

不同埋深下埋地管道温度应力分析

文 璐

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年1月3日; 录用日期: 2024年2月9日; 发布日期: 2024年2月20日

摘 要

管道埋深不同时, 管道周围土体温度不同, 进而导致管道内温度应力不同, 管道埋深对埋地管道的安全性至关重要。为了研究不同埋深下管道温度场和管道温度应力的变化规律, 采用现场实验与ANSYS软件模拟相结合的研究方法, 对现场实验和软件模拟确定的管道周围土体温度值和应力值进行对比分析, 验证有限元模拟的可行性。并进一步通过有限元数值模拟研究不同埋深下8月份和1月份时管道内温度场和温度应力的变化规律, 研究结果表明: 管道周围土体温度表现出冬暖夏凉的变化规律。管道周围土体温度高时, 管道内产生压应力, 管道周围土体温度低时, 管道内产生拉应力。随着管道埋深的不断增大, 管道环向应力和轴向应力逐渐减小。

关键词

不同埋深, 现场实验, 有限元模拟, 温度应力

Temperature Stress Analysis of Buried Pipelines under Different Burial Depths

Lu Wen

School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Jan. 3rd, 2024; accepted: Feb. 9th, 2024; published: Feb. 20th, 2024

Abstract

The different burial depths of pipelines result in different soil temperatures around the pipelines, leading to different temperature stresses inside the pipelines. The burial depth of pipelines is crucial for the safety of buried pipelines. In order to study the temperature field and temperature stress changes of pipelines under different burial depths, a research method combining on-site experiments and ANSYS software simulation was adopted to compare and analyze the tempera-

文章引用: 文璐. 不同埋深下埋地管道温度应力分析[J]. 土木工程, 2024, 13(2): 154-166.

DOI: 10.12677/hjce.2024.132020

ture and stress values of the soil around the pipeline determined by on-site experiments and software simulation, and to verify the feasibility of finite element simulation. Furthermore, through finite element numerical simulation, the temperature field and temperature stress inside the pipeline were studied under different burial depths in August and January. The research results showed that the temperature of the soil around the pipeline exhibited a variation pattern of warm in winter and cool in summer. When the temperature of the soil around the pipeline is high, compressive stress is generated inside the pipeline. When the temperature of the soil around the pipeline is low, tensile stress is generated inside the pipeline. As the burial depth of the pipeline increases, the circumferential and axial stresses of the pipeline gradually decrease.

Keywords

Different Burial Depths, On-Site Experiments, Finite Elements Simulation, Temperature Stress

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地下管线工程因为工程造价低, 长期运行, 节省地上空间等优点而被广泛使用, 因为埋地管道与土体直接接触, 且受到土体的约束, 导致其管道内产生温度应力[1] [2] [3]。埋深不同则管道周围土体温度不同, 管道埋深对管道安全性能有着重要影响[4] [5], 当管道埋深较深时会造成施工困难, 工程造价偏高等不利影响, 管道埋深较浅时, 埋地管道上覆土体重度较小, 容易造成埋地管道产生竖向失稳, 埋地管道破坏后不宜检修, 如若埋地管道发生爆管, 将造成巨大的经济损失。因此合理管道埋深对于工程施工来说是至关重要的。前人对此也进行了大量的研究工作。武建军等[6]通过建立土壤温度场数学模型和原油温度场数学模型, 对不同气候、不同埋深条件下热油管道对温度场分布的影响进行分析, 研究发现, 管道埋深对其横截面上温度分布影响很大。林名桢[7]提出了对不同埋深管段采用不同热影响半径的思想利用有限元法求解了热油管道稳态运行时的热微分方程并且编制了相应的计算程序, 研究结果表明在冬季, 如果计算埋深比实际埋深大将会使温度场计算结果偏高, 夏季则正好与之相反。孔朝金等[8]分析了长输管道埋深不足的产生原因和后果并且提出了一些在特殊管段可以保证埋深的建议, 如合理设计管道敷设方式、回填质量等。王超峰[9]建立埋地热力管道的物理模型, 模拟埋地热油管道的传热过程, 通过研究发现, 在埋设管道时, 不能埋的过浅, 虽然节省施工费用, 但散热量很大; 同样也不能埋的过深, 这样虽然散热量降低节省运行费用, 但施工费会相应增加。

由前人研究可知, 对于埋深不同时管道内温度应力已有研究, 但是对于埋深不同管道周围土体温度不断变化时管道内温度应力的研究极少。因此本文通过建立管-土三维有限元模型, 通过现场实验测定管道周围土体温度值和管道应力值并和 ANSYS 有限元数值模拟进行对比分析, 验证了有限元数值模拟方法的可靠性, 进而用软件模拟分析不同管道埋深对管道温度场和管道应力值的影响。

2. 现场实验

2.1. 埋地管道周围土体温度监测

采用 JMT-36X 型温度传感器如图 1 所示, 对管道周围土体温度进行为期一年的现场监测, JMT-36X 传感器是一种高精度、高稳定性、高可靠性、防潮及绝缘性良好的新型传感器, 其精度在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、测量

范围在 -30°C ~ 120°C 、线性误差为 0.5°C 。可广泛应用于石油、化工、能源、交通、铁路、建筑等行业中的温度测量。监测点布置图如图 2，在现场沿埋深方向每隔 0.5 m 布设一个温度传感器，现场共布设 6 个监测点。



Figure 1. Temperature sensor
图 1. 温度传感器

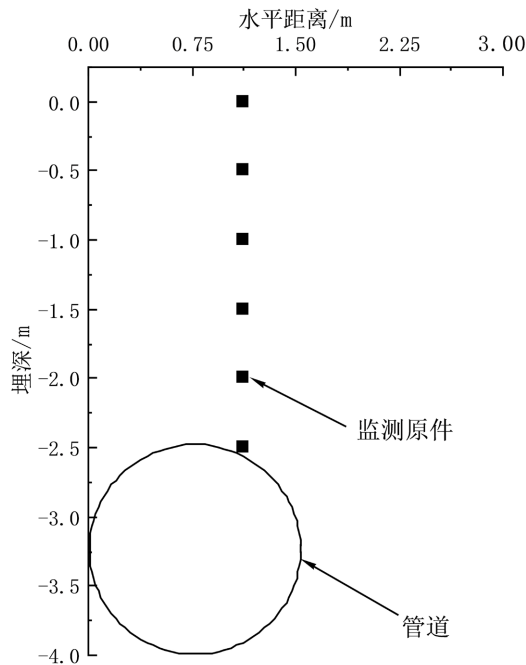


Figure 2. Layout of monitoring points
图 2. 监测点布置

2.2. 埋地管道应变监测

监测管道因为土体温度变化引起的一年中的变形情况，本试验选取了三轴 45° 应变花来测量管道应变。应变片贴在管道上，通过管道的拉伸或压缩变形而改变应变片敏感栅的电阻，进而可确定平面应力场中主应变的大小和方向。本试验采用的应变片可以测试 3 个方向(0° 、 45° 、 90°)的应变，故称之为应变花，根据现场的实际情况应变花分别粘贴在如图 3 所示。分别沿管周贴 8 个应变花，分别为 0° 、 45° 、 90° 、

135℃、180℃、225℃、270℃、315℃。因为钢管是温度敏感性材料，所以当其表面温度发生变化时，其钢管要产生热胀冷缩的变形，但是因为土体的约束作用导致浅埋管道的变形受阻，从而导致管道内温度应力的产生。采用应变采集仪进行数据的采集工作，当结构变形为弹性变形，且忽略弯矩影响时，将应变转换成应力公式为：

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

式中： σ 为应力值。

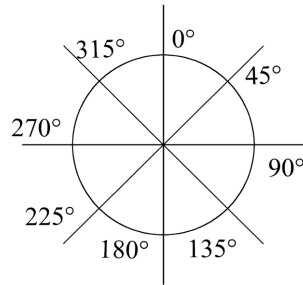


Figure 3. Schematic diagram of strain flower pasting

图 3. 应变花粘贴示意图

3. 软件模拟

3.1. 模型尺寸

采用 ANSYS 建立管 - 土三维有限元模型如图 4 所示，土体模型的尺寸为：宽度 10 m，深度 10 m，长度 30 m。管道模型的尺寸为：长度 30 m，外径 1.5 m，内径 1.48 m，管道顶端距上部土体 3 m。

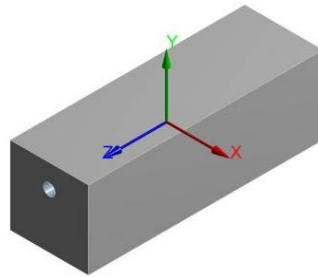


Figure 4. Three dimensional finite element model of pipe soil

图 4. 管 - 土三维有限元模型

3.2. 材料参数的选取

材料参数的选取见表 1、表 2

Table 1. Pipeline model parameters

表 1. 管道模型参数

指标	参数
管道材料	Q355C 钢材
管道密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7850

续表

管道弹性模量/Gpa	206
管道柏松比	0.3
管道膨胀系数/(m·°C ⁻¹)	1.2 × 10 ⁻⁵
管道导热系数/W(m·°C) ⁻¹	48
管道屈服强度/(Mpa)	439

Table 2. Soil model parameters**表 2.** 土体模型参数

指标	参数
土体材料	砂土
土体密度/(kg·m ⁻³)	1900
土体弹性模量/Mpa	18
土体柏松比	0.3
土体导热系数/W(m·°C) ⁻¹	1.4
土体粘聚力/(kpa)	5
土体内摩擦角/(°)	34

3.3. 边界条件和约束的设定

重力荷载：重力荷载取 y 轴负方向，大小取 $9.8 \text{ m}^2/\text{s}$ 。温度荷载：对于模型上边界条件，根据现场实测温度值确定 8 月份土体表面温度值为 26.6°C 和 1 月份土体表面温度值为 0°C ，对于模型两侧边界条件，管道温度对于水平方向的影响是有限的，当管道与土体在水平方法上的距离足够远时，管道的对此时的温度场的作用忽略不计，对于模型下边界条件，地温年变化深度以下地温变化量，其温度值可以取为常量根据现场的监测，地表以下 10 m 处的土体温度值近似为 14°C ，以此作为模型下边界条件，土体添加预定义温度场 22°C 。在本次模拟中采用间接耦合法进行模拟。

土体材料本构模型选择 Mohr-Coulomb 弹塑性模型，选择管道外壁面为目标面管周土体面为接触面，管 - 土摩擦系数取 0.4 ，对土体而言下表面采用固定约束，上表面为自由面，模型左右表面约束 x 方向的位移，模型前后表面约束 z 方向位移。对管道两端约束 z 方向的位移。

4. 结果分析

4.1. 数值模拟和实验结果对比验证

为了验证有限元结果的正确性，取 1 月份和 8 月份两个典型月份的现场实测土体温度值和应力值与模拟土体温度值和应力值进行对比分析。由图 5、图 6 可知：土体温度值在 8 月份和 1 月份实验值与模拟值具有相同的变化趋势，且两者相差不大，在 8 月份土体温度值随埋深的增大而减小，在 1 月份土体温度值随埋深的增大而增大，其结果表明在当地的气候条件下其土体温度值呈现冬暖夏凉的变化趋势。温度变化主要影响管道轴向应力，对 8 月份和 1 月份管道轴向应力实验值和模拟值进行对比分析如图 7、图 8 可知：其实验值和模拟值两者相差不大，在 8 月份管道周围土体温度较高，管道轴向产生压应力。在 1 月份管道周围土体温度较低，管道轴向产生拉应力。

综合可知土体温度值和管道应力值其实验值和数值模拟值吻合较好，从而验证了有限元数值模拟的可行性，因此本文将基于该有限元方法研究不同埋深下管道温度场和应力值的变化规律。

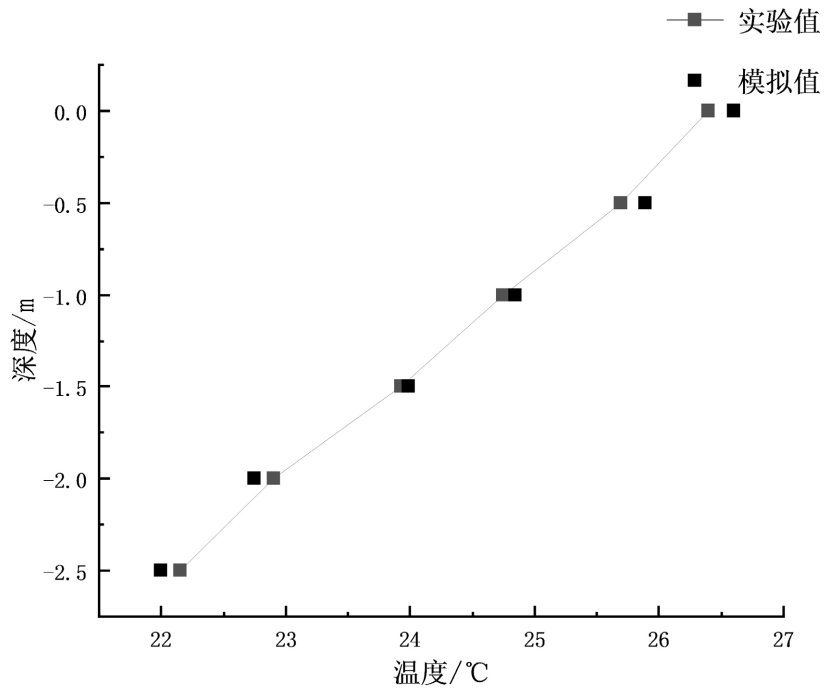


Figure 5. Comparison between soil temperature values and simulated values in August
图 5. 8 月份土体温度值与模拟值对比

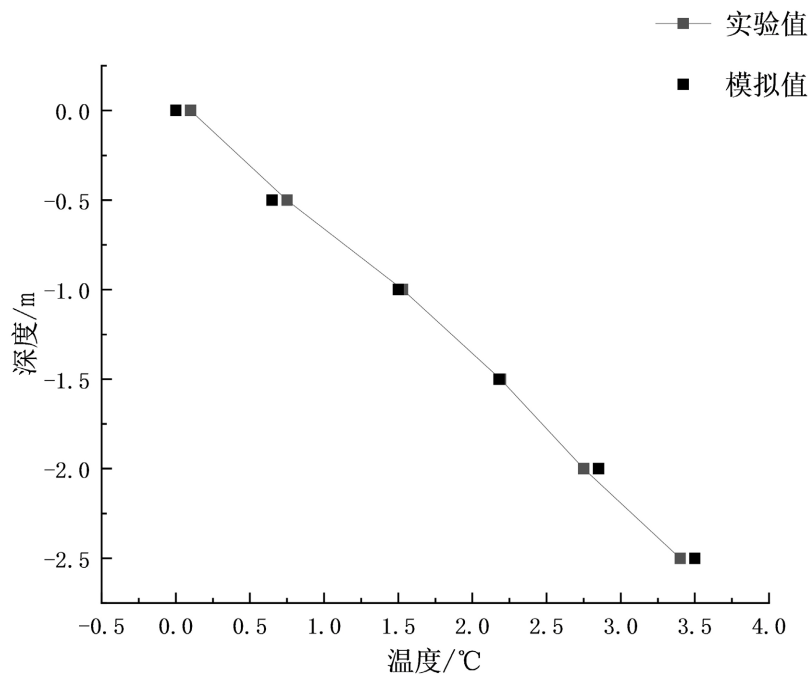


Figure 6. Comparison between soil temperature values and simulated values in January
图 6. 1 月份土体温度值与模拟值对比

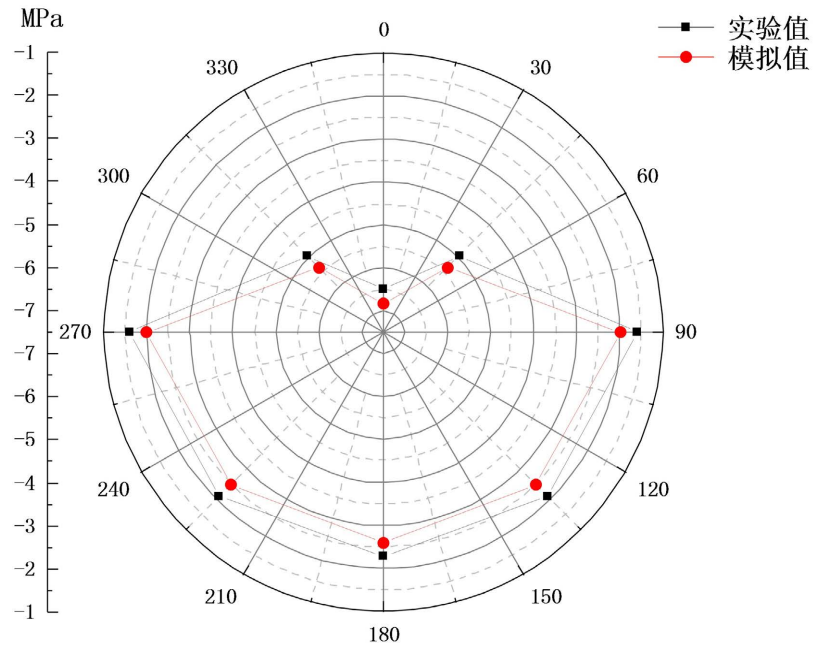


Figure 7. Comparison between axial stress values and simulated values in August
图 7. 8 月份轴向应力值与模拟值对比

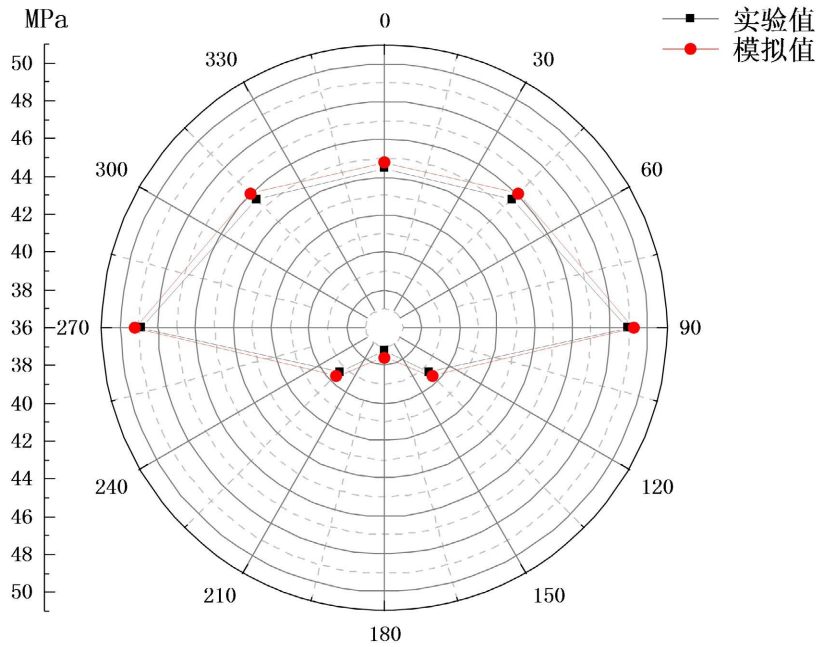


Figure 8. Comparison of axial stress values and simulated values in January
图 8. 1 月份轴向应力值与模拟值对比

4.2. 不同埋深下管道温度场分析

选择 1 月份和 8 月份气候最低和最高时进行分析，其他条件不变，选择埋深为 2、3、4 m 进行分析如图 9~14。提取 1 月份和 8 月份不同埋深时管道顶端和管道底端数据绘图如图 15、图 16 可知：因为管道直径较大，则管道温度值在管顶、管侧和管底的温度值有所不同，因为管道周围土体温度值随大气温

度不断的发生改变，所以赋存于土体内部的管道温度值不断的发生改变，可以看出在 8 月份随着埋深的增大，管顶和管底温度值逐渐减小，在 1 月份随着埋深的增大，管顶和管底温度值逐渐增大，符合管道周围土体冬暖夏凉的变化规律。

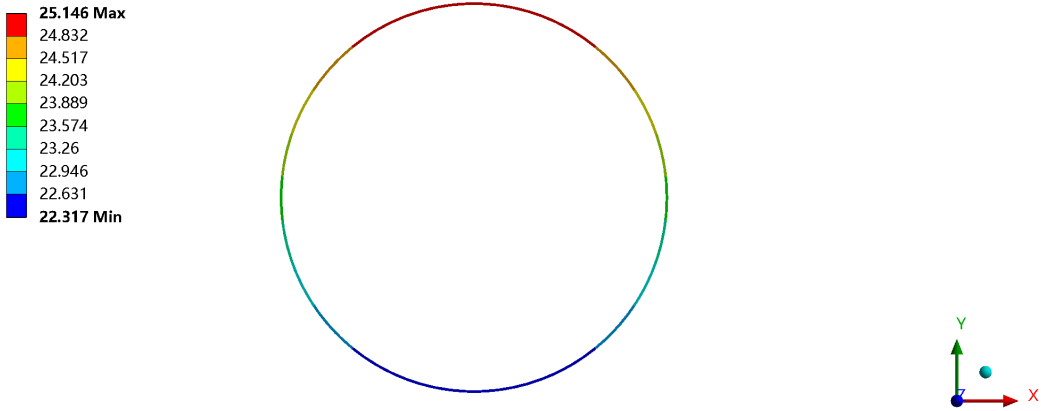


Figure 9. Temperature cloud map of soil at a depth of 2 m in August
图 9. 8 月份 2 m 埋深土体温度云图

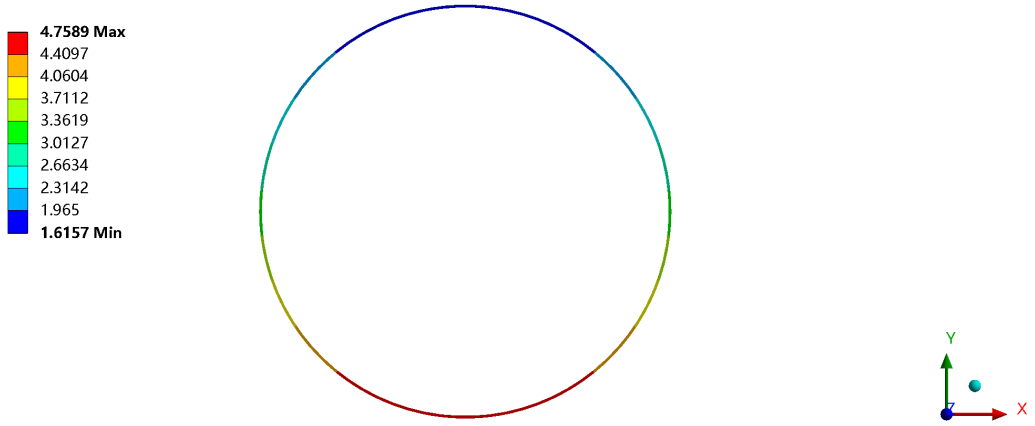


Figure 10. Temperature cloud map of soil at a depth of 2 m in January
图 10. 1 月份 2 m 埋深土体温度云图

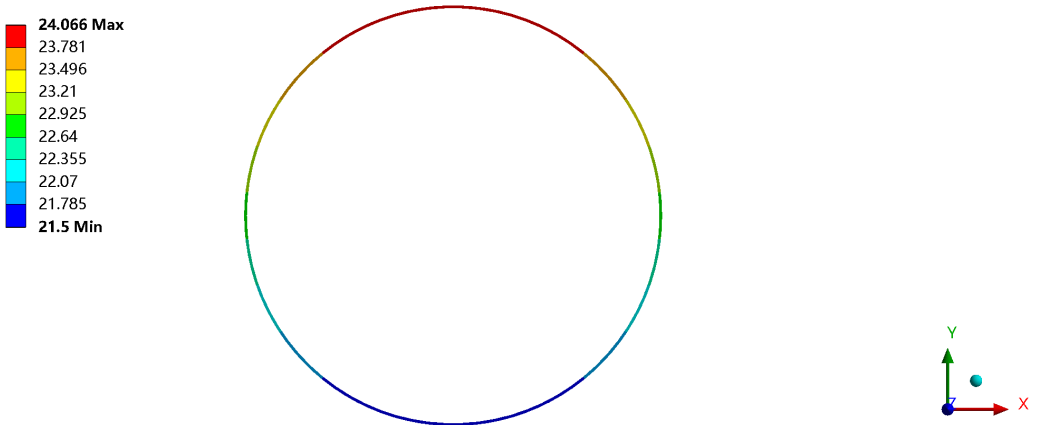


Figure 11. Cloud map of soil temperature at a depth of 3 m in August
图 11. 8 月份 3 m 埋深土体温度云图

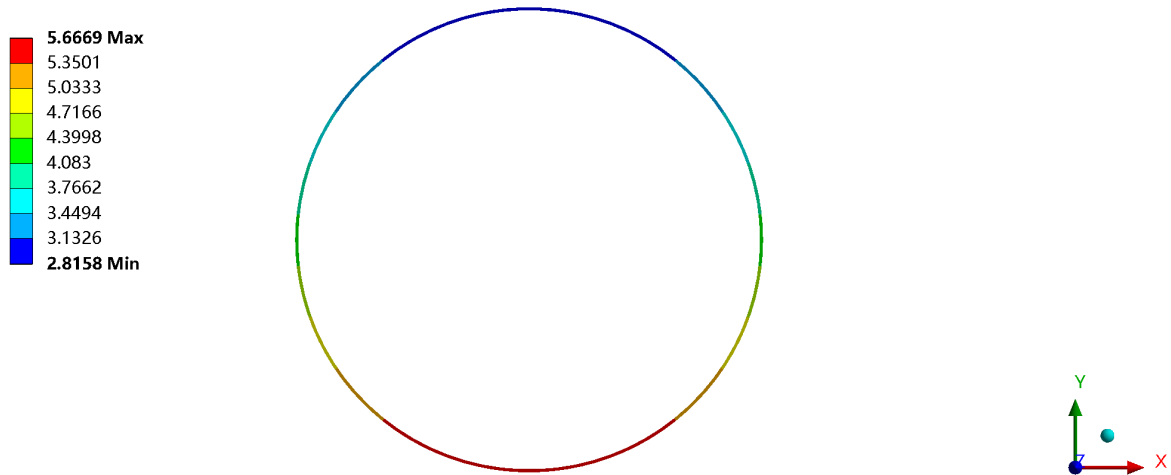


Figure 12. Temperature cloud map of soil at a depth of 3 m in January
图 12. 1 月份 3 m 埋深土体温度云图

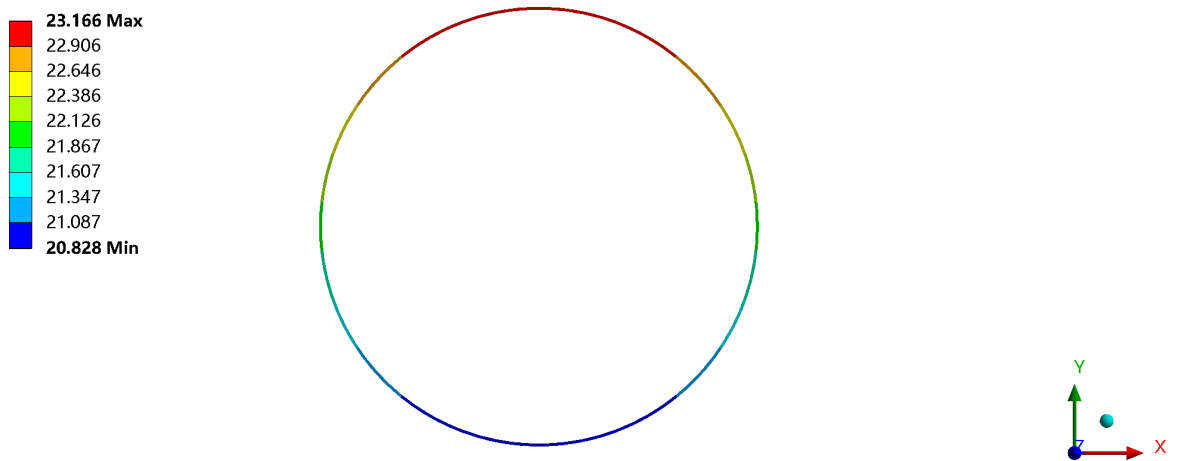


Figure 13. Temperature cloud map of soil buried at a depth of 4 m in August
图 13. 8 月份 4 m 埋深土体温度云图

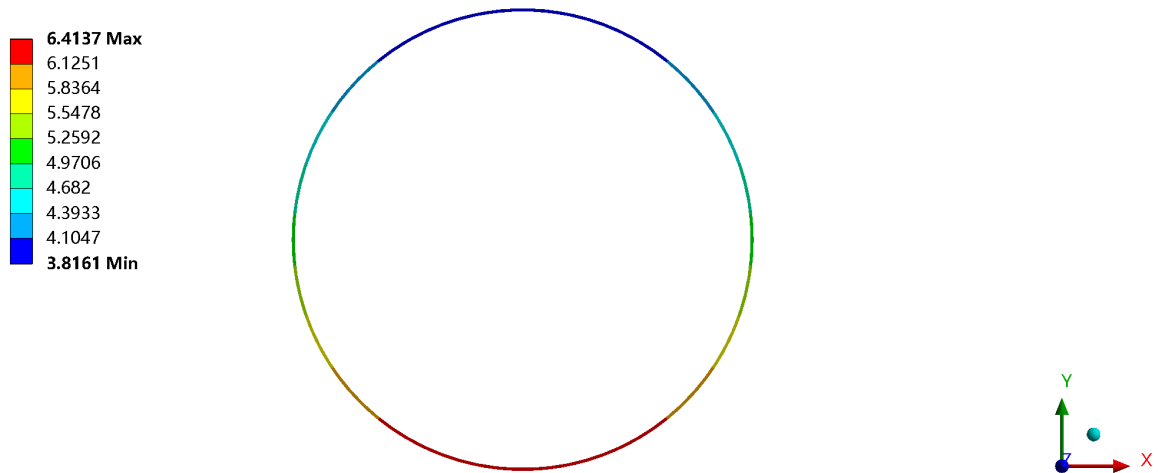


Figure 14. Temperature cloud map of soil buried at a depth of 4 m in January
图 14. 1 月份 4 m 埋深土体温度云图

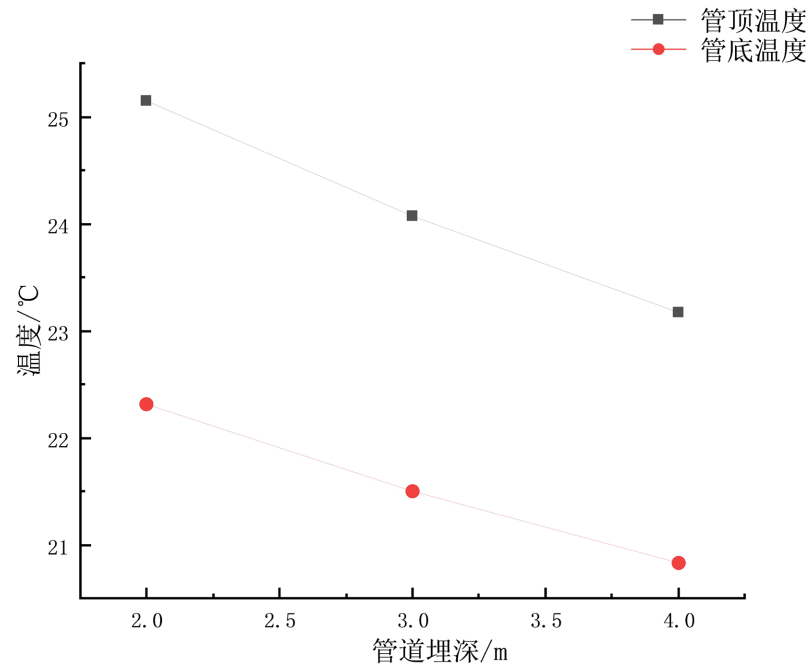


Figure 15. Temperature values of pipelines with different burial depths in August
图 15. 8 月份不同埋深管道温度值

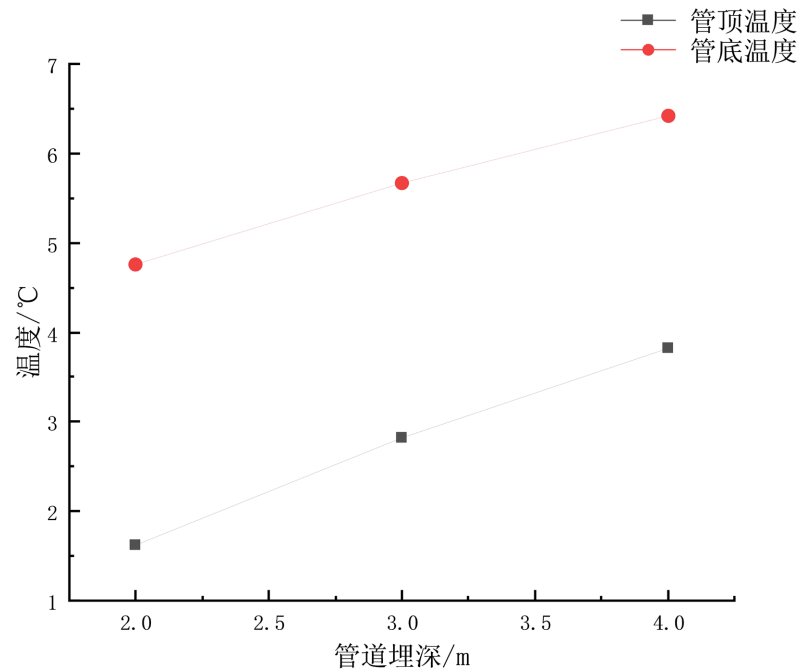


Figure 16. Temperature values of pipelines with different burial depths in January
图 16. 1 月份不同埋深管道温度值

4.3. 不同埋深下管道应力分析

将上文土体和管道温度场作为温度荷载加载至应力场，分析 8 月份和 1 月份不同埋深下管道应力值。因为该管道是薄壁结构，管道径向应力可以忽略不计，因此只分析管道环向应力和轴向应力。由

下图 1 月份和 8 月份管道环向应力如图 17、图 19 可知：随着管道埋深的增大，管道环向应力值逐渐增大，并且管顶和管底受压，管侧受拉。且管侧应力值大于管顶和管底。因为环向应力由外压引起，当埋深增大的时候，其土压力增大，进而导致管道环向应力值增大。管顶和管底受压。管侧受拉主要因为管顶底承受压应力，所以导致管顶和管底受压，而在管侧因为管道在管侧产生环向鼓胀，所以导致管侧受拉。管侧应力值大于管顶和管底主要因为由于管道的变形在管顶产生了明显的土拱效应使管道顶端和底端的土压力减小，即管顶和管底应力值减小，在管侧应该管道发生鼓胀，对管侧土体有明显的挤压作用，因此使管侧土压力增大，即管侧应力值增大，所以管道环向应力值管侧应力大于管顶和管底。

由下图 1 月份和 8 月份管道轴向应力如图 18、图 20 可知：随着埋深的增大，管道轴向应力逐渐减小。分析 8 月份管道轴向应力可知，随着埋深的增大，8 月份管道轴向应力逐渐减小。主要因为管道轴向应力由温度分量和压力分量组成，由温度分量可知，管道在 8 月份管道周围土体温度随埋深的增大有“夏凉”的变化规律，则埋深越大，管道周围土体温度越低，又因为在 8 月份管道内产生压应力，则埋深越深，管道轴向压应力值越小。由压力分量可知，随着埋深的增大，管顶底受压，管侧受拉，且其值随着埋深的增大而增大，则由两部分叠加可知在 8 月份随着埋深的增大，8 月份管道轴向应力逐渐减小。分析 1 月份管道轴向应力可知，随着埋深的增大，1 月份管道轴向应力逐渐减小。主要因为管道轴向应力由温度分量和压力分量组成，由温度分量可知，管道在 1 月份管道周围土体温度随埋深的增大有“冬暖”的变化规律，则埋深越大，管道周围土体温度越高，又因为在 1 月份管道内产生拉应力，则埋深越深，管道轴向拉应力值越小。由压力分量可知，随着埋深的增大，管顶底受压，管侧受拉，且其值随着埋深的增大而增大，则由两部分叠加可知在 1 月份随着埋深的增大，1 月份管道轴向应力逐渐减小。

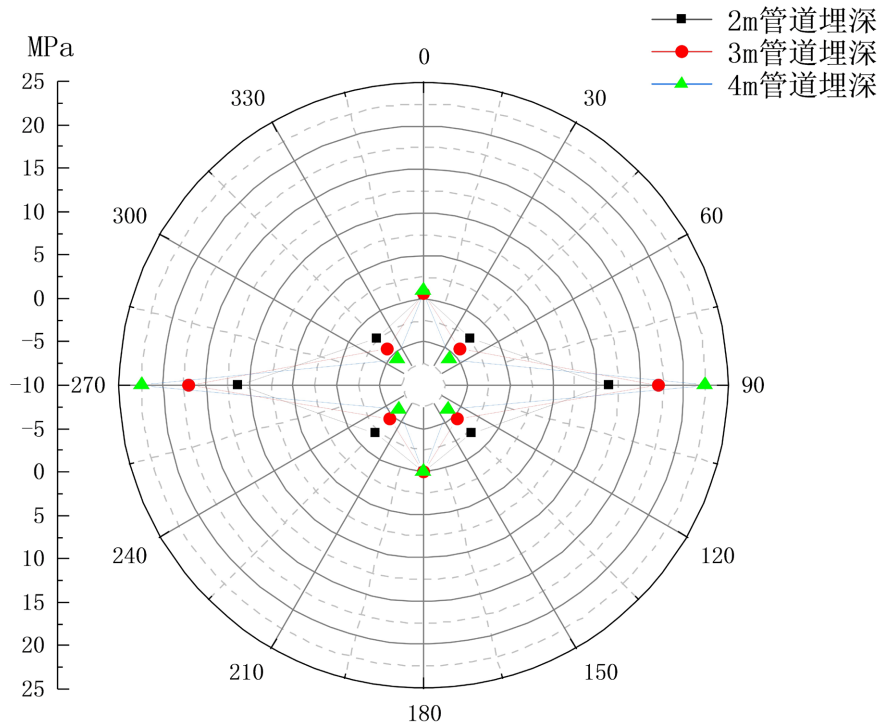


Figure 17. Circumferential stress of pipelines under different burial depths in August
图 17. 8 月份不同埋深下管道环向应力

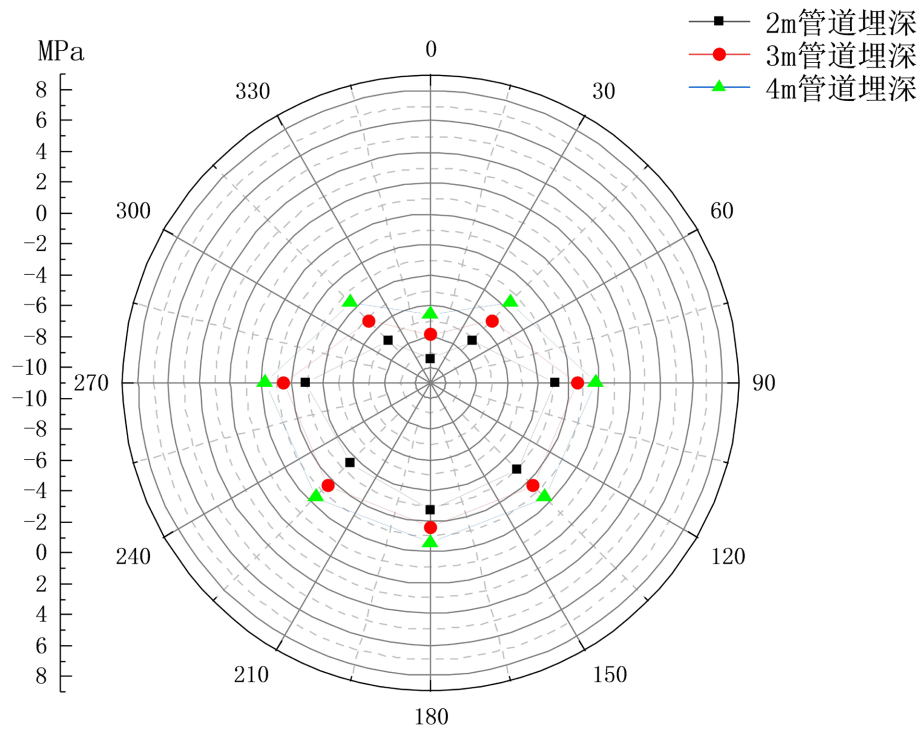


Figure 18. Axial stress of pipelines under different burial depths in August
 图 18. 8 月份不同埋深下管道轴向应力

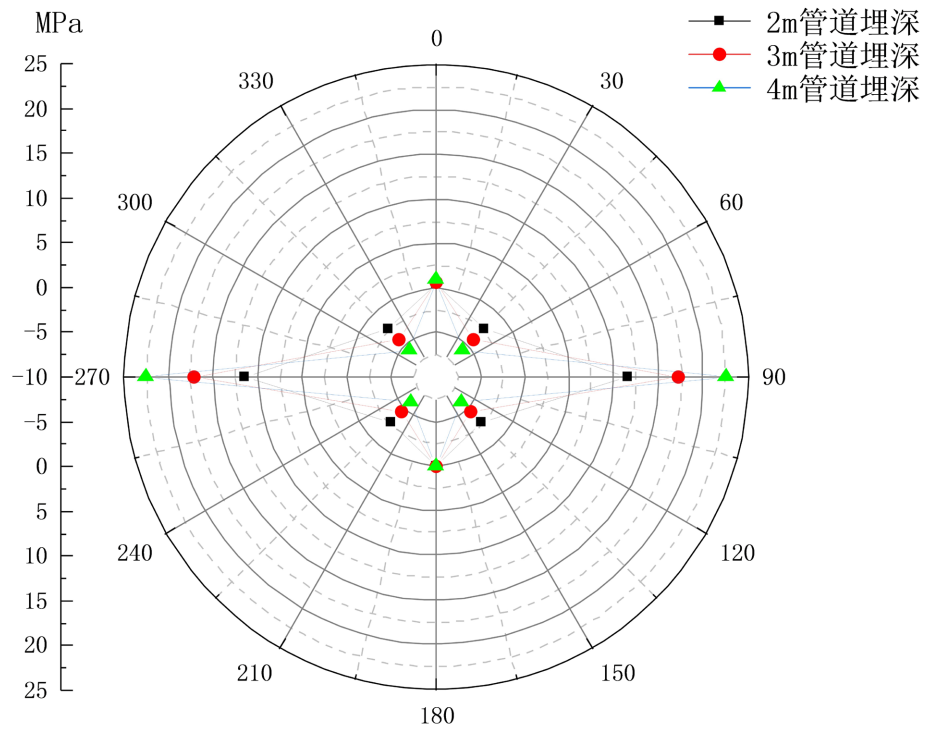


Figure 19. Pipeline circumferential stress under different burial depths in January
 图 19. 1 月份不同埋深下管道环向应力

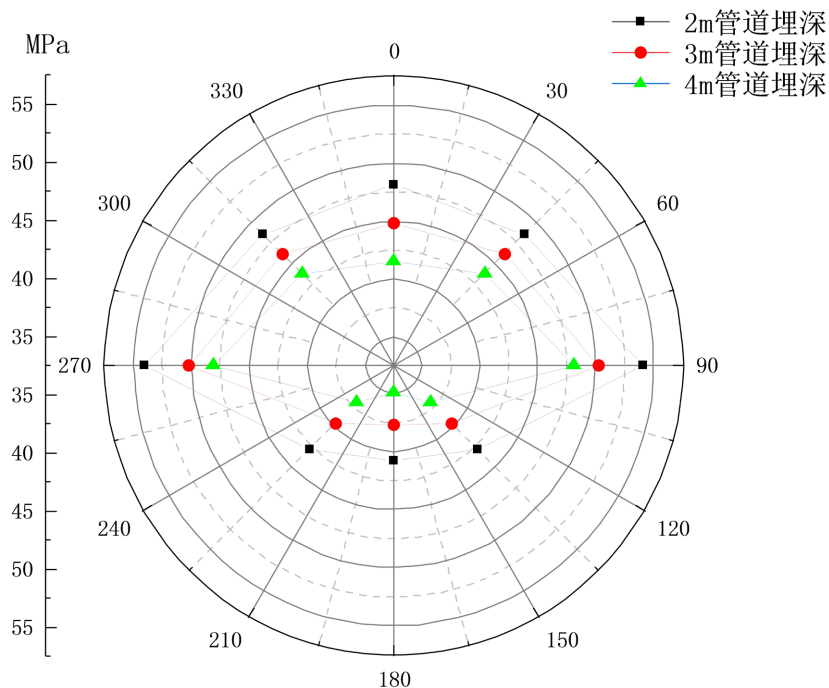


Figure 20. Axial stress of pipelines under different burial depths in January
图 20. 1 月份不同埋深下管道轴向应力

5. 结论

1) 管道周围土体温度呈现冬暖夏凉的变化趋势, 冬季管道周围土体温度随埋深的增大而增大, 夏季管道周围土体温度随埋深的增大而减小。

2) 管道周围土体温度高时, 管道内产生压应力。管道周围土体温度低时, 管道内产生拉应力。

3) 因为管道周围土体温度不断变化, 则赋存与土体内部的管道温度也不断的发生变化, 因为管道的直径较大, 所以管顶、管侧、管底温度不相同, 在 8 月份随着埋深的增大, 管顶和管底温度值逐渐减小, 在 1 月份随着埋深的增大, 管顶和管底温度值逐渐增大, 符合管道周围土体冬暖夏凉的变化规律。

4) 随着埋深的增大, 管道环向应力值逐渐增大, 管道轴向应力值逐渐减小。管道埋深每增大 1 m, 管道环向应力约增大 2 Mpa, 管道轴向应力约减小 2 Mpa。

参考文献

- [1] 许春青, 胡晶国. 市政直埋管线温度应力引起的风险评估分析[J]. 工程与实验, 2020, 60(4): 67-71.
- [2] 张志浩. 聚乙烯管道温度应力分析及应对措施[J]. 给水排水, 2017, 43(9): 100-102.
- [3] 王晓津, 王艳昌, 肖刚, 等. 城市埋地燃气钢管的应力分析[J]. 煤气与热力, 2020, 40(10): 4-8.
- [4] 杨海礁. 直埋供热管道埋深的研究[J]. 煤气与热力, 2010, 30(10): 14-16.
- [5] 王峰. 北方寒区输水管道埋置深度分析及防冻害措施探讨[J]. 水利科技与经济, 2019, 25(4): 40-44.
- [6] 武建军, 马贵阳. 改变热油管道埋深对土壤温度场的影响[J]. 管道技术与设备, 2011(1): 48-50.
- [7] 林名桢, 李传宪, 杨飞. 管道埋深对稳定运行热油管道热力特性的影响[J]. 石油化工高等学校学报, 2008, 21(3): 63-67.
- [8] 孔朝金, 白晓航, 李贵荣, 等. 长输管道埋深安全隐患防治和保障措施[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(8): 82-84.
- [9] 王超峰. 不同埋深热油管道传热数值模拟[J]. 油气田地面工程, 2013, 32(5): 48-48.