

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0211

# 考虑地下水渗流与空气流动的能源隧道换热性能及热变形

余淑琳<sup>1</sup>, 岑夺丰<sup>1,2\*</sup>, 夏才初<sup>1,2</sup>

(1.宁波大学 岩石力学研究所, 浙江 宁波 315211; 2.宁波市能源地下结构重点实验室, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 为研究地下水渗流和空气流动对能源隧道换热性能的影响及由此可能引起的热变形, 以德国 Stuttgart-Fasanenhof 能源隧道为原型, 建立了考虑地下水渗流与隧道内空气流动的热互馈作用的耦合数值模型。针对不同地下水渗流方向和流速以及不同空气流速, 采用有限元法模拟分析隧道换热器出水口温度、换热功率、隧道空气和周围地层的温度场及隧道变形特征。结果表明: 渗流方向与隧道走向垂直时, 在渗流速度 0.05~1.00 m/d 范围, 运行 60 d 后换热功率增大 50%; 渗流方向与隧道走向同向时, 流速越大, 换热效率越小, 在渗流速度 0.05~1.00 m/d 范围, 运行 60 d 后换热功率下降 37%。空气流速增大对换热效率起促进作用, 但增大到一定程度后影响不再明显。渗流速度增大对热变形引起的隧道位移在竖直方向影响较小, 在水平方向几乎无影响; 在渗流速度 0.05~1.00 m/d 范围, 换热系统运行 60 d, 隧道整体的竖直位移为 0.05~0.20 mm。研究成果为能源隧道的合理设计提供了参考。

**关键词:** 能源隧道; 换热性能; 热变形; 渗流; 空气流速

**中图分类号:** U459.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132(2025)05-0054-10

寻找高效、清洁的建筑供暖和制冷方案一直是降低建筑能耗、节约能源的重要课题<sup>[1-2]</sup>。地源热泵作为一种利用地热能作为建筑供暖和制冷的节能技术, 因其在减少二氧化碳排放和化石燃料消耗方面的优势而受到青睐。能源隧道是将地源热泵系统与隧道工程相结合的节能新技术, 通过在衬砌结构内埋设换热管, 形成换热器与隧道周围岩土体发生热交换, 从而提取地热能用于附近建筑供暖和制冷。由于城市对高效公共交通系统的需求不断增加, 地下基础设施的建设以及地热能用于供暖和制冷的应用日益广泛。能源隧道技术最早出现在欧洲, 之后在全球兴起, 尤其是在韩国、中国、澳大利亚等国家<sup>[3-6]</sup>。

隧道换热器与地层进行热量交换会导致地层和隧道内空气温度变化, 这种变化对换热器的换热效率影响显著<sup>[7]</sup>。因此, 能源隧道系统设计的前提是探明地层热物理性质、地层渗流特征以及隧道内

空气的温度和流通性对换热性能的影响规律。同时, 需要分析由于换热可能引起的地层变形和隧道位移, 以免对隧道和地面建筑结构造成危害。Barla 等<sup>[8]</sup>研究了能源隧道在有地下水流动和无地下水流动情况下的换热效率, 发现两者的换热功率相差 30~40 W/m<sup>2</sup>。毕金锋等<sup>[9]</sup>分析了地下水渗流与隧道走向垂直时的换热效率, 发现渗流作用对换热效率影响显著。Zhang 等<sup>[10]</sup>在内蒙古扎敦河隧道进行了现场热响应实验, 发现隧道通风会显著影响围岩温度场, 同时随着通风速率的增大, 换热效率大幅提高。Zhang 等<sup>[11]</sup>通过数值模拟研究了无地下水流动情况下能源隧道的沉降规律, 结果表明: 能源隧道周围的沉降随着时间的推移不断累积, 并发现前 4 a 内隧道的沉降量占 40%, 10 a 后累计沉降量为 15 mm; 该结果基于特定工况(如地质条件、隧道结构等)的仿真分析, 其具体数值可能与实际工程存在差异, 但整体规律可为类似工程提供参考。因

收稿日期: 2025-02-25

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目(LZ22E080008); 宁波市自然科学基金(2024J091)

第一作者: 余淑琳, 硕士研究生, 主要研究方向为能源隧道。E-mail: yushulin@163.com

\*通信作者: 岑夺丰, 副研究员, 主要研究方向为能源地下结构。E-mail: cdfschool@126.com

此,研究考虑地下水渗流与空气流动特性的能源隧道换热性能及热变形具有重要意义。但已有的研究通常仅考虑渗流或空气的影响,并将空气温度作为固定边界输入数值模型,忽略了地层与空气之间的热互馈作用;同时考虑渗流和空气的耦合影响以及由此引起的地层热变形,并分析多因素耦合影响机制的报道较少。

本研究依据德国 Stuttgart-Fasanenhof 能源隧道,使用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件建立考虑地下水渗流与隧道内空气流动的热互馈作用的耦合数值模型,并对其进行瞬态求解,计算温度场和换热功率,进而分析换热引起的地层热变形和隧道位移,研究成果可为能源隧道的合理设计提供参考。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 数值模型

以德国 Stuttgart-Fasanenhof 能源隧道为原型(图1),经适当简化,采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件建立数值模型(图2)。数值模型网格划分采用自由四面体网格,共138 550个,其中包括242 553个自由度,采用三级(粗、中、细)网格逐步细化,计算出水口温度和换热功率。当相邻两级网格的结果差异小于1%时,判定网格独立性成立,当前的细网格满足计算精度要求。模型中地层、混凝土衬砌以及隧道内空气之间的传热采用固体与流体传热模块。地层与衬砌之间采用完全热-力耦合接触,忽略相对位移;换热管与衬砌通过热阻边界模拟实际嵌入效果,接触热阻根据材料界面特性设定。隧道内空气流动考虑为湍流,采用  $k-\epsilon$  模型。为使隧道内空气流动更加符合实际情况,空气物理模型可压缩性设置为弱可压缩流动,空气和隧道内壁接触条件为无滑移。地下水渗流采用多孔介质与地下水流动模块,换热管采用非等温管道流传热。

模型水平宽度200 m,高度115 m,厚度10 m。隧道中心点位于地面以下15 m处,隧道内径10 m,长度10 m(模型厚度),隧道衬砌厚度0.4 m。换热管采用高密度聚乙烯(HDPE)管道,管道外径25 mm,外径与管壁厚度比11。管道布置于衬砌外边缘,管道间距0.4 m。隧道壁总面积315 m<sup>2</sup>,其

中换热管布设有效面积240 m<sup>2</sup>。模型中地层密度2 400 kg/m<sup>3</sup>,衬砌混凝土密度2 250 kg/m<sup>3</sup>,换热管导热系数0.4 W/(m·K),地层恒压比热容1 100 J/(kg·K),衬砌混凝土恒压比热容890 J/(kg·K),管道流体恒压比热容4 180 J/(kg·K),地层导热系数2.0 W/(m·K),混凝土衬砌导热系数2.1 W/(m·K),管道流体导热系数0.582 W/(m·K)。更多有关德国 Stuttgart-Fasanenhof 能源隧道材料参数和工程背景可参考文献[12-15]。



图1 德国 Stuttgart-Fasanenhof 能源隧道<sup>[4]</sup>

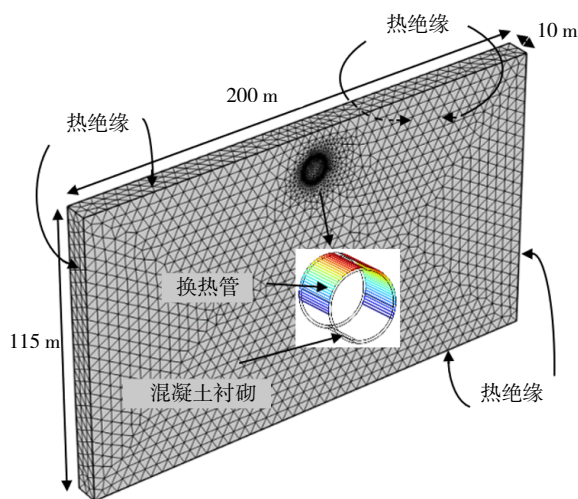


图2 数值模型

### 1.2 控制方程

建立的能源隧道全耦合有限元模型充分考虑了管道内的传热、隧道内的空气和地层中的地下水流动。地下水渗流和地层传热控制方程及地层内的能量守恒方程如下:

$$\rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla \cdot q_s = Q_s \quad (1)$$

$$\rho_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} u_f \cdot \nabla T_f + \nabla \cdot q_f = Q_f \quad (2)$$

式中:  $T_s$  为多孔介质温度;  $T_f$  为多孔介质中流体温度;  $t$  为时间;  $C_{p,s}$  和  $C_{p,f}$  分别为多孔介质固相和液相比热容;  $\rho_s$ 、 $q_s$  和  $Q_s$  分别为多孔介质密度、热通量和换热功率;  $\rho_f$ 、 $q_f$  和  $Q_f$  分别为多孔介质中流体密度、热通量和换热功率;  $u_f$  为多孔介质中流体的达西速度, 可与达西速度场耦合计算。

换热管内传热为管道内的流体与管道壁的热传导, 包括流体流动时发生的热对流。传热过程满足以下传热控制方程:

$$\rho_w A C_{p,f} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w A C_{p,f} v_w \cdot \nabla T = \nabla_t \cdot (A \kappa \nabla T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_w A}{d_h} |v_w|^2 + Q_{wall} \quad (3)$$

式中:  $\nabla_t$  为传热时间;  $A$  为管道的横截面积;  $v_w$  为管道中流体速度场;  $f_D$  为管道内壁粗糙度;  $\kappa$  为管道中流体导热系数;  $Q_{wall}$  为通过管壁交换的热量;  $d_h$  为管道热影响半径;  $T$  为管道回路中流体温度;  $\rho_w$  为管道内流体密度。

考虑隧道内空气为湍流, 模型中湍流流动动能和流动耗散率满足以下控制方程<sup>[16]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \epsilon) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\epsilon \mu_t) \nabla \epsilon] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为隧道内空气密度;  $k$  为湍流动能;  $U$  为空气流动特征速度;  $\mu$  为流体动力黏度;  $\mu_t$  为湍流黏性;  $\sigma_k$  和  $\sigma_\epsilon$  为湍流模型常数;  $P_k$  为由平均速度梯度产生的湍流动能;  $\epsilon$  为湍流耗散率;  $C_{1\epsilon}$  和  $C_{2\epsilon}$  为模型常数。

在整个换热过程中计算实时出口温度, 并根据以下换热效率控制方程计算实时换热功率:

$$Q_s = \frac{\rho_w v c_M (T_{out} - T_{in})}{A_s} \quad (6)$$

式中:  $Q_s$  为换热器单位面积换热功率;  $T_{in}$  为入水口温度;  $T_{out}$  为出水口温度;  $v$  为换热管循环介质水体积流量;  $c_M$  为流体介质比热容;  $A_s$  为换热管铺设的有效面积。

### 1.3 边界条件与初始条件

模型外边界为热绝缘(零热流), 上下边界为无流动(不透水), 左右边界为定水头(渗流驱动)。水头为 10 m, 分别模拟地下水渗流方向与隧道走向垂直和同向情况, 地下水流速为 0.05、0.15、0.50、1.00 m/d。根据德国 Stuttgart-Fasanenhof 能源隧道环境条件, 地层初始温度设置为 10 °C, 隧道内空气初始温度 10 °C。用于模拟强制对流的隧道内参考大气压为 101 325 Pa, 空气流速分别考虑 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s。换热管入水口温度 21 °C, 循环介质流速 0.48 m/s。

### 1.4 模型验证

将数值模拟结果与德国 Stuttgart-Fasanenhof 能源隧道段的测试结果<sup>[4,17]</sup>进行对比, 以验证模型的准确性。能源隧道段的换热管总长度 400 m, 布设的有效换热面积 240 m<sup>2</sup>。管道中的换热流体由隧道顶部的入水口经管道循环到隧道衬砌中的出水口, 使用温度传感器对换热系统的入水口温度和出水口温度进行监测。使用安装在距离隧道结构水平方向 0.5 m 处(地表以下 15 m)的温度传感器测量地下温度。

图 3 为隧道换热系统运行 180 d 期间换热器入水口和出水口温度传感器的实测结果与数值模拟结果对比, 可见两者较一致。

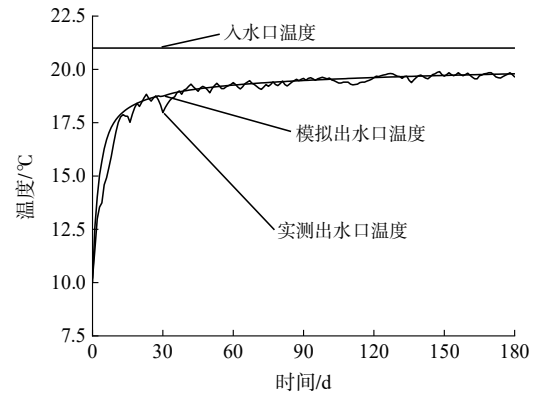


图 3 换热器出水口温度模拟与实测结果比较

图 4 为数值模拟得到的距隧道结构水平方向 0.5 m 处地层的温度变化, 同样与使用安装在距离隧道结构水平方向 0.5 m 处(地表以下 15 m)的温度传感器测量得到的地下温度结果较一致。表明本研究建立的能源隧道数值模型模拟隧道实际热响应较好, 可用于后续影响因素分析。

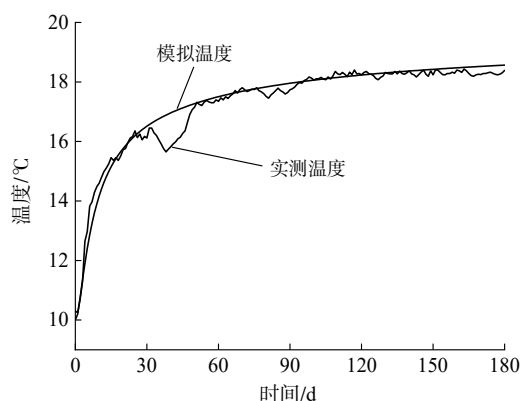


图4 地层温度模拟与实测结果比较

## 2 换热性能分析

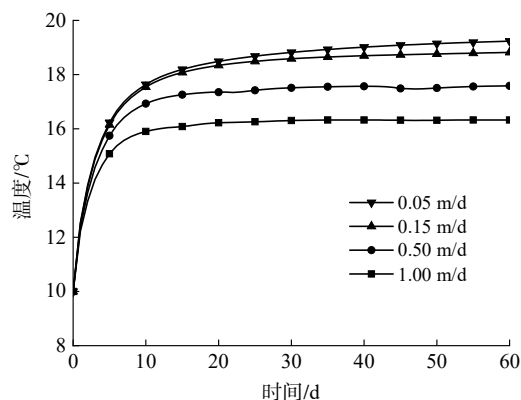
### 2.1 地下水渗流对换热性能的影响

地下水渗流速度对能源隧道周围地层的热补给能力影响较大,流速越大地层的热补给能力越强。与之前研究只考虑地下水渗流方向与隧道走向垂直不同,本研究同时考虑地下水渗流与隧道走向相同和垂直情况下的换热器换热性能。换热器入水口温度  $21^{\circ}\text{C}$ ,地层初始温度  $10^{\circ}\text{C}$ ,模拟夏季取冷过程,设取冷过程连续运行 60 d,设定隧道内空气流速  $0.5\text{ m/s}$ ,考虑地下水不同渗流速度。

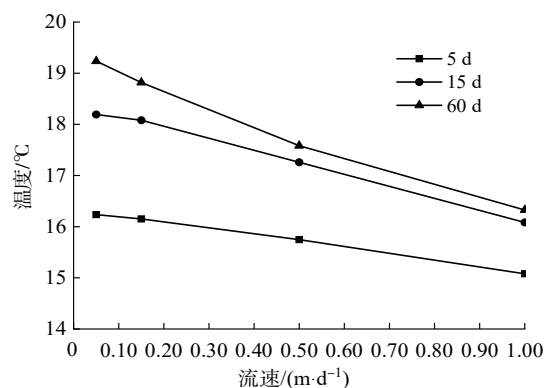
#### 2.1.1 地下水渗流方向与隧道走向垂直

地下水渗流方向与隧道走向垂直时不同渗流速度下换热器出水口的温度变化如图 5 所示。

从图 5 (a) 可见,随着换热的进行,出水口温度在前 10 d 迅速升高,之后增速明显变缓,最终温度趋于恒定。在地下水流速为  $0.05\text{ m/d}$  情况下,经过 60 d 换热,换热器出水口温度从初始  $10^{\circ}\text{C}$  上升至  $19.1^{\circ}\text{C}$  左右;当地下水流速为  $1.00\text{ m/d}$  时,出水口温度上升至  $16.1^{\circ}\text{C}$  左右。



(a) 出水口温度随时间的变化

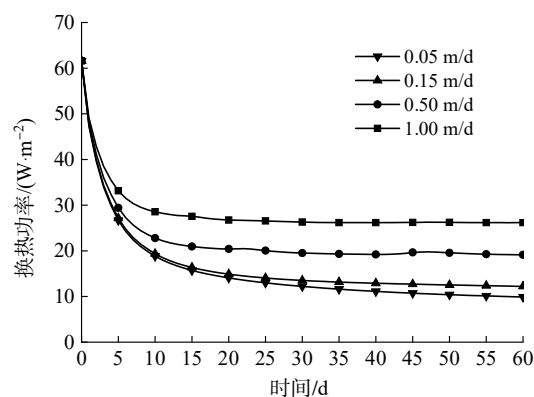


(b) 出水口温度随渗流速度的变化

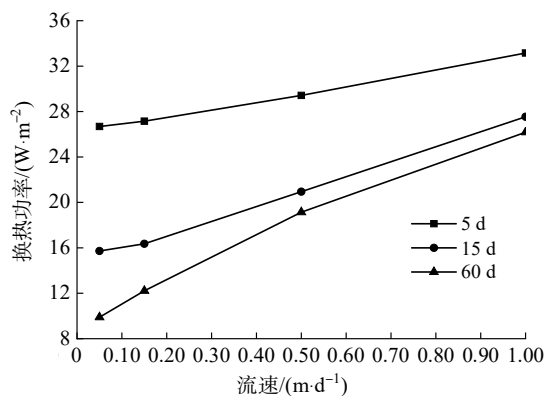
图5 不同渗流速度下出水口温度的变化(垂直时)

从图 5 (b) 可见,随着渗流速度的增大出水口温度明显降低,且随着运行时间的增加,下降量增大。运行 60 d 后,在流速为  $1.00\text{ m/d}$  时出水口温度降低近  $3^{\circ}\text{C}$ 。这是因为随着地下水流速的增大,换热器换热在地层产生的热量会被地下水带往下游,从而在一定程度上消散了热积累。

地下水渗流方向与隧道走向垂直时不同渗流速度下换热器的换热功率如图 6 所示。



(a) 换热功率随时间的变化



(b) 换热功率随渗流速度的变化

图6 不同渗流速度下换热功率的变化(垂直时)

总体上, 换热功率与出水口温度呈现相反的变化规律, 即随着换热的进行, 换热功率在前 10 d 迅速减小, 之后减小速度明显变缓, 最终趋于恒定; 随着渗流速度的增大, 换热功率明显增大, 且随着运行时间的增加, 增大量增加。

从式(6)可知, 换热功率与出、进水口温度的差值(文中为负值)呈现负相关, 由于进水口温度恒定, 换热功率变化由出水口温度控制, 并呈现相反的变化规律。随着换热进行, 地层温度升高, 出水口温度随之升高, 导致换热功率减小。但随着渗流速度的增大, 热累积现象减小, 出水口温度降低, 从而使换热功率增大。

图 7 为地下水渗流方向与隧道走向垂直时不同渗流速度下换热 60 d 后的温度场。由于换热管布置在隧道上半区域, 该区域地层温度相对较高, 且下游侧(图中隧道右侧)地层温度高于上游侧(隧道左侧)。随着渗流速度的增加, 上游侧热影响区域逐渐减小, 甚至消失, 而下游侧热影响区域逐渐增大, 当流速较大时向下游侧延伸区域较大。此外, 隧道内空气温度也随着渗流速度的增大而降低。可见, 渗流速度对热堆积的消散程度影响明显。

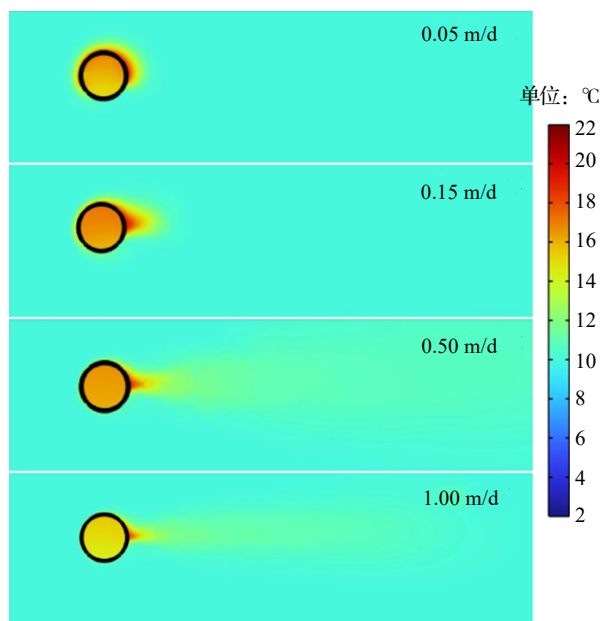


图 7 换热 60 d 后不同渗流速度下的温度场(垂直时)

### 2.1.2 地下水渗流方向与隧道走向相同

地下水渗流方向与隧道走向相同时不同渗流速度下换热器出水口温度和换热功率变化如图 8 和图 9 所示。

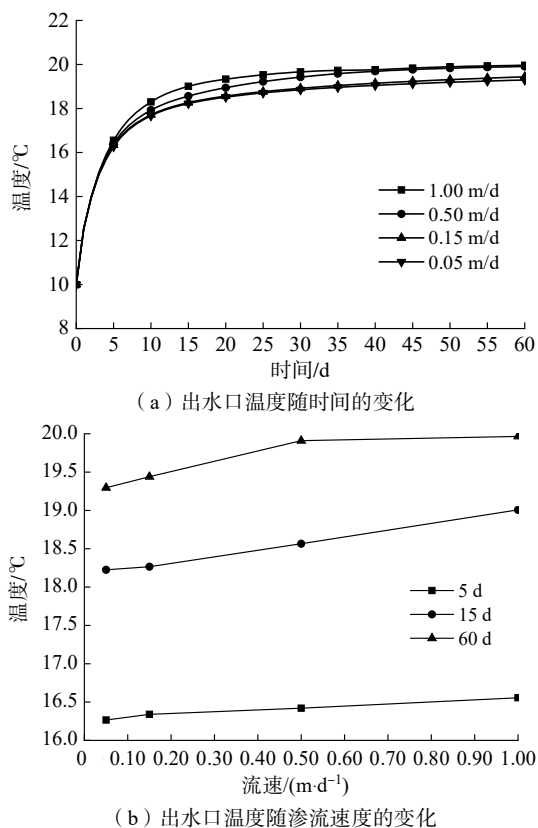


图 8 不同渗流速度下出水口温度的变化(同向时)

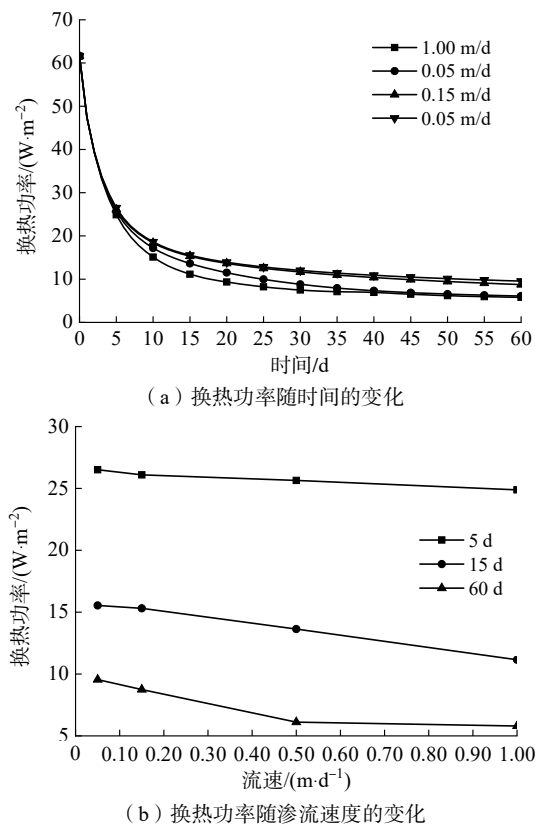


图 9 不同渗流速度下换热功率的变化(同向时)

从图8和图9可见,出水口温度和换热功率随时间的变化规律与地下水渗流方向与隧道走向垂直的情况相似,即出水口温度在前10 d迅速升高,之后增速明显变缓,最终温度趋于恒定(图8(a));换热功率在前10 d迅速减小,之后减小速度明显变缓,最终趋于恒定(图9(a))。但出水口温度和换热功率随渗流速度的变化规律与地下水渗流方向与隧道走向垂直的情况相反,即出水口温度随渗流速度的增大而升高(图8(b)),换热功率随渗流速度的增大而减小(图9(b)),只是影响较小,换热60 d后,渗流流速从0.05 m/d增大到1.00 m/d时,换热器出水口温度仅从19.20 °C升高至19.93 °C,换热功率从9.87 W/m<sup>2</sup>减小至5.90 W/m<sup>2</sup>。原因是渗流方向与隧道走向相同时,上游地层吸收的热量随着地下水渗流带往下游,从而抑制了下游换热器的运行效率,但总体影响不明显。

图10为地下水渗流方向与隧道走向相同时不同渗流速度下换热60 d后隧道附近的温度场。

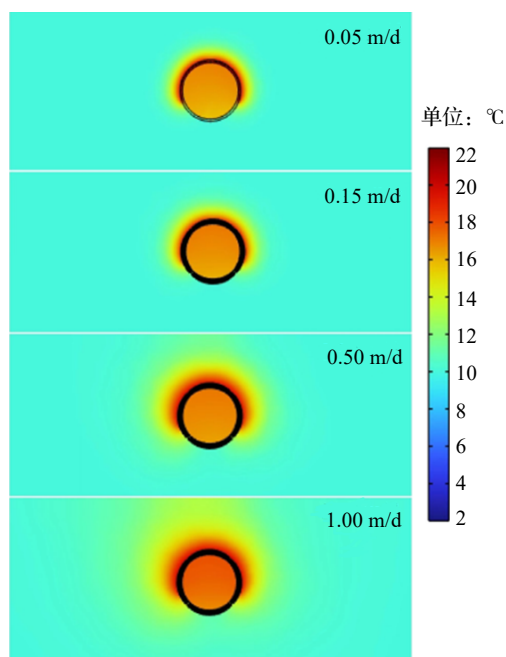


图10 换热60 d后不同渗流速度下的温度场(相同时)

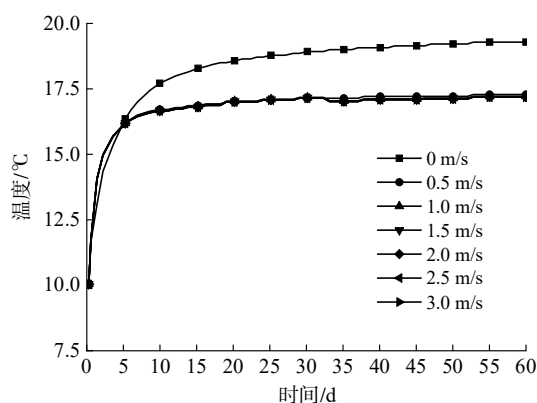
从图10可见,当渗流速度为0.05 m/d时,换热器换热对隧道周围地层温度场的影响范围仅在隧道附近1 m范围;当渗流速度为0.15 m/d时,影响范围达到了2 m左右,地层和隧道内空气的温度也随之升高;随着渗流速度的继续增大,当渗流速

度达到1.00 m/d时,换热器换热对周围地层的影响范围达到6 m左右。在渗流速度不断增大过程中,换热器换热对周围地层温度场的影响范围也逐渐增大,地层和隧道内空气温度持续升高。在能源隧道的换热运行过程中对于地下水渗流方向与隧道走向相同的隧道段,其产生的热堆积非常不利于能源隧道的长期运行。因此,在能源隧道的实际工程设计中,应尽量避免在地下水渗流方向与隧道走向相同区段设置换热器。

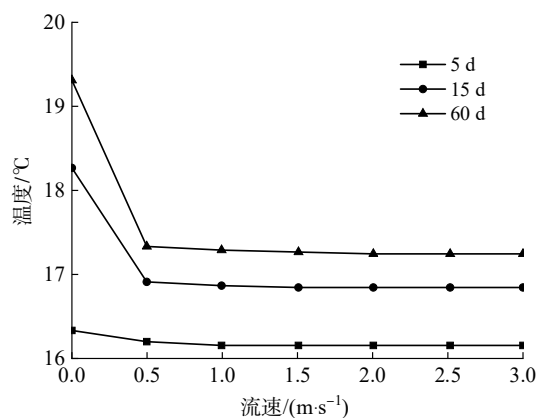
## 2.2 隧道空气流动对换热性能的影响

Zhang等<sup>[10]</sup>研究发现,隧道内的通风会影响围岩温度场。为研究隧道内空气流动对能源隧道换热器换热性能的影响,考虑地下水渗流方向与隧道走向垂直,渗流速度为0.05 m/d,设置不同空气流速进行数值模拟。

不同空气流速下换热器出水口温度变化如图11所示。



(a) 温度随时间的变化



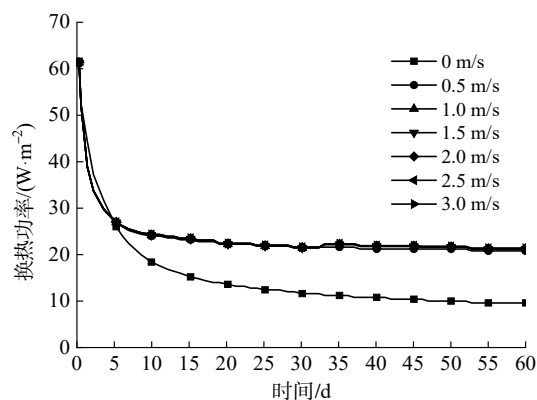
(b) 温度随空气流速的变化

图11 不同空气流速下出水口温度的变化

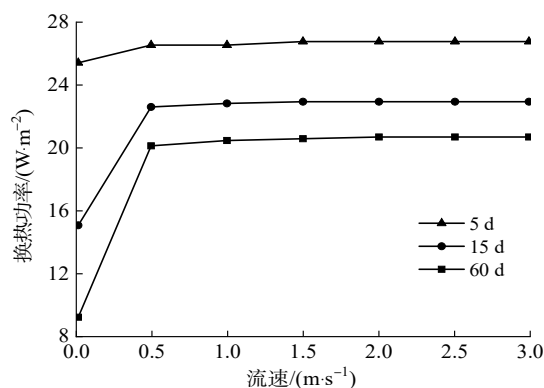
从图11(a)可见,随着换热的进行,出水口

温度在前 15 d 迅速升高,之后增速明显变缓,最终温度趋于恒定。从图 11 (b) 可见,随着空气流速从 0 m/s 增大至 0.5 m/s,出水口温度降低,且随着运行时间增加,下降量增大,但之后趋于稳定,表明空气流速的影响范围有限。

不同空气流速下换热器的换热功率变化如图 12 所示。总体上,换热功率变化与出水口温度变化呈现相反规律,即随着换热的进行,换热功率在前几天迅速减小,之后减小速度明显变缓,最终功率趋于恒定(图 12 (a)); 换热功率从流速为 0 m/s 增至 0.5 m/s 时有所增大,且随着运行时间的增加,增大量增加,但之后趋于稳定。原因是随着空气流速的增大,热量消散加快,换热功率增大,但空气流速的影响范围有限。



(a) 换热功率随时间的变化



(b) 换热功率随空气流速的变化

图 12 不同空气流速下换热功率的变化

图 13 为不同空气流速下换热 60 d 后的温度场。从图 13 可见,当空气流速为 0 m/s 时,主要在布置有换热管的隧道上半区域发生温度升高。原因是空气流速为 0 m/s 时不能使隧道空间内的空气发生充分热交换,导致温度场分异。但随着空气流速

的增大,在湍流流动下,隧道内空气发生充分热交换,隧道内空气温度分布较为均匀,从而使周围地层的温度场分布较为均匀。但如前文分析,空气流速超过一定值后,对温度场的影响有限。

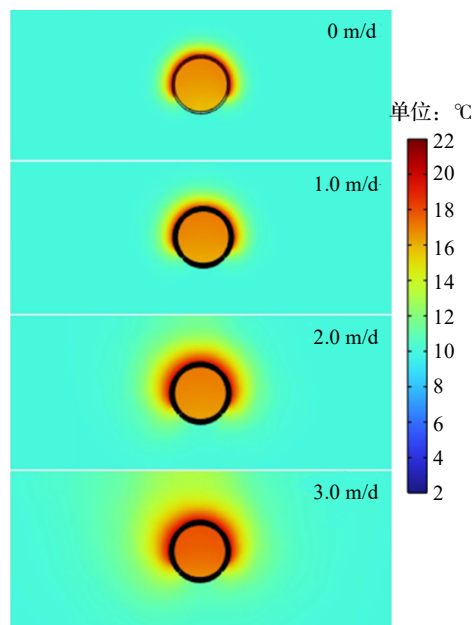


图 13 换热 60 d 后不同空气流速下的温度场

### 3 换热引起的变形

#### 3.1 数值模型简化

能源隧道在运行过程中与周围地层的换热会引起地层温度的变化,温度过高可能导致地层的热变形。有研究<sup>[18]</sup>表明,能源隧道在运行过程中地层会产生不可恢复的变形,隧道空气流速影响范围有限,地下水渗流方向与隧道走向垂直有利于换热管换热且影响较大,故研究地下水渗流方向与隧道走向垂直情况下地下水渗流速度对能源隧道换热过程中周围地层的热变形影响规律。

由于复杂三维数值模型计算热变形时会面临收敛困难、计算耗时较长等问题,而二维模型可简化计算,且通常能在合理的时间内收敛。二维模型可满足分析需求,同时显著减少计算资源的消耗。因此对数值模型进行了简化,简化后的数值模型如图 14 所示。

不考虑换热管内流体流动具体换热细节,将换热管布设位置简化为面热源,由于换热过程对衬砌地层边界的影响可以忽略,考虑外边界为热绝缘边界,隧道衬砌内边界为无流动的壁面边界。

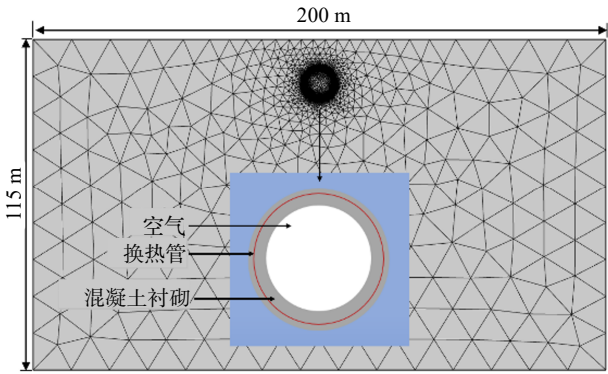


图 14 简化数值模型

Liu 等<sup>[19]</sup>研究表明, 热交换导致地层的变形比衬砌的变形更加关键, 所以将隧道衬砌部分视为刚体。另外, 忽略换热管内的流体流动产生的热传导, 将换热管布设位置所在的圆弧面简化为面热源, 温度为  $T_p$ 。同时, 将隧道空气和衬砌也作为热源, 温度分别为  $T_A$  和  $T_L$ 。这三个热源的温度采用不同渗流速度下的计算结果, 即换热 60 d 得到的换热管出水口温度、空气平均温度和隧道衬砌平均温度 (表 1)。其他条件与前文数值模型同。模型中地层的热膨胀系数为  $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , 地层的弹性模量为  $2.4 \times 10^6 \text{ Pa}$ , 混凝土衬砌的弹性模量为  $3.5 \times 10^9 \text{ Pa}$ , 地层的泊松比为 0.30, 混凝土衬砌的泊松比为 0.15, 其他参数与前数值模型同。

表 1 模型热源参数

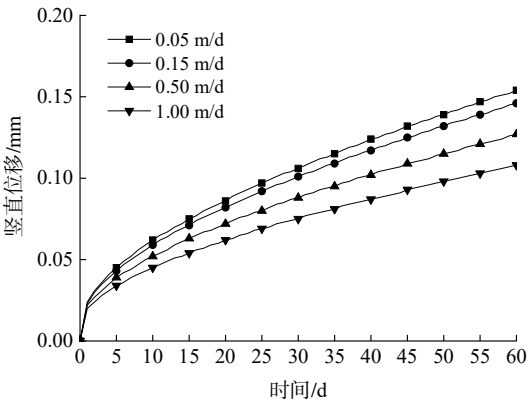
| 渗流速度/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | $T_A/^\circ\text{C}$ | $T_L/^\circ\text{C}$ | $T_p/^\circ\text{C}$ |
|-----------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0.05                                    | 17.2                 | 19.7                 | 19.0                 |
| 0.15                                    | 16.9                 | 19.0                 | 18.5                 |
| 0.50                                    | 16.0                 | 17.7                 | 17.3                 |
| 1.00                                    | 14.7                 | 16.0                 | 16.1                 |

3.2 热变形分析

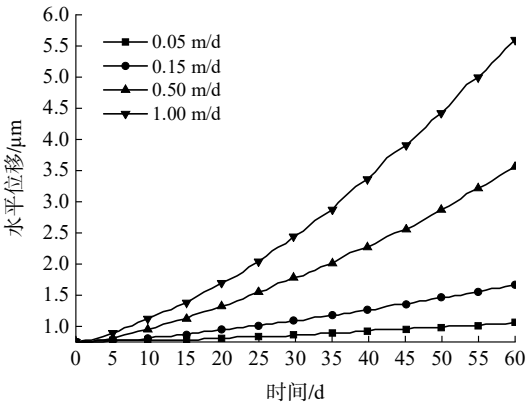
图 15 为不同渗流速度下换热 60 d 期间隧道位移的变化 (刚性衬砌位移, 向上和向左为正)。从图 15 (a) 可见, 随着换热的进行, 隧道周围地层的温度逐渐上升, 地层受热膨胀影响, 隧道被抬升, 出现向上位移; 但随着地下水渗流速度的增大, 热消散加快, 这种抬升作用减弱, 总体隧道向上位移不大, 不超过 0.2 mm。

从图 15 (b) 可见, 随着换热的进行, 隧道向渗流上游侧逐渐发生偏移, 原因是下游侧地层温度高于上游侧 (图 7), 导致下游侧地层热膨胀量大

于上游侧 (图 16), 从而推动隧道向上游位移, 且随着渗流速度的增大, 位移逐渐增大, 但总体位移不明显, 仅为微米级, 可忽略不计。



(a) 竖直位移



(b) 水平位移

图 15 不同渗流速度下隧道的位移

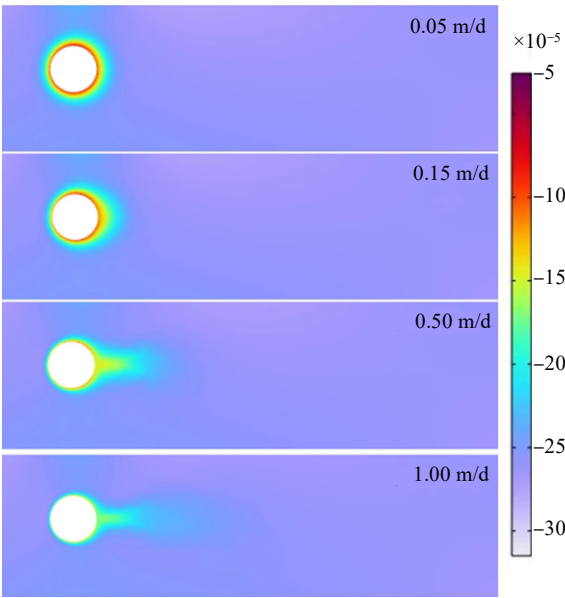


图 16 不同渗流速度下地层的体积应变

不同渗流速度下换热 60 d 后隧道周围地层的体积应变(图 16)总体上与温度场(图 7)相关,下游侧地层由于温度高于上游侧地层,使得下游侧热应变大于上游侧热应变。随着渗流速度的增大,热量消散作用增强,应变场分布变得不均匀,且应变逐渐减小。

#### 4 结论

(1) 在地下水渗流方向与隧道走向垂直情况下,随着地下水渗流速度增大,地层热消散能力增强,能源隧道换热效率提高。在渗流速度 0.05~1.00 m/d 范围,运行 60 d 后换热功率提升 50%;而在地下水渗流方向与隧道走向相同情况下,上游地层吸收的热量随着地下水渗流带往下游,从而抑制了下游隧道的换热效率,导致一定的热堆积,且随着流速的增大热堆积范围增大,但总体影响不显著。在地下水渗流速度 0.05~1.00 m/d 范围,运行 60 d 后换热功率下降 37%。因此,在实际工程设计中,应尽量避免在地下水渗流方向与隧道走向相同的区段设置换热器。

(2) 隧道内空气在湍流流动下,空气内部热交换较为充分,隧道内空气温度场较为均匀。在空气流速 0~1.0 m/s 范围,随着空气流速的增大,能源隧道换热效率明显增大,而空气流速超过 1.0 m/s 后,其对换热效率的影响不再显著。因此,在能源隧道的运行过程中可适当增加隧道内的通风速率,以提高换热效率。

(3) 夏季换热取冷会使隧道周围地层的温度升高,发生热膨胀,隧道被抬升。在地下水渗流方向与隧道走向垂直情况下,渗流速度在 0.05~1.00 m/d 时,换热系统运行 60 d,隧道整体的竖直位移为 0.05~0.20 mm。由于下游侧地层温度高于上游侧,使得下游侧地层热膨胀量大于上游侧,从而推动隧道向渗流上游发生偏移,但位移很小,可以忽略不计。

#### 参考文献:

- [1] 严金秀. 世界隧道工程技术发展主流趋势: 安全、经济、绿色和艺术[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(5): 693-696.
- [2] 钱七虎. 利用地下空间助力发展绿色建筑与绿色城市[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(11):1737-1747.
- [3] ZHANG G Z, XIA C C, SUN M, et al. A new model and analytical solution for the heat conduction of tunnel lining ground heat exchangers[J]. Cold regions science and technology, 2013, 88:59-66.
- [4] 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.
- [5] BARLA M, DI DONNA A, PERINO A. Application of energy tunnels to an urban environment[J]. Geothermics, 2016, 61:104-113.
- [6] ADAM D, MARKIEWICZ R. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers[J]. Géotechnique, 2009, 59(3):229-236.
- [7] HE J, YIN M, WEI X Y, et al. Optimization of pipe circuits in energy tunnels[J]. Underground space, 2023, 13:166-182.
- [8] BARLA M, DI DONNA A. Energy tunnels: concept and design aspects[J]. Underground space, 2018, 3(4):268-276.
- [9] 毕金锋, 姜弘, 丁文其, 等. 能源隧道换热过程中的地层热补给能力研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(增刊 1):163-170.
- [10] ZHANG G Z, XIA C C, ZHAO X, et al. Effect of ventilation on the thermal performance of tunnel lining GHEs[J]. Applied thermal engineering, 2016, 93:416-424.
- [11] ZHANG S, CHENG X H, ZHAO X D, et al. Numerical modelling of ground settlement induced by long-term operation of an energy tunnel[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2021, 861(7):072123.
- [12] BIDARMAGHZ A, NARSILIO G A. Shallow geothermal energy: emerging convective phenomena in permeable saturated soils[J]. Géotechnique letters, 2016, 6(2):119-123.
- [13] BIDARMAGHZ A, NARSILIO G A, BUHMANN P, et al. Thermal interaction between tunnel ground heat exchangers and borehole heat exchangers[J]. Geomechanics for energy and the environment, 2017, 10: 29-41.
- [14] BIDARMAGHZ A, NARSILIO G A, JOHNSTON I W, et al. The importance of surface air temperature fluctuations on long-term performance of vertical ground heat exchangers[J]. Geomechanics for energy and the environment, 2016, 6:35-44.
- [15] BIDARMAGHZ A, MAKASIS N, NARSILIO G A, et al. Geothermal energy in loess[J]. Environmental geotechnics,

- 2016, 3(4):225-236.
- [16] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1974, 3(2):269-289.
- [17] MOORMANN U D H C, BUHMANN D P, FRIEDEMANN D W, et al. Tunnel geothermics: international experience with renewable energy concepts in tunnelling[J]. Geomechanics and Tunnelling, 2016, 9(5):467-480.
- [18] 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):571-676, 585.
- [19] LIU J Q, ZHOU C. Thermo-hydro-mechanical behaviour of geothermal energy tunnel in different ground conditions[J]. Computers and geotechnics, 2022, 151: 104954.

## Heat exchange performance and thermal deformation of energy tunnels considering groundwater seepage and air flow

YU Shulin<sup>1</sup>, CEN Duofeng<sup>1,2</sup>, XIA Caichu<sup>1,2</sup>

( 1.Institute of Rock Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Key Laboratory of Energy Geostructure, Ningbo 315211, China )

**Abstract:** In order to study the effects of groundwater seepage and air flow on heat exchange performance of energy tunnels and the possible thermal deformation caused by them, a coupled numerical model considering the thermal interaction between groundwater seepage and air flow in the tunnels was established by taking the Stuttgart-Fasanenhof energy tunnel in Germany as a prototype. In light of different groundwater seepage directions and velocities and different air velocities, the temperature of the outlet of the tunnel heat exchanger, the heat exchange power, the temperature field of the tunnel air and the surrounding ground, and the deformation characteristics of the tunnel were simulated and analyzed. The results show that when the seepage direction is perpendicular to the tunnel trend, the larger the seepage velocity, the stronger the ground heat dissipation, and the higher the heat exchange efficiency. When the seepage direction is in the same direction as the tunnel, the larger the seepage velocity, the lower the heat exchange efficiency, but the effect is not significant. The increase of air velocity plays a role in promoting the heat exchange efficiency, but the effect is no longer significant after it being increased to a certain extent. The increase of seepage velocity has little effect on the tunnel displacement caused by thermal deformation in the vertical direction, and almost no effect in the horizontal direction. The results of this study can provide a theoretical reference for the rational design of energy tunnels.

**Keywords:** energy tunnel; heat exchange performance; thermal deformation; seepage; air velocity

( 责任编辑 史小丽 )