

隧道内地源热泵热交换管与隧道结构相互影响

夏才初^{1,2}, 杨勇^{1,2}, 张国柱^{1,3}, 邹一川^{1,4}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 东南大学 地下工程系, 南京 210096; 4. 四川省建筑设计院, 成都 610017)

摘要: 为解决寒区隧道冻害问题, 将地源热泵型供热系统应用于内蒙古博牙高速扎敦河隧道中. 系统由取热段、加热段、热泵和分、集水管路组成, 可用于隧道洞口段衬砌和保温水沟加热. 热交换管以串联纵向的布置形式埋设在初衬和二衬之间. 通过计算含热交换管承载截面面积和惯性矩的减小率, 分析得到热交换管对隧道衬砌承载力的影响较小, 可以忽略. 隧道结构内包括锚杆、防水板和钢拱架, 通过建立单因素对比计算模型, 分析各构件对热交换管换热量的影响, 研究表明: ①锚杆对热交换管换热量产生的影响不明显, 最大仅为 2.3%; ②运行前期, 应充分考虑防水板对热交换管换热量的不利影响, 但长期运行后, 可忽略防水板的不利影响; ③运行前期, 钢拱架对热交换管换热量有显著的提升, 但长期运行后, 该影响趋于不明显.

关键词: 寒区隧道; 地源热泵; 热交换管; 相互影响

中图分类号: TU354

文献标志码: A

Mutual Influence Between Tunnel Structures and Heat Exchange Pipes of Ground Source Heat Pump in Tunnel

XIA Caichu^{1,2}, YANG Yong^{1,2}, ZHANG Guozhu^{1,3}, ZOU Yichuan^{1,4}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Underground Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 4. Sichuan Provincial Architectural Design Institute, Chengdu 610017, China)

Abstract: Tunnel heating system using heat pump was introduced for the first time at Zhadun River tunnel in Inner Mongolia Autonomous Region of China to prevent freezing damage in cold region tunnels. Tunnel heating system consists of the heating section, absorbing section, heat pump,

collector, and distributor line. This system can be used for heating lining and insulation ditch in tunnel portal. The heat exchange pipes are laid between first lining and second lining in series of longitudinal arrangement. By calculating the decreased ratio of area and moment of inertia of carrying cross-section within heat exchange pipes, the results show that the influence of heat exchange pipes on the carrying capacity of tunnel lining is so small that it can be ignored. Tunnel structure includes anchors, waterproof boards and steel arches. The influences of each component on the heat transfer of heat exchange pipes were analyzed by establishing single factor comparison model. The results show that: ① The influence of anchors on the heat transfer of heat exchange pipes is not obvious, only 2.3% at most; ② The disadvantageous influence of waterproof boards on the heat transfer of heat exchange pipes should be considered at the prophase, but it can be ignored after long-running; ③ The advantageous influence of steel arches on the heat transfer of heat exchange pipes is obvious at the prophase, but it tends to be not obvious after long-running.

Key words: tunnel in cold region; ground source heat pump; heat exchange pipe; mutual influence

寒区隧道在冬季面临冻害的威胁, 我国 76% 的寒区隧道都发生了不同程度的冻害破坏. 利用电能和煤炭的隧道加热系统虽能永久根除隧道病冻害, 但却增加了隧道的运行管理费用, 并带来环境污染等问题^[1]. 因此急需研发一种既节能又环保的新型加热系统.

Brandl^[2] 和 Adam^[3] 等提出了采用地热能的隧道技术, 即利用布置于隧道初衬和二衬之间的能源土工布吸收围岩地温能, 经地源热泵提升后, 用于隧道内部和附近建筑物的供暖. Brandl^[2] 开展了采用

收稿日期: 2013-01-02

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(2009318822047); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1029); 内蒙古自治区交通科技项目(NJ-2008-25)

第一作者: 夏才初(1963—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为岩石力学、地下结构和能源地下工程等.

E-mail: tjxiacbb@126.com

地热能的隧道现场试验研究,该试验采用 6 台地源热泵将提取的地温能提升后为附近一所学校供暖,能提供 150 kW 功率的热能,一个供暖季度可提供 214 MW·h 的能量. Islam 等^[4-5]研发了水平单 U 管道路加热系统,利用埋于隧道中部路面以下 1.2 m 处的水平单 U 管吸收围岩地温能,对隧道洞口段的路面加热. 该技术成功应用于 Nanaori-Toge 隧道,现场温度监测表明,隧道洞口路面温度始终处于冰点以上,达到了预期效果. 夏才初等^[6]在分析总结国外先进技术的基础上,提出了能源地下工程新概念,并对其应用前景做了详细论述. 张国柱等^[7]提出了利用地温能的寒区隧道地源热泵供热系统,并开展了岩土热响应试验.

有关寒区隧道地源热泵型防冻保暖系统埋设的热交换管与隧道结构之间相互影响方面的研究成果尚未见报道. Soga 等^[8]开展了能源桩循环荷载试验,研究了能源桩热交换时温度变化对能源桩桩内应力、轴向荷载和桩基沉降量等方面的影响. 曹诗定^[9]分析研究了能源地下连续墙内埋管对地下连续墙承载力的影响. 朱建龙等^[10]在上述研究的基础上,考虑地下连续墙和灌注桩两种围护结构,研究了埋管对结构承载力的影响以及围护结构变形对内部热交换管的影响. 但是由于结构形式和边界条件等方面的差别,上述研究成果不能直接用于隧道.

隧道比地下连续墙和灌注桩结构更加复杂,其中包括衬砌、锚杆、钢拱架和防水板等. 本文以内蒙古博牙高速扎敦河隧道为依托工程,研究了寒区隧

道地源热泵热交换管与隧道结构的相互影响.

1 扎敦河隧道地源热泵供热系统

内蒙古博牙高速扎敦河隧道右幅入口首次采用地源热泵供热系统. 该系统由取热段、供热段、热泵和分、集水管路组成. 取热段位于隧道中部,由埋设于隧道初衬和二衬之间的热交换管环路(PE 管)组成;供热段位于隧道洞口处,由安装于二衬与保温层之间的供热管和保温水沟内的供热管环路组成. 寒区隧道地源热泵供热系统如图 1 所示.

该系统工作原理如下:热交换管由分、集水管与地源热泵前端相连,形成封闭系统,系统内注满循环介质(含防冻液),在水泵的驱动下,热交换管内的循环介质在管内循环流动,吸收围岩中的地温能,经地源热泵提升后,用于对隧道洞口段的衬砌及保温水沟进行加热.

扎敦河隧道地源热泵供热系统取热段距洞口 550 m 处,取热段长度为 200 m,取热段位于Ⅲ级围岩中,断面如图 2 所示. 隧道断面尺寸:上部为内径 11.5 m 的半圆形,圆心距离隧道路面 1.6 m,下部由两段内径为 16.5 m,角度为 16°的圆弧段与上部半圆形端点连接而成,二衬厚度 35 cm,初衬厚度 25 cm,初衬和二衬交界面铺设 1.5 mm 厚的防水板,由初衬向围岩内打设直径 22 mm 的普通水泥砂浆锚杆,打入深度 250 cm,锚杆环向间距 1.2 m,纵向间距 1 m,取热段铺设的保温层厚度为 8 cm.

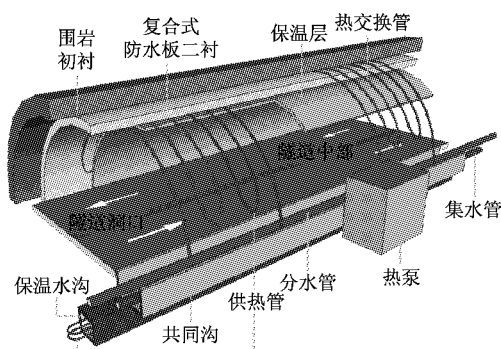


图 1 寒区公路隧道地源热泵供热系统效果图
Fig.1 Schematic view of the tunnel heating system with heat pump

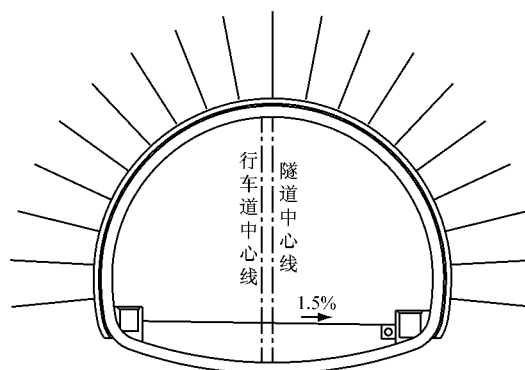


图 2 取热段隧道断面图
Fig.2 Cross-sectional view of the tunnel in the absorbing section

2 热交换管对隧道衬砌承载力的影响

系统取热段热交换管以串联纵向的布置形式埋

设在隧道初衬和二衬之间,可能影响隧道衬砌的承载力,为分析埋设的热交换管对隧道衬砌承载力影响的大小,作以下几点简化:①隧道为长细结构,用平面应变模式分析^[11],并且沿着隧道纵向取单位延

米分析;②隧道承载结构简化为初衬和二衬,忽略其中的防水板、钢拱架、锚杆等结构;③隧道初衬和二衬作为整体混凝土承载结构计算分析.

隧道衬砌承载截面包括无热交换管承载截面和含热交换管承载截面(图 3). 图中, D 为隧道衬砌厚度值; y_0 为热交换管的中心在 y 方向距原点距离; d 为热交换管直径; dA 为衬砌某点微面积. 在外荷载不变以及配筋量和混凝土标号不变的情况下,影响构件承载能力的主要因素是截面面积和面积的分布(用惯性矩表示). 因此,只要计算含热交换管比无热交换管承载截面面积和惯性矩的减小率,即可知道热交换管对隧道衬砌承载力的影响大小.

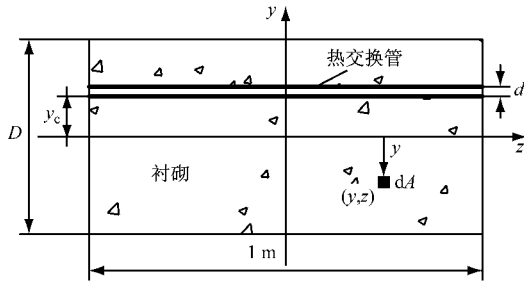


图 3 含热交换管承载截面

Fig.3 Carrying cross-section within heat exchange pipes

2.1 埋管对隧道衬砌承载截面面积的影响

不同围岩级别条件下,隧道衬砌厚度值可以参考《公路隧道设计规范》^[12]中的设计参数值,见表 1.

表 1 隧道衬砌厚度设计参数

围岩级别	初衬厚度/cm		二衬厚度/cm	
	两车道隧道	三车道隧道	两车道隧道	三车道隧道
I	5	8	30	35
II *	6.5	9	30	40
III *	10	12.5	35	45
IV *	13.3	17.5	35	50
V *	20	25	45	60
VI *	通过试验、计算确定			

注: * 标注的围岩级别所对应初衬厚度取文献^[12]中相应初衬厚度变化范围的平均值.

根据假设(2)并由表 1 可确定,不同围岩级别条件下,不同车道隧道内,隧道衬砌厚度值大致的变化范围为 $35 \text{ cm} \leq D \leq 85 \text{ cm}$,热交换管一般直径为 $d = 2.5 \text{ cm}$. 设含热交换管比无热交换管承载截面面积的减小率为 η :

$$\eta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (1)$$

式中: A_1 为含热交换管承载截面的面积; A_0 为无热交换管承载截面的面积.

从而可得,含热交换管承载截面面积减小率 η 的变化范围为 $2.9\% \leq \eta \leq 7.1\%$,不同条件下面积减小率 η 的具体值见表 2.

表 2 不同条件下面积的减小率

围岩级别	两车道隧道		三车道隧道	
	衬砌厚度/cm	面积减小率 $\eta/\%$	衬砌厚度/cm	面积减小率 $\eta/\%$
I	35	7.1	43	5.8
II	36.5	6.8	49	5.1
III	45	5.6	57.5	4.3
IV	48.5	5.2	67.5	3.7
V	65	3.8	85	2.9

2.2 埋管对隧道衬砌承载截面惯性矩的影响

热交换管埋设在隧道衬砌内,减小衬砌承载截面的惯性矩,如图 3 所示,隧道衬砌承载截面的形心主轴为 y 轴和 z 轴,其中 z 轴是中性轴. 定义 $y^2 dA$ 为 dA 对中性轴 z 轴的惯性矩,则整个衬砌承载截面 A 对 z 轴的惯性矩定义为

$$I_z = \int_A y^2 dA \quad (2)$$

设含热交换管比无热交换管承载截面惯性矩的减小率为 ξ :

$$\xi = \frac{I_0 - I_1}{I_0} \quad (3)$$

式中: I_1 为含热交换管承载截面的惯性矩; I_0 为无热交换管承载截面的惯性矩.

由表 1 可知隧道衬砌厚度大致的变化范围为 $35 \text{ cm} \leq D \leq 85 \text{ cm}$,从而可得,含热交换管承载截面惯性矩减小率 ξ 的变化范围为 $1.3\% \leq \xi \leq 8.9\%$,不同条件下惯性矩减小率 ξ 的具体值见表 3.

表 3 不同条件下惯性矩的减小率

围岩级别	两车道隧道		三车道隧道	
	衬砌厚度/cm	惯性矩减小率 $\xi/\%$	衬砌厚度/cm	惯性矩减小率 $\xi/\%$
I	35	8.9	43	5.7
II	36.5	6.8	49	5.2
III	45	4.2	57.5	3.6
IV	48.5	2.5	67.5	2.2
V	65	1.4	85	1.3

热交换管对隧道衬砌承载截面的面积和惯性矩都有一定的影响. 在 I ~ III 级围岩条件下,含热交换管承载截面面积和惯性矩的减小率基本在 $5\% \sim 9\%$ 的范围内;在 VI 和 V 级围岩条件下,含热交换管承载截面面积和惯性矩的减小率基本小于 5% . 根据《公路隧道设计规范》^[12]: 对于复合式衬砌中的二次衬

砌, I ~ III 级围岩中为安全储备, VI、V 级围岩中为承载结构. 虽然 I ~ III 级围岩条件下含热交换管承载截面面积和惯性矩的减小率大于 5%, 但此时的二衬只是作为安全储备, 所以热交换管对截面承载力的影响可以不予考虑; 而 VI 和 V 级围岩条件下含热交换管承载截面面积和惯性矩的减小率小于 5%, 因而对承载力的影响很小. 综合看, 热交换管对隧道衬砌承载力的影响较小, 可以忽略.

3 隧道结构对热交换管换热量的影响

隧道施工过程中布设了大量的锚杆和钢拱架, 隧道中还铺设了防水板, 这些隧道结构内的构件均可能对热交换管换热量产生影响. 为比较上述各构件对热交换管换热量的影响, 建立有限元计算模型(以不考虑隧道结构中锚杆、防水板和钢拱架的影响为对照组), 计算该模型内热交换管的换热量并将其作为对照. 再在该计算模型中分别添加各构件, 建立单因素对比计算模型, 将在相同边界条件下计算所得热交换管的换热量与对照组的计算结果对比, 定量分析某一因素对热交换管换热量影响的大小. 分析中作以下几点简化:

(1) 隧道初衬和二衬均为混凝土材料, 建模时将两者合起来考虑;

(2) 忽略热交换管管壁对换热的影响.

3.1 热交换管换热量计算(对照组)

(1) 计算理论^[13]

对于任何传热问题, 都必须满足能量守恒定律, 即热能或机械能通过边界进入系统的速率减去能量通过边界离开系统的速率, 再加上系统体内产生能量的速率, 必须等于系统储存能量的速率. 对于二维热传导问题, 利用能量守恒定律, 可以得到如下热传导方程:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q'}{K} = \frac{\rho c}{K} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

式中: T 为介质的温度; q' 为单位体积介质内生成能量的速率; K 为介质的导热系数; ρ 为介质的密度; c 为介质的比热容.

有限元计算传热问题时, 主要分为稳态传热和瞬态传热两种类型. 其中, 稳态分析中的任一节点的温度不随时间变化, 稳态热分析的能量平衡方程为(以矩阵形式表示):

$$KT = Q \quad (5)$$

式中: K 为传导矩阵, 包含导热系数、对流系数、辐射率和形状系数; T 为节点温度向量; Q 为节点热流率

向量, 包含热生成.

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程, 在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有变化. 瞬态热分析的能量平衡方程为(以矩阵形式表示):

$$C\dot{T} + KT = Q \quad (6)$$

式中: C 为比热矩阵, 考虑系统内能的增加; \dot{T} 为温度对时间的导数.

实际热分析时, 一般是先利用稳态传热计算初始温度场, 再利用瞬态传热模拟计算系统的加热或冷却过程, 得到系统温度场及相关热参数随时间的变化情况.

(2) 计算模型及参数

取热段热交换管以串联纵向的布置形式埋设于初衬与二衬之间, 管间距为 0.5 m, 围岩厚度取 10 m, 按照图 2 所示的取热段隧道实际断面尺寸建立有限元计算模型, 如图 4 所示. 计算中各材料的热物性参数见表 4.

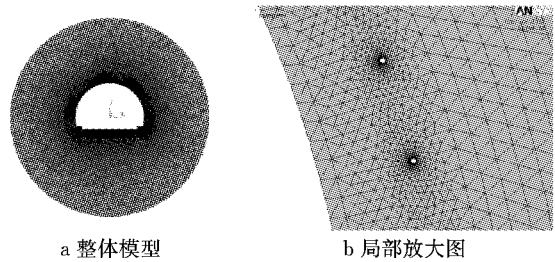


图 4 有限元计算模型图(对照组)

Fig. 4 Diagram of finite element model (reference group)

表 4 各材料的热物性参数

Tab. 4 Thermophysical parameters of different materials

材料	热物性参数		
	导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	比热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)
混凝土	1.85	970	2 500
围岩	3.22	1 293	2 544
聚氨酯材料	0.05	55	1 210
防水板	0.036	60	120
钢材	36	470	7 800

(3) 边界条件

模型的外边界为恒温边界条件, 边界处的温度等于围岩的原始地温(为 $7^\circ C$). 根据《地源热泵系统工程技术规范》^[14], 供热工况下, 地埋管换热器中传热介质的设计平均温度一般为 $-2 \sim 5^\circ C$, 计算时, 利用恒温法思路——即在热交换管管壁处施加 $0^\circ C$ 的对流边界条件, 用于模拟热交换管管内循环介质

与管壁之间的传热.

模型内边界为对流边界条件,洞内气体温度如下:

$$T(t) = 4.2 + 8.7 \sin\left[\frac{2\pi(t + 205)}{365}\right] \quad (7)$$

式中: t 为系统运行时间,d.

(4)计算结果

计算模型上加载相应的边界条件,以瞬态传热计算得到持续换热 60 d 后热交换管的换热量和初衬与二衬交界面的温度值随运行时间的变化曲线,如图 5 所示.

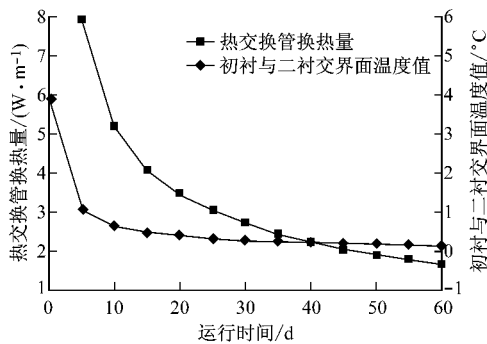


图 5 换热量和温度随运行时间变化曲线(对照组)

Fig.5 Heat transfer-time and temperature-time curves (control group)

由图 5 可知,热交换管换热量随运行时间的变化近似呈指数递减,变化率逐渐减小并趋于稳定;初衬与二衬交界面温度值变化率在运行初期很大,之后逐渐减小并趋于稳定值.可见,运行初期热交换管内循环介质与衬砌围岩的温差较大,换热量也较大,随着运行时间增加,热交换管内循环介质与衬砌围岩的温差逐渐减小并趋于动态平衡,从而热交换管的换热量也趋于稳定.

3.2 锚杆对热交换管换热量的影响

隧道初衬施工时,需要布设大量锚杆,以提高隧道围岩的自稳能力.根据设计资料,隧道深埋段打设有大量普通水泥砂浆锚杆,锚杆的导热系数远大于隧道衬砌及围岩的导热系数,有利于将隧道围岩深部的地热能传导至初衬,从而可能增大热交换管的换热量.

在图 4 有限元计算模型中的初衬外侧,按照实际布设的直径及间距添加锚杆,添加锚杆后的有限元计算模型如图 6 所示.对于普通水泥砂浆锚杆,其填充材料的热物性参数与围岩相差不大,计算中仅考虑锚杆(热物性参数同钢材)对热交换管换热量的影响.

图 6 所示有限元计算模型所施加的边界条件同对照组,计算中各材料的热物性参数见表 4,计算得

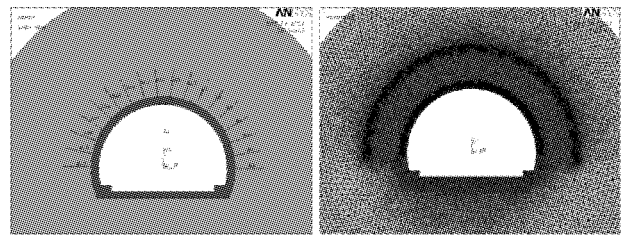


图 6 有限元计算模型(含锚杆)

Fig.6 Diagram of finite element model (including anchors)

到锚杆影响后的热交换管换热量与对照组中热交换管换热量的对比情况如图 7 所示.由图 7 可知,考虑锚杆影响后的热交换管换热量也近似呈指数递减,变化趋势同对照组中热交换管换热量,并且两者之间的换热量相差很小,最大仅为 2.3%.因此,隧道结构中布设锚杆对热交换管换热量产生的影响不明显.

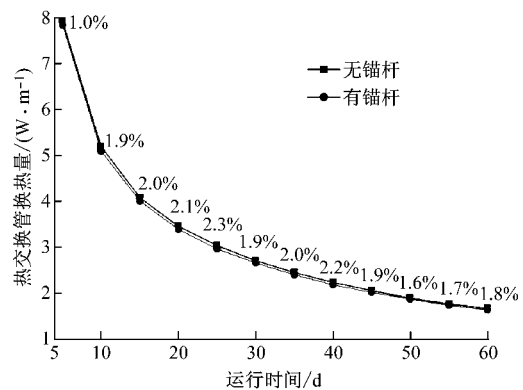


图 7 热交换管换热量对比图(考虑锚杆)

Fig.7 Comparison chart of heat transfer of heat exchange pipes (with a consideration of anchors)

3.3 防水板对热交换管换热量的影响

隧道二衬施工前,需要在初衬表面铺设防水板,以防止地下水渗入二衬混凝土造成隧道内壁渗水、滴漏等病害,防水板内侧设计有集水管,初衬渗透出的地下水沿防水板进入纵向集水管,最终汇集至中央深埋水沟并排出隧道.地源热泵供热系统取热段的热交换管铺设在初衬表面,位于防水板和初衬之间(图 8).防水板导热性能较差,阻隔了洞内空气对隧道初衬和围岩温度的影响,从而可能对热交换管换热量产生影响.

由于防水板厚度过薄(1.5 mm),建立有限元计算模型时,对防水板的导热系数和厚度进行等效处理,即厚度为 1.5 mm,导热系数为 0.036 W·m⁻¹·°C⁻¹的防水板等效为一层厚度为 15 mm,导热系数为 0.36 W·m⁻¹·°C⁻¹的传热介质.在图 4 有限

元计算模型中的初衬与二衬之间添加一层厚度为 15 mm, 导热系数为 $0.36 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ 的防水板, 添加防水板后的有限元计算模型如图 9 所示.

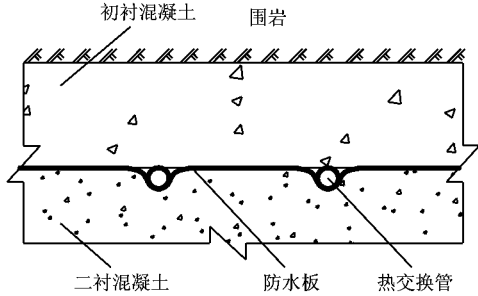


图 8 防水板与热交换管位置图

Fig. 8 Location map of waterproof boards and heat exchange pipes

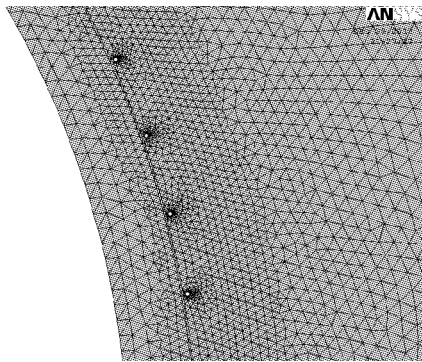


图 9 有限元计算模型(含防水板)

Fig. 9 Diagram of finite element model (including waterproof boards)

上述有限元计算模型所施加的边界条件同对照组, 计算中各材料的热物性参数见表 4, 计算得到防水板影响后的热交换管换热量与对照组中热交换管换热量的对比情况如图 10 所示. 由图 10 可知, 考虑防水板影响后的热交换管换热量变化趋势同对照组中热交换管换热量, 但是考虑防水板影响后的热交换管换热量却低于对照组热交换管换热量. 运行初期, 由于防水板导热性能较差, 热交换管从隧道二衬取热受到防水板的阻碍, 因此考虑防水板影响后的热交换管换热量反而降低了 10.8%, 随着换热的进行, 换热量的降幅逐渐减小, 两种情况下热交换管换热量逐渐接近, 持续换热 60 d 后, 考虑防水板影响后的热交换管换热量的降幅仅为 2.5%. 为了前期运行的可靠, 防水板对热交换管换热量降低的影响在换热量计算中应考虑, 但长期运行后, 可忽略防水板的不利影响.

3.4 钢拱架对热交换管换热量的影响

当隧道围岩级别较差时, 需要在初次喷射混凝土后架设钢拱架加强初衬, 然后再二次喷射混凝土

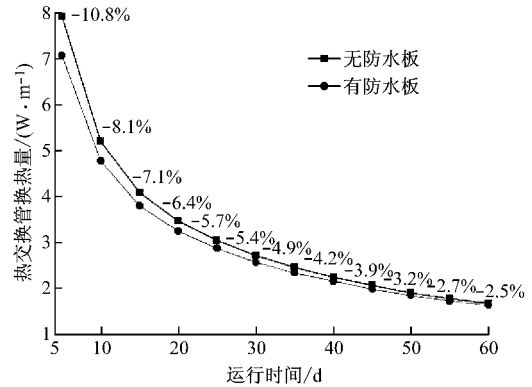


图 10 热交换管换热量对比图(考虑防水板)

Fig. 10 Comparison chart of heat transfer of heat exchange pipes (with a consideration of waterproof boards)

以完成隧道初衬的施工. 钢拱架一般由型钢组成, 架立于隧道环向上半部, 并沿纵向每隔一定距离设一道支撑. 型钢的导热性能高于围岩和混凝土, 对初衬混凝土热物性参数有一定提升作用, 从而可能会影响热交换管的换热量.

采用折算系数法研究钢拱架对热交换管换热量的影响, 折算公式如下:

$$\begin{cases} K = (1 - \epsilon)K_c + \epsilon K_s \\ C = (1 - \epsilon)C_c + \epsilon C_s \\ \rho = (1 - \epsilon)\rho_c + \epsilon \rho_s \end{cases} \quad (8)$$

式中: K_c 、 K_s 和 K 分别为混凝土、钢材和综合的导热系数; C_c 、 C_s 和 C 分别为混凝土、钢材和综合的比热容; ρ_c 、 ρ_s 和 ρ 分别为混凝土、钢材和综合的密度; ϵ 为每延米钢材体积占总体积的比例.

根据工程资料, 取钢拱架的间距为 0.75 m, 并将钢拱架所用材料折算成隧道沿纵向每延米所用材料量, 见表 5. 从而计算得 $\epsilon = 1.9\%$, 由式(8)计算得到初衬综合热物性参数为: $K = 2.50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, $C = 961 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, $\rho = 2601 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 在图 4 有限元计算模型中, 将初衬与二衬分别建模, 初衬混凝土采用折算后的综合热物性参数, 二衬混凝土采用原热物性参数. 模型边界条件同对照组, 计算得到钢拱架影响后的热交换管换热量与对照组中热交换管换热量的对比情况如图 11 所示.

表 5 钢拱架所用材料量

Tab. 5 The amount of materials of steel arch				
名称	长度/cm	数量/件	重量/kg	重量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)
型钢	2 385.4	1	489.32	652.43
连接钢板		8	28.94	38.59
基础钢板		2	8.04	10.72
连接钢筋	85	25	52.49	70.00
总量			578.79	771.74

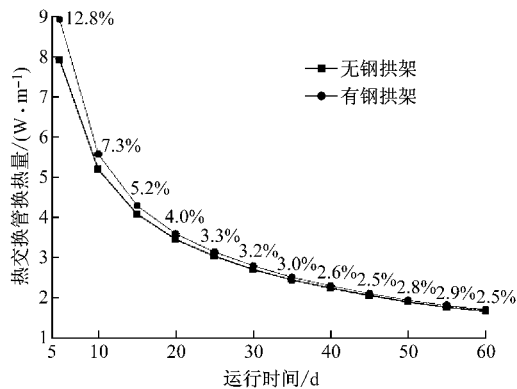


图 11 热交换管换热量对比图(考虑钢拱架)

Fig. 11 Comparison chart of heat transfer of heat exchange pipes (with a consideration of steel arches)

由图 11 可知,当初衬中存在钢拱架时,运行初期,热交换管换热量较对照组热交换管换热量得到一定的提高,如持续运行的第 5 天,提高率达到 12.8%,但持续运行较长时间后,换热量提高率明显下降,如持续运行 60 d 后,提高率为 2.5%。因此,钢拱架对热交换管换热量有一定的有利影响,但随着换热的持续进行,这一有利影响逐渐趋于不明显。

4 小结

(1)热交换管埋设于隧道衬砌中,对衬砌承载截面的面积和惯性矩都有一定的影响,虽然 I~III 级围岩条件下含热交换管承载截面面积和惯性矩的减小率大于 5%,但此时的二衬只是作为安全储备,所以热交换管对截面承载力的影响可以不予考虑;而 VI 和 V 级围岩条件下含热交换管承载截面面积和惯性矩的减小率小于 5%,对承载力的影响很小。综合看,热交换管对隧道衬砌承载力的影响较小,可以忽略。

(2)考虑锚杆影响后的热交换管换热量与对照组中热交换管换热量相差很小,最大仅为 2.3%,隧道结构中布设锚杆对热交换管换热量产生的影响不明显,因此换热量计算时可不考虑锚杆对热交换管换热量的影响。

(3)隧道初衬与二衬间的防水板在一定程度上对传热起到了隔离作用,阻滞了热交换管从二衬取热,从而降低了热交换管的取热效果,因此考虑防水板影响后的热交换管换热量低于对照组中的热交换管换热量,为了前期运行的可靠,防水板对热交换管换热量降低的影响在换热量计算中应考虑。

(4)当初衬中存在钢拱架时,运行初期对热交换管换热量有较明显的提升,但是长期持续运行后,这一有利影响趋于不明显,因此,运行前期换热量计算时,应充分考虑钢拱架的有利影响,但长期持续运行后,可忽略钢拱架的有利影响。

参考文献:

- [1] 夏才初,张国柱,曹诗定,等. 寒区公路隧道防冻保暖技术及其发展趋势[C]//2009 年全国公路隧道学术会议. 兰州: [s. n.], 2009: 13-19.
XIA Caichu, ZHANG Guozhu, CAO Shiding, et al. Anti-freeze and warmth retention technology and develop trend road tunnel in frigid areas[C]//2009 National Conference on Road Tunnel. Lanzhou: [s. n.], 2009: 13-19.
- [2] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active structures[J]. Geotechnique, 2006, 56(2): 81.
- [3] Adam D, Markiewicz R. Energy from earth-coupled structures, foundation, tunnel and sewers[J]. Geotechnique, 2009, 59(3): 229.
- [4] 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): 23.
- [5] Ialam M S, Fukuhara T, Watanabe H. Simplified heat transfer model of horizontal U-tube(HUT) system[J]. Journal of Snow Engineering of Japan, 2007, 23(3): 232.
- [6] 夏才初,曹诗定,王伟. 能源地下工程的概念、应用与前景展望[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 419.
XIA Caichu, CAO Shiding, WANG Wei. An introduction to energy geotechnical engineering and its application and prospect[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 419.
- [7] 张国柱,夏才初,马绪光,等. 寒区隧道热源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.
ZHANG Guozhu, XIA Caichu, MA Xuguang, et al. Rock-soil thermal response test of tunnel heating system using heat pump in coldregion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 99.
- [8] Bourne-Webb P J, Amatya B, Soga K, et al. Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles[J]. Geotechnique, 2009, 3: 237.
- [9] 曹诗定. 能源地铁车站主要热交换构件传热计算方法研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2009.
CAO Shiding. Study on the calculation method of main heat exchangers in energy subway station[D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2009.
- [10] 夏才初,朱建龙,曹诗定. 围护结构内的热交换管和结构的相互影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 685.
XIA Caichu, ZHU Jianlong, CAO Shiding. Research on mutual influence between the enclosure structures and the heat exchange pipes in enclosure structures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 685.

(下转第 150 页)