

砂土地中直埋热力管道热力学特性试验研究

吴嘉锦, 郑荣跃*, 邓岳保, 陈士远, 陈德升

(宁波大学 岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为研究砂土地中管道温度变化影响下管体与土体的热力学特性, 设计了一种直埋热力管道温度变化模型试验及测试系统, 较为系统地研究了砂土地中直埋热力管道运行时的管土热力学特性. 结果表明: 在管道升温过程中, 管道上部土体温度增长速率和幅度均大于管道侧边及底部土体温度; 土体孔压随温度上升而增大, 在温度稳定后逐渐消散; 管体应变在温度上升时因膨胀而变大, 随后回落, 并维持在一定值, 其中环向应变大于轴向应变.

关键词: 砂土地基; 热力管道; 应变; 孔隙水压力

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 04-0070-07

地下热力管道是保障城市运行的重要基础设施和“生命线”, 但是近年来, 地下热力管道开裂破坏以及事故等时有发生, 严重影响人们的日常生活及人身安全^[1-2]. 由于其隐蔽性和突发性导致事故较难预防及处理, 故探究事故的发生机理及演化规律对预防处理相关事故有着非常重要的价值.

国内外已有不少学者主要从理论、有限元模拟或者数值计算方法对热力管道开展相关的研究. Mitchell 等^[3]、Chen 等^[4]、DiFelice 等^[5]基于无限大平面的假设对 2 个圆型域温度场进行解析分析. 白冰^[6]对一个无限长圆柱形热源向外传导和扩散问题进行研究, 给出了非等温条件下周围饱和土体的温度、孔隙水压力和位移的解析解答, 从理论上探讨了热力管道的管-土相互作用. 任鹏召^[7]围绕供热管道管-土相互作用的复杂性及热力管道受力因素的多样性, 针对大管径多层结构供热管道进行了应力特性研究, 分析了大管径热力管道的应力特性及稳定性特征. 洪学娣^[8]利用 ADINA 软件对直埋热力管道在外力作用下的破坏进行数值模拟, 并重点考虑了管内热流与管道的耦合作用. 崔秀国等^[9]建立了埋地热油管道热力影响区的数学模型, 讨论了管道温度变化对管周土体温度的影

响. Nacini 等^[10]研究了管道直径和厚度、管道埋深、管道周围土体的摩擦角和密度等设计参数对管道最大弯曲应变和弯曲应变分布的关系. 徐钱^[11]也提出了一种管道承载覆土压力及管底土反力模型, 建立了直埋热水管道流动与传热过程水力、热力、流动场耦合作用的数学计算模型.

相对于数值模拟来说, 通过试验来分析热力管道力学特性的研究还比较少. 黄勇^[12]通过模型试验研究了软土地区直埋热力管道在恒温 and 间歇运行条件下的管土热力学特性, 然而也仅仅只考虑了管道内媒介在 80 °C 运行时的管-土相互作用, 并未对不同温度条件以及不同土质地基的影响未作探讨.

砂土地基在我国城市建设中有着非常大的比例, 且我国《城镇供热直埋热水管道技术规程》(CJJ/T 81-2013)和《城镇直埋供热管道工程技术规程》(CJJ/T 81-98)也规定在开槽管道施工中, 对于管道的回填土应采用砂性土进行回填. 由此, 直埋热力管道埋与砂土地基的相互作用问题有必要开展细致研究.

针对此现状, 笔者进行了砂土地条件下直埋热力管道的热力学特性试验, 对直埋热力管道在管内流体温度变化情况下的管身应力、土体表面

收稿日期: 2019-11-12.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51778303).

第一作者: 吴嘉锦(1995-), 男, 浙江绍兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 地下工程. E-mail: jimodenianqingren@163.com

*通信作者: 郑荣跃(1964-), 男, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 软土地基处理. E-mail: rongyue@nbu.edu.cn

沉降、土体温度场变化以及土体孔压变化等方面展开了测试及分析。

1 模型简介及试验方案

1.1 地基土

模型试验中土体是采用砂颗粒与土按一定比例拌合而成的砂土。通过筛网过滤土中粗粒, 再将过滤土和粗砂按比例放置于搅拌机搅拌, 加水搅拌均匀后静置得到试验用土。基本参数见表 1。

表 1 模型试验砂土基本参数

参数	数值
内摩擦角/(°)	34
黏聚力/kPa	0
相对密实度/%	64
天然孔隙比	0.715
干密度/(g·cm ⁻³)	1.494
饱和密度/(g·cm ⁻³)	1.895

砂土颗粒级配曲线如图 1 所示。

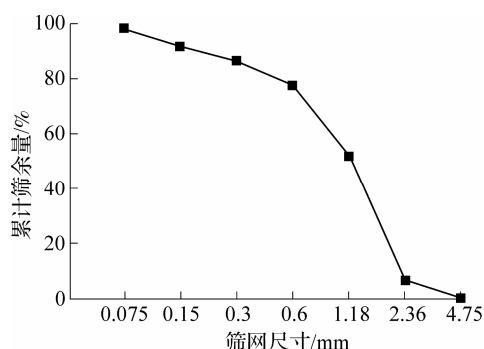


图 1 砂土试样颗粒级配曲线

1.2 模型箱

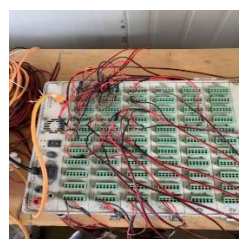
对于模型试验来说, 模型箱的尺寸及边界问题对热力管的管土相互作用具有一定影响, 因此为了减少边界效果对实验结果的影响, 使得模型试验能够顺利开展, 设计了内部尺寸长×宽×高分别为 2.5 m×1.2 m×1.2 m 的模型箱。

1.3 量测装置及温度控制系统

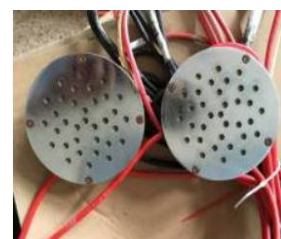
量测系统包括 DH3816 静态应变测试系统(图 2(a))、百分表、应变片、温度-孔隙水压力传感器(图 2(b))、JTM-V10A 型频率温度测量仪^[11]。其中百分表与应变片 DH3816 型应变采集仪连接, 通过电脑自动记录数据, 而孔压、温度数据通过人工读取方式进行记录。

温度控制系统主要包括 AEOT-20-18 温度循环控制仪(常温~300 ℃)(图 2(c))、进出油接口、保温材料、玻璃丝布、美孚 605#导热油、连接软管。

采用美孚 605#导热油作为热媒介质, 通过软管将无缝钢管与温度循环控制仪相连接。为减少在传输热媒过程中存在的热量损耗, 基于工程背景和实际情况对无缝钢管和连接软管进行保温处理。试验中, 先使用 TS1-382 高强度耐高温胶水密封应变片, 待胶水凝固后, 用无纺纱布紧密缠绕管身, 之后在无纺纱布外层包裹橡塑保温管套, 其闭孔结构有极小的水汽渗透率, 能长期保持较低的导热系数, 故能有效减少温度的消散。最后在橡塑保温材料外部包裹玻璃丝布, 作为保温层的最外层保护。处理过的无缝钢管如图 2(d)所示。



(a)静态应变测试系统



(b)温度-孔隙水压力计



(c)AEOT-20-18 温度循环控制仪



(d)保温处理之后的无缝钢管

图 2 量测及温度控制系统等

1.4 传感器的布设

1.4.1 应变片的布设

为满足试验需要, 并保证测量的准确性, 选择最高测量温度为 250 ℃的耐高温应变片。在应变片布设过程中首先清理管道表面, 除去管道表面的

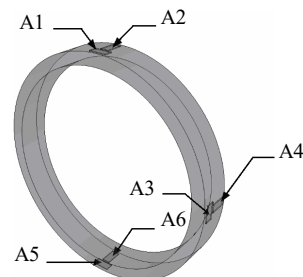


图 3 应变片的布设

灰尘及铁锈, 清理完成后粘贴应变片. 应变片主要布设 3 环, 分别在距管道右侧 0.25 m、0.5 m、0.75 m 处; 且分别布设在管壁上方、侧边、下方, 轴向应变片编号 A1、A3、A5, 环向应变片编号 A2、A4、A6(图 3). 其余 2 环也按此规律布设.

1.4.2 温度-孔隙水压力计的埋设

为了综合分析管体及其周围土体的力学特性变化, 选择 JTM-V3000A 型振弦式孔隙水压力计, 其温度使用范围为 $-25 \sim 80^{\circ}\text{C}$, 可以满足试验要求. 将温度-孔隙水压力计埋设于管体周围. 把 12 个温度-孔隙水压力计分为 2 组, 每组各 6 个, 分别埋设于管体中间及端口位置, 管体中间的传感器编号为 A 组, 端口的传感器编号为 B 组. 在距箱底部 20、40、60 cm 处分别埋设 2 个传感器. 20 cm 层为 1、2 号, 40 cm 层为 3、4 号, 60 cm 层为 5、6 号, 使得 2、4、6 号和 1、3、5 号距离管道的路径数值大小相同. 传感器相关位置如图 4 所示.

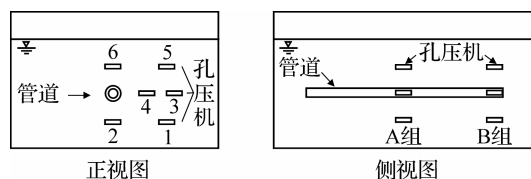


图 4 温度-孔隙水压力计的埋设

1.4.3 位移计的布设

在箱体上方搭设钢条, 以此为支点布设位移器, 3 个位移器呈直线相同间距搭设, 可以较好地测量土体平均沉降(图 5).



图 5 位移计的布设

1.5 试验方案

填土及仪器的埋设过程如图 6 所示. 对于砂土地基的模拟主要将砂土运至模型箱内, 并对其进行静置预压. 先在箱底及其四周铺设不透水膜, 形成密封空间, 防止砂土中水分从模型箱的拼接缝隙中渗出. 铺设不透水膜之后, 每层 25 cm 分 4 层逐

层铺设砂土, 铺设砂土的过程中依次埋设孔压计及管道, 最后在土体上方放置一块 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的钢板进行预压静置, 并在此钢板上搭设位移计.



图 6 填土过程及仪器的埋设

静置 7 d 后开始进行试验. 通过升温管道内热媒的方式模拟供热管道运行的状态, 分别设置 60、80、100、120 $^{\circ}\text{C}$ 为管道流体流动温度, 探究管道温度变化对管道和土体的影响. 加温过程中, 热媒的温度上升速度较快, 可视为瞬时变化. 实验过程中不断记录孔压、温度、应力、位移等相应数据.

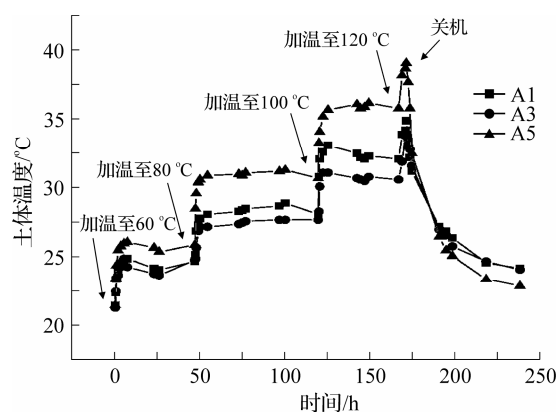
2 试验结果分析

通过对数据的整理, 分析温度场、位移场、应变场和孔压场的变化及其对管体和土体的影响.

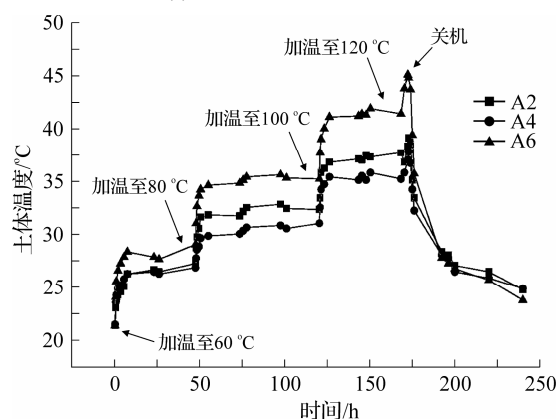
2.1 土体温度分析

对于温度场而言, 主要分析管道中流体温度变化对周围土体的温度影响, 并着重讨论距离管体 200 mm 的 A 组 135 号埋测点和 400 mm 的 246 号埋测点的温度变化. 具体的土体温度变化如图 7 所示.

通过对 A 组内环温度的比较可以发现: (1) 在管道运行时, 管道上方的土体温度比管道侧边及底部的土体温度上升的快, 且稳定后的最终温度较高; 而管道底部土体的稳定温度则高于管道侧边的土体温度. 可以得出砂土地基中热量并不是均匀向四周传递, 其中竖向的热传递通道比横向



(a)A 组外环温度变化曲线



(b)A 组内环温度变化曲线

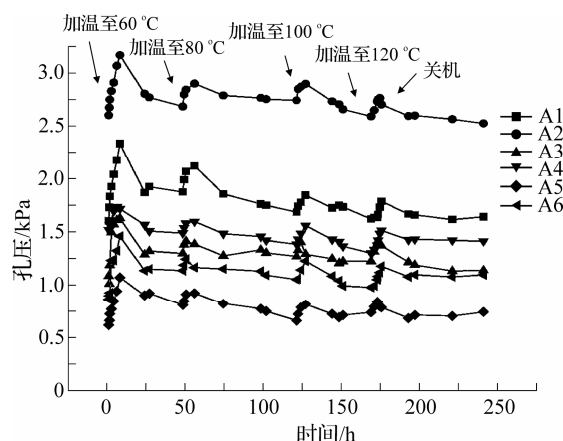
图7 土体温度变化曲线

的热传递通道更优,而在竖向热传递通道中,热量更易往上方传递。(2)在降温过程中,管道上方的土体温度下降得更快,且最终维持的温度也更低。其主要原因是由于管道下方及侧边的土体埋深更深,具有良好的储温能力,而上方土体中的热量更易往地表处传递消散,导致在热源关闭后,温度下降得更快。

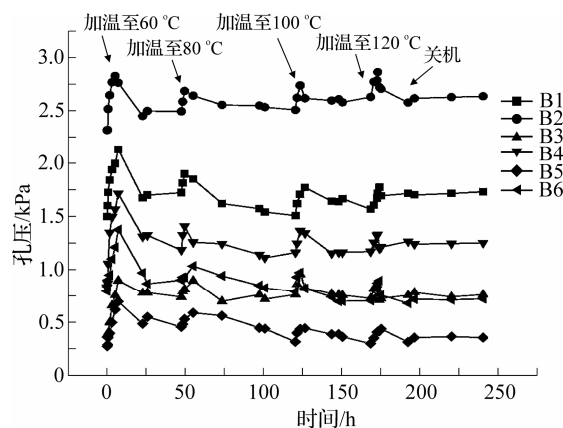
将A组内环温度与外环温度进行比较可以发现,由于离热源较近,内环土体温度要高于外环土体温度。在管体内流体温度为60~80℃时,内环土体温度要高出3~4℃,而管体内流体温度在100~120℃时,内环土体温度要高出4~6℃。

2.2 土体孔压分析

管道内流体温度的变化对土体孔压的影响主要讨论位于管体中部的A组各点孔压及位于管体端口处的B组各点孔压之间的变化差异,以此来分析管道中流体加温过程中的管周土体孔压变化情况。图8分别为A组及B组各测点随管内流体加



(a)A 组孔压变化曲线



(b)B 组孔压变化曲线

图8 土体孔压变化曲线

温及降温过程中的孔压变化趋势。

由图8(a)可知,在管道加温时,由于温度的上升,土体呈膨胀趋势,从而导致孔压上升,在第一次加温时现象最为明显,最大孔压上升了0.85 kPa左右。随后,当温度趋于稳定时,孔压开始下降,大约下降至上升量的一半左右时开始稳定。在随后的加温过程中,变化趋势和第一次加温对比相对较小,但仍有温度上升时,孔压呈先上升后下降的趋势。

通过对比2、4、6号测点孔压值与1、3、5号测点孔压值可以发现,测点距离管道越近,孔压值的上升相对较快。

对比1~6号测点的孔压值可以发现土体孔压的分布情况主要与埋深有关,埋深越深,土体的孔压越大。其中,1号与2号测点的孔压最大,分别达到了3.0 kPa和2.5 kPa左右,在管体加温降温之后稳定在2.5 kPa和1.6 kPa左右。由于之前采取了预

压措施, 预压的重量主要分布在土体中间, 所以使得位于土体中间的2号测点的孔压值大于1号测点1.0 kPa左右, 4号与6号测点的孔压值也稍大于3号与5号测点. 同时, 位于管体中间的A组孔压值也稍大于位于管体端口位置的B组.

综合分析, 管体温度上升会导致砂土地基中的孔压值上升后由于孔压逐渐消散而下降, 且随后温度上升导致孔压增加与消散没有第一次加温后的现象明显, 距离热源越近的土体其孔压上升速度也越快. 总体上, 温度对砂土地孔压的影响有限, 最大孔压变化未超过1 kPa.

2.3 土体表面位移分析

土体表面位移的变化主要是沉降变化, 由3个土体表面位移计测定, 其平均位移和3个位移计的读数如图9所示.

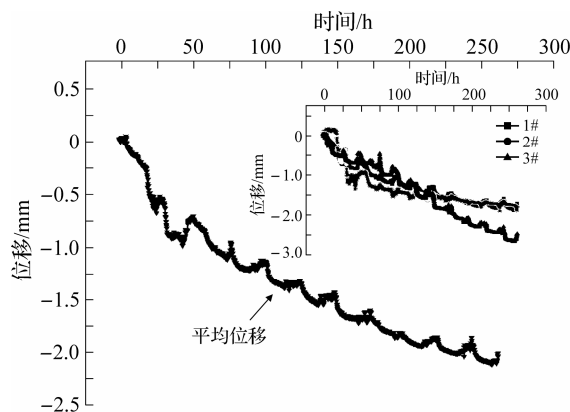


图9 土体表面位移变化曲线

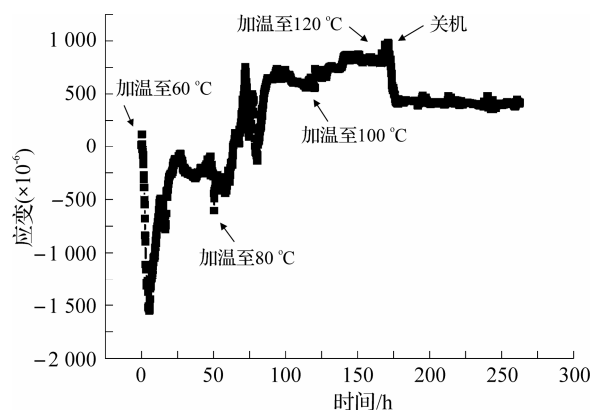
由图9可知, 在管体加温过程中, 土体表面总体呈下沉趋势, 但在下沉过程中也存在小幅的上升, 例如在45 h左右加温时有0.35 mm左右的上升, 随后又开始下沉. 在温度达到稳定状态时, 一共下沉了2.07 mm左右.

2.4 管体应变分析

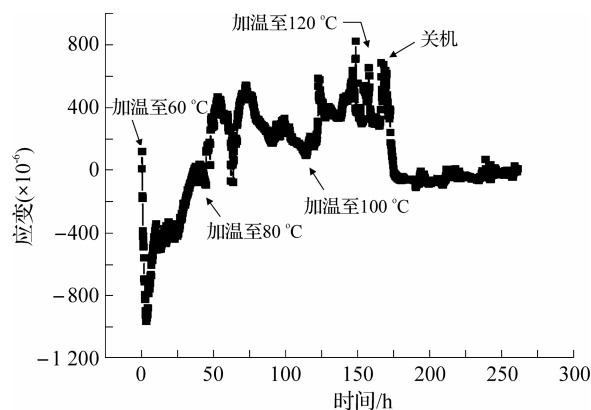
管体温度变化对管身应变影响较大, 且现象极为明显, 可通过对应变片的数据采集处理分析得出管周应变随管内流体温度的变化趋势.

由图10可知, 在加温至60℃时, 管体底部和侧边的轴向应变随着温度增大呈先下降后上升的状态, 管底轴向应变达到了-0.15%, 管侧轴向应变也达到了-0.10%. 随后在温度稳定后, 应变开始增加, 管底轴向应变维持在-0.01%~-0.03%左右, 而管侧轴向应变维持在-0.03%~-0.05%左右, 顶部轴

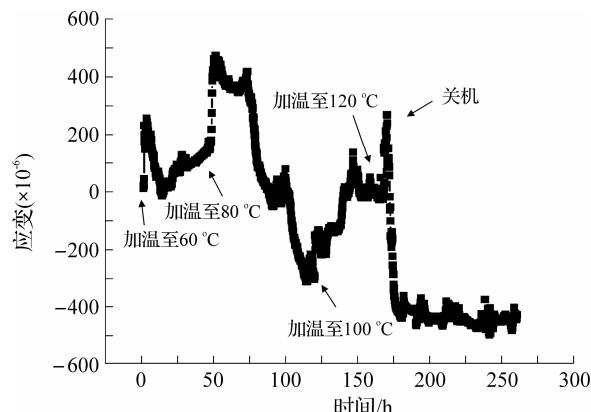
向应变呈现先上升后下降的趋势, 在加温至60℃时, 微应变上升到了0.03%左右, 随后缓慢降低至初始状态. 由于管体两端并无约束, 在第一次加温过程中, 底部和侧边都出现了压应变, 而顶部则是拉应变^[13].



(a) 管底轴向应变曲线



(b) 管侧轴向应变曲线



(c) 管顶轴向应变曲线

图10 管体轴向应变变化曲线

在随后的加温过程中, 顶部侧边及底部的轴向应变都出现先上升后下降的趋势. 在最后管内

流体温度自然降低后并维持稳定的阶段中, 底部轴向应变最终维持在 0.04% 左右, 侧边轴向应变维持在 0 左右, 而顶部轴向应变维持在 -0.04% 左右。

通过对比图 11 可以发现, 管体顶部侧边及底部的环向应力都随着温度的上升而迅速上升, 随后在温度稳定后开始下降, 并维持在一定值。三者都在加温至 120 °C 时出现应变的最大值, 其中底部

环向应变最大值在 0.11% 左右, 顶部环向应变最大值在 0.07% 左右, 而侧边环向应变最大值达到了 0.33%。应变的最小值也各有不同, 其中管顶环向应变最小值出现在 80 h 左右, 最小值为 -0.04%。而底部环向应变最小值在 0 值左右, 侧边环向应变最小值则在 0.01% 左右。在温度自然下降并稳定后, 三者的应变也各有不同, 其中底部环向微应变维持在 0.01% 左右, 侧边环向应变维持在 0.05% 左右, 而顶部环向应变维持在 0.02% 左右。

综合分析管道周围的应力变化可知, 温度对管道有着较大的影响。在管道内部流体升温及降温过程中, 管道侧边环向应变相较顶部和底部的环向应变变化更大, 而管道底部的轴向应变则大于顶部和侧边的轴向应变变化。

3 结论

根据对砂土地基中直埋热力管道的管体温度变化的热力学特性试验分析, 结合管周土体温度分布、孔压变化、表面位移及管体的应变情况, 得出以下主要结论:

(1) 在直埋热力管道升温过程中, 管周土体的温度都是先升高, 然后温度维持稳定。距管道越近的土体温度上升的越快, 而且最终的温度稳定值更高; 同时, 管道上方的土体温度要高于管道侧边及底部土体温度。在降温过程中, 管道上方土体温度的下降较管侧及管底土体降温更快, 降温幅度也更大。

(2) 在加温过程中, 孔压呈现先上升后下降的趋势; 在升温过程中, 孔压也随之上升; 当温度保持稳定时, 孔压逐渐消散。距离热源越近的土体其孔压上升速度越快。

(3) 在管道运行过程中, 土体表面位移主要表现为沉降, 在沉降过程中由于温度变化出现小幅周期性的波动。

(4) 温度对管身应变的影响较大。温度上升会导致管体应变增大; 在温度稳定后, 应变会降低并保持稳定。其中, 管体环向应变变化幅度大于管体轴向应变, 因此更易发生环向膨胀破坏。

参考文献:

[1] 赵桂林. 区域供热管网运行故障诊断的算法研究及系

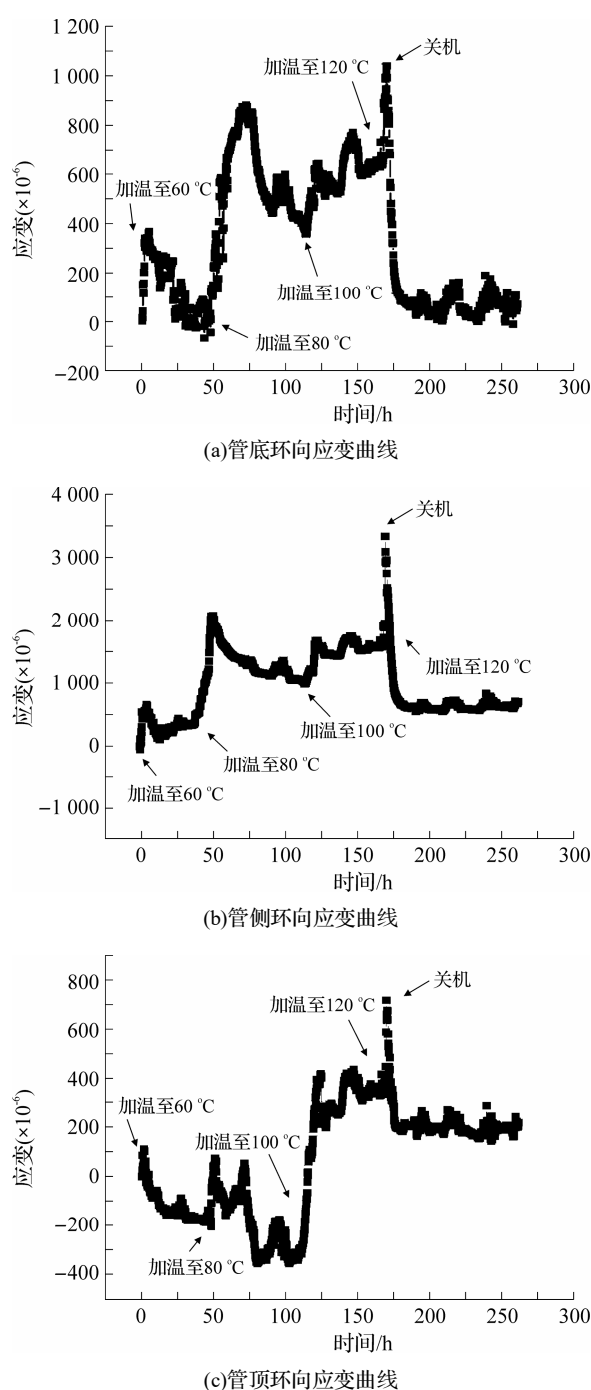


图 11 管体环向应变变化曲线

- 统仿真[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [2] 宋明启, 王志国, 陈改梅, 等. 城市供热管道爆炸的根源分析及预防措施[J]. 科技信息, 2014(13):6-7.
- [3] Mitchell J W, Myers G E. An analytical model of the counter-current heat exchange phenomena[J]. Biophysical Journal, 1968, 8(8):897-911.
- [4] Chen M M, Holmes K R. Microvascular contributions in tissue heat transfer[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1980, 335(1):137-150.
- [5] DiFelice J R F, Bau H H. Conductive heat transfer between cylinders with boundary conditions of the third kind[J]. Journal of Heat Transfer, 1983, 105(3):678-680.
- [6] 白冰. 饱和土体圆柱形热源热固结问题的一个近似解[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6):1004-1009.
- [7] 任鹏召. 大管径直埋供热管道受力与稳定性分析[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [8] 洪学娣. 直埋热力管道热力耦合的有限元分析[D]. 唐山: 河北理工大学, 2009.
- [9] 崔秀国, 张劲军. 埋地热油管道稳定运行条件下热力影响区的确定[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(2):75-78; 142.
- [10] Naeini S A, Elham M, Mahdi S M, et al. Mechanical response of buried high-density polyethylene pipelines under normal fault motions[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 20(6):2253-2261.
- [11] 徐钱. 多场耦合作用下无补偿大口径直埋热力管网特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [12] 黄勇. 考虑热水力耦合作用的地埋管热力学特性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
- [13] 刘金梅, 祝迪, 王瑞, 等. 管土耦合作用下长输直埋管道沉降分析[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(12):52-55.

Experimental study on thermodynamic characteristics of directly buried heat pipes under sand foundation

WU Jiajin, ZHENG Rongyue*, DENG Yuebao, CHEN Shiyuan, CHEN Desheng
(Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to study the thermodynamic characteristics of pipe body and soil under the influence of pipe temperature change in sand foundation, a model test and test system with temperature variation of direct buried heat pipe are designed. The thermodynamic properties of the pipe soil is systemically investigated and analyzed. The results show the following findings: During the heating process of the pipeline, the temperature growth rate and magnitude of the soil above the pipeline are greater than the temperature of the soil at the side and bottom of the pipeline. The pore pressure of the soil increases with temperature and gradually dissipates after the temperature stabilizes. The strain of the pipe body grows larger due to expansion when the temperature rises, and then falls back and maintains a certain value, wherein the hoop strain is greater than the axial strain.

Key words: sand foundation; heat pipe; strain; pore water pressure

(责任编辑 章践立)