

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220430001

温度影响下供水管道力学行为数值模拟研究*

王丽萍¹, 赵 帅¹, 张宛静¹, 宁超列²

(1. 重庆科技学院建筑工程学院, 重庆 401331; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 夏冬季节供水管道漏损和爆管事故频发, 表明温度是影响供水管道结构运行安全的重要因素。然而, 已有研究大多忽视温度变化对供水管道力学行为的影响。因此, 本文采用有限元数值模拟方法, 建立了考虑管-土相互作用的热力耦合三维数值模型, 研究了地表温度变化对供水管道周围土壤温度场的影响, 分析了供水管道因土壤与水温差异造成的力学行为变化, 研究了不同温度影响下埋深、管径和壁厚三个因素对供水管道力学行为的影响。最后, 采用均匀试验设计方法, 通过大量的有限元数值模拟, 建立了供水管道最大应力、最大竖向位移和地表温度变化之间的经验预测方程。研究表明: 土壤的温度变化幅度小于地表的温度变化幅度, 即存在“冬暖夏凉”的效果。因土壤与水体的温度差异, 供水管道容易出现“热胀冷缩”的现象, 使得供水管道发生漏损或爆管。本文建立的经验预测方程和有限元模拟结果拟合较好, 可直接用于评估供水管道不同季节的结构运行风险和沉降风险。

关键词: 供水管道; 有限元模拟; 温度影响; 力学行为; 漏损爆管

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1141-10

Numerical Simulation Investigation of Mechanical Behaviors of Water Mains under Temperature Effect

WANG Liping¹, ZHAO Shuai¹, ZHANG Wanjing¹, NING Chaolie²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

2. Tongji University, College of Civil Engineering, Shanghai 200092, China)

Abstract: Water mains are frequently damaged with leaking and bursting accidents in both summer and winter seasons, highlighting the significant influence of temperature on the structural operational safety of water mains. However, existing studies have often ignored the effect of temperature variation on the mechanical behaviors of water mains. In this study, the finite element numerical simulation method was employed to build a thermal mechanical coupling three-dimensional numerical model, considering the pipeline-soil interaction effect. We investigated the effect of ground temperature variation on the thermal field of the soils surrounding the pipeline, studied the variation of the mechanical behaviors of water mains induced by the discrepancy of soil and water temperature, and analyzed the influence of buried depth, pipe diameter, and wall thickness on the mechanical behavior of water mains under different ground temperatures. To establish empirical prediction equations between maxi-

* 收稿日期:2022-04-30;修回日期:2022-06-11

基金项目:重庆市技术创新与应用示范项目(cstc2018jsex-mszdX0126)资助

作者简介:王丽萍(1980—),女,教授,博士。主要从事市政埋地供水管道灾变机理与风险评估研究。

E-mail: Wangliping98@163.com

通讯作者:宁超列(1984—),男,副教授,博士。主要从事工程防灾研究。E-mail: cning@tongji.edu.cn

imum stress and maximum vertical displacement of water mains and ground temperature, the uniform test design method was applied and numerous finite element numerical simulations were carried out. The conclusion indicates that the temperature variation amplitude of the soil is smaller than that of the ground surface, resulting in an effect called ‘warm in winter and cool in summer’. Due to the discrepancy between soil and water, water mains are prone to a phenomenon called thermal expansion and cold contraction, leading to the occurrence of leaking and bursting of water mains. The established empirical prediction equations agree well with the finite element simulation results. They can be used to evaluate the structural operation and settlement risk of water mains in different seasons directly.

Keywords: water mains; finite element modeling; temperature effect; mechanical behavior; leaking and bursting

0 引言

供水管道是维持城市正常运行的“生命线”系统之一。供水管道一旦发生事故,不仅给人们的生产和生活带来不便,而且可能造成不可估量的经济损失与社会影响。在影响供水管道正常运行安全的诸多因素中,温度变化是关键因素之一。已有的研究表明^[1-2]:地表温度的往复周期变化对于供水管道的力学行为具有不可忽略的影响。一年当中,地表温度存在的往复周期变化特征,经由土壤的热传导和扩散作用,将导致管道外壁温度发生变化,并与管道内壁的水温形成温度差,产生温度应力,从而造成管道不断伸长或收缩,影响供水管道的日常运维安全。这一现象可由供水管道在不同季节的漏损和爆管事故证明,如图1可见,每年的夏季,如7月和8月;冬季,如12月和1月的爆管次数明显高于其他月份。爆管事件呈现季节性的周期变化规律。

这种季节性的周期变化规律一方面与外界环境温度变化相关,另一方面和其他因素,如管道运行压力波动、降雨造成土质松软,使得地面发生沉

降等因素相关。事实上,夏季和冬季的供水管道事故高发,其主导诱因不同。夏季的爆管和漏损事故一般归结为这一时期的用水量急剧增大,造成管道的输水压力过大,管道压力调控不足引起。固然,这一时期地表的温度变化和降雨频发,造成地质松软也可能对管道事故的频发产生一定程度的影响。在冬季,供水管道的事故频发则更多地认为是地表的温度变化造成的,尤其是寒潮来临,会造成大量的漏损和爆管事故。显然,这一时期供水管道的运行压力常常处于低位,对管道事故的影响较小。

因此,要想全面、详细地揭示供水管道的爆管与漏损事故发生机理,亟需针对每个影响因素进行单独研究。本文主要研究温度变化对于供水管道力学行为的影响。令人遗憾的是,目前温度效应的影响研究主要集中于油气管道和热力管道领域^[3-6],如:2017年,薛景宏等^[5]采用ANSYS软件,研究了变径燃气钢管在不同内外壁温差作用下的极限应力。研究表明:温度变化对于变径燃气钢管的极限应力具有一定程度的影响。变径钢管的拉压应变随着温差的增加而增加,极易发生断裂。2017年,黄勇^[6]采用ABAQUS软件,针对油气管道,建立了以管内热流介质为热源的管-土热力耦合三维数值模型。研究表明:管身应力主要受温度控制;随着管内热流介质温度升高,管身应力逐渐增大。对于地表温度影响下供水管道的力学行为,目前国内外一直缺乏较为深入和全面的研究,大多是基于历史事故记录的定性描述^[7-13]。与油气管道和热力管道由内向外传导和扩散的温度荷载作用响应不同,供水管道的温度影响作用属于由外到内的传导和扩散。具体来说,油气管道和热力管道属于高温介质运输管道,因此温度以热传导的方式由管道传递给土体,管道的受力状态受管道内部传输介

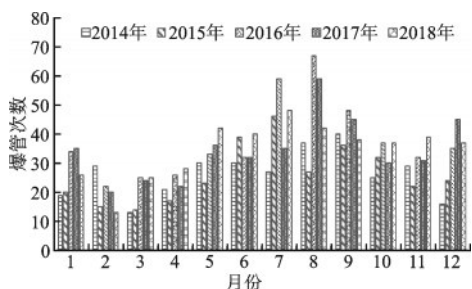


图1 某区县供水管网爆管事故统计

Fig.1 Statistics on water supply pipeline burst incidents in a specific district

质的温度变化影响显著,而供水管道属于低温介质运输管道,因此温度以热传导的方式由土体传递给管道,管道的受力状态主要受外部地表温度变化的影响。

鉴于此,本文采用有限元数值模拟方法,建立了考虑管-土相互作用的热力耦合三维数值模型,研究了地表温度变化对供水管道周围土壤温度场的影响,分析了不同的土壤温度场条件下供水管道因内外壁的温度差造成的力学行为变化。最后,采用均匀试验设计方法,通过大量的有限元数值模拟,建立了供水管道最大应力、最大竖向位移与地表温度变化之间的经验预测公式。

1 管土相互作用模型

图2给出了本文建立的考虑管-土相互作用的热力耦合三维数值模型。模型的几何尺寸为 $6.9\text{ m}\times 12\text{ m}\times 4\text{ m}$ (高 \times 长 \times 厚),管径为 110 mm ,壁厚为 6.6 mm ,管长为 12 m ,管道埋深(上覆土体厚度)为 0.9 m 。在热传导分析部分,数值模型采用Standard-热传递单元库,线性几何阶次的DC3D8单元。土体的全局网格尺寸为 0.035 m ,开洞部分的网格尺寸为 0.015 m ;管道的横向、纵向和环向网格尺寸分别为 0.001 、 0.006 、 0.002 m 。在应力场分析部分,数值模型采用Standard-三维应力单元库,线性几何阶次的C3D8R单元。土体的全局网格尺寸为 0.035 m ,开洞部分的网格尺寸为 0.025 m ;管道的环向和纵向网格尺寸分别为 0.013 、 0.02 m 。

土体参数的取值与文献[14]保持一致。因聚乙烯管道受温度变化的影响更为显著,因此管材的

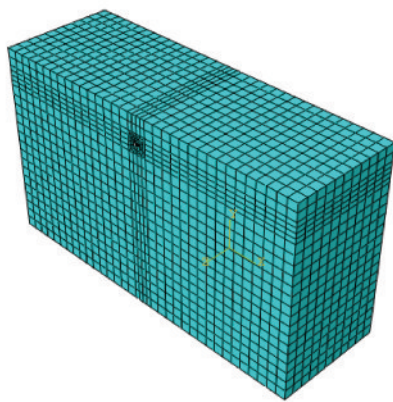


图2 有限元建模

Fig.2 Diagram of finite element modeling

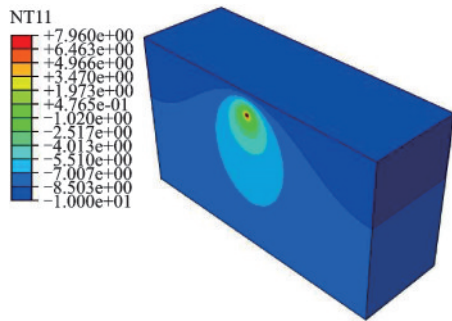
参数与聚乙烯管材的参数取值一致^[15]。为便于数值求解,对模型计算做如下假定:(1)加载过程采用顺序热力耦合方法,即应力场依赖于温度场,而温度场的变化不受应力场变化的影响;(2)管材采用非线性粘弹性模型,土体采用摩尔-库伦模型,且均为各向同性均质饱和材料;(3)管-土间的相互耦合作用采用非线性滑移接触处理,同时考虑非线性何大变形的影响;(4)不考虑管道中液体的流动,即不考虑水分迁移对管道受力状态的影响;(5)管道和土体的初始温度场呈均匀分布。

根据上述模型假定,首先设置温度初始条件和边界初始条件,开展环境温度场分析。根据研究地区的实际情况,假设土壤的初始温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,管道的内壁温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。地表温度设置两种工况,分别为 -10 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,代表冬季低温和夏季高温两种极端情景。然后,采用热传导求解算法,计算模型的土壤温度场和管道温度场。在此基础上,计算模型的应力场。由于土壤中存在初始地应力,因此在应力场的计算过程中,依次设置了三个分析步,分别为:(1)初始分析步;(2)重力分析步和(3)压强分析步。在初始分析步中,采用有限滑移的方式描述管-土的相互耦合作用,并同时施加温度荷载。有限滑移的切线方向采用“罚函数”的约束方式,摩擦系数设为 0.4 ,法线方向采用“硬接触”的约束方式。在重力分析步中,整个模型沿Y方向施加重力荷载。在压强分析步中,管道内部施加均布环向压力,压力值取 0.4 MPa 。

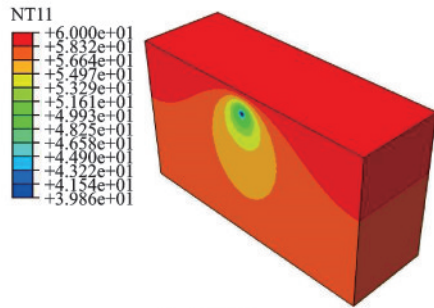
2 温度场模拟结果

图3给出了当地表温度分别为 -10 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时管道周围的土壤温度场分布。可见,管道周围土壤温度场受到两个热源(地表热源和管道内壁热源)的影响,在空间上呈现非均匀分布的特征。这两个热源之间具有热对流效应。因此,当地表温度小于管道内壁温度时,管道周围的土壤温度高于地表温度,且距管道越远,温度越低,其分布大致呈椭圆形状;当地表温度高于管道内壁温度时,管道周围的土壤温度小于地表温度,且距管道越远,温度越高,其分布同样大致呈椭圆形状。

为了更加直观地了解地表温度变化对管道周围土壤温度场的影响,选取管周外壁结点的温度进行研究。根据模型单元的划分情况,在管道端部管



(a) 地表温度-10 °C



(b) 地表温度60 °C

图3 管道周围土壤温度场分布

Fig.3 Temperature distribution of soil surrounding the pipeline

周外壁上每隔36°选取一个代表性结点,沿管周一共选取10个结点,获得当地表温度分别为-10、60 °C时的管周外壁节点温度,如图4可见,管道端部管周外壁各个结点的温度基本一致,其原因与管顶与管底的距离较小(仅为110 mm),造成管顶与管底的温度差异不明显有关。事实上,随着管径的增大,管顶和管底的距离增大,管顶和管底的温度将存在一定的差异。另一方面,当地表温度为-10 °C时,管周外壁结点的温度大于0 °C;当地表温度为60 °C时,管周外壁结点的温度小于60 °C。这一现象表明:管道周围土壤中的温度变化幅度小于地表的温度变化幅度,即土壤中存在“冬暖夏凉”的效果。

图5给出了当地表温度由-10 °C依次变化至60 °C时管道端部管顶位置的温度变化曲线。可见,随着地表温度的增加,管顶位置的温度随之增加,两者呈线性变化关系,变化斜率为0.46,截距为12.5。与基准线(斜率为1,截距为0)相比,管顶位置的温度变化速度仅为地表温度变化速度的一半左右。因此,若地表温度为0 °C,管顶位置的温度将为12.5 °C。值得注意的是,当地表温度与管道内壁温度一致时(本文中为23 °C),土体中不存在热对流效应,因此管周外壁的温度也为23 °C。此时,管道

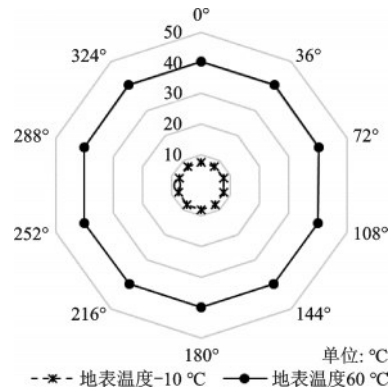


图4 管周外壁节点温度

Fig.4 Temperature of node at out wall of pipeline

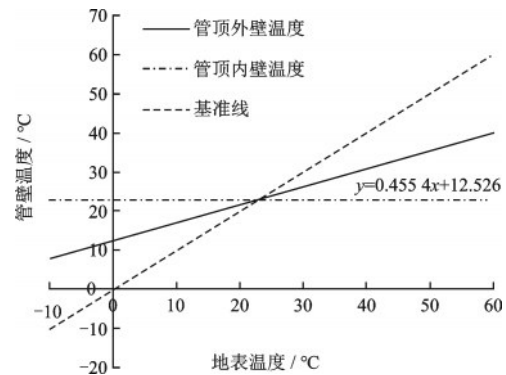


图5 管道内外壁温度随地表温度变化曲线

Fig.5 Curves of inner and outer pipe wall temperature changes with ground temperature changes

内外壁的温度曲线相交。另一方面,若管顶位置的温度为0 °C,地表温度需要降至-27.5 °C。

3 应力场模拟结果

图6给出了当地表温度分别为-10 °C和60 °C的管道应力分布云图(若无特殊说明,文中均为Mises应力)。可见,当地表温度为-10 °C时,管道中间区域的应力最大,且沿管道两端方向逐渐减小。这一现象的原因在于:管道在内外温度差的影响下,由于两端约束出现了“冷缩”的现象。因此,在管周与土体的摩擦作用下,管道的中部区域产生了应力集中。另一方面,当地表温度为60 °C时,管道中间区域的应力分布相对均匀,仅在端口位置的应力稍有降低。此外,相比地表温度为-10 °C时的管道应力,地表温度为60 °C时的管道应力更小。上述现象表明:冬季地表温度下降相比夏季地表温度升高,对于管道的漏损与爆管影响更为显著。

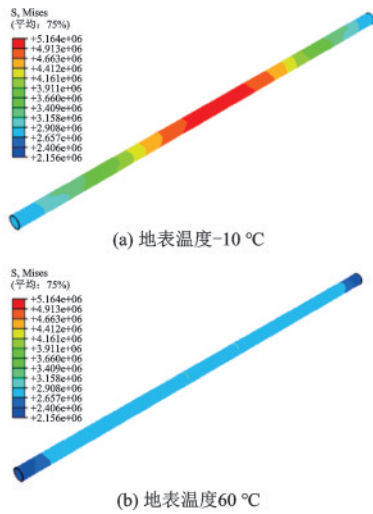


图6 管道应力分布

Fig.6 Stress distribution of pipeline under $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ above ground

3.1 管道轴向应力

管道的轴向应力变化容易使得管道出现伸缩,造成接头漏损。图7给出了不同地表温度影响下管道轴向应力沿长度方向的变化曲线。可见,地表温度变化对于管道的轴向应力有显著的影响。若不考虑温度荷载效应,管道的轴向应力沿长度方向保持恒定,大致为2.5 MPa。若考虑温度荷载效应,管道中间位置的轴向应力存在“峰值”,该“峰值”随着地表温度的降低不断增大且差异逐渐变大,最大处可达5.0 MPa。需要引起注意的是,这一变化过程与管壁内外的温差关系相关。若管壁内部的温度大于管壁外部的温度,管道中间位置的轴向应力急剧升高,“峰值”变得十分明显;若管壁内部的温度小于管壁外部的温度,管道中间位置的轴向应力变化相对平缓,“峰值”也变得不够明显。

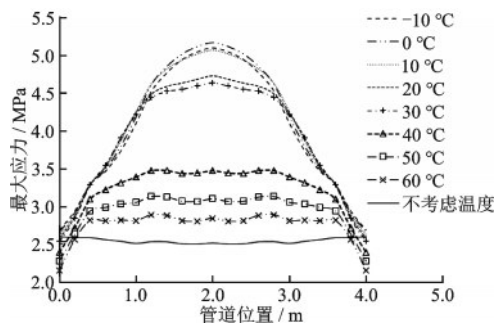


图7 管道轴向应力随地面温度变化曲线

Fig.7 Curves of axial stress variation in pipelines with ground temperature changes

3.2 管道环向应力

管道环向应力变化容易造成管道涨缩,造成爆管事故。图8给出了不同地表温度影响下管道端面截面环向应力的变化。可见,地表温度变化对管道的环向应力同样具有显著影响。若不考虑温度荷载效应,管道的环向应力沿周长保持恒定,大致为2.5 MPa。若考虑温度荷载效应,管道的环向应力沿周长存在变化。具体来说,随着地表温度的降低,管道端部的环向应力呈逐渐升高的趋势,最大可达2.7 MPa。同时,当地表温度小于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,管道环向应力沿管周分布较为均匀;当地表温度大于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,最大环向应力出现在 90° 和 270° ,即管侧位置。

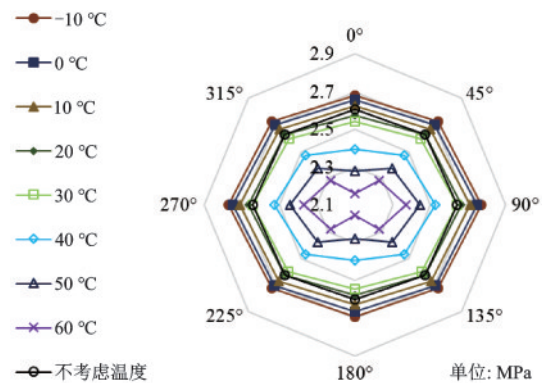


图8 管道环向应力随地面温度变化曲线

Fig.8 Curves of circumferential stress variation in pipelines with ground temperature changes

4 参数敏感性分析

上述研究结论对应的数值模型管径为110 mm,壁厚为6.6 mm,埋深(上覆土体厚度)为0.9 m。在实际工程中,由于供水管道可能具有不同的埋深、管径和壁厚,因此在此分别开展不同埋深、管径和壁厚条件下管道应力和变形的参数敏感性分析,研究这些关键参数与地表温度变化之间的关系。

4.1 埋深因素

图9给出了5种不同管道埋深(0.9、1.2、1.5、1.8 m和2.1 m)条件下地表温度与管道最大应力的关系

曲线。可见,当地表温度小于 20°C 时,管道的最大应力随埋深的增加具有较为明显的增大。当地表温度大于 20°C 时,管道的最大应力随埋深的增加而增大,但趋势不明显。这一现象的原因在于当地表温度小于 20°C 时,管道的外壁温度与内壁温度之间存在负温差,使得管道发生收缩,产生压应力。该压应力与管道内压以及上覆土体造成的压应力正向叠加,使得管道的最大应力显著增大;而当地表温度增大到 20°C 以上时,管道的外壁温度与内壁温度之间产生正温差,使得管道伸长,与此产生了温度拉应力,从而抵消了一部分管道内压和上覆土体产生的压应力,因此随着埋深的增加,虽然上覆土体产生的压应力有一定程度的增加,但与管道温度产生的拉应力相互抵消,增加的幅度并不明显。另一方面,管道的最大应力随地表温度的增加呈减小趋势。具体来说,当地表温度在 $-10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 时,管道的最大应力随地表温度的增加快速减小;当地表温度在 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 时,管道的最大应力随地表温度的增加变化较为稳定;当地表温度在 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 变化时,管道的最大应力随地表温度的增加急剧降低。综上所述,当地表温度低于 20°C 时,管道的最大应力随埋深的增加变化强烈,因此应给予深埋管道的结构运行安全更多的关注。

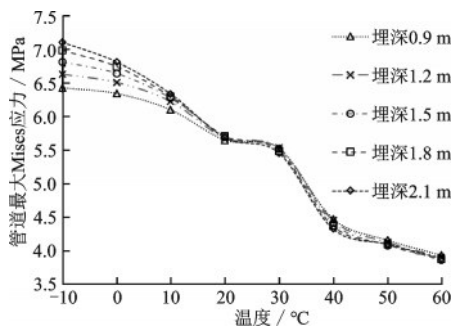


图9 不同埋深条件下管道最大应力随地表温度变化曲线
Fig.9 Curves of maximum stress variation in pipelines under different burial depths with ground temperature changes

图10给出了不同埋深条件下管道最大竖向位移与地表温度变化的关系曲线。可见,同一地表温度条件下,埋深越大,管道的最大竖向位移越大。然而,随着埋深的增加,尤其是当埋深超过 1.0 m 以后,管道最大竖向位移的增大呈逐渐减小的趋势。这一现象表明:随着管道埋深的增加,上部土体重

量增大,因此管道承受的竖向荷载随之增大,竖向位移增大;但当达到一定深度后,由于土体对管道的变形约束同样增大,因此这种影响逐渐减弱。另一方面,同一埋深条件下,管道最大竖向位移随地表温度的增大呈现“V”字型的变化趋势。具体来说,当管壁内外的温度相同时,管道的最大竖向位移最小,即存在一个“低谷”。此后,随着管壁内外的温差增大,管道竖向最大位移随之升高。因此,管壁内外的温差变化与管道的沉降变形大小密切相关。在温度变化幅度较大的夏冬季节,应更关注深埋管道的沉降变形。

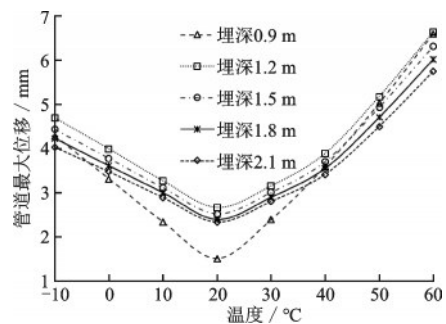


图10 不同埋深条件下管道最大竖向位移随地表温度变化曲线
Fig.10 Curves of maximum vertical displacement in pipelines under different burial depths with ground temperature changes

4.2 管径因素

图11给出了5种管径(110、140、200、250、315 mm)条件下地表温度与管道最大应力变化的关系曲线。可见,同一地表温度下,管道的最大应力随管径的增大呈逐渐减小的趋势。同一管径条件下,管道的最大应力随地表温度的升高呈逐渐减小的趋势。具体来说,在 $-10\sim 40^{\circ}\text{C}$,随着管径的增大,管道最大应力的减小趋势较为明显,大致为管径每增加 50 mm ,管道的最大应力降低 0.5 MPa 左右;而在 $40\sim 60^{\circ}\text{C}$,随着管径的增大,管道的最大应力减小趋势并不明显。这一现象在于管径的增大会限制管道温度应力的发展,这种限制与管壁内外的温差大小相关。当地表温度在 $-10\sim 40^{\circ}\text{C}$ 时,管壁内外的温差属于负温差,且管径越小,负温差造成的正应力越大,正向相互叠加之下,管道的最大应力随之快速增大。当地表温度在 $40\sim 60^{\circ}\text{C}$ 时,管壁的

内外温度属于正温差,即管外温度高于管内温度,且管径越小,正温差造成的拉应力越大,反向相互叠加之下,管道的最大应力仅有稍许降低。综上所述,对于管径因素,在温度变化幅度较大的冬季,应更关注小管径管道的结构运行安全。

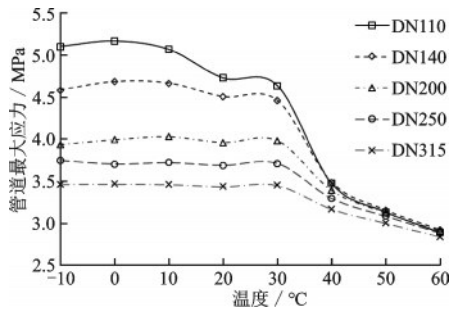


图 11 不同管径条件下管道最大应力随地表温度变化曲线
Fig.11 Curves of maximum stress variation in pipelines under different pipe diameters with ground temperature changes

图 12 给出了不同管径条件下管道最大竖向位移与地表温度变化的关系曲线。可见,同一地表温度条件下,管径越大,管道的最大竖向位移越大。同一管径条件下,管道的最大竖向位移随地表温度的升高呈现先降低后上升的趋势。上述现象与埋深因素的变化趋势基本一致,不同之处在于:管径大小对于管道最大竖向位移的影响更为显著。因此,在温度变化幅度较大的夏冬季节,应更多关注大管径管道的沉降变形。

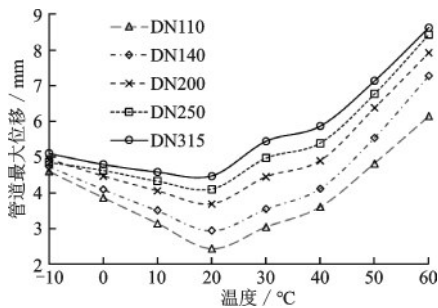


图 12 不同管径下管道最大竖向位移随地表温度变化曲线
Fig.12 Curves of maximum vertical displacement in pipelines under different pipe diameters with ground temperature changes

4.3 壁厚因素

图 13 给出了 5 种壁厚 (4.2、5.3、6.6、8.1、10

mm)条件下地表温度与管道最大应力变化的关系曲线。可见,同一地表温度下,管道的最大应力随着壁厚的增加呈逐渐增大的趋势。同一壁厚条件下,管道的最大应力随地表温度的增大呈逐渐减小的趋势。具体来说,在 $-10\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,随着管道壁厚的增大,管道的最大应力增幅较大,但随地表温度的增大,逐渐减小;而在 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,管道的最大应力随着壁厚的增加稍有“隆起”,且随地表温度的增大,变化不明显;在 $30\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,管道的最大应力随壁厚的增大继续呈增大的趋势,但随地表温度的增加,逐渐减小。上述现象产生的原因与管径因素类似,与之不同的是:当地表温度较大时,壁厚对管道最大应力的影响更为显著。因此,在温度变化幅度较大的夏冬季节,应更多关注薄壁管道的结构运行安全。

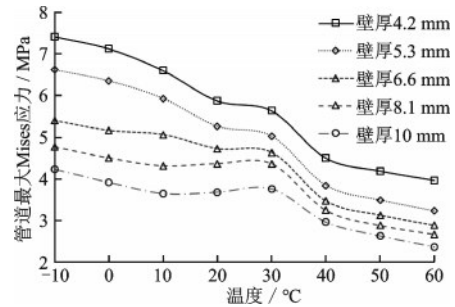


图 13 不同壁厚条件下管道最大应力随地表温度变化曲线
Fig.13 Curves of maximum stress variation in pipelines under different wall thicknesses with ground temperature changes

图 14 给出了不同壁厚条件下管道最大竖向位移与地表温度变化的关系曲线。可见,当地表温度在 $-10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时,管道的最大竖向位移总体呈下降趋势,同时随着管道壁厚的增大,管道的最大竖向位移随之增大。当地表温度在 $20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时,管道的最大竖向位移呈上升趋势,但管道的最大竖向位移随壁厚的增加变化不稳定,这一现象在于:在这一温度范围内,管壁内外的温差可能属于正温差,也可能属于负温差,其与壁厚因素密切相关。总体而言,对于壁厚因素,当气温较高时,应更关注薄壁管道的沉降变形;当气温较低时,应更关注厚壁管道的沉降变形。

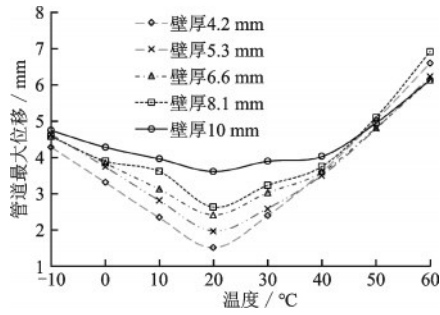


图 14 不同壁厚条件下管道最大竖向位移随地表温度变化曲线

Fig.14 Curves of maximum vertical displacement in pipelines under different wall thickness conditions with ground temperature changes

5 经验预测方程

上述参数敏感性分析结果仅可作定性参考。为便于工程应用,有必要建立地表温度与管道最大应力和最大竖向位移的经验预测方程。因此,本文采用均匀试验设计方法,建立了包括管径、埋深、壁厚和温度在内的计算工况表(表 1)。其中,管道埋深的变化范围为 0.9~3 m;管径的变化范围为 DN110-DN315;壁厚与管径的比例共 5 种(SDR11、SDR13.6、SDR17、SDR21、SDR26)。由表 1 可见,设计表中的 40 个模型均匀分散且齐整可比,因此可保证经验回归结果的可靠性,同时有利于减少计算模型的数量。

采用 ABAQUS 软件,建立上述 40 个考虑管-土相互作用的热力耦合三维数值模型,计算供水管道的最大应力和最大竖向位移。在此基础上,采用 MATLAB 软件开展经验拟合,获得管道最大应力 σ (MPa) 与地表温度 T (°C)、壁厚 t (mm)、管径 D (mm)、埋深 H (m) 之间的经验关系为:

$$\sigma = 4.835 - 0.0156T - 0.0008D + 0.466H - 0.133t \quad (1)$$

同时,建立最大竖向位移 ΔU_H (mm) 与地表温度 T 、壁厚 t 、管径 D 、埋深 H 之间的经验关系为:

$$\Delta U_H = -0.9793 + 0.0437T + 0.0099D + 0.6484H - 0.0534t \quad (2)$$

图 15 给出了式(1)和式(2)的预测结果与有限元计算结果的对比。可见,供水管道的最大应力和最大竖向变形的经验预测值与有限元计算结果基本相符, R^2 分别为 0.8414 和 0.9274。因此,根据式(1)和式(2),一旦已知管道埋深、管径、壁厚,即可

表 1 均匀试验设计表

Table 1 Uniform testing design table

编号	温度/°C	管径/mm	埋深/m	壁厚/mm
1	-10	110	1.2	5.3
2	-10	140	1.8	8.3
3	-10	200	0.9	14.7
4	-10	250	1.5	22.7
5	-10	315	2.1	12.1
6	0	110	1.2	5.3
7	0	140	1.8	8.3
8	0	200	0.9	14.7
9	0	250	1.5	22.7
10	0	315	2.1	12.1
11	10	110	1.2	5.3
12	10	140	1.8	8.3
13	10	200	0.9	14.7
14	10	250	1.5	22.7
15	10	315	2.1	12.1
16	20	110	1.2	5.3
17	20	140	1.8	8.3
18	20	200	0.9	14.7
19	20	250	1.5	22.7
20	20	315	2.1	12.1
21	30	110	1.2	5.3
22	30	140	1.8	8.3
23	30	200	0.9	14.7
24	30	250	1.5	22.7
25	30	315	2.1	12.1
26	40	110	1.2	5.3
27	40	140	1.8	8.3
28	40	200	0.9	14.7
29	40	250	1.5	22.7
30	40	315	2.1	12.1
31	50	110	1.2	5.3
32	50	140	1.8	8.3
33	50	200	0.9	14.7
34	50	250	1.5	22.7
35	50	315	2.1	12.1
36	60	110	1.2	5.3
37	60	140	1.8	8.3
38	60	200	0.9	14.7
39	60	250	1.5	22.7
40	60	315	2.1	12.1

直接评估供水管道在不同地表温度条件下的结构运行安全和沉降风险。

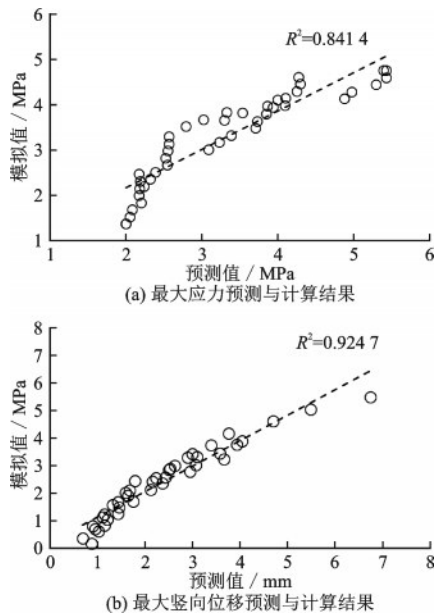


图 15 经验预测与计算结果对比

Fig.15 Comparison of empirical prediction and computational results

6 结 论

温度是影响供水管道日常运行安全的重要因素之一。本文采用有限元数值模拟方法,研究了地表温度变化对供水管道力学行为的影响,建立了供水管道最大应力、最大竖向位移和地表温度变化之间的经验预测方程,获得以下结论:

(1)土壤中的温度场受地表热源和管道内壁热源的双重影响,在空间上围绕管道呈现椭圆型的分布特征。土壤的温度变化幅度小于地表的温度变化幅度,存在“冬暖夏凉”的效果。当地表温度降为 0°C 时,模型的管顶温度仍有 12.5°C ;若模型的管顶温度降为 0°C ,地表温度需要降至 -27.5°C 。

(2)因管壁内外温差的影响,供水管道在地表温度较低时出现“冷缩”现象。同时,在管周与土体的摩擦约束作用下,管道中部将产生应力集中,使得管道接口容易被拉断。另一方面,当地表温度较高时,供水管道将出现“热胀”现象,但因管周的应力较小,管道总体偏于“安全”。因此,相比夏季的地表温度升高,冬季的地表温度下降对于供水管道的漏损与爆管事故影响更大。

(3)管道的力学行为与管壁内外的正负温差密切相关。负温差(即管外温度低于管内温度)作用下,管道发生收缩,产生温度压应力,该压应力将与

管道内压以及上覆土体造成的压应力正向叠加,使得管道的最大应力显著增大。正温差(即管外温度高于管内温度)作用下,管道发生伸长,产生温度拉应力,该拉应力将抵消一部分管道内压和上覆土体产生的压应力。

(4)在变温幅度较大的夏冬季节,管道的最大应力随埋深的增加而增大,随管径的增大而减小,随壁厚的增大而减小。因此,应分别重点关注深埋、小管径和薄壁管道的结构运行安全。同时,管道的最大竖向位移随埋深增加和管径增大呈逐渐增大的趋势。因此,应分别重点关注深埋和大管径管道的沉降变形。

需要指出的是,上述研究针对的对象是埋深为 $0.9\sim 3\text{ m}$,管径为 $\text{DN}110 - \text{DN}315$,壁厚与管径之间的比例为 $\text{SDR}11$ 、 $\text{SDR}13.6$ 、 $\text{SDR}17$ 、 $\text{SDR}21$ 、 $\text{SDR}26$ 的聚乙烯供水管道,埋设地区的地表温度变化范围为 $-10\sim 60^{\circ}\text{C}$,管道内部传输介质的压力恒定为 0.4 MPa ,平均水温为 23°C 。因此,本文的研究结论与建立的经验预测方程仅适用于上述管道和类似地区。同时,上述数值模型并未考虑地下水的季节性变化影响、管内水温的实时变化和地面沉降变形等特征。事实上,实际工程中供水管道的力学行为不仅与温度因素相关,而且与外部交通荷载、环境腐蚀老化以及第三方作用等多种因素相关。因此,如何全面、详细地揭示供水管道的失效破坏机理,避免漏损和爆管等事故的发生,尚需进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 马贵阳,刘晓国,郑平.埋地管道周围土壤水热耦合温度场的数值模拟[J].辽石石油化学大学学报,2007,27(1):40-43,46.
Ma G Y, Liu X G, Zheng P. Numerical simulation for soil hydrothermal coupling temperature field around underground pipelines[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2007, 27(1): 40-43, 46. (in Chinese)
- [2] 张稳军,李瑶,朱战魁.供水管网运行安全风险温度指标研究[J].给水排水,2020,56(7):113-118.
Zhang W J, Li Y, Zhu Z K. Study on temperature index of water supply network operation safety risk assessment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(7): 113-118. (in Chinese)

- [3] 曾景荣. 成品油管道停输状态时压力与温度的关系[J]. 化工管理, 2019(31): 220-222.
Zeng J R. Relationship between pressure and temperature when oil pipelines shut down [J]. Chemical Management, 2019(31): 220-222. (in Chinese)
- [4] 赵永涛. 埋地热油管道周围温度场数值模拟[J]. 新疆石油天然气, 2007, 3(1): 80-82, 86.
Zhao Y T. Numerical simulation of temperature field around buried hot oil pipelines [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2007, 3(1): 80-82, 86. (in Chinese)
- [5] 薛景宏, 储阳华. 温度作用下变径管道的应力应变分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(8): 51-56.
Xue J H, Chu Y H. Stress-strain analysis of reducing pipe under temperature [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(8): 51-56. (in Chinese)
- [6] 黄勇. 考虑热水力耦合作用的埋地管热力学特性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
Huang Y. Study on thermodynamic properties of buried pipe under thermo-hydraulic coupling effect [D]. Ningbo: Ningbo University, 2017. (in Chinese)
- [7] 谢绍正, 卢群展, 杨舒灵, 等. 寒潮期间供水管网事故分析和防治建议[J]. 中国给水排水, 2009, 25(6): 1-14.
Xie S Z, Lu Q Z, Yang S L, et al. Analysis and prevention of water supply network accidents in cold wave [J]. China Water & Waste Water, 2009, 25(6): 1-14. (in Chinese)
- [8] 梁建文, 高美娇, 赵雅坤, 等. 市政埋地供水管道抗寒潮可靠度分析[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(2): 10-17.
Liang J W, Gao M J, Zhao Y K, et al. Cold-wave resistance reliability analysis of municipal water supply pipes [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(2): 10-17. (in Chinese)
- [9] 舒青松, 毛勇. 寒冷天气条件下珠海市供水管网爆管分析及应对措施[J]. 给水排水, 2010, 46(5): 110-113.
Shu Q S, Mao Y. Analysis on the pipe explosion of water supply network in Zhuhai City under cold weather and the countermeasures [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 46(5): 110-113. (in Chinese)
- [10] 马乐宁, 刘文君, 徐洪福. 供水管道爆漏事故影响因素实例分析[J]. 给水排水, 2006, 32(9): 86-89.
Ma L Y, Liu W J, Xu H F. A case study on factors influencing the burst and leakage of water pipeline [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(9): 86-89. (in Chinese)
- [11] 王建军, 张蕊, 赵明, 等. 供水管网冬季爆管事故频发原因分析[J]. 净水技术, 2015, 34(3): 96-100.
Wang J J, Zhang R, Zhao M, et al. Cause analysis of frequent explosion in winter for water supply network pipelines [J]. Water Purification Technology, 2015, 34(3): 96-100. (in Chinese)
- [12] 白莉, 王炎, 刘晓龙. 严寒地区村镇供水管道周围土壤温度场的数值模拟[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2014, 31(3): 45-48.
Bai L, Wang Y, Liu X L. Numerical simulation of soil temperature field around the rural water supply pipe in severe cold area [J]. Journal of Jilin Institute of Architecture & Civil Engineering, 2014, 31(3): 45-48. (in Chinese)
- [13] 张纯, 白云祥. 环境温度对铸铁给水管道的影晌[J]. 中国铁路, 1997(9): 23-25.
Zhang C, Bai Y X. Influence of ambient temperature on cast iron water supply pipelines [J]. China Railway, 1997(9): 23-25. (in Chinese)
- [14] 李冬冬. 不均匀沉降下埋地管道力学性能数值分析[D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.
Li D D. The numerical analysis of mechanical properties of buried pipelines under uneven settlement [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [15] 王丽萍, 刘自尊, 赵帅, 等. 市政聚乙烯供水管材温度拉伸试验研究[J]. 给水排水, 2021, 47(增): 125-132.
Wang L P, Liu Z Z, Zhao S, et al. Tensile test of municipal polythene water mains under temperature conditions [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(Sup): 125-132. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)