

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211113001

## 间歇或连续运行下能源管廊热力响应特性 现场试验\*

魏叶青<sup>1</sup>, 孔纲强<sup>1</sup>, 张继兵<sup>1</sup>, 杨庆<sup>2</sup>

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 2. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 能源管廊作为能源地下结构的重要形式之一, 不仅可以经济高效地提取浅层地温能, 而且可以调控地下综合管廊温度、降低运维成本。依托南京雨花台区软件谷杆线迁移地下综合管廊工程, 在管廊的底板、侧板及顶板内埋设换热管形成能源管廊, 实测换热系统进/出口水温、底板温度及热致应力等变化规律, 探讨间歇或连续运行模式下, 能源管廊系统运行过程中的换热效率及管廊结构热力响应性能。研究表明, 与连续运行模式相比, 间歇(12 h)运行模式下能源管廊换热效率基本不变、管廊结构热致应力可以减少约50%; 间歇(12 h)或连续运行模式下, 换热效率分别为83.6和82.5 W/m<sup>2</sup>, 底板热致应力分别为0.63和1.17 MPa; 邻近管廊段产生0.22 MPa的压应力。

**关键词:** 能源管廊; 能源隧道; 换热性能; 热力响应

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0579-07

### Field Tests on Thermal Responses of Energy Utility Tunnel under Intermittence or Continuous Operation Mode

WEI Yeqing<sup>1</sup>, KONG Gangqiang<sup>1</sup>, ZHANG Jibing<sup>1</sup>, YANG Qing<sup>2</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Energy utility tunnel is one of the new types of energy geostructures, which can be used for economical and efficient utilization of shallow geothermal energy and regulation of tunnel temperature, as well as reduction of operation and maintenance costs. Based on the utility tunnel project in Nanjing Software Valley, heat exchange pipes were embedded in the bottom, side, and top plates of utility tunnel structures. The inlet/outlet water temperatures, the temperatures and thermal-induced stress of the bottom plate were measured. The heat transfer performances and structure thermal responses of utility tunnels under different operation models were briefly discussed. The results show that the heat transfer performance of energy tunnels under intermittence mode is similar to this under the continuous mode, while the thermal-induced stress can be reduced by about 50%. Under the experimental conditions of this study, in the intermittence and continuous mode, the heat transfer efficiencies of the energy tunnel are 83.6 and 82.5 W/m<sup>2</sup>, respectively; the thermal-induced tensile stresses of the energy tunnel are 0.63

\* 收稿日期: 2021-11-13; 修回日期: 2021-12-20

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51922037)资助

作者简介: 魏叶青(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事能源地下结构与工程方面的研究。E-mail: 1129013265@qq.com

通讯作者: 孔纲强(1982—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事能源地下结构与工程方面的研究。E-mail: gqkong1@163.com

and 1.30 MPa, respectively; the thermal-induced compressive stress of adjacent tunnel is 0.23 MPa.

**Keywords:** utility tunnel; energy tunnel; heat transfer performance; thermal response

## 引言

浅层地温能作为一种可再生绿色能源正受到广泛关注<sup>[1]</sup>。能源地下结构,通过在地下结构中埋设换热管,起到浅层地温能热交换器和支撑地下构筑物的双重作用<sup>[2]</sup>。

近年来,依托隧道衬砌中埋设换热管构建能源隧道工程,在浅层地温能利用中扮演着越来越重要的角色。针对能源隧道的换热效率及热力响应特性,国内外学者展开了系列研究,并取得了一些有益成果。依托日本 Nanaori-Toge 隧道工程,相关学者介绍了利用隧道围岩温度处治隧道洞口路面除冰融雪问题<sup>[3]</sup>。依托维也纳 Lainzer 隧道、德国 Stuttgart-Fasanenhof 隧道、意大利 Turin 隧道以及内蒙古扎敦河隧道等工程,相关研究人员分别在隧道衬砌或盾构管片中埋设换热管,开展能源隧道的可行性和经济性研究<sup>[4]</sup>,探讨了连续或间歇(运行 8 h、停 16 h)运行模式下,能源隧道的热力响应特性及对周围地层的影响规律<sup>[5-7]</sup>,并给出了估算隧道内空气温度的近似计算方法;A.Di Donna 等通过建立 Turin 隧道数值模型,分析了地下水流速、土层温度和导热系数等因素对能源隧道换热效率的影响规律<sup>[8-9]</sup>。依托京张铁路八达岭隧道和清华园隧道,相关学者详细介绍了清华园盾构隧道中盾构管片换热管的设计、施工与安装过程,为盾构隧道换热管的埋设施工提供技术支撑<sup>[10]</sup>;对八达岭长城站能源隧道热响应试验进行了数值分析与适用性评价,初步探讨了线热源传热模型用于能源隧道热力响应特性试验的适用性<sup>[11]</sup>。基于数值模拟方法,相关学者探讨了地下水流速、运行模式、以及换热管埋设位置等因素对能源隧道换热效率及结构热力响应特性的影响规律<sup>[12-15]</sup>。

综上所述,尽管针对能源隧道的换热效率和热力响应特性展开了一定的研究,但主要集中于新奥法隧道或盾构隧道,罕有针对明挖法隧道的相关研究。明挖法隧道截面形式、埋深等均与新奥法隧道或盾构隧道存在一定的差异,且传统的能源隧道研究主要集中于连续运行,例如寒冷地区隧道除冰等,但由于城市用电的高峰期不同,所以电力管廊

对换热量的要求并不是连续的,宜采用间歇运行。为了更好地模拟明挖形式的城市地下能源隧道实际运行情况,本文依托南京雨花台区软件谷地下综合管廊,开展能源管廊热力响应特性现场试验;实测间歇、连续两种不同运行模式下管廊的温度变化及结构热致应力变化规律,分析能源管廊系统运行的换热效率、热力响应以及对周围结构的影响规律,为依托城市地下综合管廊开展能源隧道的设计和计算提供参考。

## 1 现场试验概况

### 1.1 依托工程背景

本文现场试验依托南京雨花台区软件谷杆线迁移地下综合管廊工程,管廊主通道总长 1 070 m,标准断面为矩形,主体采用钢筋混凝土结构明挖浇筑,采用 C35 混凝土分段(每段约 20 m)浇筑。在其中一支线管廊中,取一段长度为 6.5 m 的管廊埋设换热管作为能源管廊试验段,试验段管廊断面尺寸为 3.8 m×3.0 m,钢筋混凝土壁厚 0.35 m,底板平均埋深为 7.0 m,如图 1 所示。

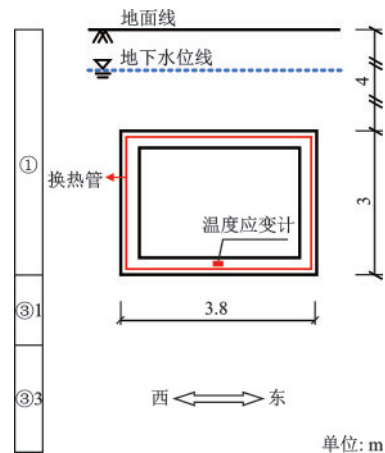


图1 能源管廊断面图

Fig.1 Cross-section of the energy utility tunnel

### 1.2 能源管廊及测试器件布置

试验段分两段(1区、2区),分别长 3.0、3.5 m。结合管廊结构施工步骤,分别在管廊结构底板、侧板和顶板的钢筋笼内绑扎换热管、布置温度应变

计,监测底板的温度及应变。换热管为PE管,外径为20 mm、壁厚为2 mm、换热管间距均为0.3 m,每段内管廊结构底板、侧板和顶板内的换热管串联起来,形成一个环路。此外,在邻近管廊段(3区)布置传感器,监测能源管廊试验段运行时对邻近管廊的影响规律。换热管、温度应变计及传感器具体布置形式如图2所示。

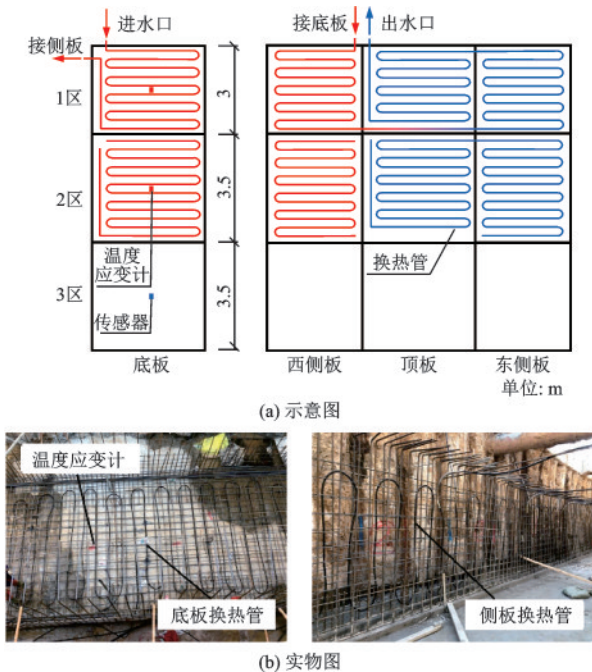


图2 能源管廊换热管道布置示意

Fig.2 Layout of heat exchange tubes in the energy utility tunnel

### 1.3 现场土性参数及环境温度

地下综合管廊为明挖法施工,因此底板以下为原状土,侧壁附近及顶板以上为回填土(回填时间<5年)。试验场地的土体可分为3层:第①层为杂填土,主要由粉质黏性土夹杂砖头、碎石块组成,结构相对松散、土质均匀性差;第③1、③3层为粉质黏土,硬塑、局部可塑,中压缩性,干强度和韧性高。试验场地的地下水埋深约为2.6 m。各土层的厚度以及力学性质指标见表1。

现场试验期间,试验段管廊外部环境变化如图3所示,昼夜温差大、最大昼夜温差约达到23℃。试验场地初始地温沿深度方向变化规律如图4所示。由图可见,地表7 m以下初始地温基本稳定在18℃左右,地下综合管廊所处的土层温度在试验期间(约10天)内也基本稳定在18.6~21.2℃。

表1 现场土层基本物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of in-situ layered soils

| 层号 | 深度/m | $w/\%$ | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 固结快剪           |                      | $E_s/\text{MPa}$ |
|----|------|--------|--|----------------|----------------------|------------------|
|    |      |        |  | $c/\text{kPa}$ | $\varphi/(\text{°})$ |                  |
| ①  | 0-7  | 27.5   | 18.0                                   | 15             | 10                   | 5.34             |
| ③1 | 7-8  | 24.6   | 19.8                                   | 62.8           | 18.6                 | 8.34             |
| ③3 | 8-10 | 23.7   | 19.9                                   | 59.1           | 18.4                 | 10.02            |

注: $w$ 为含水率; $\gamma$ 为土重度; $E_s$ 为压缩模量

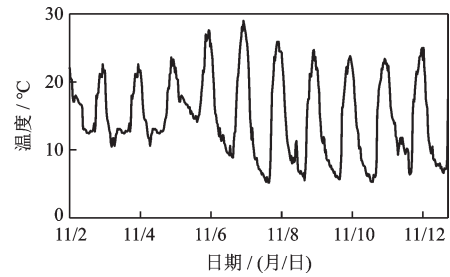


图3 现场试验期间地表气温变化规律

Fig.3 Surface air temperatures during the field test

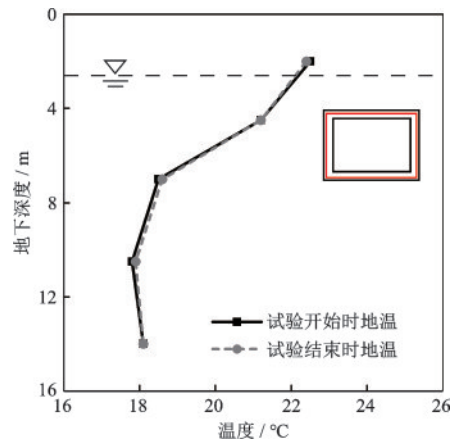


图4 现场土体初始地温沿深度变化规律

Fig.4 Initial temperatures of in-situ soil along depth

### 1.4 试验方案与设计工况

为了探讨不同运行模式下能源管廊的换热效率及管廊结构热力响应性能,1区试验段采用24 h连续加热模式、2区试验段采用12 h启停的间歇加热模式(每天8:00到20:00为运行时间,20:00到次日8:00为停歇时间),两种模式都是用水泵以恒定流速,将恒温的水导入换热管中,通过管中换热液将热量释放到管廊周围土体中。通过测试并记录两个试验段的进/出水温、底板温度及应变,来分析能源管廊的换热性能和热力响应特性规律。

待混凝土热化学反应结束后,开始现场试验,

时间为2020年11月2~13日,共计10天,试验流速为5 L/min;其中,11月3日温度记录仪故障,导致进/出水温度数据未被记录,11月8日试验现场停电,导致进水温度下降。试验方案与工况设计见表2。

表2 现场试验方案与工况设计  
Table 2 Conditions of the field test

| 区段 | 长度/m | 进水温度/°C | 流速/(L·min <sup>-1</sup> ) | 运行模式                |
|----|------|---------|---------------------------|---------------------|
| 1区 | 3.0  | 38      | 5                         | 连续                  |
| 2区 | 3.5  | 36      | 5                         | 间歇<br>(开12 h、停12 h) |

## 2 现场试验结果与分析

### 2.1 换热性能规律分析

连续或间歇运行模式下能源管廊进/出口水温如图5所示。由图可知,由于受加热功率波动、环境以及管道保温措施等因素影响,加热初期进/出口水温会存在一定的波动;但是运行10天后,连续运行模式下出口水温稳定在28.3 °C左右;间歇运行模式下出口水温稳定在23.5 °C左右。

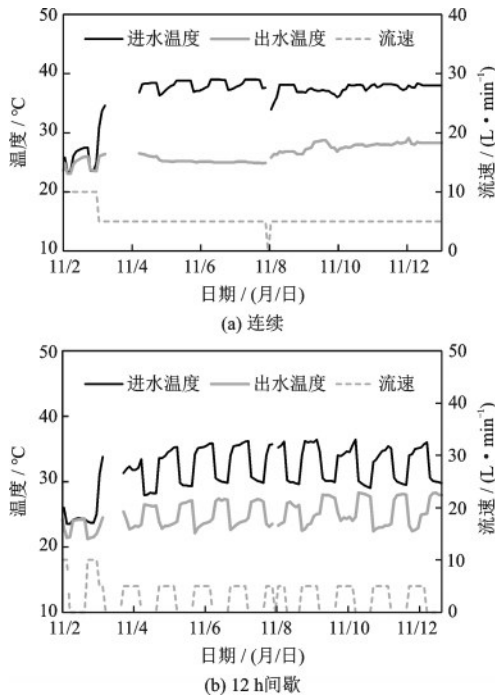


图5 连续或间歇运行模式下进/出水温度变化曲线

Fig.5 Variations of inlet/outlet water temperatures under intermittent or continuous operation mode

可根据进出水温差计算能源管廊的换热效率。但由于连续和间歇两种运行模式的每日工作时间不同,因此以二者工作时间内单位换热效率的平均值,即日平均单位换热效率来反映两种模式工作期间的换热性能,公式如下<sup>[16]</sup>:

$$\bar{Q} = \frac{\int_0^{t_0} m_w c_w (t_{in} - t_{out}) dt}{A \cdot t_0} \quad (1)$$

式中, $\bar{Q}$ 为日平均单位换热效率,W/m<sup>2</sup>;  $m_w$ 为循环工质的质量流量,kg/s;  $c_w$ 为循环工质的热容,J/(kg·K);  $t_{in}$ 、 $t_{out}$ 分别为进/出口循环工质温度,K;  $A$ 为电力管廊的换热面积,m<sup>2</sup>;  $t_0$ 为运行时间,h。

两种模式的日平均单位换热效率如图6所示。由图可知,运行10天后,连续和间歇两种运行模式下的换热效率分别达到82.5 W/m<sup>2</sup>和83.6 W/m<sup>2</sup>。试验初期,由于进水温度波动,导致换热效率较低,但是随着进水温度的稳定,水温与管廊周围土体温差随着时间减小并趋于稳定,故换热效率也逐渐趋于稳定。并且由于12 h间歇运行时,土体存在回温时间,故其试验后期进水温度与土体温差较大,导致试验稳定期的日平均换热效率相对连续运行略高一点。

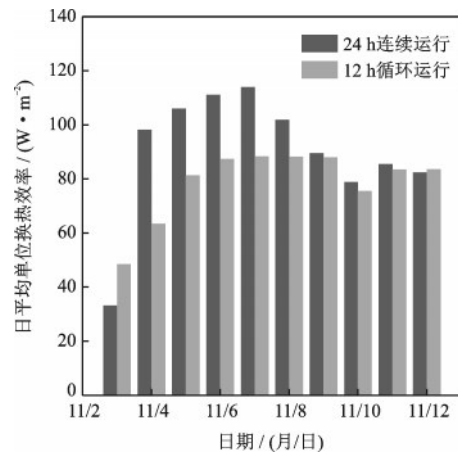


图6 不同运行模式下换热效率与运行时间关系

Fig.6 Heat transfer efficiency versus running time under different modes

不同隧道及运行模式下,既有能源隧道及本文实测的换热效率统计见表3。相关研究表明,换热效率随进口水温的变化呈线性变化<sup>[17]</sup>;由表3可知,连续运行模式下,本文试验进水温度较高,故换热效率略高于M.Barla等<sup>[15]</sup>测试结果,本文和M. Barla等测试结果均高于张国柱等<sup>[18]</sup>、P.Buhmann等<sup>[5]</sup>测试结果;间歇运行模式下本文实测换热效率

表3 不同运行模式下换热效率统计表

Table 3 Comparisons of heat transfer efficiency in different operation modes

| 编号 | 管间距/<br>m | 进口水<br>温/°C | 运行<br>模式   | 运行时<br>间/d | 换热效率/<br>(W·m <sup>-2</sup> ) | 文献来源                     |
|----|-----------|-------------|------------|------------|-------------------------------|--------------------------|
| 1  | 0.30      | 38          | 连续         | 11         | 83.0                          | 本文                       |
| 2  | 0.50      | 20          | 连续         | 2          | 37.8                          | 张国柱 <sup>[18]</sup>      |
| 3  | 0.30      | 28          | 连续         | 30         | 74.0                          | M.Barla <sup>[15]</sup>  |
| 4  | 0.40      | 20          | 连续         | 180        | 5.0~<br>30.0                  | P.Buhmann <sup>[5]</sup> |
| 5  | 0.30      | 36          | 12开<br>12关 | 11         | 85.0                          | 本文                       |
| 6  | 0.25      | 30          | 8开<br>16关  | 60         | 34.0                          | C.Lee <sup>[19]</sup>    |

高于C.Lee等<sup>[19]</sup>测试结果,这可能是由于本文试验场地存在地下水,而地下水的存在有助于换热。

### 2.2 热致应力规律分析

能源管廊换热系统运行期间,换热管内部循环液体与周围混凝土换热,导致试验段混凝土受热膨胀,但由于受到周围土体以及前后管廊段的约束,其产生的实测轴向应变低于其受相同温度荷载时理论上应产生的自由膨胀应变,从而内部产生轴向热致应力,过大的热致应力会对结构造成影响。计算公式如下:

$$\sigma_T = E(\epsilon_{obs} - \epsilon_{free}) \quad (2)$$

$$\epsilon_{free} = \alpha \cdot \Delta T \quad (3)$$

式中, $\sigma_T$ 为热致应力,本文规定热致拉应力为正值; $E$ 为混凝土的弹性模量; $\epsilon_{obs}$ 为实测应变, $\mu\epsilon$ ; $\epsilon_{free}$ 为自由膨胀应变, $\mu\epsilon$ ; $\alpha$ 为混凝土的热膨胀系数; $\Delta T$ 为管廊底板温度改变量。

试验期间,连续或间歇运行模式下能源管廊底板的温度及轴向热致应力变化曲线如图7所示。由图可知,运行11天后,连续或间歇运行模式下,管廊底板温度分别由18.2°C升至28.4°C、由18.3°C升至25.6°C;轴向最大热致应力分别为1.17 MPa和0.63 MPa,均远小于C35混凝土的抗压强度(35 MPa)。间歇运行模式下,停歇时底板温度下降,轴向热致应力下降;连续运行模式下,底板温度一直上升,轴向热致应力不断累增,故间歇运行模式下的最大热致应力小于连续运行模式。

轴向热致应力增量 $\Delta\sigma_T$ 与温度升幅 $\Delta T$ 的关系如图8所示。由图可知,连续运行模式下热致应力增量 $\Delta\sigma_T$ 与温度升幅 $\Delta T$ 存在明显的线性关系;由于

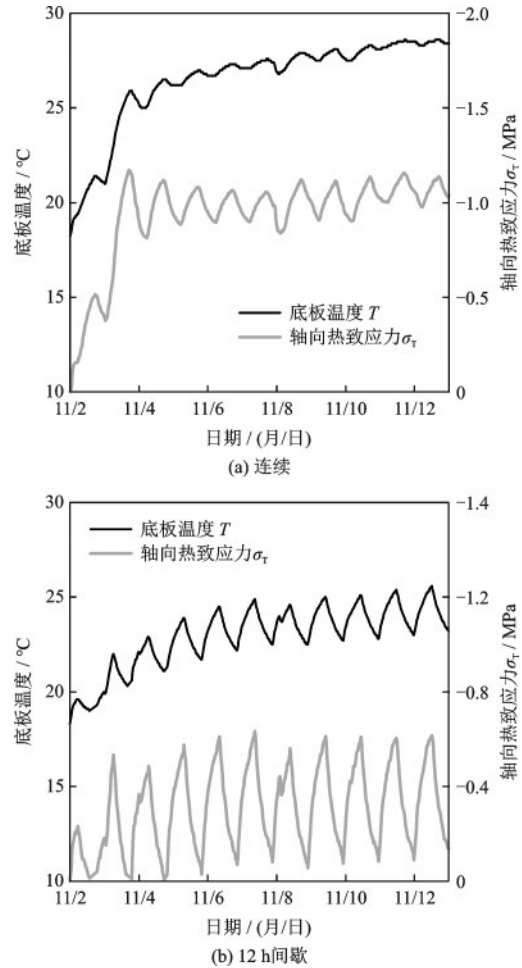


图7 不同运行模式下底板温度、热致应力变化曲线

Fig.7 Variations of bottom plate temperature and thermal induced stress under different modes

本次试验中热致应力仅为温度变化产生,因此当温度升幅为0时,热致应力也为0,故拟合线接近原点,本文试验曲线与季伟伟等<sup>[20]</sup>基本趋势一致。12 h间歇运行模式下,由于停歇时间短,土体不能完全回温,导致底板产生余温,故产生了残余的热致应力;随着余温的累积,残余热致应力也缓慢增加;最后,随着周围土体的温度上升,底板与周围土体换热以及残余应力都趋于稳定,斜率也不发生变化。

### 2.3 对邻近管廊段的影响分析

在受热膨胀作用下,能源管廊试验段会挤压邻近管廊段,从而使其产生压应力。邻近管廊底板应力变化曲线如图9所示。由图可知,在试验期间,3区底板产生的最大压应力为0.22 MPa。由于2区试验段受热膨胀,挤压3区邻近管廊段使其产生轴向压应力;故3区轴向应力曲线和2区热致轴向应力曲线走向基本一致,但是3区受到的轴向压应力明

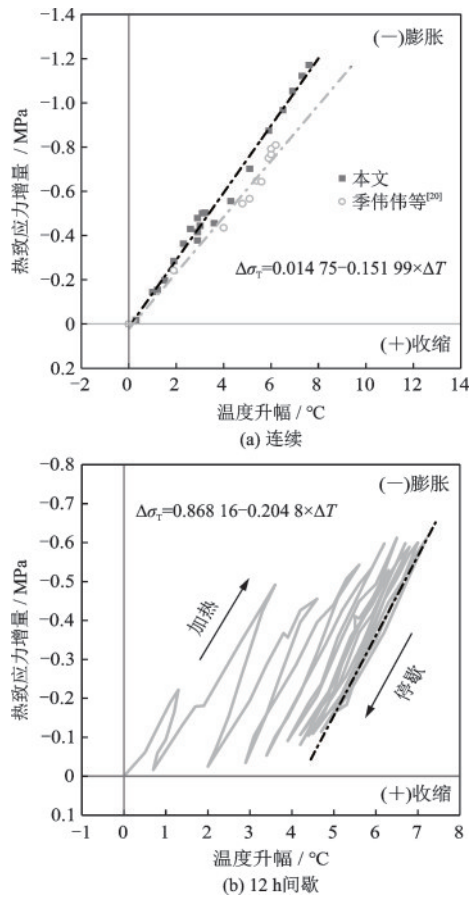


图8 不同运行模式下热致应力增量与温度升幅关系曲线  
Fig.8 Relationship between bottom plate temperature rise and thermal induced stress under different modes

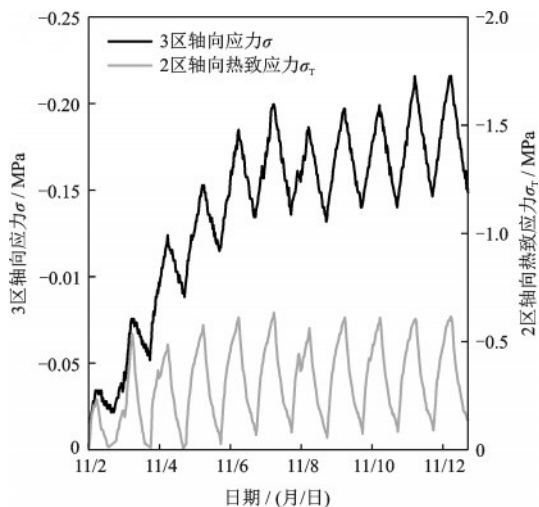


图9 邻近管廊底板应力变化曲线  
Fig.9 Variations of bottom plate stress changes versus time

显小于2区的热致应力,这是由于2区管廊试验段底板膨胀时,两区之底板间的土体产生的摩擦力抵消了一部分膨胀应力。

### 3 结 论

依托南京雨花台区软件谷杆线迁移地下综合管廊工程,开展了连续或间歇运行模式下能源管廊的换热效率和热力响应特性现场试验,得到以下结论:

(1) 运行11天后,连续与间歇运行模式下的日平均单位换热效率分别为82.5、83.6 W/m<sup>2</sup>,两者基本一致,且由于地下水的存在,换热效率相对较高。

(2) 连续运行模式下地下综合管廊的温度升幅大于12h间歇运行模式,故产生的轴向热致应力也相对较大;运行11天后,连续与间歇运行模式下轴向热致应力分别为1.17 MPa和0.63 MPa,间歇运行模式由于底板回温可使结构热致应力减少约50%。连续与间歇运行模式下的稳定时热致应力增量与温度升幅均呈线性关系,且间歇运行模式下的斜率略大。

(3) 能源管廊运行期间,邻近管廊段会受到一定的影响,能源管廊加热膨胀会挤压邻近管廊段,但由于周围土体的摩擦抵消作用,邻近管廊段产生较小的压应力(0.22 MPa),远小于混凝土抗压强度。

### 参考文献:

[1] Moore J N, Simmons S F. More power from below[J]. Science, 2013, 340(6135): 933-934.  
 [2] Loveridge F, McCartney J S, Narsilio G A, et al. Energy geostructures: a review of analysis approaches, in situ testing and model scale experiments[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2020, 22: 100173.  
 [3] Ialam M S, Fukuhara T, Watanabe H, et al. Horizontal U-tube road heating system using tunnel ground heat [J]. Journal of Snow Engineering of Japan, 2006, 22 (3): 229-234.  
 [4] Adam D, Markiewicz R. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers [J]. Géotechnique, 2009, 59(3): 229-236.  
 [5] Buhmann P, Moormann C, Westrich B, et al. Tunnel geothermics-A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2016, 8: 1-7.

- [6] Barla M, Di Donna A, Insana A. A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 87: 1-14.
- [7] 夏才初, 张国柱, 孙猛. 能源地下结构的理论与应用 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.  
Xia C C, Zhang G Z, Sun M. Theory and application of energy geostructures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015. (in Chinese)
- [8] Di Donna A, Barla M. The role of ground conditions on energy tunnels' heat exchange [J]. *Environmental Geotechnics*, 2016, 3(4): 214-224.
- [9] Barla M, Di Donna A. Energy tunnels: concept and design aspects [J]. *Underground Space*, 2018, 3(4): 268-276.
- [10] 祝振南, 郭红仙. 地热利用型盾构法隧道施工探索——以清华园隧道能源管片设计、制作及安装为例 [J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(4): 677-683.  
Zhu Z N, Guo H X. Exploration on construction of geothermal-utilized shield tunnels: a case study of fabrication and installation of tunnel energy segments in Qinghuayuan tunnel [J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(4): 677-683. (in Chinese)
- [11] 郭红仙, 孟嘉伟, 祝振南. 能源隧道热响应试验数值分析与适用性评价 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(4): 572-578.  
Guo H X, Meng J W, Zhu Z N. Numerical analysis and applicability evaluation of thermal response test in energy tunnels [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation*, 2019, 39(4): 572-578. (in Chinese)
- [12] Bidarmaghz A, Narsilio G A. Heat exchange mechanisms in energy tunnel systems [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2018, 16: 83-95.
- [13] Ogunleye O, Singh R M, Cecinato F, et al. Effect of intermittent operation on the thermal efficiency of energy tunnels under varying tunnel air temperature [J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 2646-2658.
- [14] Cousin B, Loria A F R, Bourget A, et al. Energy performance and economic feasibility of energy segmental linings for subway tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 91: 102997.
- [15] Barla M, Di Donna A, Perino A. Application of energy tunnels to an urban environment [J]. *Geothermics*, 2016, 61: 104-113.
- [16] 桩基地热能利用技术标准: JGJ/T 438—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [17] Zhang G, Xia C, Yang Y, et al. Experimental study on the thermal performance of tunnel lining ground heat exchangers [J]. *Energy and buildings*, 2014, 77: 149-157.
- [18] 张国柱, 夏才初, 马绪光, 等. 寒区隧道地源热泵型供热系统岩土热响应试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(1): 99-105.  
Zhang G Z, Xia C C, Ma X G, et al. Rock-soil thermal response test of tunnel heating system using heat pump in cold region [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(1): 99-105. (in Chinese)
- [19] Lee C, Park S, Choi H J, et al. Development of energy textile to use geothermal energy in tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 59: 105-113.
- [20] 季伟伟, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 软塑黄土地区能源仰拱热力响应特性现场试验 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 558-564.  
Ji W W, Kong G Q, Liu H L, et al. Field tests on thermal response characteristics of energy tunnel in soft plastic loess area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 558-564. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)