

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-11
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260511002

渗流工况下地铁能源隧道传热特性分析

王菲¹ 杨成康¹ 叶然¹ 王一硕¹ 郑进福^{1,2} 胡松涛^{1,2} 季永明^{1,2}

(1 青岛理工大学环境与市政工程学院 青岛 266520; 2 山东省健康环境与低碳能源工程研究中心 青岛 266520)

摘要 长期服役的地铁隧道面临热环境持续恶化的问题,严重影响其安全高效运行。能源隧道技术是解决上述难题的有效技术之一。现有研究仍未全面揭示基于毛细管换热器(CHE)的盾构能源隧道在渗流工况下的传热特性,制约了该技术的工程应用。本文基于示范项目,建立了基于CHE的地铁盾构能源隧道三维热-渗耦合数值模型,分析了渗流工况下换热器运行参数对能源隧道换热性能的影响规律。结果表明:渗流可显著提升盾构能源隧道的传热性能,当渗流速度由0 m/s提升至 2.3×10^{-5} m/s时,供暖季与供冷季的换热量分别提高106.77%和276.00%;靠近渗流入口侧的CHE环路换热能力略高于远离入口侧。此外,CHE入口流速与温度对换热性能影响显著,当入口流速由0.06 m/s增至0.12 m/s时,供冷季与供暖季的换热量分别提升89.53%和72.66%;当入口温度在供冷季升高6℃、供暖季降低6℃时,换热量分别提高58.80%和177.01%。提高CHE入口流速及增大传热温差会导致管片温度分布均匀性下降。本研究可为盾构能源隧道的设计与应用提供理论支撑。

关键词 能源隧道;渗流;毛细管换热器;传热性能;地铁

中图分类号: TB657.5; TU831.6; TU833⁺.1

文献标识码: A

Analysis of Heat Transfer Characteristics in Subway Energy Tunnels under Seepage Flow Conditions

Wang Fei¹ Yang Chengkang¹ Ye Ran¹ Wang Yishuo¹ Zheng Jinfu^{1,2}
Hu Songtao^{1,2} Ji Yongming^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. Shandong Engineering Research Center of Healthy Environment and Low-Carbon Energy, Qingdao 266520, China)

Abstract Continuous deteriorations of thermal environments in subway tunnels induces long-term service problems, which significantly affect their safe and efficient operations. Energy tunnel technology is an effective solution for these problems. However, the existing research has not fully revealed the heat-transfer characteristics of shield-energy tunnels with capillary heat exchangers (CHE) under seepage conditions, thereby restricting the engineering application of this technology. Based on a demonstration project, this study established a three-dimensional thermal-seepage coupling numerical model of shield-subway-energy tunnels with CHE, and analyzed the influences of heat-exchanger operational parameters on the heat transfer performances of energy tunnels under seepage conditions. The results showed that seepage could significantly improve the heat-transfer performance of shield-energy tunnels. When the seepage velocity increased from 0 to 2.3×10^{-5} m/s, the heat transfer during the heating and cooling seasons increased by 106.77% and 276.00%, respectively. The heat transfer capacity of the CHE loop near the seepage inlet was slightly higher than that farther from the inlet. In addition, the inlet flow velocity and temperature of the CHE significantly affected the heat transfer performance. When the inlet flow velocity increased from 0.06 m/s to 0.12 m/s, the heat transfer capacities during the cooling and heating seasons increased by 89.53% and 72.66%, respectively. When the inlet temperature increases by 6℃ during the cooling season and decreased by 6℃ during the heating season, the heat transfer capacities increased by 58.80% and 177.01%, respectively. However, increasing the inlet flow velocity of the CHE and the heat-transfer temperature difference led to a decrease in the uniformity of the temperature distribution of the segments. This study provides a theoretical support for the design and application of shield-energy tunnels.

收稿日期:2026-05-11;修回日期:2026-05-26;录用日期:2026-07-29 责任编辑:田甜

基金项目:国家自然科学基金(52478092)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52478092).)



移动阅读

Keywords energy tunnels; seepage; capillary heat exchanger; thermal performance; subway

地铁具有运量大、排放低和运行效率高等优点,是缓解城市地面交通压力的重要基础设施^[1]。然而,地铁隧道属于典型的半封闭地下空间,长期运营过程中产生的大量废热难以及时排除,导致隧道热环境持续恶化^[2]。地铁隧道温度升高不仅会增加环控系统能耗,还可能对隧道衬砌结构安全及地铁运营稳定性产生不利影响^[3-5]。

传统的地铁隧道降温方法主要包括机械通风、冷却塔与冷水机组联合运行等,但这些方法普遍存在能耗高、效率低等问题。基于热泵的能源隧道技术能够借助在隧道衬砌内部敷设的换热器,吸收存储于隧道空气以及围岩中的废热,进而应用热泵技术达成利用废热为地上建筑供暖的目标。该技术可在解决隧道热环境恶化的同时,实现废热资源化利用,吸引了大量学者的关注。H. Brandl^[6]于2006年在奥地利兰策隧道开展了现场实验,实测了基于传统地埋管换热器的能源隧道的换热能力。此后,大量学者对能源隧道换热性能的影响因素展开了研究。Jiang Jize等^[7]通过模型实验,研究了寒冷地区能源隧道入口段的热交换特性,结果表明,随着入口温度升高和流量增加,热传递效率也随之提升。Cen Duofeng等^[8]分析并验证了利用能源隧道跨季节蓄冷改善隧道热环境的可行性。此外,部分学者针对地下水渗流对能源隧道换热性能的影响展开了研究。A. Bidarmaghz等^[9]发现地下水渗流显著影响隧道空气、地面和隧道前端换热器的温度场分布。Liu Jinquan等^[10]研究了土壤物性、地下水渗流和隧道内环境等因素对能源隧道换热性能的影响。A. Schaufelberger等^[11]研究了隧道空气和地下水渗流对能源隧道储热性能的影响,结果表明,相较于空气对流,地下水渗流的影响更为显著。

受土壤源热泵技术启发,现有能源隧道研究多采用传统地埋管换热器。然而,传统地埋管换热器存在管径大、不易弯折、综合传热效率低、换热不均匀等问题,导致其难以在隧道衬砌中快速敷设,尤其是难以与盾构隧道衬砌管片结合^[12]。针对该问题,青岛理工大学团队提出了将毛细管换热器(capillary heat exchanger, CHE)敷设于地铁盾构隧道衬砌管片中的技术方案^[13]。随后,相关学者围绕基于CHE的盾构隧道传热性能开展了系列研究。Ji Yongming等^[14]以寒冷地区某示范工程中地源热泵系统毛细管前端换热器为研究对象,建立了一维圆形复合介质中的CHE流体-热耦合传热模型。Sun Ying等^[15]研

究了能源隧道中毛细管铺设形状对换热性能的影响,结果表明,I形CHE在传热效率方面表现突出,而W形CHE则能确保更优异的温度均匀性。

与传统地埋管换热器相比,毛细管换热器具有管径小、综合传热效率高、换热更均匀的特点,更适合在盾构管片内集成敷设,并且理论上可显著提升能源隧道的换热性能。然而,现有研究多关注基于传统地埋管换热器的能源隧道,而对基于CHE的能源隧道的研究较少。此外,地铁隧道建设过程中经常遇到地下水渗流,且现有研究显示,地下水渗流对能源隧道的传热性能影响显著。因此,有必要针对渗流工况下基于CHE的盾构能源隧道热-渗耦合特性开展研究。

本研究旨在揭示渗流工况下地铁盾构能源隧道的传热特性。首先,基于示范工程技术方案,建立了基于CHE的地铁盾构能源隧道三维稳态数值仿真模型;其次,分析了有无渗流、CHE入口温度及流速对能源隧道传热特性的影响规律;最后,将本研究结果与同类研究进行了对比分析。本研究可为后续实际应用提供理论支撑。

1 模型建立

1.1 数值模型

示范项目中,每环盾构隧道由6个能源管片组成,包括封顶块、邻接块和标准块;隧道顶部埋深约为15 m,隧道内径为5.5 m,盾构管片厚度为0.35 m,环宽为1.5 m。CHE仅在邻接块和标准块内敷设,如图1所示。为降低毛细管换热器对隧道整体结构的影响并提高施工效率,将CHE安装在盾构管片的外弧保护层内。每环盾构隧道包含左右2个独立回路,同侧的能源管片先串联,再与隧道内供回水干管连接。盾构管片内的CHE由集管和双U型毛细支管组成。其中,CHE支管直径为4.3 mm,壁厚为0.85 mm;供回水干管型号为De16,材质为PP-R,壁厚为2 mm。CHE的具体敷设方案如图1所示。

为建立数值模型,本研究将地铁能源隧道简化为圆形复合介质,主要包括围岩、预制能源管片和隧道空气等部分。基于COMSOL仿真平台,建立了三维仿真模型,如图1所示。本研究主要关注CHE运行过程中盾构管片的传热性能,因此忽略了隧道内辅助及照明设备的影响。同时,假设模型各组成部分紧密贴合,忽略了不同材料层之间的接触热阻,以及盾构隧道壁后注浆层对围岩热物性和渗透率的影响。

响。为进一步简化模型,本研究基于对称性原则,以两环盾构隧道的交界面为对称面,选取一环盾构隧道作为研究对象。经过试模拟并参考 Wang Yongyan

等^[16]的研究结果,本研究将几何模型尺寸设定为 150 m×75 m×1.5 m(长×宽×高)。

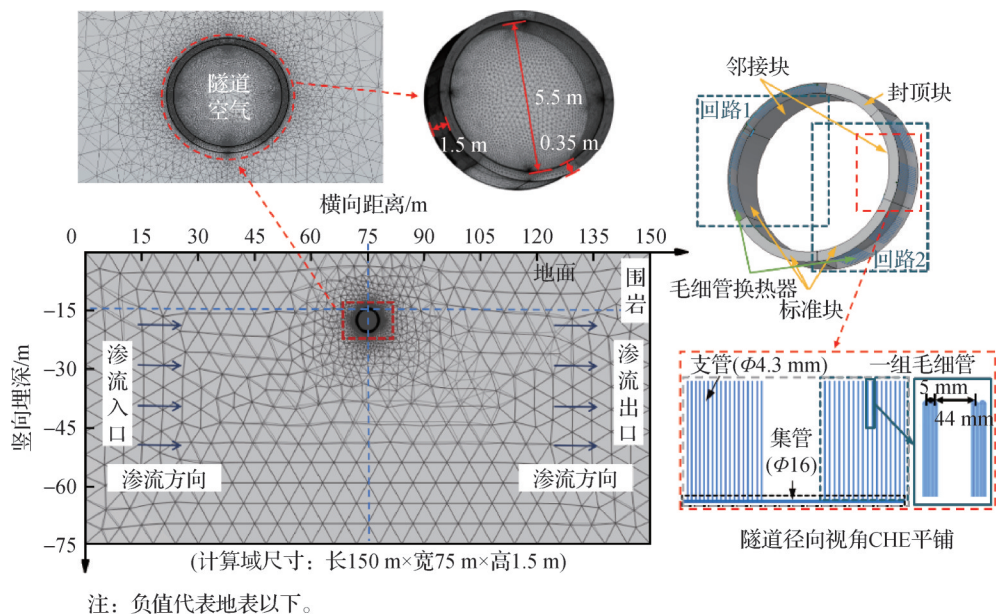


图1 基于CHE的盾构能源隧道数值模型

Fig.1 Numerical model of shield energy tunnel based on CHE

模型采用疏密结合的网格划分方式,由于隧道内部为紊流,因此对隧道空气部分和空气域内边界进行单独加密,最小网格大小为0.054 8 m;由于换热器尺寸远远小于隧道结构,因此对换热器及安装换热器的衬砌管片进行了加密,最小网格大小为0.003 m。

模型各部分的热物性参数参照示范项目设置,如表1所示。

表1 模型热物性参数

Tab.1 Thermal and physical parameters of the model

材料 参数	密度/ (kg/m ³)	比热容/ [J/(kg·°C)]	导热系数/ [W/(m·°C)]	黏度/ [kg/(m·s)]
隧道空气	1.225	1 006.43	0.024 2	1.850×10 ⁻⁵
水	998.2	4 182	0.24	1.003×10 ⁻³
CHE	900	2 000	0.24	—
围岩	2 800	920	3.49	—
管片	2 700	935	5.65	—

1.2 初始及边界条件

数值模型的初始及边界条件主要包括地面温度、恒温层温度、换热器出口压力、隧道空气出口压力、隧道空气进口温度、隧道空气流速、隧道内热源产热量(列车、照明等)、CHE入口流速及温度、地下水渗流方向和速度,具体设置如表2所示。

其中,将距隧道上方15 m、隧道下方60 m及左右两侧75 m处设定为恒温边界;由于假定每环盾构隧道的换热工况相同,因此将距隧道前后方0.75 m处设定为绝热边界;模型中换热器出口及隧道空气出口设置为压力出口。基于刘强军等^[17]关于地面温度与室外平均温度的相关系数高达0.95的实证结论,本研究引用申寿恒^[18]对该地区室外空气温度的实测数据,将供暖季与供冷季的室外平均温度分别作为供暖季与供冷季的地面温度,分别为25 °C与2.8 °C。恒温层温度基于示范项目实测结果设置,为14.6 °C。基于姜波^[19]关于隧道空气温度与室外空气温度具有高度同步性的研究结论,本研究引用吴汶泽^[20]对隧道空气温度的实测数据,将供暖季与供冷季隧道空气的平均温度分别作为2个季节的隧道空气入口温度,分别为28 °C与12 °C。綦浩宇^[21]对齐江浩等^[22]实测的隧道空气流速数据进行积分并求平均值,得到了列车运行时的平均空气流速。本研究直接引用该计算值作为列车正常运行工况下的隧道空气入口流速,为4.61 m/s。在地铁停运阶段,为排除区间隧道内的余热及CO₂等污染物,隧道顶部轴流风机开启,引入新风排出污染空气,风速约为0.5 m/s^[23]。因此本研究将该值设置为列车停运阶段开启隧道风机时的空气流速。Ji Yongming等^[24]通过构建内热源时空叠加模型,综合考虑列车运行、地铁辅助设备产热以

及人员散热等因素,得到了供暖季与供冷季的隧道内热源产热量。本研究引用相关计算结果作为供暖季与供冷季的隧道内热源产热量,分别为105 W/延米与106 W/延米。地下水渗流方向和速度根据示范项目^[25]的地勘数据设置,方向为水平横切隧道(从左至右),速度为2 m/d(合 2.3×10^{-5} m/s)。

表2 初始及边界条件参数表
Tab.2 Initial and boundary conditions

项目	供冷季	供暖季
地面温度/℃	25	2.8
隧道空气出口压力/Pa	101 325	
恒温层温度/℃	14.6	
换热器出口压力/Pa	101 325	
隧道空气进口温度/℃	28	12
隧道空气流速/(m/s)	4.61(列车运行); 0.50(地铁停运、风机开启)	
隧道空气内热源产热量/(W/延米)	105	106
地下水渗流速度(m/s)	2.3×10^{-5}	

1.3 网格无关性检验

基于典型工况(CHE入口温度为6℃、CHE入口流速为0.08 m/s)下的仿真结果,对模型的网格无关性进行了验证,结果如图2所示。由图2可知,随着网格数的增加,出口温度及换热量均缓慢变化,当网格数由460万增至536万时,出口温度的相对变化率仅为0.097 0%,换热量的相对变化率仅为0.027 1%。综合考虑误差与计算效率,本研究将模型网格数定为460万。

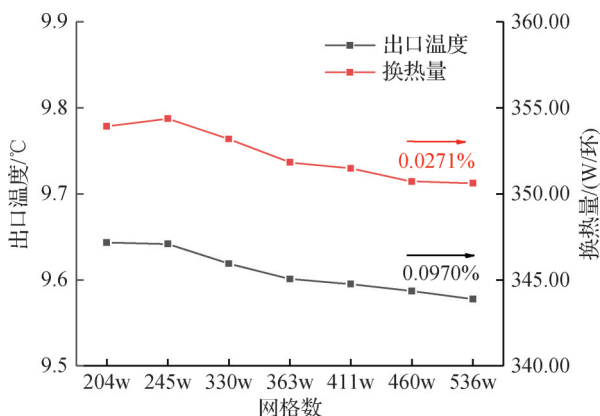


图2 网格无关性验证结果

Fig.2 Grid independence verification results

1.4 工况设置

为分析渗流工况下盾构能源隧道的传热特性,共设置了6个工况,涵盖供暖季与制冷季的典型运行

场景。其中工况1、工况2与工况5、工况6用于对比分析有无渗流的影响,工况3、4用于分析CHE入口温度的影响,工况5、6用于分析CHE入口流速的影响,具体工况设置如表3所示。

表3 模拟工况设置
Tab.3 Simulation condition settings

工况	季节	渗流速度/ (10^{-5} m/s)	CHE入口 温度/℃	CHE入口流速/ (m/s)
1	供暖季	0	6	0.08
2	制冷季	0	35	0.08
3	供暖季	2.3	4、6、8、10	0.08
4	制冷季	2.3	31、33、35、37	0.08
5	供暖季	2.3	6	0.04、0.06、 0.08、0.10
6	制冷季	2.3	35	0.04、0.06、 0.08、0.10

2 模型验证

在前期研究中,团队已基于现场实验数据对仿真模型进行了验证。结果显示,毛细管换热器入口与出口处的模拟温度与实测温度的相对误差均低于10%,表明所建立的数值模型具有较好的可靠性与准确性。本研究的数值模型与前期模型完全一致,仅边界条件的取值及工况设置有所不同。因此,为避免重复,本文不再重复进行模型验证,具体验证过程可参见文献[26]。

3 结果分析与讨论

3.1 评价指标

为系统评价盾构能源隧道的传热特性,选取单位面积换热量、温度集中系数和温度不均匀系数作为评价指标,其中,单位面积换热量可反映系统换热能力,温度集中系数和温度不均匀系数可反映管片温度场分布均匀性,从而间接反映热应力的大小(热应力与温度不均匀性成正比)。

单位面积换热量计算公式:

$$q = Q/A \quad (1)$$

式中: q 为单位面积换热量, W/m^2 ; Q 为每环能源管片换热量, W ; A 为CHE轮廓投影面积, m^2 。

温度集中系数计算式:

$$K_T = T_i/T_{\text{ave}} \quad (2)$$

$$K_{T,\text{max}} = T_{i,\text{max}}/T_{\text{ave}} \quad (3)$$

$$K_{T,\text{min}} = \frac{T_{i,\text{min}}}{T_{\text{ave}}} \quad (4)$$

式中: K_T 为管片的温度集中系数; $K_{T,\max}$ 为管片的最大温度集中系数; $K_{T,\min}$ 为管片的最小温度集中系数; T_i 为某取样点的温度,℃;

$T_{i,\max}$ 为管片的最大温度,℃; $T_{i,\min}$ 为管片的最小温度,℃; T_{ave} 为管片的平均温度,℃。

温度不均匀系数计算式:

$$C_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_i - T_{ave}}{T_{ave}} \right)^2} \quad (5)$$

式中: C_T 为温度不均匀系数; n 为取样点的数量。

3.2 有无渗流对比

有无渗流工况下,盾构能源管片的换热量如图3所示。由图3可知,渗流工况下盾构能源隧道的换热量显著提高。其中,供暖季换热量提升率为106.77%,制冷季提升率为276.00%。原因在于:与无渗流工况相比,地下水流动能够持续更新换热区域周围介质温度,减弱能源隧道长期运行过程中的热量或冷量堆积程度,显著改善围岩内的温度场,从而增加CHE与围岩的换热温差,提高能源隧道的换热能力。上述结果表明,地下水渗流可显著增强能源隧道的换热能力。在实际工程中,可充分利用地下水渗流这一有利条件,优化CHE布置和运行参数,以提高能源隧道的供热供冷能力。

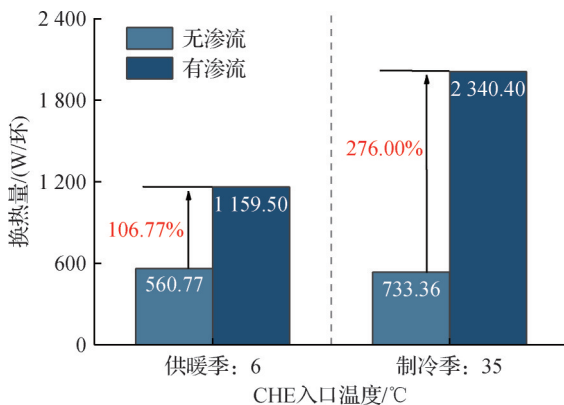


图3 有无渗流工况下能源隧道换热性能对比

Fig.3 Thermal performance comparison of energy tunnel under the seepage and non-seepage conditions

3.3 CHE入口温度的影响

为分析CHE入口温度对系统传热特性的影响,本文对比了不同CHE入口温度下,能源隧道近、远渗流入口侧CHE出口温度及进出口温差、单位面积换热量以及温度分布特性的变化趋势。

3.3.1 供暖季

供暖季CHE入口温度对其出口温度及进出口温差的影响如图4所示。由图4(a)与图4(b)可知,随着CHE入口温度的升高,CHE近渗流入口侧出口温度

和远渗流入口侧出口温度均呈上升趋势,CHE进出口温差均逐渐减小,总体呈现线性变化规律。当CHE入口温度从4℃增至10℃时,CHE近渗流入口侧出口温度从7.60℃增至11.33℃,CHE进出口温差从3.60℃减至1.33℃;CHE远渗流入口侧出口温度从7.13℃增至11.05℃,CHE进出口温差从3.13℃减至1.05℃。

此外,与远渗流入口侧相比,近渗流入口侧CHE具有更高的出口温度及更大的进出口温差。原因在于:近渗流入口侧盾构能源管片受较高温地下水持续作用,提高了近渗流入口侧衬砌温度,使CHE与衬砌之间的换热温差增大,从而使CHE具有更高的出口温度;而远渗流入口侧地下水在流动过程中已经与近渗流入口侧衬砌发生了换热,导致其温度有所降低,使CHE与衬砌之间的换热温差有所减小,从而使远渗流入口侧CHE的出口温度降低。

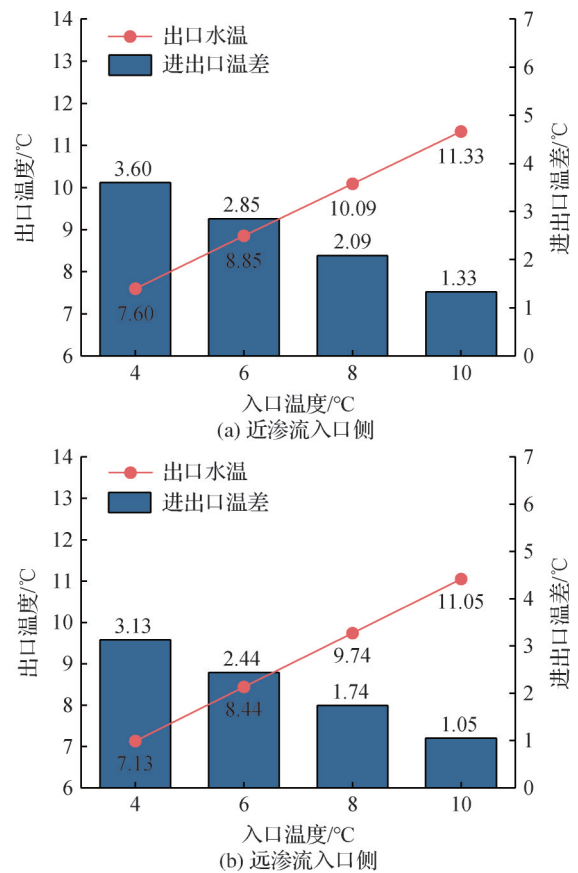


图4 供暖季CHE入口温度对传热特性的影响

Fig.4 Influence of CHE inlet temperature on its heat-transfer characteristics during the heating season

供暖季CHE入口温度对盾构能源隧道换热量、单位面积换热量以及温度分布特性的影响见图5。由图5(a)可知,随着CHE入口温度的升高,盾构能源隧道的换热量呈线性降低。当CHE入口温度从4℃

升至 10 °C 时,盾构能源隧道的换热量从 1 471.50 W/环降至 531.21 W/环,单位面积换热量则从 143.56 W/m²降至 51.83 W/m²。由图 5(b)可知,随着 CHE 入口温度的升高,最大温度集中系数逐渐减小并趋近于 1,最小温度集中系数逐渐增加并趋近于 1;同时,温度不均匀系数也随着 CHE 入口温度的增加而降低。上述结果表明,随着 CHE 入口温度的增加,管片上的温度集中程度降低,温度场趋于均匀。综上可知,供暖季提高 CHE 入口温度有助于改善能源隧道的温度分布均匀性,但同时也降低了其换热能力。

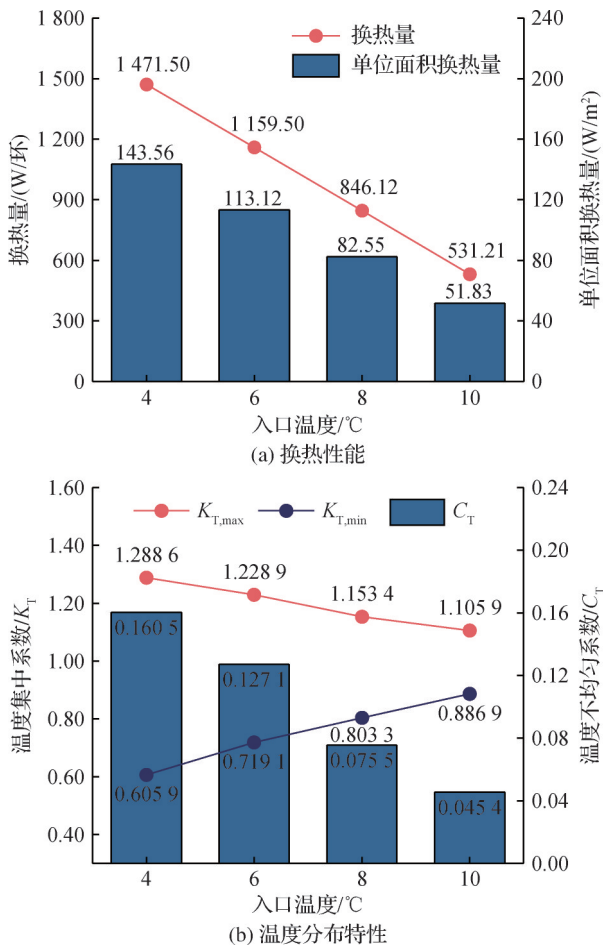


图5 供暖季 CHE 入口温度对能源隧道换热量及温度分布的影响

Fig.5 Influence of CHE inlet temperature on the heat transfer rate and temperature distribution of energy tunnel during the heating season

3.3.2 制冷季

制冷季 CHE 入口温度对其出口温度及换热温差的影响如图 6 所示。由图 6(a)与图 6(b)可知,随着 CHE 入口温度的升高,CHE 近渗流入口侧出口温度和远渗流入口侧出口温度均呈上升趋势,CHE 进

口温差均逐渐增加,总体呈现线性变化规律。当 CHE 入口温度从 31 °C 增至 37 °C 时,CHE 近渗流入口侧出口温度从 26.70 °C 增至 30.29 °C,CHE 进出口温差从 4.30 °C 增至 6.71 °C;CHE 远渗流入口侧出口温度从 27.95 °C 增至 31.73 °C,CHE 进出口温差从 3.05 °C 增至 5.27 °C。此外,近渗流入口侧出口温度略小于远渗流入口侧出口温度的原因与供暖季类似,不再赘述。

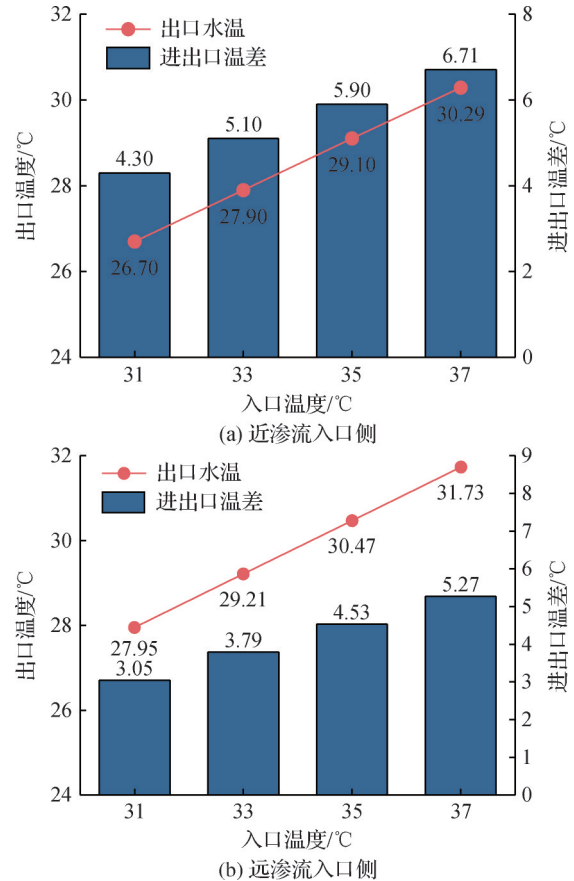


图6 制冷季 CHE 入口温度对传热特性的影响

Fig.6 Influence of CHE inlet temperature on its heat-transfer characteristics during the cooling season

制冷季 CHE 入口温度对盾构能源隧道换热量、单位面积换热量以及温度分布特性的影响如图 7 所示。由图 7(a)可知,随着 CHE 入口温度的升高,盾构能源隧道的换热量呈近似线性上升趋势。当 CHE 入口温度从 31 °C 升至 37 °C 时,盾构能源隧道的换热量从 1 682.00 W/环增至 2 671.10 W/环,单位面积换热量则从 164.10 W/m²增至 260.60 W/m²。由图 7(b)可知,随着 CHE 入口温度的升高,最大温度集中系数逐渐增大并偏离 1,最小温度集中系数逐渐减小并偏离 1。上述结果表明,随着 CHE 入口温度的增加,能源管片的温度分布呈现“更不均匀”的趋势。其中,最大温度集中系数逐渐增大并偏离 1,表明最高温区的

集中程度增强,温度峰值更突出;最小温度集中系数逐渐减小并偏离1,表明最低温区域相对更低,与整体平均水平的偏离进一步加大。此外,温度不均匀系数也随CHE入口温度的增加而增大,表明管片温度场的离散程度逐渐增强。综上可知,制冷季提高CHE入口温度有助于提高管片整体的换热能力,但同时也加剧了管片的温度分布不均匀性。

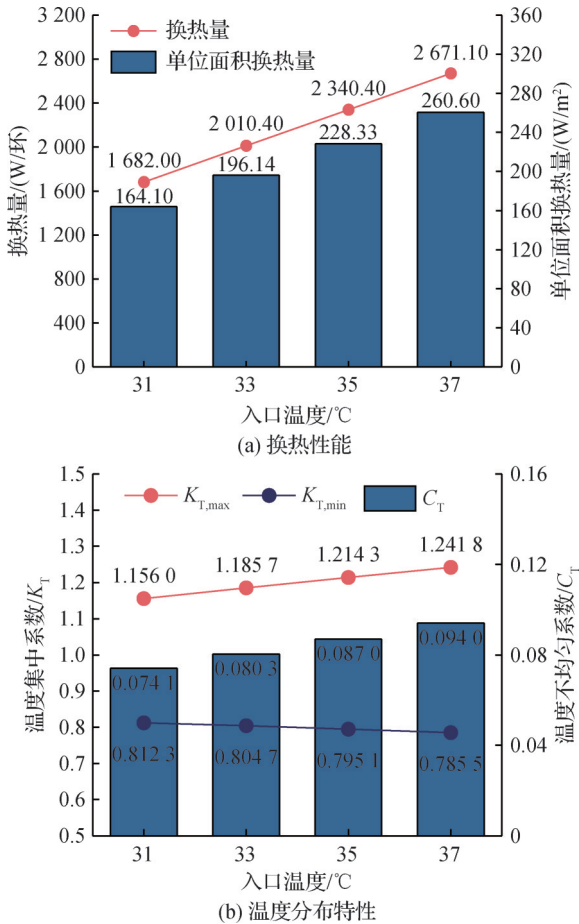


图7 制冷季CHE入口温度对能源隧道换热量及温度分布的影响

Fig.7 Influence of CHE inlet temperature on the heat transfer rate and temperature distribution of energy tunnel during the cooling season

3.4 CHE入口流速的影响

本文分析对比了不同CHE入口流速下,CHE近/远渗流入口侧出口温度及进出口温差、单位面积换热量以及温度分布特性的变化趋势。

3.4.1 供暖季

供暖季CHE入口流速对其出口温度及换热温差的影响如图8所示。由8(a)与图8(b)可知,随着CHE入口流速的提高,CHE近渗流入口侧出口温度和远渗流入口侧出口温度均呈降低趋势,CHE进出口温差均逐渐减小。当CHE管内流体的入口流速从

0.04 m/s增至0.10 m/s时,CHE的近渗流入口侧出口温度从9.78℃降至8.48℃,CHE的远渗流入口侧出口温度从9.35℃降至8.10℃。同时,近渗流入口侧CHE的出口温度及进出口温差略高于远渗流入口侧。

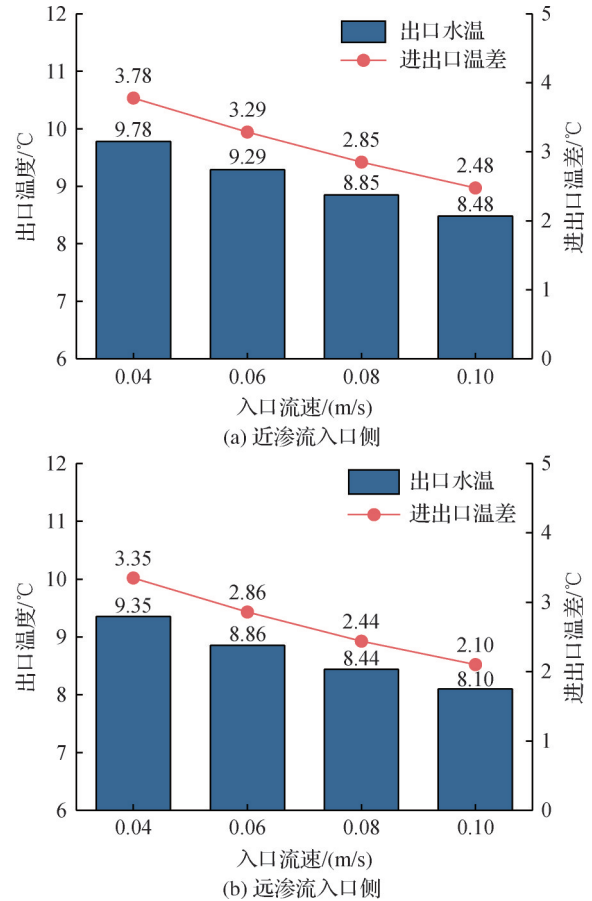


图8 供暖季CHE入口流速对传热特性的影响

Fig.8 Influence of CHE inlet velocity on its heat-transfer characteristics during the heating season

供暖季CHE入口流速对盾构能源隧道换热量、单位面积换热量以及温度分布特性的影响如图9所示。由图9(a)可知,随着CHE入口流速的增大,盾构能源隧道的换热量呈逐渐增大的趋势。当CHE入口流速从0.04 m/s增至0.10 m/s时,每环盾构管片的换热量从735.55 W提高至1270.00 W,单位面积换热量从71.76 W/m²提高至123.90 W/m²。同时,随着CHE入口流速的增加,盾构能源隧道的换热量的提升幅度呈现逐渐下降的趋势。CHE入口流速依次提升0.02 m/s时,盾构能源隧道换热量的增长率分别为35.12%、16.67%、9.53%。

入口流速的增加使CHE内的循环水流量同步增大,同时增大了换热器内表面的对流传热系数,从而提高了CHE的取热量,但CHE取热量的增速小于其

入口流速的增速;此外,增大流速的同时也减少了流体与换热器内表面之间的接触时间,进而降低了单位体积流体的传热量。上述两方面综合作用下,导致随着CHE入口流速的增加,换热器出口温度及进出口温差减小,但其取热量逐渐增大。

由图9(b)可知,随着CHE入口流速的增大,最大温度集中系数逐渐增大并偏离1,最小温度集中系数逐渐减小并偏离1,表明最高温区的集中程度增强,最低温区域则与整体平均水平的偏离进一步加大,能源管片的温度分布呈现“更不均匀”的趋势。此外,温度不均匀系数也随流速的增大而增大,进一步表明温度场的离散度增大、均匀性下降。

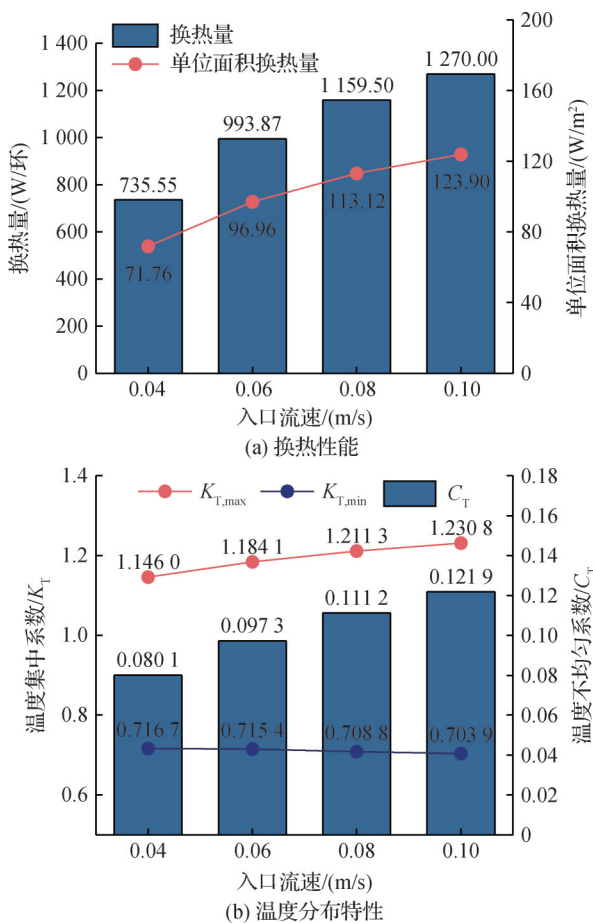


图9 供暖季CHE入口流速对能源隧道换热量及温度分布的影响

Fig.9 Influence of CHE inlet velocity on the heat transfer rate and temperature distribution of energy tunnel during the heating season

导致上述结果的原因如下:随着入口流速增大,换热量逐渐增加,管片平均温度逐渐降低,但管片中最高温度的降幅低于平均温度的降幅,使得最大温度集中系数逐渐偏离1;而最高温度点因与隧道空气直接接触,其温度受隧道空气影响而变化幅度较小,

导致最小温度集中系数逐渐远离1。此外,随着CHE入口流速增加,温度不均匀系数逐渐升高,由0.0801逐渐增至0.1219,表明管片上的温度分布变得更加不均匀。综上可知,供暖季提高CHE入口流速虽有助于提高整体的换热能力,但同时会加剧管片的温度分布不均匀性。

3.4.2 制冷季

制冷季CHE入口流速对其出口温度及换热温差的影响如图10所示。由图10(a)与图10(b)可知,随着CHE入口流速的增大,CHE近渗流入口侧出口温度和远渗流入口侧出口温度均呈上升趋势,CHE进出口温差均逐渐减小。当CHE入口流速从0.04 m/s增至0.10 m/s时,CHE的近渗流入口侧出口温度从27.38℃增至30.39℃,远渗流入口侧出口温度从28.98℃增至31.53℃。同时,近渗流入口侧CHE的出口温度略低于远渗流入口侧。

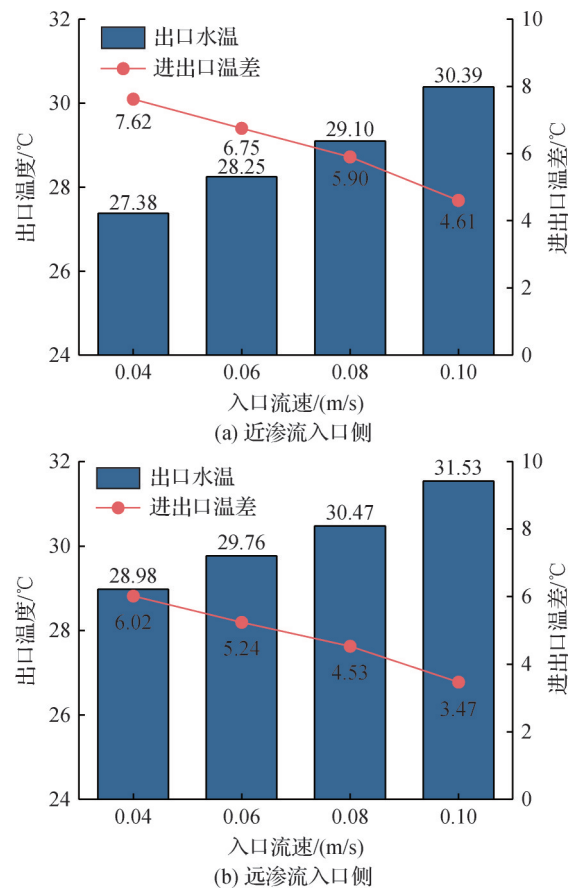


图10 制冷季CHE入口流速对其传热特性的影响

Fig.10 Influence of CHE inlet velocity on its heat-transfer characteristics during the cooling season

制冷季CHE入口流速对盾构能源隧道换热量、单位面积换热量以及温度分布特性的影响如图11所示。由图11(a)可知,随着CHE入口流速的增大,盾构能源隧道的换热量的变化趋势与供暖季一致。当

CHE管内流体的入口流速从0.04 m/s增至0.10 m/s时,每环盾构管片的换热量从1 448.00 W提高至2 744.40 W,单位面积换热量从141.27 W/m²提高至267.75 W/m²。随着流速的依次提升,换热量的增长率逐渐减小,分别为37.29%、17.73%、17.26%。导致上述结果的原因与供暖季相似,不再赘述。由图11(b)可知,当CHE入口流速从0.04 m/s增至0.10 m/s时,最大温度集中系数逐渐减小并趋近于1,最小温度集中系数逐渐减小并偏离1,表明管片平均温度与最高温度的差值逐渐减小,与最低温度的差值逐渐增大。导致上述现象的原因与供暖季类似,不再赘述。综上可知,制冷季提高CHE入口流速虽有助于提高整体的换热能力,但同时会加剧管片的温度分布不均匀性。

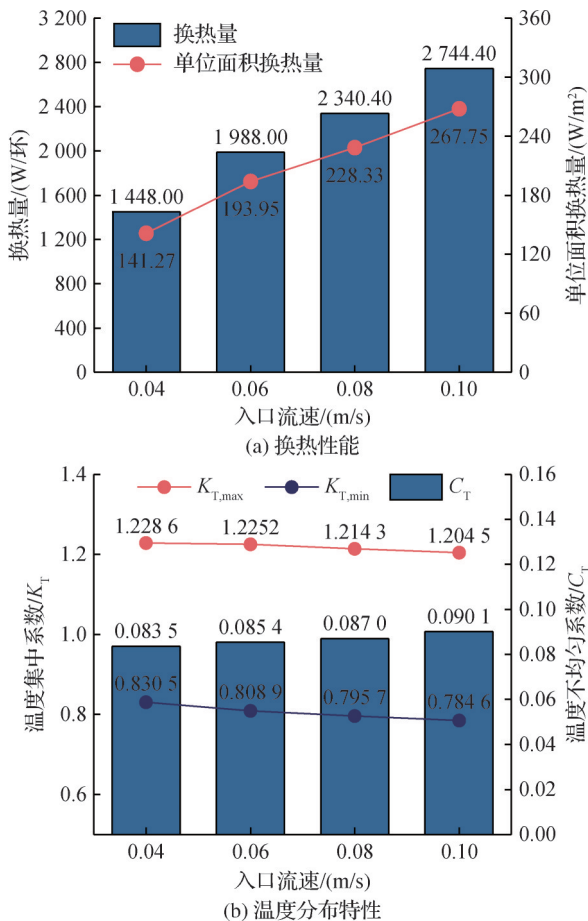


图11 制冷季CHE入口流速对能源隧道换热量及温度分布的影响

Fig.11 Influence of CHE inlet velocity on the heat transfer rate and temperature distribution of energy tunnel during the cooling season

3.5 讨论

在换热系统性能评价中,单位面积换热量是衡量换热器性能优劣的重要指标。因此,为了客观评

估本文所采用毛细管换热器的性能,有必要将其与相似研究进行对比分析。

本研究与国内外类似研究的结果对比如表4所示。虽然设计和运行参数存在差异,致使对比结果的客观公正性有所削弱,但从单位面积换热量的角度来看,仍可体现不同研究之间的差异。

表4显示,在供暖季无渗流工况下,研究1^[27]、研究2^[28]、研究3^[29]得出的传统地埋管换热器的单位面积换热量分别仅为32.19 W/m²、32.20 W/m²、35.40 W/m²。相比之下,本研究(研究6)中毛细管换热器的单位面积换热量达54.71 W/m²,较上述研究的提升率分别为69.96%、69.91%、54.55%。渗流条件下,研究4^[10]、研究5^[30]得出的传统地埋管换热器的单位面积换热量分别仅为64.50 W/m²、65.00~70.00 W/m²。相比之下,本研究(研究7)中毛细管换热器的单位面积换热量达113.12 W/m²,较上述研究提升率分别为75.38%、61.60%~74.03%。上述结果充分表明,本研究提出的基于毛细管换热器的能源隧道相较于基于传统地埋管换热器的能源隧道,具备更优的传热性能。

表4 本研究与相似研究对比

Tab.4 Comparison of this study with similar ones

研究编号	渗流速度/ (10 ⁻⁵ m/s)	换热器类型	单位面积换热量/ (W/m ²)
1	0	GHE	32.19
2	0	GHE	32.20
3	0	GHE	35.40
4	1.74	GHE	64.50
5	2.30	GHE	65.00~70.00
6	0	CHE	54.71
7	2.30	CHE	113.12

注:1)编号1~5为相似研究,编号6~7为本研究;GHE(ground heat exchanger)与CHE分别为传统地埋管换热器与毛细管换热器的缩写。

4 结论

能源隧道是解决地铁隧道热环境恶化的有效技术之一。本研究建立了基于毛细管换热器(CHE)的盾构能源隧道数值仿真模型,分析了其在渗流工况下的传热特性,得到如下结论:

1)渗流可显著提升盾构能源隧道的换热量。与无渗流工况相比,渗流工况下(2.3×10^{-5} m/s)每环盾构能源隧道的换热量在供暖季与制冷季可分别提升106.77%与276.00%。

2)CHE入口温度对盾构能源管片换热性能的影

响呈现出明显季节性差异。在供暖季, CHE 入口温度从 4 °C 增至 10 °C 时, 每环盾构管片的换热量从 1 471.50 W 降至 531.21 W, 温度不均匀系数从 0.160 5 降至 0.045 4; 在制冷季, CHE 入口温度从 31 °C 增至 37 °C 时, 每环盾构管片的换热量从 1 682.00 W 增至 2 671.10 W, 温度不均匀系数从 0.074 1 增至 0.094 0。

3) 提高 CHE 入口流速有助于提高管片整体的换热能力, 但管片的温度分布均匀性下降。在供暖季和制冷季, CHE 入口流速从 0.04 m/s 增至 0.10 m/s 时, 每环盾构管片的换热量分别从 735.55 W 提高至 1 270.00 W 和从 1 448.00 W 提高至 2 744.40 W, 温度不均匀系数分别从 0.080 1 增至 0.121 9 和从 0.083 5 增至 0.090 1。

本研究可为基于 CHE 的盾构能源隧道的设计提供理论支撑。后续研究可进一步探究渗流工况下地铁能源隧道的热-力耦合特性以及周期性非稳态传热特性。

本文受山东省自然科学基金(ZR2025MS701)和青岛市科技惠民示范专项项目(24-1-8-cspz-1-nsh)资助。(The project was supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2025MS701), and the Qingdao Science and Technology Project for Promoting People's Well-being (No. 24-1-8-cspz-1-nsh).)

参考文献

- [1] 王莹莹, 王兴仁, 锁军. 基于复杂网络的城市轨道交通拥堵及碳排放研究[J]. 黑龙江科学, 2025, 16(18): 129-131. (Wang Yingying, Wang Xingren, Suo Jun. Research on urban rail transit congestion and carbon emissions based on complex networks [J]. Heilongjiang Science, 2025, 16(18): 129-131.)
- [2] 王丽慧, 邹学成, 陶辉, 等. 地铁隧道围岩热库逐年演化特性的实验研究[J]. 暖通空调, 2017, 47(5): 53-57, 82. (Wang Lihui, Zou Xuecheng, Tao Hui, et al. Experimental study on evolution characteristics of heat reservoir of wall rock in underground railway tunnels [J]. Journal of HV&AC, 2017, 47(5): 53-57.)
- [3] 杨乐. 地铁站用能特征与节能策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2017. (Yang Le, Yue. Research on the energy use characteristics and energy saving strategies of metro stations [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.)
- [4] Cui Shengai, Cui Enqi, Xia Wei, et al. Influence of surrounding rock temperature on fracture parameters of concrete for shotcrete use in the hot-dry tunnel environments [J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 123548.
- [5] Rotta Loria A F. The silent impact of underground climate change on civil infrastructure [J]. Communications Engineering, 2023, 2: 44.
- [6] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81-122.
- [7] Jiang Jize, Wang Chenglong, Bouazza A, et al. Experimental study of thermal behaviour of energy tunnels at the entrance in cold regions [J]. Environmental Geotechnics, 2026, 13(2): 127-138.
- [8] Cen Duofeng, Yao Shuguang, Xia Caichu. Cold storage scheme for energy tunnels to improve the ground thermal accumulation around subway tunnels [J]. Renewable Energy, 2025, 253: 123589.
- [9] Bidarmaghz A, Narsilio G A. Heat exchange mechanisms in energy tunnel systems [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2018, 16: 83-95.
- [10] Liu Jinquan, Zhou Chao. Thermal performance of geothermal energy tunnel in unsaturated soils [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 245: 122868.
- [11] Schaufelberger A, Laloui L, Rotta Loria A F. Influence of convection on the thermal storage performance of energy tunnels [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2024, 40: 100595.
- [12] Zhu Z, Guo H. 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.
- [13] 王海英, 胡松涛, 常忠, 等. 一种应用于地铁隧道中的毛细管土壤源热泵系统: CN201310629223.X [P]. 2014-03-05.
- [14] Ji Yongming, Wu Wenzhe, Wang Wenqiang, et al. Heat transfer model of the front-end capillary heat exchanger of a subway source heat pump system [J]. Energy and Buildings, 2022, 255: 111665.
- [15] Sun Ying, He Jinfang, Ye Ran, et al. Thermal performance of capillary heat exchanger-based energy segments for metro tunnel source heat pump system [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 75: 107292.
- [16] Wang Yongyan, Zhou Guobing, Liu Jun, et al. Experimental investigation on heat transfer performance and thermal stress of segment lining in a heating power energy tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 161: 106544.
- [17] 刘强军, 梁赟, 宋军芳, 等. 近 42 年山西省晋城市地温与气温时空特征研究 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6): 240-245. (Liu Qiangjun, Liang Yun, Song Junfang, et al. Temporal and spatial characteristics of ground

- temperature and air temperature in Jincheng City of Shanxi Province in recent 42 years and their correlation analysis [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48 (6) : 240-245.)
- [18] 申寿恒. 地铁盾构能源隧道衬砌管片热—力耦合特性分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2025. (Shen Shouheng. Analysis of thermo-mechanical coupling characteristics of lining segment in shield metro energy tunnel [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2025.)
- [19] 姜波. 地铁运营初期区间隧道气温变化规律研究[J]. 都市轨道交通, 2018, 31(2): 113-118. (Jiang Bo. Research on air temperature of metro tunnel during the initial stage [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2018, 31(2): 113-118.)
- [20] 吴汶泽. 地铁源热泵系统源侧换热器多频响应传热特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022. (Wu Wenzhe. Study on multi-frequency response heat transfer performance of source side heat exchanger in metro source heat pump system [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.)
- [21] 蔡浩宇. 地下水渗流对地铁源热泵毛细管前端换热器传热特性的影响[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023. (Qi Haoyu. Effect of groundwater seepage on heat transfer characteristics of front-end capillary heat exchanger of metro source heat pump system [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023.)
- [22] 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. Subway piston wind measurement and analysis of Xi'an metro Line 2 [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2016, 13 (4): 740-747.)
- [23] GB 50157—2013 地铁设计规范[S]. (GB 50157—2013 Code for design of metro[S].)
- [24] Ji Yongming, Jiao Jiachen, Yin Zhenfeng, et al. Rapid performance prediction model for capillary heat exchangers in subway tunnel linings [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 232: 120967.
- [25] 青岛地铁集团有限公司. 青岛市地铁8号线支线工程环境影响报告书[R]. 2022-01-10. (Qingdao Metro Group Co, Ltd. Environmental impact report for the 8th branch line project of qingdao metro [R]. 2022-01-10.)
- [26] Ji Yongming, Ji Chengfan, Shen Shouheng, et al. Performance and optimal design parameters of tunnel lining CHEs under typical design conditions [J]. *Renewable Energy*, 2025, 238: 121962.
- [27] Ma Chunjing, 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.
- [28] Wu Di, Zhang Tianlong, Li Bowen, et al. Field test and numerical modelling on the heat exchange performance of an energy utility tunnel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 281: 128735.
- [29] Liu Jiaxin, Han Chanjuan. Design and optimization of heat extraction section in energy tunnel using simulated annealing algorithm [J]. *Renewable Energy*, 2023, 213: 218-232.
- [30] Ma Chunjing, Di Donna A, Dias D. Numerical study on the thermo-hydro-mechanical behaviour of an energy tunnel in a coarse soil [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 151: 105003.

通信作者简介

季永明,男,副教授,青岛理工大学环境与市政工程学院, 18353268850, E-mail: jixia_2008@126.com。研究方向: 能源隧道技术。

About the corresponding author

Ji Yongming, male, associate professor, School of Environment and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, 86-18353268850, E-mail: jixia_2008@126.com. Research fields: energy tunnel technology.