

引用本文:于 达,孔纲强,季伟伟,等.隧道仰拱及基底能量桩热致应力与换热效率现场试验[J].建筑科学与工程学报,2023,40(3):121-129.  
YU Da,KONG Gangqiang,JI Weiwei,et al. Field tests on thermal induced stress and heat transfer efficiency of tunnel invert and base energy pile[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2023,40(3):121-129.

DOI:10.19815/j.jace.2022.03047

# 隧道仰拱及基底能量桩热致应力与换热效率现场试验

于 达<sup>1</sup>,孔纲强<sup>1</sup>,季伟伟<sup>1</sup>,王成龙<sup>2</sup>,王忠涛<sup>3</sup>,杨 庆<sup>3</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210024; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045; 3. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

**摘要:**依托黄土塬区银川—西安高铁驿马一号隧道工程,在隧道仰拱和基底桩基内埋设换热管,搭建能源隧道仰拱-基底能量桩联合热泵系统,实测不同进口温度作用下换热管的进出口水温、隧道仰拱结构和基底桩基的温度、热致应力,探讨黄土塬区隧道仰拱结构及基底桩基的换热效率、热力响应特性与变化规律。结果表明:在现场特定条件下,进口温度与初始地温差值分别为4.7℃和14.7℃时,隧道仰拱结构温度升幅分别约为3.8℃和11.4℃,热致轴向应力分别为3.13 MPa和13.86 MPa,热致环向应力分别为2.85 MPa和9.93 MPa,隧道仰拱换热效率分别约为7.86 W·m<sup>-1</sup>和24.15 W·m<sup>-1</sup>;单位温升条件下热致轴向应力和热致环向应力分别为0.44 MPa·℃<sup>-1</sup>和0.35 MPa·℃<sup>-1</sup>;恒功率运行下仰拱基底能量桩换热效率随进口温度与初始地温差值的变化近乎为一条斜率 $k=4.1$ 过原点的直线,换热效率维持在50~70 W·m<sup>-1</sup>之间,与常规能量桩的换热效率规律基本一致;桩基周围土体的力学性质受能量桩运行影响有限。

**关键词:**隧道仰拱;桩基;黄土塬区;热致应力;换热效率;现场试验

中图分类号:TU473

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)03-0121-09

## Field tests on thermal induced stress and heat transfer efficiency of tunnel invert and base energy pile

YU Da<sup>1</sup>, KONG Gangqiang<sup>1</sup>, JI Weiwei<sup>1</sup>, WANG Chenglong<sup>2</sup>, WANG Zhongtao<sup>3</sup>, YANG Qing<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

**Abstract:** Based on Yima No. 1 tunnel project of Yinchuan-Xi'an high-speed railway located in loess plateau, heat exchange tubes were buried in the tunnel invert and pile foundation, and energy tunnel invert-pile foundation combined heat pump system was built. The inlet and outlet water temperature, tunnel invert and pile foundation temperatures, thermal induced stress under difference inlet water temperature were measured. The heat transfer efficiency, the thermal response characteristics and change law of the tunnel invert and the soil surrounding energy pile

收稿日期:2022-03-11

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2017G007-G);国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51922037);江苏高校“青蓝工程”资助项目(2019)

作者简介:于 达(1997-),男,工学硕士研究生,E-mail:1006531027@qq.com。

通信作者:孔纲强(1982-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:gqkong1@163.com。

were discussed and analyzed. The results show that in specific conditions on site, when inlet temperature and initial ground temperature difference are  $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively, the temperature of the tunnel invert structure rise about  $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the thermal induced axial stress are  $3.13\text{ MPa}$  and  $13.86\text{ MPa}$ , the thermal induced hoop stress are  $2.85\text{ MPa}$  and  $9.93\text{ MPa}$ , and the heat transfer efficiency of tunnel invert are  $7.86\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$  and  $24.15\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ . The unit thermal induced axial and hoop stress equal  $0.44\text{ MPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  and  $0.35\text{ MPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ , respectively. Under constant power operation, the change of heat transfer efficiency of invert base energy pile with inlet temperature and initial ground temperature difference is almost a straight line with slope  $k=4.1$  passing through the origin. The heat transfer efficiency maintained between  $50\text{--}70\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ , which is similar with that of conventional energy pile. The mechanical properties of the soil around the pile foundation are limited by the operation of the energy pile.

**Key words:** tunnel invert; pile foundation; loess area; thermal induced stress; heat transfer efficiency; field test

## 0 引言

工程技术的主流趋势正朝着更加安全、经济、绿色和艺术等方向发展,能源地下结构作为一种清洁的绿色能源技术,可以将传统地下结构与浅层地热能采集传递有机地结合在一起,具有不额外占用地下空间资源和降低埋管施工费用的优势,有着良好的推广应用价值<sup>[1-2]</sup>。隧道结构在满足其主要功能的基础上,还可以作为浅层地热能换热器<sup>[3]</sup>,相关学者提出通过在隧道结构或桩基础内埋设换热管等能源地下结构技术,提取隧道周围或桩基周围岩土体的浅层地热能,以减少寒区隧道洞口冻害或用于隧道洞口路面除冰融雪<sup>[4-5]</sup>。

部分学者针对能源隧道、能量桩的换热效率和热力响应问题进行了多角度的研究。根据不同隧道工程的施工工艺,换热管可以预制在盾构管片内,或者布置在衬砌结构中,或者通过土工布固定在衬砌结构侧壁<sup>[6-8]</sup>。依托不同区域的能源隧道结构,相关学者开展了一系列的热力响应测试。张国柱等<sup>[9]</sup>分析了进口温度、管间距、流速对温度场的影响。马康等<sup>[10]</sup>借助有限元计算探究了隧道温度应力的变化规律。众多学者借助有限元计算与现场试验分析了埋管间距、流速、地下水、隧道环境、运行模式等因素对换热性能的影响<sup>[11-15]</sup>;季伟伟等<sup>[16]</sup>依托黄土塬区隧道工程埋设换热管形成能源隧道,通过实测不同输入功率条件下仰拱处温度及应力变化,探究输入功率对供热系统运行过程中隧道仰拱温度及应力变化的影响规律。结合灌注桩、预制桩等不同桩基的施工工艺,能量桩的埋管施工过程也各有不同<sup>[17]</sup>。

依托不同地区的能量桩,相关学者开展了系列现场测试,探讨了桩顶约束、运行模式等因素对能量桩换热性能和热致应力的影响规律<sup>[18-21]</sup>;结合桩基荷载传递模型和群桩效应系数,建立了能量桩群桩承载力计算方法<sup>[22]</sup>。

当隧道穿越软弱土地区时,隧道基底会采用桩基础等进行地基加固。由上述分析可知,既有研究都是针对能源隧道或能量桩的热力响应特性展开研究,尚没有针对隧道基底含桩基础的结构进行研究。温度作用下隧道仰拱结构与隧道基底桩基的受力情况及相互作用机理尚不明确。因此,本文依托软塑黄土塬区银西高铁驿马一号隧道工程,开展不同升温条件下能源隧道仰拱结构和基底桩基的热致应力与换热效率研究,探讨软塑黄土塬区能源隧道仰拱结构和基底桩基周围土层的热力响应特性,以期软塑黄土塬区能源隧道的设计与计算提供技术支撑。

## 1 现场试验

### 1.1 依托工程

依托银川至西安高速铁路庆阳段隧道工程,开展温度作用下隧道仰拱结构及基底桩基周围土层热力响应现场试验,试验场地位于甘肃省庆阳市黄土塬区,试验段黄土属软塑黄土,是目前中国穿越软塑黄土塬区的隧道工程中具有代表性的隧道之一(区位图参见文献<sup>[16]</sup>)。采用矿山法施工,隧道尺寸、隧道基底桩基布置及邻近土层类别等相关参数如图1所示。

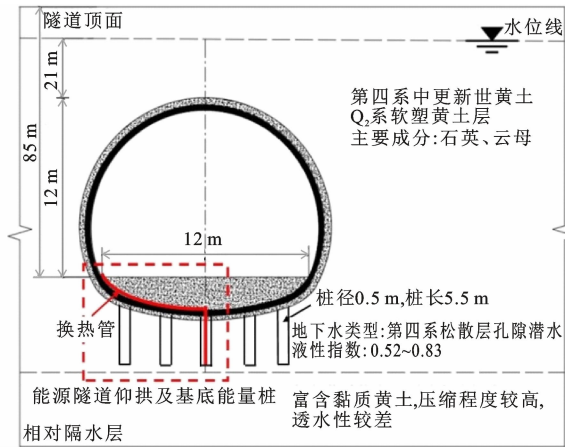


图 1 隧道仰拱及基底桩基换热管布置  
Fig. 1 Layout of heat exchange tubes in tunnel invert and base pile foundation

表 1 土层性质

Table 1 Properties of layered soils

土层类型	$w/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$e$	$I_L$	$I_P$	$E_s/\text{MPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$c/\text{kPa}$
含水层以上	22	1.89	0.76	0.27	11.8	7.72	20.7	33.3
含水层以下	26	1.96	0.75	0.57	12.0	6.48	20.2	33.5

注:  $w$  为天然含水率;  $\rho$  为天然密度;  $e$  为孔隙比;  $I_L$  为液性指数;  $I_P$  为塑性指数;  $E_s$  为压缩模量;  $\varphi$  为内摩擦角;  $c$  为黏聚力。

选用外径 2.5 cm、内径 2.1 cm 的 PE 管作为换热管,在隧道仰拱内以 W 形布置在钢筋笼上,管路每段长 4.0 m,间距 0.3 m,两端均由仰拱上部伸出,总长约 17.0 m。基底桩基中通过固定钢筋笼布置 U 形埋管,单根桩内换热管总长约 10.0 m。为保证系统温度稳定,换热管路地表以外部分设置保温棉保温。

温度传感器和应力传感器埋设在隧道仰拱结构内的钢筋笼上。温度传感器、土压力盒和孔压计埋设在基底能量桩侧壁 0.65 m 处,且沿着桩深方向布置 3 层(分别对应基底能量桩的顶部、端部和中部),具体现场布置如图 2 所示。

1.4 试验方案

试验期间,当地日最高、最低气温和隧道内环境温度如图 3 所示。由图 3 可见:尽管当地日气温存在一定的波动,但隧道内环境温度受影响相对较小,基本稳定在 20~23 ℃ 之间;在试验持续的 28 d 内,试验段位置的平均环境温度约为 21.7 ℃。由文献[16]可知,在地源热泵系统通入常温水进行循环,得到隧道仰拱底部土层初始温度约为 22.8 ℃。

使常温水以恒定温度、恒定流速在换热管路中循环,使之与仰拱结构底部土体进行热量交换,直至各项温度达到稳定。试验开始时间距地源热泵系统

1.2 现场软塑黄土性质

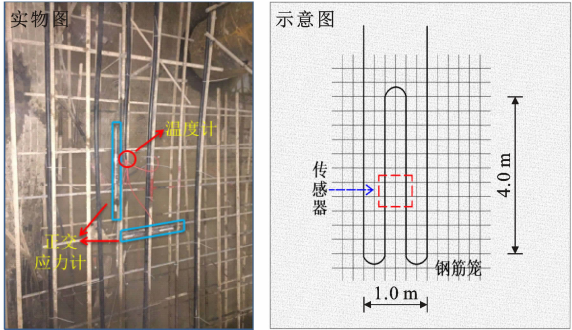
试验段隧道顶板在地下水位以下 21 m 处,地下水无侵蚀性,隧道围岩土体为软塑黄土,属于第四系中更新世黄土,仰拱基底桩基下层富含黏质黄土,压缩程度高,透水性差,形成相对隔水层,所以试验段内黄土被地下水浸湿,使得液性指数较高,试验段土层的基本物理力学性质如表 1 所示[16]。

1.3 换热管埋设及测试传感器布置

地源热泵系统埋设地点距离洞口约 1.91 km,距离地表约 85 m,左起里程桩号为 DK257+466,右至里程桩号为 DK257+478。仰拱结构混凝土和钢筋材料强度等级分别为 C35 和 HRB400,弹性模量分别为 200 GPa 和 31.5 GPa。基底桩为浆固碎石桩,桩径 0.5 m,桩长 5.5 m,桩顶紧接仰拱底部。



(a) 试验位置及测试系统布置



(b) 仰拱内传感器布置

图 2 换热系统及传感器布置

Fig. 2 Heat exchange system and sensor layout

搭建完成约 30 d,仰拱结构混凝土材料水化热基本消散完成。本文隧道仰拱采用恒定进口温度(TPT)控制,基底能量桩以恒定功率(TRT)控制,具体试验工况如表 2 所示。

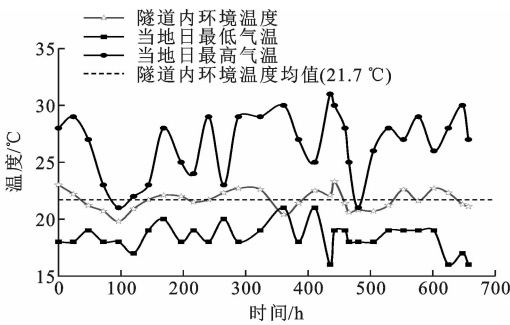


图 3 现场试验期间当地气温及隧道内环境温度

Fig. 3 Ambient temperature in and out tunnel during field tests

表 2 现场试验工况

Table 2 Field test conditions

位置	能源隧道仰拱		基底能量桩	
控制类型	TPT-1	TPT-2	TRT-3	TRT-4
恒定进口温度/℃	27.5	37.5		
恒定输入功率/kW			0.5	1.0
流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.4	0.4	0.4	0.4

2 试验结果与分析

2.1 基底能量桩周围土体热力响应

以输入功率为 1.0 kW (TRT-4) 为例,距离基底能量桩侧壁 0.65 m 处的土层温度、土压力和孔压沿桩深方向的分布规律如图 4 所示,土层温度、土压力及孔压随时间  $T$  的变化曲线如图 5 所示。由图 4 可知:基底能量桩加热 300 h 后,桩侧土层的温度、土压力及孔压均有一定的变化,且桩顶附近土层温度变化较大,桩端底部附近土层温度变化较小。这可能是由于桩顶附近土层温度受能量桩和能源隧道仰拱共同作用引起的,且桩底土体可以存储大量的热量,所以升温现象不明显。

当桩体与管道流体产生热交换时,桩体受热膨胀,产生径向与竖向的桩体变形。这些变形对桩与土界面处土体产生挤压,导致桩周土体发生体积变化,引起土压力的改变。此外,桩身受力与桩侧摩擦力也因此受到影响。0 m 桩身处温度变化幅度为 2.2 °C,土压力变化幅度为 1.92 kPa,相较于初始土压力发生了 1.7% 变化,而桩底处温度与土压力均近乎没有变化。可见温度的改变确实会引起土压力的变化,进而影响桩体的受力情况,但这样的影响很小。

由图 5 可知,相较于土压力累积增量,孔压累积增量更小。由此不难推测出土压力的变化主要是由于有效应力改变产生的,进一步可以看出能量桩的

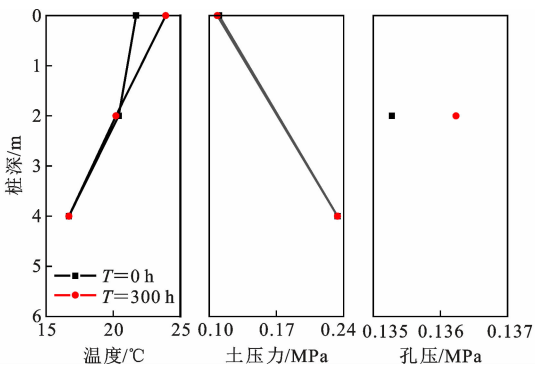


图 4 基底能量桩周围土层温度、土压力及孔压沿桩深方向分布规律

Fig. 4 Distribution law of temperature, soil pressure and pore pressure of layered soil surrounding energy pile along pile depth

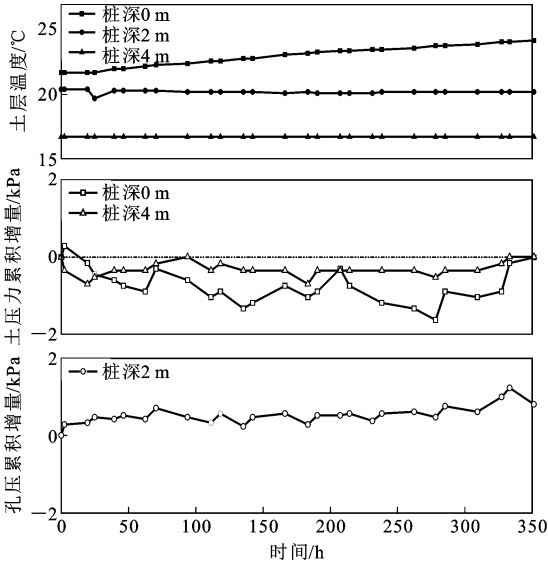


图 5 基底能量桩周围土层温度、土压力及孔压随时间变化曲线

Fig. 5 Change curves of temperature, soil pressure and pore pressure of layered soil surrounding energy pile with time

运行对于周围土体的影响主要发生在土体微观颗粒的变形挤压上,所以桩基底部土压力相较于顶部变化小的原因主要是底部初始土压力更大,更难发生变形。基底能量桩周围土层温度、土压力及孔压随着加热时间而略有升高,但是变化幅度不大。说明土体温度波动小,利于能量桩系统保持换热效率,土层换热性能良好。

2.2 仰拱结构热致应力与热致应变

受温度变化影响,混凝土结构本身会发生体积变形,而变形受到边界约束时就会产生附加应力与应变,这就是热致应力与热致应变。当隧道供热系



统运行时,换热管内部循环热介质,通过换热管、混凝土材料与仰拱结构底部的土体进行热交换,埋藏换热管的混凝土仰拱结构受热膨胀,但变形受限于仰拱结构附近的围岩,故而径向应力和环向应力有所增大。应力增量与仰拱结构温度升幅的关系见图6。可以看出,约束应力增量与仰拱温度上升幅度呈明显的线性关系。仰拱结构及基底桩基混凝土材料的热膨胀系数均假定为  $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,由于本次试验中约束应力仅由温度变化产生,所以初始仰拱温度升幅为0时,环向与轴向约束应力均为0。进口温度为  $27.5 \text{ } ^\circ\text{C}$  时(输入水温与地层温度温差约为  $4.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ ),系统运行稳定后,仰拱结构的温度为  $26.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,此时的环向应力与轴向应力分别为  $2.85 \text{ MPa}$  和  $3.13 \text{ MPa}$ ;进口温度为  $37.5 \text{ } ^\circ\text{C}$  时(输入水温与地层温度温差约为  $14.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ ),仰拱结构最终稳定温度为  $33.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,此时的环向应力与轴向应力分别为  $9.93 \text{ MPa}$  和  $13.86 \text{ MPa}$ 。理论上来说,热致应力增量与仰拱温度升幅的关系曲线应该通过原点,但由于应力计和温度计位置间有一定距离,所以出现热致应力变化滞后的情况。随着输入水温的升高,混凝土升温速率快,结构变形与温度变化的不同步性更加明显,出现了变形比温度变化慢的现象,所以图6中  $37.5 \text{ } ^\circ\text{C}$  所对应的曲线在  $27.5 \text{ } ^\circ\text{C}$  所对应曲线的右侧。环向应力及轴向应力随进口温度增加而增大,且环向应力均比轴向应力小。

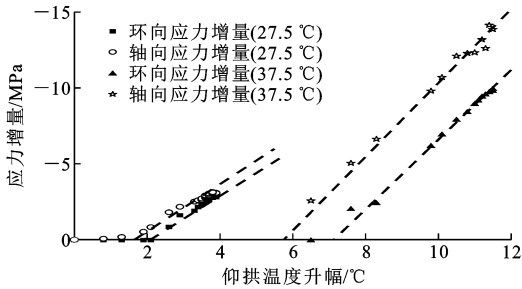


图6 应力增量与仰拱结构温度升幅关系曲线

Fig. 6 Relation curves between stress increment and tunnel inverted arch temperature rise

在结构受热膨胀的条件下,钢筋混凝土会产生拉应力,一般鉴于两者温度膨胀系数相近,故变形近乎相同。但因仰拱混凝土与钢筋的强度等级分别为C35和HRB400,热膨胀系数分别取  $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [23] 和  $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [23],所以有必要考虑钢筋对混凝土的拉应力,其弹性模量分别取  $31.5 \text{ GPa}$  和  $200 \text{ GPa}$  [23]。

钢筋应力、应变、弹性模量分别设为  $\sigma_1$ 、 $\epsilon_1$ 、 $E_1$ ,相应的混凝土应力、应变与弹性模量分别设为  $\sigma_2$ 、 $\epsilon_2$ 、 $E_2$ 。由变形协调条件

$$\epsilon_1 = \sigma_1 / E_1 \quad (1)$$

$$\epsilon_2 = \sigma_2 / E_2 \quad (2)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 \quad (3)$$

得到的解析解为

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{E_2}{E_1} \quad (4)$$

将本文最大轴向应力  $13.85 \text{ MPa}$  作为钢筋的轴向应力,借助解析解可以得到混凝土所受拉应力为  $2.18 \text{ MPa}$ ,小于混凝土  $2.2 \text{ MPa}$  的抗拉强度。这里计算得到的拉应力是基于隧道衬砌外挂完工状态下的试验工况,其受力状态也是符合隧道能源仰拱实际运行情况的。

将加热段中心点所在隧道截面近似取为直径  $12 \text{ m}$  的圆环,当进口温度为  $37.5 \text{ } ^\circ\text{C}$  时,加热段上最大环向应力约为  $9.93 \text{ MPa}$ 。假定加热段上应力增量处处相等,其沿环向衰减的规律如图7所示。由图7可见,在仰拱所处的隧道环向结构中,加热段受热产生应力增量,并沿环向方向不断衰减。

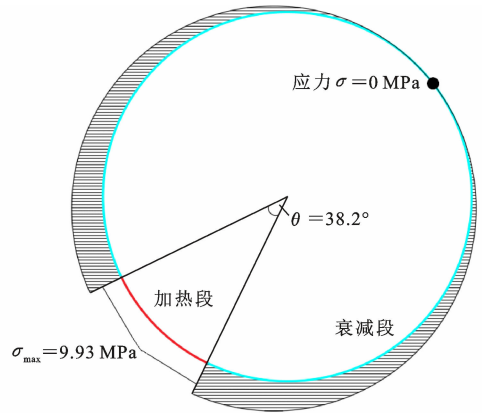


图7 环向应力发展

Fig. 7 Circumferential stress development

## 2.3 基底能量桩换热效率

试验期间基底能量桩进出口水温及换热效率随时间变化规律如图8所示。由图8可知:  $0.5 \text{ kW}$  或  $1.0 \text{ kW}$  恒定功率输入情况下,  $1 \text{ d}$  左右进出口水温即可达到相对稳定的状态;基底能量桩换热效率维持在  $50 \sim 70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  之间。表3为能量桩换热效率对比,可以看出,基底能量桩与常规能量桩的换热效率规律基本一致 [19-21],即软塑黄土地区隧道基底能量桩换热效率与常规软土地区能量桩的换热效率基本一致。同时也可以看出隧道仰拱的换热过程对基底能量桩的换热效率影响有限。

能量桩换热效率受进口温度影响较大,这里探究在恒功率工况下进口温度与初始地温差值对换热效率的影响。将  $0.5 \text{ kW}$  与  $1.0 \text{ kW}$  两种工况下的

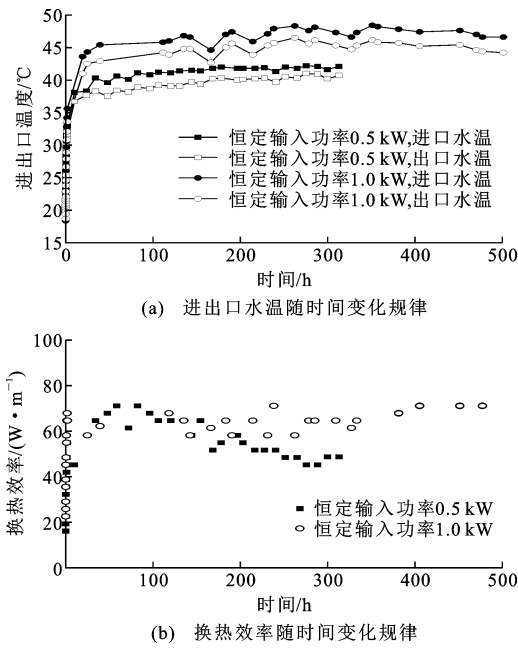


图 8 基底能量桩进出口水温及换热效率随时间变化规律

Fig. 8 Change law of base energy pile inlet and outlet temperatures and heat transfer efficiency with time

表 3 能量桩换热效率对比

Table 3 Comparison of heat exchange efficiency of energy pile

土体	输入功率/kW	进口温度/℃	流速/( $m \cdot s^{-1}$ )	桩径比	换热效率/( $W \cdot m^{-1}$ )	数据来源
黏土	3.0		0.4	40	30.5	文献[24]
粉土-粉质黏土		40	0.2	30	90.0	文献[21]
			0.4		75.0	
			0.8		120.0	
黄土	0.5		0.4	11	64.0	本文
	1.0		0.4	11	67.5	

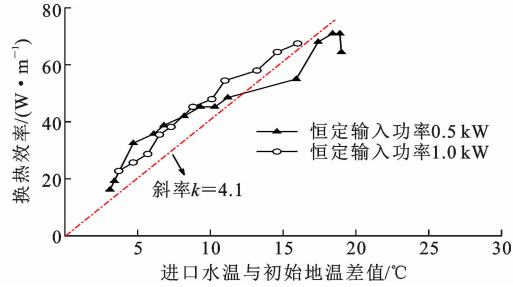


图 9 基底能量桩换热效率随进口水温和初始地温差值的变化曲线

Fig. 9 Change curves of energy pile heat transfer efficiency with temperature difference between inlet temperature and initial ground temperature

$T_2$ , 温度升幅  $\Delta T_1$  和  $\Delta T_2$  分别为 3.8 °C 和 11.4 °C, 大体反映出温度变化与输入功率正相关的变化关系。由图 10 可知, 仰拱温度升幅在系统运行 7 d 和 5 d 后开始稳定, 与图 11 得到的进出口水温均值开始稳定时间基本相同。分别将恒定进口温度与恒

换热效率数据进行拟合, 结果如图 9 所示。可以看出, 两种工况下的换热效率随着温度差值增大而增大, 增长速率相当且近乎为一条过原点的直线。理论上来说, 换热效率应该随着进口温度与初始地温差值的增大而持续增大, 但通过图 9 发现, 换热效率的增长存在峰值。这主要是由于达到峰值后的换热效率所对应的地温发生了改变, 随着能量桩系统的运行, 初始地温会受系统运行影响发生改变, 因此进口水温和实际地温的差值不是一直变大的, 换热效率也不会一直线性增长。换言之, 在系统恒定功率情况下, 土体本身的换热能力和对热量的存储能力会对能量桩换热效率上限产生重要影响。

2.4 隧道仰拱换热效率

不同进口温度下仰拱结构的温度变化曲线与热交换管进出口水温均值随时间的变化曲线分别如图 10、11 所示。可以看出, 两次恒温试验的进口温度  $T_{in1}$  和  $T_{in2}$  分别为 27.5 °C 和 37.5 °C, 仰拱在两次试验开始前初始温度  $T'_1$  和  $T'_2$  分别为 22.4 °C 和 22.1 °C, 试验运行后最终达到稳定温度分别对应  $T_1$  和

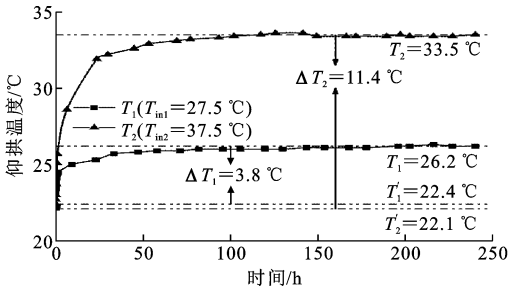


图 10 不同进口温度下仰拱温度变化曲线

Fig. 10 Change curves of tunnel inverted temperature under different inlet temperatures

定输入功率<sup>[16]</sup>两种条件下第一次达到平衡时对应的点连接, 即图 11 中红线所示, 斜率均为正, 代表最终平衡温度越高, 到达平衡点所需时间越长。将两种条件下进出口平均水温变化情况进行对比, 可以发现恒定输入功率条件下, 换热系统进出口平均水温达到稳定所需时间较长。

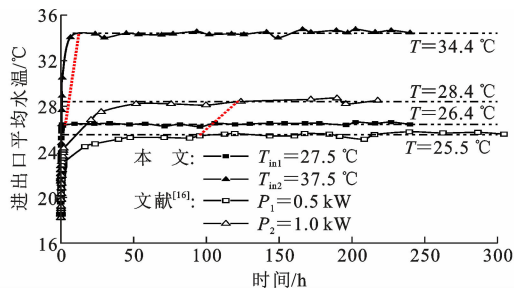


图 11 不同进口温度下进出口平均水温变化曲线

Fig. 11 Change curves of inlet and outlet average temperature under different inlet temperatures

进出口水温均值与仰拱温度升幅的关系曲线如图 12 所示。可以看出,两段曲线起初均为凹曲线,然后在一定时间内呈现线性关系,当进出口平均温度基本稳定后,仰拱温度继续上升,曲线近似于垂直方向,直至仰拱温度稳定。在恒定输入功率条件下,曲线先表现为凹状,后基本为线性(图 12 中空心图例曲线)。这可能是因为,在换热系统刚开始运行时,热传播路径还未稳定,仰拱结构受传热影响还不显著,故而结构温度升幅较慢,曲线表现为凹状。在热量传递稳定后,进出口平均水温与仰拱温度升幅之间表现为线性相关。在恒定进口温度条件下,进出口水温到达平衡点所需的时间较短,仰拱温度升高滞后于进口水温变化,出现一段时间的垂直增长。

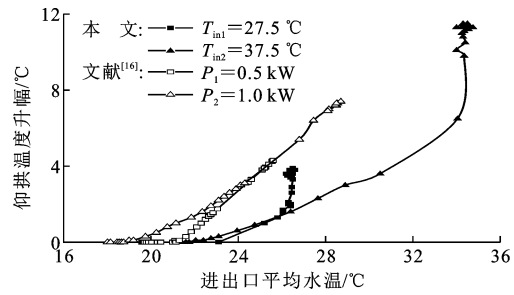


图 12 仰拱温度升幅与进出口平均水温关系曲线

Fig. 12 Relation curves between tunnel inverted temperature rise and inlet and outlet average temperature

假定传热介质为常物性,仰拱中的热交换管从围岩吸收和释放热量是可逆过程,每延米换热管的换热效率计算公式为

$$q = \rho c_p \nu \Delta T / l \quad (5)$$

式中: $q$  为每延米换热管换热效率; $\rho$  为管内循环介质的密度; $c_p$  为管内循环介质的比热容; $\nu$  为管内循环介质流量; $\Delta T$  为换热管进出口温差; $l$  为换热管的长度。

通过计算获得不同进口温度下的换热效率随时间变化关系曲线如图 13 所示。由图 13 可知,单位

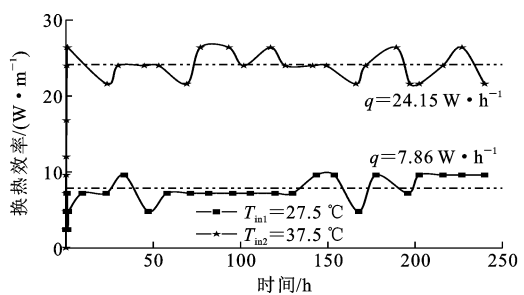


图 13 不同进口温度下换热效率变化曲线

Fig. 13 Change curves of heat transfer efficiency under different input temperatures

延米的换热效率随着进口温度的增加而增加。换热效率变化稳定后,恒定 37.5 °C 进口温度运行状态下,换热效率约为 0.5 kW 运行状态下的 3.07 倍。相较于初始地层温度,进口温度分别为 27.5 °C 和 37.5 °C 时,温度分别增加 4.7 °C 及 14.7 °C,后者为前者的 3.12 倍,与换热效率倍率几乎相同。进口温度与初始地温差值为 4.7 °C 和 14.7 °C 时,隧道仰拱结构温度升幅分别为 3.8 °C 和 11.4 °C,热致轴向应力分别为 3.13 MPa 和 13.86 MPa,热致环向应力分别为 2.85 MPa 和 9.93 MPa。单位温升条件下热致轴向应力和热致环向应力分别为 0.44 MPa · °C<sup>-1</sup> 和 0.35 MPa · °C<sup>-1</sup>。

换热效率与恒定输入温度条件下进口温度及恒定输入功率条件下最终稳定温度关系曲线如图 14 所示。可以看出,两条曲线均表现为线性相关,恒定输入功率条件下换热效率更高,且斜率也更高,约为恒定输入温度条件下的 4.3 倍。

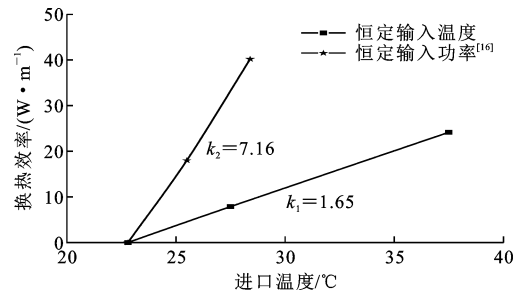


图 14 换热效率与进口温度关系曲线

Fig. 14 Relation curves between heat transfer efficiency and inlet temperature

本文能源隧道仰拱换热效率与既有文献能源隧道系统换热效率对比结果如表 4 所示。张国柱等<sup>[9]</sup>依托内蒙古林场隧道开展岩土热响应试验发现,单位延米换热管的换热量随进口水温增加而呈线性增长,与本文结论一致,但鉴于流速、管长等因素不同,本文出现换热效率相对偏低,线性增长率相对偏小

表 4 能源隧道系统换热效率对比

Table 4 Comparison of heat transfer efficiency of energy tunnel system

输入功率/ kW	进口温度/℃	管间距/m	换热效率/ (W·m <sup>-1</sup> )	数据来源
50 *	16.0	0.5	22.800	文献[9]
	18.0	0.5	28.500	
	20.0	0.5	33.000	
		0.5	4.200	文献[11]
		0.8	6.400	
		1.5	12.000	
		0.4	1.175~7.050	文献[25]
0.5		0.3	18.000	文献[16]
1.0		0.3	40.200	
	27.5	0.3	7.860	本文
	37.5	0.3	24.150	

注：“\*”表示现场总热负荷。

的情况。与其他情形下的换热效率相比,可以确定本文的换热效率在合理的范围内。

3 结 语

(1) 隧道仰拱结构热致环向应力与轴向应力增量随仰拱温度升幅增加而增加,并逐渐趋向稳定,且前者小于后者。进口温度与初始地温差值分别为 4.7℃和 14.7℃时,隧道仰拱结构温度升幅分别约为 3.8℃和 11.4℃,热致轴向应力分别为 3.13 MPa 和 13.86 MPa,热致环向应力分别为 2.85 MPa 和 9.93 MPa。单位温升条件下热致轴向应力和热致环向应力分别为 0.44 MPa·℃<sup>-1</sup>和 0.35 MPa·℃<sup>-1</sup>。

(2) 隧道仰拱的换热效率与进口温度和初始地温值相关。进口温度与初始地温差值分别为 4.7 和 14.7℃时,系统换热效率约分别为 7.86 W·m<sup>-1</sup>和 24.15 W·m<sup>-1</sup>,后者约为前者的 3.07 倍,与进口温度升高幅度基本相同。

(3) 软塑黄土地区隧道基底能量桩换热效率维持在 50~70 W·m<sup>-1</sup>之间,与常规软土地区能量桩的换热效率基本一致。恒定功率运行下仰拱基底能量桩换热效率随进口温度与初始地温差值近乎为一条斜率 4.1 过原点的直线。基底能量桩桩周土层的温度、土压力和孔压受能量桩运行影响有限。

参考文献:

References:

[ 1 ] 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.

[ 2 ] 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.

[ 3 ] YAN J X. Development trends in world tunneling technology: safe, economical, green and artistic [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(5): 693-696.

[ 4 ] FUKUHARA T, WATANABE H, NAKAMURA A. Horizontal U-tube road heating system using tunnel ground heat[J]. Journal of Snow Engineering of Japan, 2006, 22(3): 229-234.

[ 5 ] MA C J, DI DONNA A, DIAS D, et al. Thermo-hydraulic and sensitivity analyses on the thermal performance of energy tunnels[J]. Energy and Buildings, 2021, 249: 111206.

[ 6 ] FRODL S, FRANZIUS J N, BARTL T. Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach[J]. Geomechanics and Tunnelling, 2010, 3(5): 658-668.

[ 7 ] LEE C H, PARK S W, WON J M, et al. Evaluation of thermal performance of energy textile installed in tunnel[J]. Renewable Energy, 2012, 42: 11-22.

[ 8 ] 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 Zhennan, GUO hongxian. 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.

[ 9 ] 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 Guozhu, XIA Caichu, MA Xuguang, 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.

[10] 马 康, 程晓辉. 能源隧道的温度应力有限元计算[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4): 571-576, 585.

MA Kang, CHENG Xiaohui. Finite element calculation of thermal stress of energy tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4): 571-576, 585.

[11] 夏才初, 邹一川, 张国柱. 寒区隧道地源热泵加热系



- 统埋管间距优化分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(12):1802-1807.
- XIA Caichu, ZOU Yichuan, ZHANG Guozhu. Pipe distance optimization of geothermal resource heat pump in cold region[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2012,40(12):1802-1807.
- [12] MA C J, DI DONNA A, DIAS D, et al. Numerical investigations of the tunnel environment effect on the performance of energy tunnels[J]. Renewable Energy,2021,172:1279-1292.
- [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] 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 Hongxian, MENG Jiawei, ZHU Zhennan. Numerical analysis and applicability evaluation of thermal response test in energy tunnels[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2019,39(4):572-578.
- [15] INSANA A, BARLA M. Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel[J]. Renewable Energy,2020,152:781-792.
- [16] 季伟伟,孔纲强,刘汉龙,等. 软塑黄土地区隧道仰拱热力响应特性现场试验[J]. 岩土力学,2021,42(2):558-564.
- JI Weiwei, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Field tests on thermal response characteristics of the tunnel invert in soft plastic loess area[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(2):558-564.
- [17] 江强强,焦玉勇,骆 进,等. 能源桩传热与承载特性研究现状及展望[J]. 岩土力学,2019,40(9):3351-3362,3372.
- JIANG Qiangqiang, JIAO Yuyong, LUO Jin, et al. Review and prospect on heat transfer and bearing performance of energy piles[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(9):3351-3362,3372.
- [18] 党 政,关 文,程晓辉,等. CFG 能源桩用于混凝土路面除冰降温的试验研究[J]. 中国公路学报,2019,32(2):19-30.
- DANG Zheng, GUAN Wen, CHENG Xiaohui, et al. Experimental study on CFG energy pile for concrete pavement deicing and cooling[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(2):19-30.
- [19] 陆浩杰,吴 迪,孔纲强,等. 循环温度作用下饱和黏土中摩擦型桩变形特性研究[J]. 工程力学,2020,37(5):156-165.
- LU Haojie, WU Di, KONG Gangqiang, et al. Displacement characteristics of friction piles embedded in saturated clay subjected to thermal cycles[J]. Engineering Mechanics,2020,37(5):156-165.
- [20] 李富远,王忠瑾,谢新宇,等. 静钻根植能源桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学,2020,41(10):3307-3316.
- LI Fuyuan, WANG Zhongjin, XIE Xinyu, et al. Model test on bearing characteristic of static drill rooted energy pile[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(10):3307-3316.
- [21] 任连伟,任军洋,孔纲强,等. 冷热循环下 PHC 能量桩热力响应和承载性能现场试验[J]. 岩土力学,2021,42(2):529-536,546.
- REN Lianwei, REN Junyang, KONG Gangqiang, et al. Field tests on thermo-mechanical response and bearing capacity of PHC energy pile under cooling-heating cyclic temperature[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(2):529-536,546.
- [22] 费 康,朱志慧,石雨恒,等. 能量桩群桩工作特性简化分析方法研究[J]. 岩土力学,2020,41(12):3889-3898.
- FEI Kang, ZHU Zhihui, SHI Yuheng, et al. A simplified method for geotechnical analysis of energy pile groups[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(12):3889-3898.
- [23] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- Code for design of concrete structures:GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.
- [24] 孔纲强,吕志祥,孙智文,等. 黏性土地基中摩擦型能量桩现场热响应试验[J]. 中国公路学报,2021,34(3):95-102.
- KONG Gangqiang, LYU Zhixiang, SUN Zhiwen, et al. Thermal response testing of friction energy piles embedded in clay[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(3):95-102.
- [25] 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.