

东北地区灌溉管道的浅埋技术研究

白静¹, 谢崇宝¹, 高虹¹, 陈石磊²

(1. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054; 2. 北京中灌绿源国际咨询有限公司, 北京 100054)

摘要: 为了研究灌溉管道浅埋方式, 在总结研究现状的基础上, 首先分析了不同情况下的管道受力情况, 以及管道的开裂方式, 然后估算了在管道工作的最不利情况下管道内部冰胀压力大小, 分析了冻土的冻胀和融沉作用影响因素, 最后给出了浅埋防冻的具体措施和建议, 包括管沟换填、安装伸缩节和排空管道等。一些地区的现有经验表明, 采取相应的措施后, 灌溉管道浅埋可行。

关键词: 灌溉; 管道; 防冻; 冻土

中图分类号: TV93 **文献标识码:** A

Research on the Technology of Irrigation Pipeline Buried in a Shallow Layer of Northeast China

BAI Jing¹, XIE Chong-bao¹, GAO Hong¹, CHEN Shi-lei²

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

2. China Green Water International Consulting Co., Ltd, Beijing 100054, China)

Abstract: In order to study the way of the irrigation pipes buried in a shallow layer, the pipe stress under different conditions and the cracking way of pipeline were analyzed based on the related research status. The ice stresses of pipeline were estimated in the worst working situation and the factors affecting the frost heave and thaw settlement process of frozen ground were listed in the context. Finally specific measures were given to protect the pipeline buried in a shallow layer. These measures included emptying pipes after irrigation, installing expansion joints and the trench replacement. Existing experience shows that burring irrigation pipes in a shallow layer is feasible after taking corresponding measures in Northeast China.

Key words: irrigation; pipeline; anti-freezing; frozen soil

1 研究现状

我国冻土分布十分广泛, 占国土面积的 55%。冻土区可以分为: 季节性冻土区和多年冻土区。季节性冻土区主要分布在东北、华北和西北等地, 多年冻土区主要分布在黑龙江、吉林, 内蒙古北部、西藏和部分高山地区。冻土的土力学性质尤其是冻土的冻胀和融沉是冻土方面研究的重点和热点, 学者们试图探讨冻胀、融沉的机理或者估算其量的大小^[1-3]。在冻土中埋设管道, 冻土对管道的影响、管道的铺设、管道的开裂方式等也广受学者的关注。赵薇娜^[4]采用损伤力学的方法研究了塑料

管道的破坏机理; 陈继^[5]采用仿三维数值方法模拟分析了土壤含水量、地表温度、管道埋深等主要因素对埋地管道最不利水温的影响; 吕宏庆等^[6]分析了多年冻土区管道的主要失效形式和产生机理, 以及管道检测的内容。

在灌溉管道系统中, 出于经济效益和成本的考虑, 一般采用 PVC 或 PE 塑料管道。在东北冻土区, 冻土深度可达 1.8 m, 局部极寒冷地区的冻土深可达 2.3 m。东北大部分地区采用管道浅埋, 埋深以 0.8 m 居多, 可以降低挖填方成本。同时, 需要采取适当防冻措施, 防止管道冻裂。这种管道浅埋的方式, 在东北四省节水增粮行动项目区中应用广泛, 目前没有大的问题。根据塑料管道特性和寒冷的工作环境, 建议浅埋管道采用 PE 管道。在我国部分地区已经有了管道浅埋成功的试验和实践, 比如晋北地区^[7], 东北地区^[8]等。本文中, 在分析埋地管道受力情况和管道开裂方式的基础上, 着重分析了管道内部冰胀压力、冻土的冻胀和融沉作用, 在此基础上提出了浅埋防冻的具体措施和建议。

收稿日期: 2016-07-19

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划项目“节水增粮高效灌溉关键技术与装备”(2014BAD12B05)。

作者简介: 白静(1986-), 女, 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。

2 地埋灌溉管道的受力分析

根据管道内是否存水、地埋管道周围土壤温度状况,分以下4种情况对管道的受力分别进行分析。这里将管道承受的荷载分为:恒定荷载和非恒定荷载。恒定荷载是指管道上保持不变的重力,非恒定荷载是指在不同的工作环境和温度条件下,管道上受到不断变化的荷载,比如水压力、冰压力、土压力等。

除了恒定的重力外,管道的受力情况分析如下:

(1) 管道内存水不结冰,管道周围没有冻土的情况(灌溉时)。管道受力有土压力、水压力,可能存在少量的温度应力和土体摩擦力。其中温度应力由管道热胀冷缩引起,是管道受到的轴向力之一。土体的摩擦力为管道周围阻止管道沿着轴向变化的轴向力,是温度应力的反作用力。这种情况下,不论是温度应力还是土体摩擦力对管道都不会造成破坏。

(2) 管道内没有存水,管道周围没有冻土的情况(灌溉间歇期)。管道的受力有土压力,可能存在少量的温度应力和土体摩擦力。这些外力不会对管道造成破坏。

(3) 管道内无水、管道周围有冻土的情况(冬季)。管道的受力有土压力,较大的温度应力和土体摩擦力。在管道周围的情况下,由于土体中水分的冻结和冰体(特别是凸镜状冰体)的增长引起土体膨胀,会使土压力变大,这种情况下,可能会受到冻土的冻胀破坏。

(4) 管道存水结冰、管道周围有冻土的情况(冬季)。这是比较危险的情况,管道的受力不仅有土压力、冰压力,存在较大的温度应力和土体摩擦力。由于受到管道内部冰压力和外部土体的冻胀作用,管道容易遭到破坏。为了解决寒冷地区地埋管道易遭受破坏的问题,有必要对管道的破坏情况做进一步分析。

3 灌溉管道的破坏形式

根据管道破坏的速度,灌溉PE管道可以分为快速破裂和慢速破裂。

(1) 快速破裂。PE管道快速破裂,是一种脆性开裂形式,容易在低温情况下发生。在管道运行时,管道上产生微小裂纹,当内部或者外部压力超过其临界压力时,裂纹以100~450 m/s的速度扩展,直到驱动力小于临界压力时为止。这种破裂大致可以分为两个阶段^[4]:

第一为裂纹产生阶段,此阶段占管道生命周期的90%,也就是说在管道正常使用期间,有90%的时间是在产生微观裂纹,但这些裂纹还不影响管道的正常使用。此过程可以用材料力学中的损伤力学进行分析和描述。裂的纹产生大概有:①蠕变产生了微小裂纹;②接头焊接造成了缺陷;③水锤冲击造成微观裂纹;④大型机械碾压产生裂纹;⑤管道内部冰压力产生裂纹。

第二为裂纹发展阶段,此阶段占管道生命周期的10%,具体表现为管道应变和内部压力的释放对管壁的撕裂作用。管道应变和内部压力的释放为管道开裂提供了驱动力,单位面积裂纹形成所消耗的能量是管道裂纹增长的阻力。此阶段驱动

力大于裂纹增长阻力,裂纹以100~450 m/s的速度扩展(图1)。

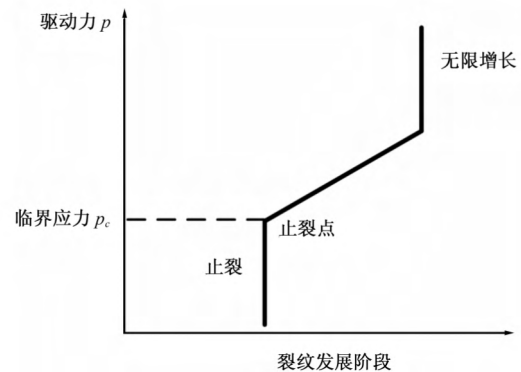


图1 裂纹过程中的驱动力变化

Fig.1 Changes of driving force in the crack developing process

(2) 慢速破裂。慢速开裂的主要影响因素是管道本身的微观结构。在低应力条件下,慢速破裂是管道破坏最典型的一种形式。在这种情况下,PE管的分子链发生了解缠。管道慢速破裂的影响因素主要是PE管的微观结构^[9]:比如分子量的分布、支链的密度和分布、支链的长度、结晶后片晶的厚度及完整性等等,这些因素与管道的加工合成工艺相关。

在本文中,主要关注的是管道的快速开裂过程。灌溉管道浅埋时,在冬季完全处在冻土层中,采用适宜的防冻措施,防止管道快速开裂是我们研究的重点。

4 管道内部冰胀压力估算

结合东北管道损坏情况,认为管道内部的冰胀压力是管道破坏过程中最重要的受力因素。假定管道内为满管流,在只考虑冰的压缩性的前提下,采用胡克定律对管道内部的冰压力进行分析和计算。

根据胡克定律有

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

式中: ε 为材料的应变; σ 为材料的应力; E 为材料的弹性模量。

PE管内壁受到冰胀压力 P 的作用,沿着径向产生的变形 ΔL_p 为:

$$\Delta L_p = \frac{P}{E_p} \delta_p = \frac{P}{E_p} C R_p \quad (2)$$

式中: P 为冰胀压力; E_p 为PE管的弹性模量; δ_p 为PE管的厚度; $C = \delta_p / R_p$ 为PE管的相对厚度; R_p 为PE管的内半径。

PE管内冰体受到管壁约束力 P 的作用,比在无约束的条件下沿着径向少产生的变形 ΔL_i 为:

$$\Delta L_i = \frac{P}{E_i} R_p \varphi_i \quad (3)$$

式中: P 为冰胀压力; E_i 为冰的弹性模量; φ_i 为结冰率,PE管道内冰水混合物中冰的比例。

在没有约束的情况下,管内冰体沿着径向的变形量 $\Delta L_i'$ 为:

$$\Delta L_i' = \varphi_i \alpha_i \beta R_p \quad (4)$$

式中: $\alpha_i = (\gamma_w / \gamma_i)^{1/3} - 1$,是水结冰后的膨胀系数; γ_w 为水的密度; γ_i 为冰的密度; β 为冰胀压力沿着径向的传递系数。

由 $\Delta L_i' = \Delta L_i + \Delta L_p$ 可得，

$$P = \frac{\varphi_i \alpha_i \beta E_i E_p}{C E_i + \varphi_i E_p} \quad (5)$$

采用 0.6 MPa dn90 的 PE 管进行冰胀压力计算。计算结果见表 1 所示，从计算结果中可以发现，在满管水流的情况下，如果沿着径向的压力传导系数大于 0.05 时，随着管道内水结冰过程的进行，冰胀压力超过 PE 管的承压能力(0.6 MPa)，PE 管容易发生爆裂。

表 1 管道内冰胀压力计算结果 MPa

Tab.1 The Calculation result of ice-expansion pressure in pipeline

P	φ_i				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.05	1.58	2.37	2.84	3.16	3.39
β	0.10	3.16	4.74	5.69	6.78
	0.15	4.73	7.11	8.53	9.48

5 冻土的冻胀和融沉作用

冻土对管道的影响主要表现为冻胀和融沉作用^[10]。土体冻胀量和融沉量获取方法有：实地观测、试验观测、经验公式和模拟计算。冻胀作用主要表现为：在结冰时，土体中水分子以薄膜水的形式从温度高的区域向温度低的区域迁移，水分冻结引起土体向上膨胀，管道向上翘曲，如图 2 所示。土体冻胀量的影响因素有土体的冻结深度、含水量、颗粒级配、温度和压力等。

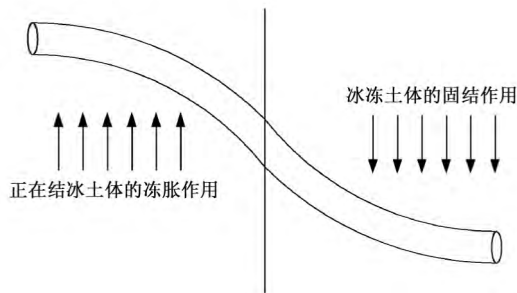


图 2 冻土的冻胀作用

Fig.2 The frost-heave effect of frozen ground

冻胀量计算的公式为：

$$h = \bar{f} z \quad (6)$$

式中： h 为冻胀量，cm； \bar{f} 为平均冻胀强度，%； Z 为设计冻深，m。

\bar{f} 可以采用封冻前土壤含水量估算：

$$\bar{f} = a(\omega - \omega_p) \quad (7)$$

式中： a 为调整系数，与土体的级配、地下水埋深有关； ω 为土体含水率； ω_p 为土体的塑限含水率。

融沉作用表现为：在融化后不稳定区域，冻土融化后，土体沉降失去支撑作用，管道向下弯曲，如图 3 所示。融沉量的影响因素有土体的融化深度、含冰量和颗粒级配等。

忽略应力固结的作用，融沉量可以用下式来估算^[11]：

$$h_2 = 0.09 Cr \frac{\gamma_d \omega}{\rho_w} z_2 \quad (8)$$

式中： h_2 为融沉量； ω 为土体含水率； γ_d 是土体的干密度； ω 为土体的含水率(以重量计)； $Cr = \omega/\omega_b$ ； ρ_w 为水的密度； z_2 为融化层的高度。

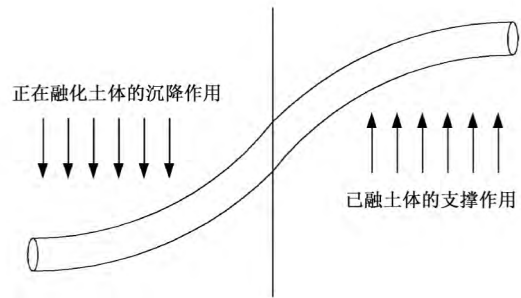


图 3 冻土的融沉作用

Fig.3 The thaw-settlement effect of frozen ground

在灌溉管道的铺设中，为了减少土壤的冻胀量，可以采用换填的方式，改变土体的结构和管道周围土体的含水量。

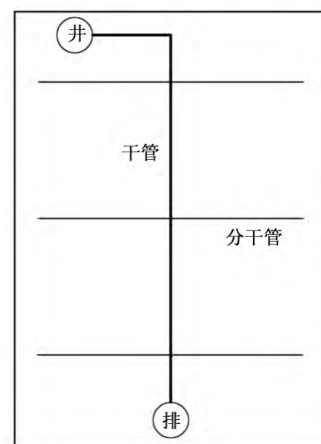
6 浅埋防冻措施

针对管道的受力和破坏情况，浅埋灌溉管道的防冻措施有：

(1) 在灌溉季结束后，排空管道中的残留水体。在干管的末端设置排水阀和排水井，灌溉期结束后，打开排水阀，排空灌溉管道中的水体。对于地形比较平整的地块，地理管道主干管可以按照 1/1 000~1/2 000 顺坡铺设，分干管可以按照 1/1 000~1/2 000 逆坡铺设，这样铺设有利于管道内水体排空，必要时可以配备空气压缩机，加速管道内水体的排出，如图 4 所示。对于丘陵地带或者坡地，排水井和排水阀应设置在低处，地理管道主干管垂直于等高线布置，分干管大致沿着等高线方向按照 1/1 000~1/2 000 坡度逆坡铺设，具体铺设如图 5 所示。

(2) 安装伸缩节。为了补偿管道轴向、径向的应变，在管道一定距离内(建议 50 m 左右)安装伸缩节。一方面伸缩节可以减少温度应力的变化对管道的损害，另一方面可以减轻冻土冻胀和融沉对管道的损害。

(3) 管沟换填。管沟换填是将管沟基础软弱土层及冻胀性土壤换填为其他强度较高、冻胀性小的材料，见图 6。一方面提高土体承载力，减少沉降量；另一方面加速排出管道周围的水



(a)平面图

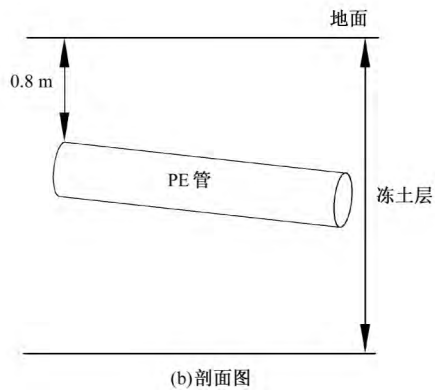


图 4 平整地块的管道布置示意图

Fig.4 The diagram of the pipeline layout for flat fields

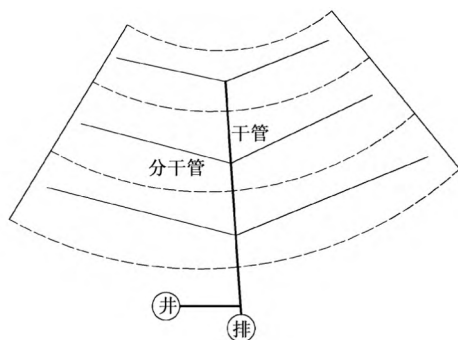


图 5 坡地的管道布置示意图

Fig.5 The diagram of the pipeline layout for sloping fields

分 防止冻胀。

在辽宁双辽市和黑龙江龙江县、林甸县近三年的“东北节水增粮行动”项目建设中, 地理管道均采用了浅埋的方式, 管道埋深为 0.6~0.8 m, 并且通过增设空气压缩机, 在灌溉结束后, 排出管道内水体, 达到了防冻的效果。现有的实践经验表明, 采用相应的防冻措施后, 管道浅埋可行。

7 结 语

浅埋管道最不利的工作情况为管道存水结冰、管道周围有冻土的情况, 管道受到内部冰胀压力和外部土体的冻胀作用。计算表明, 在管道内部充满水体结冰的过程中, 管道内冰胀压力过大, 管道容易损坏, 同时冻土的冻胀和融沉对管道也不利。针对管道浅埋的情况, 提出了相应的防冻措施。现有的经验表

(上接第 134 页) 农业用水量统计的专项工作经费或者落实的经费难以满足目前的工作需要, 很大程度上制约了统计工作的开展。农业用水量工作量大面广, 灌区需要专门的工作人员完成数据量测、记录、统计和填报等各方面工作, 需要花费大量的人力物力和财力。建议各级水行政主管部门进一步加强对农业灌溉用水量统计工作的重视, 尽快落实工作经费来源, 确保农业灌溉用水量统计工作的顺利开展。 □

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 《中国水资源公报 2015》[M]. 北京: 水

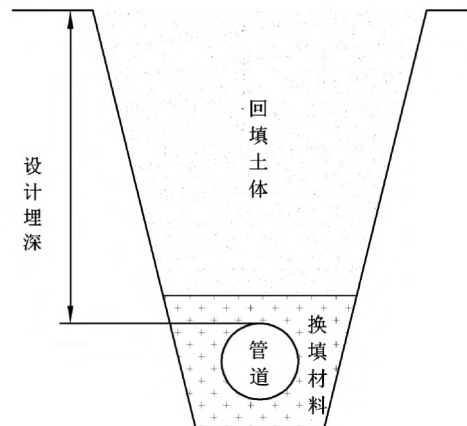


图 6 管沟换填示意图

Fig.6 The sketch map of the pipeline ditch replacement

明, 采用相应的防冻措施后, 管道浅埋可行。 □

参考文献:

[1] 齐吉琳, 马 巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2011, 31(1): 133-143.
 [2] 何 平, 程国栋, 杨成松, 等. 冻土融沉系数的评价方法[J]. 冰川冻土, 2013, 25(6): 608-613.
 [3] 杨凤学, 张喜发, 冷毅飞, 等. 冻土融化体积压缩系数的经验确定方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 432-436.
 [4] 赵薇娜. 塑料压力管道破坏机理的损伤力学研究及其数值模拟[D]. 成都: 四川大学, 2007.
 [5] 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): 936-844.
 [6] 吕宏庆, 李均峰, 苏 毅. 多年冻土区管道的失效形式及监测技术[J]. 天然气工业, 2008, 28(9): 98-100.
 [7] 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.
 [8] 王维喜, 邵志荣, 刘 森. 严寒区低压塑料管道浅埋输水灌溉工程建设[J]. 黑龙江水利科技, 1999, (4): 52-54.
 [9] 熊志敏, 孙佳文, 武志军, 等. 聚乙烯管材慢速裂纹增长性能及其评价方法[J]. 塑料工业, 2011, 39(8): 10-14.
 [10] Foriero A, Ladanyi B. Pipe uplift resistance in frozen soil and comparison with measurements[J]. J. Cold Reg. Eng., 1994, 8(3): 93-111.
 [11] 何 平, 程国栋, 杨成松, 等. 冻土融沉系数的评价方法[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 608-613.

利水电出版社, 2016.
 [2] 中华人民共和国水利部. 关于印发用水量统计方案的通知[Z]. 2014.
 [3] GB/T 23598-2009, 水资源公报编制规程[S].
 [4] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室. 第一次全国水利普查总体方案[J]. 中国水利, 2010, (22): 11-27.
 [5] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[J]. 中国水利, 2013, (7): 1-3.
 [6] 胡荣祥, 贾宏伟. 浙江省灌溉用水统计名录样点灌区分析[J]. 浙江水利科技, 2015, (5): 6-8.