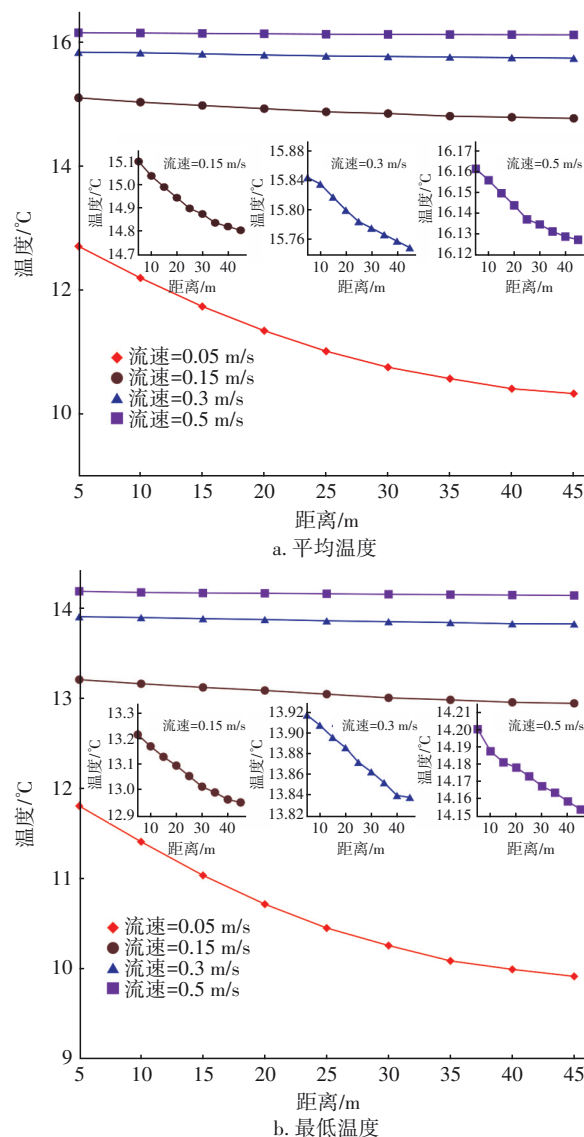


图5 输水管沿管长温度变化曲线

Fig.5 Variation curve of pipe temperature

#### 4.4 进口流速对冻土层温度的影响

图6是不同进口流速下冻土层的最高温度变化规律。与输水管内变化规律一致,冻土层的最高温度沿管长同样呈下降趋势,且随着流速的增加,冻土层最高温度逐渐增加,而温差逐渐减小。当流速为0.05 m/s时,冻土层的最高温度下降了0.189℃;当流速为0.15 m/s时,冻土层的最高温度下降了0.03℃;当流速为0.3 m/s时,冻土层的最高温度下降了0.017℃;当流速为0.5 m/s时,冻土层的最高温度下降了0.014℃。由此可见,在整个输水管的长度范围内冻土层最高温差的变化较小。冻土层的最高温度主要受到U型伴热管进口速度和温度的影响,存在U型伴热管进口速度和温度的合理组合使得冻土层的最高温度不超过0℃。

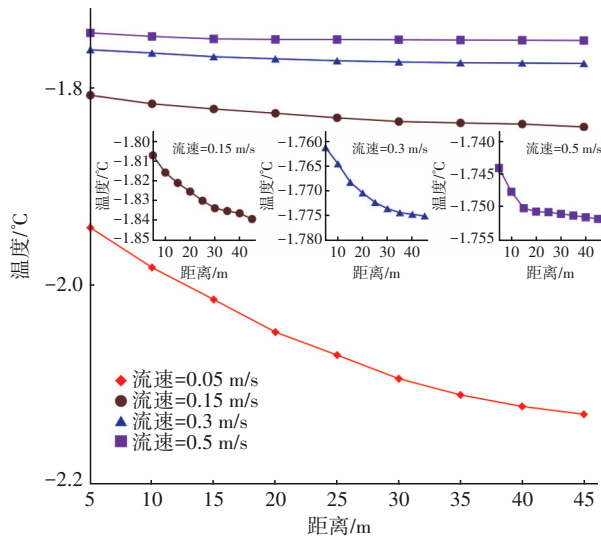


图6 管道周围冻土层最高温度变化曲线

Fig.6 Maximum temperature variation curve of the permafrost layer around the pipeline

与输水管不同的是,冻土层内温度需要始终保持在冰点以下,所以必须控制U型伴热管进口流速和进口温度,如果进口流速和温度过大,就会导致冻土层内温度高于冰点,使冻土层开始融化,造成冻土融沉破坏管道。从图6可以看出,冻土层的最高温度沿管道长度逐渐降低,所以冻土层的前端温度最大,因此只要保证冻土层前端温度不高于冰点,那么整个冻土层就不会融化。为了给U型伴热管应用提供理论指导,通过给定不同U型伴热管的进口温度和速度,模拟相关工况,最后通过Matlab给出冻土层的最高温度( $T_{\max}$ )与U型伴热管进口温度和流速的拟合关系式如下:

$$T_{\max} = 191.329 t_{\text{in}}^{0.0615} v_{\text{in}}^{0.000162} \quad (7)$$

式中: $t_{\text{in}}$ 为U型伴热管进口温度,K; $v_{\text{in}}$ 为U型伴热管进口流速,m/s。

图7为拟合关系式的预测结果与仿真结果间的偏差。可以看出,冻土最高温度的拟合误差在5%以内。当进口温度为60℃、进口流速在0.05~1.3 m/s之间变化时,仿真和拟合温度都已经超过0℃,会使冻土的局部开始融化,这说明如果初始进口温度过高,在不降低进口流速的情况下,会导致冻土最高温度高于冰点;同样,如果初始进口流速过大,在不降低进口温度的情况下,也会导致冻土最高温度高于冰点。所以通过拟合关系式,可以得到合理的初始进口流速和温度。

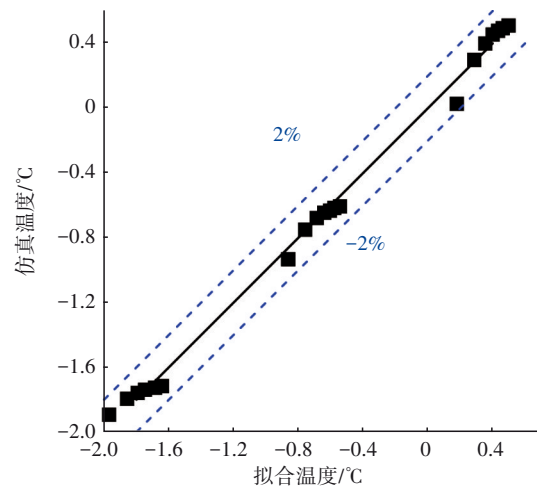


图7 冻土层模拟最高温度与拟合经验公式比较曲线

Fig.7 Comparison curve between simulated maximum temperature of permafrost layer and fitted empirical equation

根据上述结果,实际项目中采用如下伴热参数:伴热管进口温度控制在20~25℃,循环流速为0.12 m/s。在一年的运行中,管道供水正常,管道周围冻土保持原状,未见沉融现象发生,表明模拟研究结果可靠。

#### 5 结论

① U型伴热管进口温度不变时,随着进口流速的增加,出口温度也逐渐增加,但进出口温差逐渐减小。当流速为0.05、0.5 m/s时,U型管进出口温差分别约为8、1℃。

② 不同流速下U型伴热管温度随管道长度增加而逐渐降低。随着流速的增加,出口温度差减小。通过拟合关系式,可以预测管道温度低于冰点

时的管道长度。以进口流速为0.3 m/s、管道长度为50 m时的数据为基础,预测U型伴热管出口处温度降到冰点以下时对应的管道长度为587 m;而以管道长度为120 m时的数值仿真数据为基础,预测的管道长度为638 m。根据数值仿真结果预测到的管道最大长度相对保守,对工程应用具有指导价值。

③ 当U型伴热管进口温度和流速同时变化时,得到了冻土层最高温度与进口流速和温度的拟合关系式,据此可以得到不同进口温度时所需进口流速的极限值,以及不同进口流速时所需的进口温度极限值,从而保证冻土层不被融化。

#### 参考文献:

- [1] 桑稳姣,李栋,贾成华,等. 神农架林区冬季供水保证设施研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(7): 45-48.  
SANG Wenjiao, LI Dong, JIA Chenghua, *et al.* Research and design of water supply assurance device for in winter Shennongjia forest region [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (7): 45-48(in Chinese).
- [2] BARTH R E, BONORDEN C M, HOUSE P A, *et al.* Heat tracing technology for the 21st century [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8(1): 42-48.
- [3] 耿玉. 伴热技术在管道防冻设计方案中的选择 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47(20): 114-116.  
GENG Yu. Selection of heat tracing technology in pipeline anti-freezing design scheme [J]. Building Technology Development, 2020, 47 (20): 114-116(in Chinese).
- [4] 周卫红. 沥青长输管道伴热保温设计研究 [J]. 化工设计, 2019, 29(1): 22-24.  
ZHOU Weihong. Research on heat tracing and insulation design for long distance transportation asphalt pipeline [J]. Chemical Engineering Design, 2019, 29 (1): 22-24(in Chinese).
- [5] 薛杰华. 蒸汽伴热与电伴热在化工工程中的应用对比分析 [J]. 化工管理, 2020, 17: 173-174.  
XUE Jiehua. Comparative analysis of steam heat tracing and electric heat tracing in chemical engineering [J]. Chemical Management, 2020, 17: 173-174 (in Chinese).
- [6] 牟元生, 万旭光. 对比分析蒸汽伴热与电伴热在化工工程中的应用 [J]. 化工管理, 2021, 10: 182-183.
- MOU Yuansheng, WAN Xuguang. Comparative analysis of steam tracing and electric tracing in chemical engineering [J]. Chemical Management, 2021, 10: 182-183(in Chinese).
- [7] KAYFECI M. Determination of energy saving and optimum insulation thicknesses of the heating piping systems for different insulation materials [J]. Energy & Buildings, 2014, 69: 278-284.
- [8] 赵树炳, 赵振兴, 张志强. 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 (1): 86-89.  
ZHAO Shubing, ZHAO Zhenxing, ZHANG Zhiqiang. Design and finite element analysis of insulation pipeline buried in permafrost area [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015 (1): 86-89(in Chinese).
- [9] 白静, 谢崇宝, 吴志琴. 季节性冻土区管道浅埋换填防冻模式研究 [J]. 水利学报, 2018, 49 (5): 588-597.  
BAI Jing, XIE Chongbao, WU Zhiqin. Research on anti-freezing pattern of shallow buried pipe by replacement filling of pipe trench in seasonal frozen soil area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (5): 588-597(in Chinese).
- [10] 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.  
CHEN Ji, LI Kun, SHENG Yu, *et al.* Variations and influencing factors of the water temperature within the pipe buried in seasonally frozen ground areas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36 (4): 836-844(in Chinese).
- [11] KHOSHKHOO Y, JANSSEN P E, IRANNEJAD P, *et al.* Calibration of an energy balance model to simulate wintertime soil temperature, soil frost depth, and snow depth for a 14 year period in a highland area of Iran [J]. Cold Regions Science & Technology, 2015, 119: 47-60.

作者简介:贾海锋(1974—),男,甘肃白银人,本科,高级工程师,主要研究方向为寒区工程。

E-mail:3208034588@qq.com

收稿日期:2022-12-10

修回日期:2022-12-26

(编辑:李德强)