

渗流对地铁源热泵前端毛细管换热器性能及 围岩温度场的影响

季永明, 蔡浩宇, 吉程帆, 焦嘉琛, 尹振峰, 胡松涛

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

摘要: 地铁长期运行会引起隧道内的热堆积, 影响地铁的安全高效运行。以毛细管为前端换热器的地铁源热泵系统是解决上述问题的有效技术之一。基于某示范工程, 建立了隧道衬砌内毛细管换热器仿真模型; 分析了典型工况下, 渗流对其传热特性及隧道围岩温度场的影响。结果显示, 渗流会显著扩大换热器的热影响范围, 最远可达围岩下游 70 m 处; 与无渗流工况相比, 渗流可显著提高换热器的效率, 且二者逆流时, 提升效果更明显, 供冷季为 3.20 倍, 供暖季为 2.55 倍; 渗流可显著减弱围岩的热堆积。本研究可为地铁源热泵前端换热器的设计提供理论支撑。

关键词: 地铁; 热堆积; 供热; 换热器; 渗流; 热泵

中图分类号: TU831.6; TU833⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0125-08

Effect of seepage on the performance of the front-end capillary heat exchanger in subway source heat pump system and the surrounding rock temperature field

JI Yongming, QI Haoyu, JI Chengfan, JIAO Jiachen, YIN Zhenfeng, HU Songtao

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Long-term operation of subway will cause heat accumulation in the tunnel, which will affect the safe and efficient operation of subway. The subway source heat pump system with front-end capillary heat exchanger is one of the effective technologies to solve the above problem. Based on a demonstration project, a simulation model of the capillary heat exchanger in the tunnel lining was established. The influence of seepage on the heat transfer characteristics of the capillary heat exchanger and the surrounding rock temperature field under typical working conditions was analyzed. The results show that the seepage can significantly expand the heat influence range of the heat exchanger, up to 70 m downstream of the surrounding rock. Compared with the condition without seepage, the efficiency of the heat exchanger can be significantly improved by seepage, and the improvement effect is more obvious when the two flow upstream, which is 3.20 times in the cooling season and 2.55 times in the heating season. The thermal accumulation of surrounding rock can be significantly weakened by seepage. This study can provide theoretical support for the design of the front-

收稿日期: 2022-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52108079)

作者简介: 季永明(1986-), 男, 山东潍坊人。博士, 副教授, 主要从事可再生能源方面的研究。E-mail: jixia_2008@126.com。

end heat exchanger of the subway source heat pump system.

Key words: subway; heat accumulation; heating; heat exchanger; seepage; heat pump

地铁因其舒适、准时、快捷等优点成为缓解城市交通拥堵问题的首选,近年来其运营与建设规模飞速增长。地铁运行过程中会产生大量的废热,且该废热难以完全排除。随着地铁的累积运行,大量废热被存储在隧道围岩中,最终形成一个“热套”,严重影响了地铁安全高效运行。目前,基于隧道衬砌换热器的地铁源热泵系统是解决上述问题的方案之一。该方案通过隧道衬砌内换热器吸收隧道内废热,并将其用于地上建筑供热,理论上可彻底解决地铁隧道热堆积问题,同时使地铁隧道成为“能源隧道”。

BARLA 等^[1-4]探究并验证了在隧道衬砌中敷设传统埋管的可行性,分析了渗流作用下的隧道衬砌换热器的传热规律。BIDARMAGHZ 等^[5]分析了渗流对隧道衬砌换热器、隧道内热环境和围岩温度场的影响,结果表明地下渗流可以很好地改善隧道热环境,同时改变隧道围岩温度场分布。BRANDL^[6]提出了利用热泵技术提取隧道内的热量用于地上学校供热的方案,分析结果显示,该方案具有良好的供热效果与经济性。LIU 等^[7]、夏才初等^[8]基于实验及数值模拟,分析了渗流对隧道衬砌换热器的影响,结果显示,渗流对换热器的影响要远大于隧道通风。

相比于传统埋管换热器,毛细管换热器具有“面大、壁薄、效率高”等优点。鉴于此,胡松涛团队^[9-10]提出了将其敷设于地铁隧道衬砌内作为前端换热器的技术方案,并对系统可行性进行系统研究。JI 等^[11]采用理论分析和数值模拟相结合的方法,分析了毛细管换热器入口温度、流速和围岩类型等因素对毛细管换热性能的影响。TONG 等^[12]分析了影响地铁源热泵系统的关键设计参数,给出了系统冷热负荷比和毛细管换热器管内流速设计参考值。MAO 等^[13]建立了复合式地铁源热泵系统仿真模型,分析了不同运行策略下系统运行性能。TONG 等^[14]对地铁源热泵系统的实际运行参数及性能进行了分析,结果显示,该系统运行高效,具有良好的节能性。

渗流对隧道衬砌内换热器性能影响显著,但是目前缺少对隧道衬砌内 CHE(毛细管换热器)在渗流作用下传热特性的研究。本文基于某实际工程,建立了隧道衬砌内 CHE 传热性能仿真模型,分析了稳态工况下,渗流对其传热特性及围岩温度场的影响,以为实际工程设计提供参考。

1 模型建立

基于隧道衬砌 CHE 物理模型建立相应数值仿真模型。该地铁隧道成型后截面为马蹄形,为便于建模,将其简化为圆形。地下水渗流作用下的 CHE 物理模型由内向外依次为:隧道空气、二衬、挡水板、CHE、初衬、围岩与渗流地下水,CHE 沿环向敷设在衬砌内部,位于隧道的正上方。为简化计算量,以 CHE 相邻管束之间绝热面为边界,建立了相应仿真模型,如图 1 所示。

为简化模型,假设如下:

- 1) 衬砌、CHE 管壁、围岩均为常物性且各向同性体;
- 2) 忽略衬砌、围岩等结构之间接触热阻;
- 3) CHE 沿隧道环向平行均匀布置;
- 4) 隧道初始时刻,模型各处初始温度相同,且初始温度为当地土壤年平均温度;
- 5) 渗流沿水平方向,入口速度及温度恒定,且饱和;

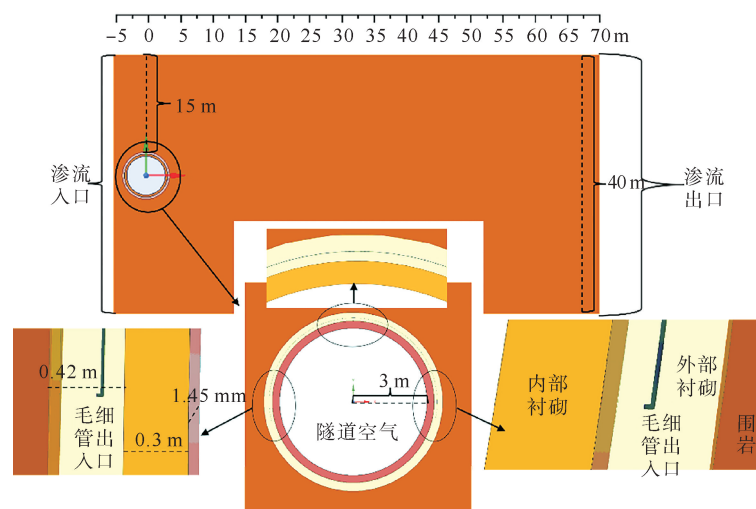


图1 渗流作用下 CHE 物理模型

6) 系统运行时,CHE 内流体及隧道空气流速恒定;不运行时,二者为 0。

1.1 模型参数及网格划分

根据实际工程及现有 CHE 制造工艺,设 CHE 管束长 12 m,直径 4.3 mm。设隧道左侧围岩厚(渗流上游)5 m,右侧围岩厚(渗流下游)70 m,隧道顶部距离地面 15 m。模型前后距离为 14.3 mm(单根 CHE 管束前后厚度各取 5 mm,总计厚度为 4.3+5+5=14.3 mm)。衬砌最内层距隧道中心 3 m,CHE 最内侧距隧道中心 3.425 m,防水板距离隧道中心 3.3 m。模型以防水板为界分为内外两部分,外部为渗流流动区域,内部由于防水板的存在,无渗流。

由于模型的几何尺寸很大,为加快运算速度,选用 ANSYS 中 ICEM 绘制了结构化网格。网格划分如图 2 所示。网格划分总体质量大于 0.8,质量合格,满足后续模拟计算需要。

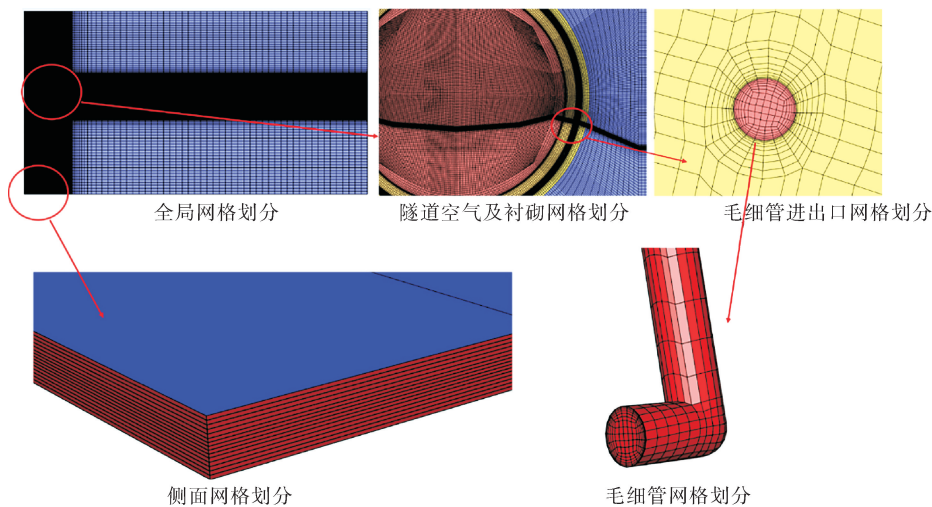


图 2 计算区域网格划分

1.2 材料物性

地铁隧道各部分材料物性见表 1。

根据前期项目地勘报告,青岛市黄岛区施工隧道附近地下水渗流大约在 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 左右,因此,本研究将模型的入口渗流速度设为 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。由于地铁建设位置以沉积岩为主,沉积岩孔隙率大约在 30%~40%^[15],本研究设为 35%;实际示范工程部位沉积岩以壤质沙土为主,故模型粒径设为 0.05 mm^[16]。隧道衬砌的主要成分为混凝土,孔隙率约为 3%^[17]。

表 1 隧道各部分材料物性参数

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	黏度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
混凝土衬砌	2 400.000	1.740 0	840.00	—
围岩	2 680.000	2.000 0	787.10	—
毛细管管壁	900.000	0.240 0	2 000.00	—
水	998.200	0.600 0	4 182.00	1.003×10^{-3}
空气	1.225	0.024 2	1 006.43	$1.789 4 \times 10^{-5}$

1.3 数值仿真设置

该模型涉及四部分传热,分别为:隧道空气与壁面之间的对流换热,CHE 壁面与水之间的对流换热,

CHE 壁面和衬砌、围岩之间的导热,渗流与衬砌围岩之间的对流换热。上述传热过程涉及固-液-气耦合传热,因此,模拟中 Model 开启 Energy 和 Viscous 项,Methods 中采用 Coupled 耦合求解,求解精度为 1×10^{-6} 。由于隧道内空气流动为湍流,本研究采用 RNG $k-\epsilon$ 模型。

1.3.1 边界条件

本研究旨在分析典型工况下的渗流影响,因此需要设定有代表性的模型边界条件。

模型上表面温度设为该地区的供冷季与供暖季室外空气温度均值,数据来源于 DeST 软件中气象参数库。青岛地区供暖季为 141 d,供冷季为 92 d^[18],经计算,供冷季与供暖季室外空气平均温度分别为 25 和 2.8 °C。

由于渗流和围岩多孔介质接触面积大,换热效率高,因此,假定模型入口处渗流温度与围岩初始温度一致。本研究将其设为该地的年平均温度,为 14.6 °C^[18]。

隧道空气流速设为列车运行时的平均流速 4.61 m/s^[19-20],隧道空气温度采用供冷季与供暖季的隧道空气温度实测均值,分别为 28 和 12 °C。

根据实际工程系统源侧设计流量,计算得 CHE 入口流速为 0.1 m/s^[10]。

1.3.2 网格独立性检验

为确定模型最佳网格数,将网格加密两次,第一次由 1 332 414 个加密到 1 930 455 个,第二次由 1 930 455 个增加为 2 347 828 个,并在相同的工况下进行了模拟,结果对比如图 3 所示。图 3 为隧道中心水平线方向渗流下游的围岩温度模拟结果。由图 3 可知,第一次网格加密后与加密前最大温差为 2.65 °C,平均温差为 1.75 °C;第二次网格加密后与第一次加密后的温差最大为 0.11 °C,平均为 0.084 °C,第二此加密后结果差距较小,故选用第一次加密后的网格以加快模拟速度。

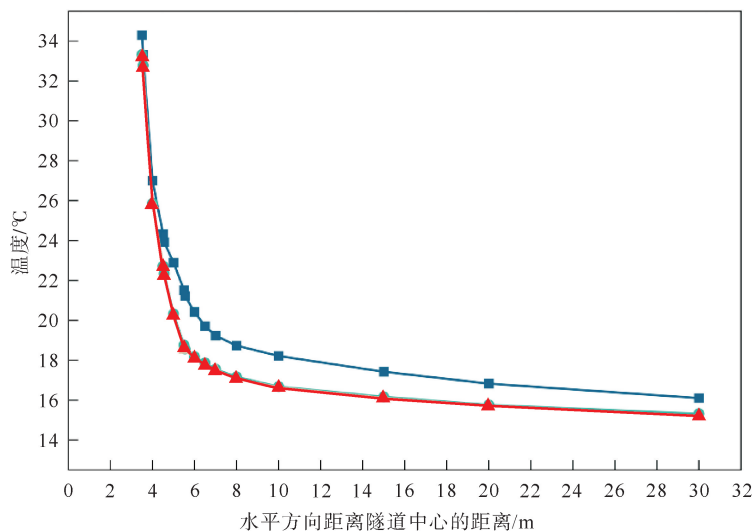


图3 网格加密前后对比

—■— 加密前; —●— 第一次加密; —▲— 第二次加密

2 模型验证

为验证模型准确性,对寒冷地区某实际示范工程的实测数据与模拟结果进行了对比分析。

2.1 测试概况

某实际示范工程项目对毛细管进出口温度及管内流速等数据进行了长期监测,测点布置如图 4 所示。

此外,实际工程对隧道内空气温度及流速也进行了长期监测。数据记录设备及参数见表 2。

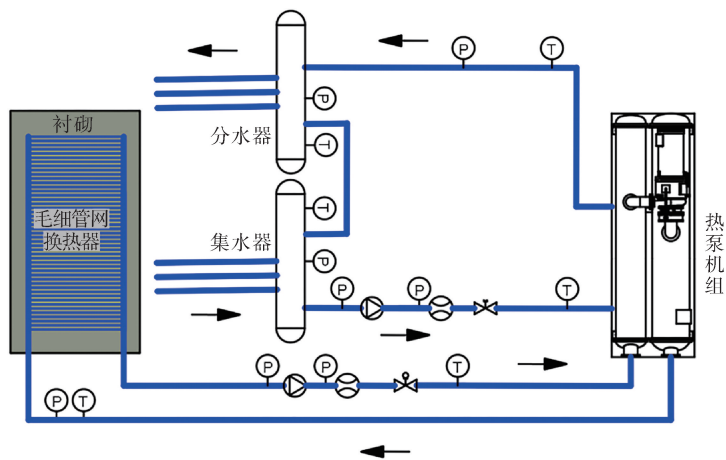


图4 地铁源热泵系统测点布置

⊗ 电磁阀; ⊕ 压力表; ⊕ 温度计; ⊕ 流量计; ⊕ 水泵

2.2 实测及模拟结果对比

取供冷季典型日实测数据进行对比。验证模型边界条件采用实测值,包括 CHE 入口温度与速度、隧道空气温度与速度、围岩初始温度,其他参数设置同前。CHE 出口温度实测值与模拟结果对比如图 5 所示。

由图 5 可知,毛细管换热器的出口温度模拟值要低于实测值,二者最大相对误差为 11.0%,平均相对误差为 8.9%。在实际工程中,有大量因素可影响 CHE 的性能,例如渗流速度与方向、隧道各部分材料的物性、不同材料之间的接触热阻等。为简化数值模型,本研究进行了大量的假设,导致模拟结果与实测结果产生误差,其中,主要因素为忽略了接触热阻。模拟中接触热阻的忽略将使得 CHE 的传热热阻减小,从而增大 CHE 的传热量,导致在同样的入口温度下,CHE 出口温度模拟结果相对实测值减小。

尽管本研究所建立的模型存在一定误差,但误差均小于 12%,表明模型具有较高的预测精度和可靠性,可基本满足实际工程应用需求。

3 毛细管换热器性能分析

3.1 模拟工况

本研究分析了典型工况下,渗流对 CHE 传热特性的影响,同时设置了无渗流工况进行对比,模拟工况见表 3。

表 2 主要测量设备参数

设备名称	型号	测量范围	精度
温度记录仪	Testo 175-H1	-20~50 °C	±0.4 °C
电磁流量计	RZ-LD	0.04~0.25 m ³ /h	0.5% R
温度传感器	PT100	-20~100 °C	±0.5 °C
壁面温度记录仪	TR-52i	-60~80 °C	±0.3 °C
热线式风速仪	MODEL6006	0.01~20.00 m/s	±5% m/s

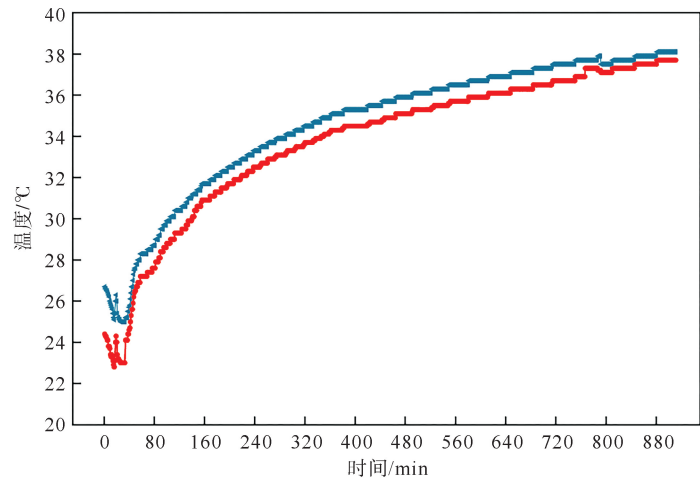


图 5 CHE出口温度实测与模拟结果对比

← 实测值; → 模拟值

表 3 模拟工况

工况	渗流	CHE 流动方向	隧道空气温度	CHE 入口温度	地面温度
工况 1	无	右进左出	28/12	35/8	25/2.8
工况 2	有	右进左出	28/12	35/8	25/2.8
工况 3	有	左进右出	28/12	35/8	25/2.8

注:A/B 分别为供冷季与供暖季参数设置

3.2 供冷季典型工况下模拟结果

供冷季不同工况下的模拟结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,无渗流时(工况 1),CHE 的影响范围较小,最远约 10 m,在 CHE 周围存在明显的热堆积现象;围岩温度场分布不对称,其原因为模型中 CHE 进出口有一段沿隧道轴向设置的管道散热造成的。有渗流时(工况 2、3),毛细管换热器及围岩的温度场分布规律明显不同,渗流下游围岩区域形成明显的“拖尾”,该“拖尾”主要由三部分组成,分别为毛细管周围的“热堆积区”,渗流下游“过渡区”,以及围岩深处的“扩散区”。在工况 2 中,隧道左侧不存在明显的热堆积现象,但右侧存在热堆积区且影响范围在水平方向更大。此外,大量热量被渗流带入下游狭长区域,其中过渡区域范围约为 7~32 m,扩散区域范围约为 32~70 m。在工况 3 中,隧道四周存在轻微的热堆积

现象,同样热量随渗流被带入下游狭长地带,其中过渡区域范围约为6~23 m,扩散区域范围约为23~70 m。

对比各工况可知,与无渗流工况相比,有渗流时热堆积区明显减小,但热影响范围在水平方向上显著增大;当渗流与CHE管内流体逆流时(工况2),依然会存在热堆积区,当二者顺流时(工况3),无明显热堆积区域。

供冷季不同工况下,CHE单位长度换热量、出口温度、总换热量及换热效率统计结果见表4。

由表4可知,在供冷季,与无渗流工况相比,有渗流工况下CHE单位长度换热量、总换热量、换热效率均显著增大,出口温度有所降低。其中,相对于工况1,工况2、工况3中单位长度换热量增长率分别为220%、105%,总换热量增长率分别为218%、103%,换热效率增长率分别为221%、104%,出口温度降低率分别为-7%、-3%。上述结果充分表明,渗流可以显著地增强供冷季CHE的换热效果,提升能源隧道的传热性能,且渗流与CHE内流体逆流时,效果更显著。

在供冷季,当CHE出口与热泵机组冷凝器相连时,其出口水温对热泵机组性能具有重要影响。表4显示,有渗流时,CHE出口温度有所降低,热泵机组冷凝温度相应地随之降低,进而,机组性能有所提升。

3.3 供暖季典型工况下模拟结果

供暖季不同工况下的模拟结果如图7所示。图7中供暖季温度场分布规律与图6相似。由图7可知,无渗流时(工况1),CHE的影响范围较小,最远约11 m,在CHE周围存在明显的冷堆积现象;围岩温度场分布不对称,其原

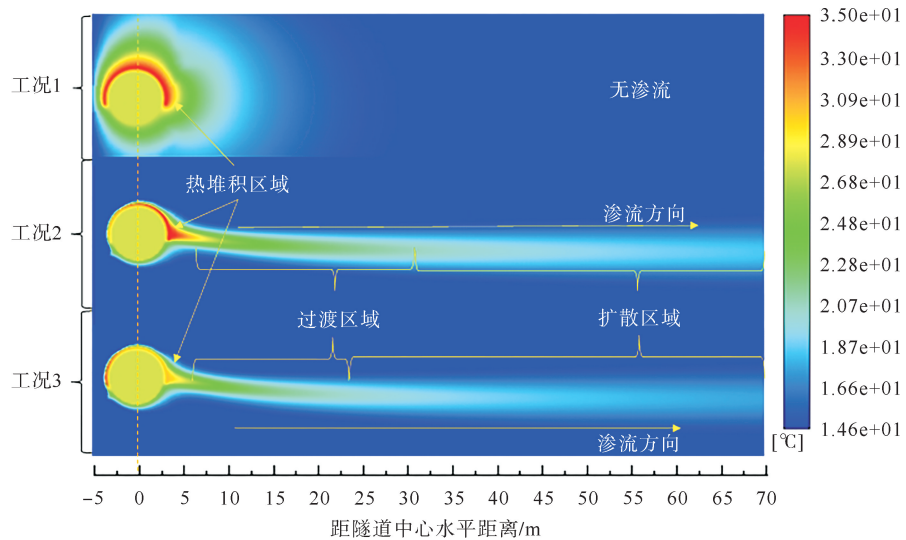


图6 供冷季不同工况下模拟结果

表4 供冷季CHE传热特性统计结果

工况	单位长度换热量/ ($W \cdot m^{-1}$)	CHE出口 温度/ $^{\circ}C$	总换热量/ W	换热效率/ %
工况1	0.41	33.94	4.95	5.2
工况2	1.31	31.62	15.73	16.7
工况3	0.84	32.84	10.05	10.6

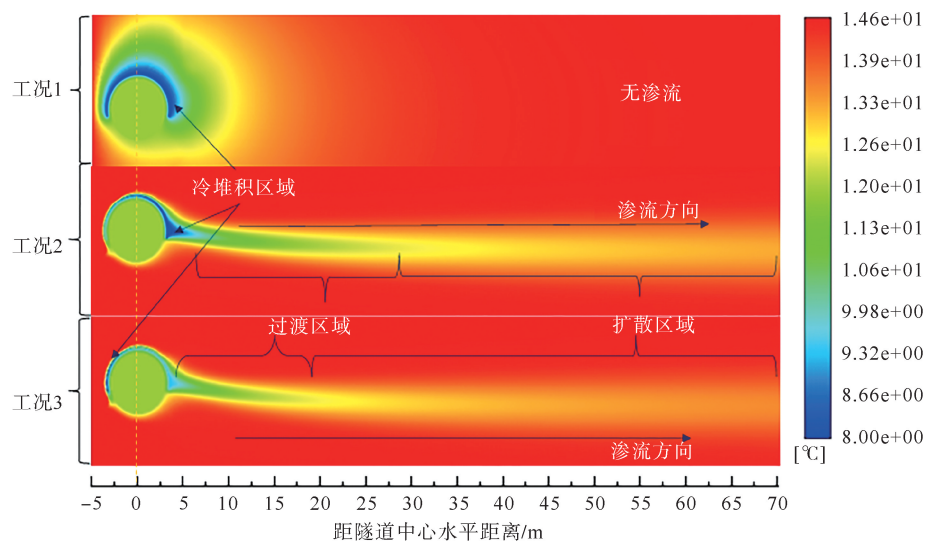


图7 供暖季不同工况下模拟结果

因,围岩温度场分布不对称,其原

因与制冷季同理,即 CHE 进出口有一段沿隧道轴向设置的管道吸热造成的。有渗流时(工况 2、3),渗流下游围岩区域同样形成“冷堆积区”“过渡区”与“扩散区”。在工况 2 中,隧道左侧不存在明显的冷堆积现象,但右侧存在冷堆积区且影响范围在水平方向较工况 1 更大。此外,大量冷量被渗流带入下游狭长区域,其中过渡区域范围约为 6~28 m,扩散区域范围约为 28~70 m。在工况 3 中,隧道四周存在轻微的冷堆积现象,同样冷量随渗流被带入下游狭长地带,其中过渡区域范围约为 4~19 m,扩散区域范围约为 19~70 m。

对比各工况可知,与无渗流工况相比,有渗流时冷堆积区明显减小,但冷影响范围在水平方向上显著增大;当渗流与 CHE 管内流体逆流时(工况 2),依然会存在冷堆积区;当二者顺流时(工况 3),无明显冷堆积区域。

供暖季不同工况下,CHE 单位长度换热量、出口温度、总换热量及换热效率统计结果见表 5。

由表 5 可知,在供暖季,与无渗流工况相比,有渗流工况下 CHE 单位长度换热量、总换热量、换热效率均显著增大,出口温度略有上升。其中,相对于工况 1,工况 2、工况 3 中单位长度换热量增长率分别为 155%、69%,总换热量增长率分别为 153%、66%,换热效率增长率分别为 157%、65%,出口温度提高率分别为 13%、6%。上述结果充分表明,渗流可以显著地增强供暖季 CHE 的换热效果,提升能源隧道的传热性能,且渗流与 CHE 内流体逆流时,效果更显著。

在供暖季,当 CHE 出口与热泵机组蒸发器相连时,其出口水温对热泵机组性能同样具有重要影响。表 5 显示,有渗流时,CHE 出口温度有所升高,热泵机组蒸发温度相应地随之升高,进而,机组性能有所提升。

此外,与供冷季结果对比可知,供暖季 CHE 单位长度换热量、总换热量较小,换热效率较高。

4 结论

1) 与无渗流工况相比,渗流可明显改善 CHE 四周的冷热堆积问题,且与 CHE 内流体逆流时,改善效果更好,但会显著增加 CHE 沿围岩水平方向的热影响范围,最远可达 70 m。

2) 渗流可显著提高 CHE 单位长度换热量、总换热量、换热效率,且与 CHE 内流体逆流时,提高率更高,在供冷季相应提高率分别为 220%、218%、221%,在供暖季相应提高率分别为 155%、153%、157%。

3) 渗流可降低 CHE 在供冷季的出口温度,提高 CHE 在供暖季的出口温度,从而提高与之相连的地铁源热泵的性能。

本研究可为地铁源热泵毛细管前端换热器的设计与应用提供理论支撑;同时,未考虑围岩的各向异性、不同岩土体的渗透特性和渗流方向的影响,相关研究有待开展。

参考文献(References):

- [1] BARLA M, PERINO A. Energy from geo-structures: A topic of growing interest[J]. *Environmental Geotechnics*, 2015, 2(1):3-7.
- [2] BARLA M, DONNA A D, INSANA A. Energy tunnel experimental site in turin metro[C]// 15th IACMAG. ACM, 2017.
- [3] BARLA M, DI DONNA A, PERINO A. Application of energy tunnels to an urban environment[J]. *Geothermics*, 2016, 61:104-113.
- [4] DI DONNA A, BARLA M. The role of ground conditions on energy tunnels' heat exchange[J]. *Environmental Geotechnics*, 2016, 3(4): 214-224.
- [5] BIDARMAGHZ A, NARSILIO G A. Heat exchange mechanisms in energy tunnel systems[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2018, 16: 83-95.
- [6] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. *Géotechnique*, 2006, 56(2):81-122.
- [7] LIU X, LI C, ZHANG G, et al. Numerical investigation on energy efficiency of heat pump with tunnel lining ground heat exchangers under building cooling[J]. *Buildings*, 2021, 11(12): 611. DOI: 10.3390/buildings11120611.
- [8] 夏才初,孙猛,张国柱. 能源地下结构的理论及应用[M]. 上海:同济大学出版社,2015.

- XIA Caichu, SUN Meng, ZHANG Guozhu. Theory and application of energy underground structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.
- [9] 胡松涛,施志钢,高号.毛细管壁面换热器用于地铁隧道的可行性分析[J].暖通空调,2015,45(7):14-17.
HU Songtao,SHI Zhigang,GAO Hao. Capillary wall heat exchangers are used for feasibility analysis of metro tunnels[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015,45(7):14-17.
- [10] 高号.地铁隧道毛细管换热器传热特性研究[D].青岛:青岛理工大学,2015.
GAO Hao. Study on heat transfer characteristics of capillary heat exchanger in subway tunnel[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2015.
- [11] JI Y, WU W, QI H, et al. Heat transfer performance analysis of front-end capillary heat exchanger of a subway source heat pump system[J]. Energy, 2022, 246: 123424.
- [12] TONG L, LIU N, HU S, et al. Study on key design parameters of subway source heat pump system with capillary exchanger[J]. Renewable Energy, 2021, 164: 183-193.
- [13] MAO Z, HU S, GUAN Y, et al. Performance analysis of a hybrid subway source heat pump system using capillary heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 197: 117367.
- [14] TONG Z, GUAN Y, CAO T, et al. Onsite measurement and performance analysis of capillary heat pump system used in subway tunnels[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 204: 118008.
- [15] 刘惠芳,于吉顺.电子显微镜图像法测定岩石的孔隙度[J].电子显微学报,2006(S1):373-374.
LIU Hui Fang, YU Jishun. Electron microscopy image method to determine the porosity of rocks[J]. Journal of Electron Microscopy, 2006(S1):373-374.
- [16] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993(20):1896-1899.
YANG Peiling, LUO Yuanpei, SHI Yuanchun. Soil fractal characteristics characterized by weight distribution of particle size[J]. Bulletin of Science, 1993(20):1896-1899.
- [17] 李淑进,赵铁军,吴科如.混凝土渗透性与微观结构关系的研究[J].混凝土与水泥制品,2004(2):6-8. DOI:10.19761/j.1000-4637.2004.02.002.
LI Shujin, ZHAO Tiejun, WU Keru. Study on the relationship between permeability and microstructure of concrete[J]. Concrete and Cement Products, 2004(2):6-8. DOI:10.19761/j.1000-4637.2004.02.002.
- [18] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告[M].北京:中国建筑工业出版社,2020.
Tsinghua University, Building Energy Conservation Research Center. China building energy efficiency annual development research report[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2020.
- [19] 齐江浩,赵蕾,王君,等.地铁隧道活塞风实测及特征分析[J].铁道科学与工程学报,2016,13(4):740-747.
QI Jianghao, ZHAO Lei, WANG Jun, et al. Measurement and characteristic analysis of piston wind in subway tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016,13(4):740-747.
- [20] 张悦,张强,毕海权,等.地铁活塞风道风速及变化规律试验研究[J].制冷与空调(四川),2020,34(4):463-467.
ZHANG Yue, ZHANG Qiang, BI Haiquan, et al. Experimental study on wind speed and its variation in metro piston duct[J]. Refrigeration and Air Conditioning (Sichuan), 2020,34(4):463-467.

(责任编辑 姜锡方;英文校审 程文华)

(上接第83页)

- [21] 温瑞智,冀昆,任叶飞.工程地震动输入:从传统抗震设防到韧性提升[M].北京:地震出版社,2021.
WEN Ruizhi,JI Kun,REN Yefei. Engineering ground motion input:From traditional seismic fortification to resilience enhancement[M]. Beijing:Earthquake Press,2021.
- [22] BAKER J W. Conditional mean spectrum: Tool for ground-motion selection[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(3): 322-331.
- [23] 霍俊荣.近场强地面运动衰减规律的研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,1989.
HUO Junrong. Study on attenuation law of near-field strong ground motion[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1989.
- [24] 冀昆,温瑞智,任叶飞.中国地震安全性评价中天然强震记录选取[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(12):183-188.
JI Kun, WEN Ruizhi, REN Yefei. Selection of natural strong earthquake records in seismic safety evaluation of China[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 183-188.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)