



## 关闭/废弃矿井井筒蓄热特性多物理场耦合研究

张国庆 刘展 褚召祥 郝富瑞 杨利亚 何鹏

### 引用本文:

张国庆, 刘展, 褚召祥, 等. 关闭/废弃矿井井筒蓄热特性多物理场耦合研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 149–161.

ZHANG Guoqing, LIU Zhan, CHU Zhaoxiang. Multi-physics coupling study on thermal energy storage characteristics in closed/abandoned mine shafts[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 149–161.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1496>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 废弃矿井蓄洪储能与取热综合利用模式研究

Energy storage via storing flood in abandoned mines and low temperature heat energy utilization from mine water

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 197–204 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0323>

##### 废弃煤矿压缩空气储能研究现状与发展趋势

Research status and development trend of compressed air energy storage in abandoned coal mines

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 163–176 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0131>

##### 深部矿井煤炭地热协同开采系统研究

Research on coal-geothermal collaborative exploration system in deep mines

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 87–94 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0650>

##### 废弃矿井可采煤层群瓦斯资源特征及其应用

Characteristics and applications of gas resources in abandoned coal seam groups within mining areas

煤炭科学技术. 2025, 53(3): 161–173 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1793>

##### 关闭矿井采空区破碎岩体再断裂机制及空隙结构演化特性

Research on re-fracturing mechanism and cavity structure evolution characteristics of broken rock mass in goaf of closed mine

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 104–114 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1802>

##### 晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展

Research progress on surface drainage of coalbed methane in abandoned mine gobbs of Jincheng Mining Area

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 204–211 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6f9a3691-b7fb-4cfa-889f-363b9fadbf0c>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张国庆, 刘展, 褚召祥, 等. 关闭/废弃矿井井筒蓄热特性多物理场耦合研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 149–161.

ZHANG Guoqing, LIU Zhan, CHU Zhaoxiang, *et al.* Multi-physics coupling study on thermal energy storage characteristics in closed/abandoned mine shafts[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 149–161.

## 关闭/废弃矿井井筒蓄热特性多物理场耦合研究

张国庆<sup>1</sup>, 刘展<sup>1,2</sup>, 褚召祥<sup>1,2,3,4</sup>, 郝富瑞<sup>3</sup>, 杨利亚<sup>3</sup>, 何鹏<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 深地科学与工程云龙湖实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 自然资源部矿山生态效应与系统修复重点实验室, 北京 100081; 4. 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室, 山东 青岛 266101)

**摘要:** 对关闭/废弃矿井遗留设施及空间进行重构改造实现矿山地质能源再生利用是实现“双碳”目标的有效方式。为探究关废矿山竖井储热的技术可行性, 提出一种基于同轴套管式换热器的井筒循环蓄水储热方案。首先, 构建了矿井水-岩土非稳态流固耦合传热数学模型, 以徐州卧牛山煤矿副井(井深200 m)为研究对象开展井筒蓄热特性数值模拟, 通过与3组试验数据对比, 验证模型的适用性; 其次, 分别针对自然冷却工况下的矿井水保温性能和蓄热模式下的运行特性进行数值模拟, 开展参数敏感性分析。结果表明: 在快速蓄热后进入自然冷却阶段时, 井筒矿井水的热损失呈二阶指数衰减特性, 集中于蓄热后的10 d内, 此期间热量损失占100 d累计热损失的29.73%; 高地温梯度( $\geq 0.03$  k/m)能起到抑制自然对流换热和深层矿井水散热的作用, 有利于井筒深部矿井水的保温; 井筒长径比与矿井水热损失大小在短期内正相关, 但长径比较大的井筒矿井水长期储存后的平均温度较高, 也更利于蓄热后供暖季的地热回收利用, 综合分析后建议矿井井筒储热长径比范围为30~50。蓄热模式下, 提高注入流量能够在短期内迅速加热矿井水至所需温度, 但破坏了矿井水温度分层结构, 导致储热效率显著降低; 增加上游热源温度会导致轴向水温梯度和储热效率提升、热损失降低, 故蓄热性能相对更优。此外, 在井壁不采取保温措施的情况下, 对于太阳能跨季节井筒矿井水蓄热系统, 建议蓄水容积与集热面积比 $R_v$ 取2.5~3.0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, 以保证矿井水温度达到长期供暖要求。

**关键词:** 废弃矿井; 同轴套管换热器; 储热; 地温梯度; 长径比

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)04-0149-13

### Multi-physics coupling study on thermal energy storage characteristics in closed/abandoned mine shafts

ZHANG Guoqing<sup>1</sup>, LIU Zhan<sup>1,2</sup>, CHU Zhaoxiang<sup>1,2,3,4</sup>, XI Furui<sup>3</sup>, YANG Liya<sup>3</sup>, HE Peng<sup>4</sup>

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Yunlong Lake Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory of Mine Ecological Effects and Systematic Restoration, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 4. Key Laboratory of Geological Safety of Coastal Urban Underground Space, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266101, China)

**Abstract:** Repurposing closed/abandoned mine spaces for renewable energy development serves as an effective approach to achieving carbon peaking and neutrality goals. To explore the technical feasibility of thermal energy storage in abandoned vertical shafts, this study proposes a cyclic water storage system based on coaxial borehole heat exchangers. A transient fluid-solid coupled heat transfer model was developed to characterize thermal interactions between mine water and geotechnical materials. Numerical simulations of thermal storage characteristics were conducted on the approximately 200 m-deep auxiliary shaft of the Xuzhou Woniushan Coal Mine, with model validation achieved through comparison with three experimental datasets from literature. Subsequently, parametric sensitivity analyses were per-

收稿日期: 2024-10-21

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 陈思成

DOI: 10.12438/cst.2024-1496

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42230704); 徐州市科技计划资助项目(KC23383); 自然资源部矿山生态效应与系统修复重点实验室开放基金资助项目(MEER-2023-09)

作者简介: 张国庆(1999—), 男, 安徽肥西人, 硕士研究生。E-mail: 2495059002@qq.com

通讯作者: 褚召祥(1987—), 男, 山东菏泽人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: chulongxiang@cumt.edu.cn

formed to investigate the thermal insulation performance of mine water under natural cooling conditions and the operational characteristics under the thermal storage mode. The results indicate that during the natural cooling phase following rapid heat storage, the thermal loss of shaft mine water exhibits second-order exponential decay characteristics, with 29.73% of the cumulative 100-day heat loss concentrated within the initial 10-day period; higher geothermal gradients ( $\geq 0.03$  k/m) suppress natural convection and reduce deep-layer heat loss, enhancing thermal preservation; shaft slenderness ratio exhibits a positive correlation with short-term heat loss, yet facilitates higher average water temperatures after long-term storage, favoring geothermal recovery during heating seasons. After comprehensive consideration, a slenderness ratio of 30–50 is recommended for thermal energy storage in mine shafts. Under thermal storage mode, increasing the injection flow rate can rapidly elevate mine water temperature to the desired level in the short term, but this disrupts thermal stratification, significantly reducing storage efficiency. Conversely, raising the upstream heat source temperature enhances the axial water temperature gradient and storage efficiency while decreasing the ratio of heat loss, thus relatively improving thermal storage performance. Moreover, in solar seasonal thermal storage systems without insulation measures on the shaft, a volume-to-collector area ratio ( $R_v$ ) of 2.5 to 3.0  $\text{m}^3/\text{m}^2$  is advisable to ensure mine water temperatures meet long-term heating demands.

**Key words:** abandoned mine; coaxial borehole heat exchanger; thermal energy storage; geothermal gradient; slenderness ratio

## 0 引言

近年来,随着我国煤炭资源的不断开采和能源结构的改革调整,许多资源枯竭、不符合生产要求的矿井已关停或即将关停,随之而来大量关闭/废弃矿井的资源化再生利用成为一个亟待解决的问题<sup>[1-3]</sup>。同时,清洁能源的储存与利用是实现“双碳”目标的重要途径。在储能方面,国内外对利用关闭/废弃矿井井巷和采空区等进行抽水蓄能<sup>[4-5]</sup>(Pumped Hydroelectric Storage, PHS)、压缩空气储能<sup>[6]</sup>(Compressed Air Energy Storage, CAES)和储热<sup>[7-8]</sup>(Thermal Energy Storage, TES)进行了许多研究。相比在地面上建造额外空间储存热能,利用已有地下空间储热<sup>[9-10]</sup>具有建设运行成本低、储存周期长、储能容量大和不占用地面空间的优势。目前,地下储热方式主要有地埋管储热、水箱储热、含水层储热、砾石-水储热和洞穴储热。矿井储热(Mine Thermal Energy Storage, MTES)一般是指利用关废矿井遗留设施和空间进行显热或潜热热能储存,具有广阔的发展前景。

目前,国内外学者已对矿井储热开展了部分探索性理论、模拟和试验研究。GUO等<sup>[11]</sup>基于Tough2软件建立了废弃矿井采空区多孔介质模型,以描述注入水在热储层的流动和传热规律。王健<sup>[12]</sup>建立了考虑渗流特性的热-水-力(THM)耦合数值模型研究不同开采工况(抽采流量、回灌尾水温度和井距)对采空区储热蓄冷系统运行效率的影响。PHILIPPE等<sup>[13]</sup>在Saint-Maximin旧石灰岩矿巷道搭建蓄水池进行蓄热试验,并基于COMSOL开展了蓄热温度80℃、蓄热时长6月的三维非稳态数值试验。LI等<sup>[14-15]</sup>求解了一种周期性温度边界条件下多层岩石瞬态热传导的解析解,基于Fluent建立了矿井充填采空区闭环蓄/取热数值模型。SUN等<sup>[15]</sup>提出利用

地源热泵提取废弃矿山地热能,建立了单U型管换热管道流模型,并在此基础上对管群传热性能进行了优化。

由上可知,目前国内外对于MTES的研究大多是针对矿井中的巷道或采空区空间进行水热型地热回收,开展矿山回填后地埋管闭环传热的试验或模拟分析,而聚焦于利用关闭矿山废弃的大量井巷设施及空间进行热能储存的研究相对较少。矿山立井井筒支护强度高、服役寿命长、纵向空间大<sup>[16-17]</sup>,相对巷道和采场更适合开展地下储热。此外,对于浅层(钻孔深度在200 m以内)地热能的开发,传统的地埋管换热器通常钻孔深度在100 m左右,实际使用尚且面临用地不足的问题,利用矿井井筒可大大节约钻孔成本,提高可行性。例如,WANICZEK等<sup>[18]</sup>提出一种将压缩空气与固体储热材料结合、放置于废弃竖井中的混合储能系统,并在此基础上分析了该储热罐的性能。SILVA等<sup>[19]</sup>通过数值模拟研究了围岩岩性对地下淹没矿房中循环储热能力和热回收率的影响,并将可多年运行提取的低焓矿井水热与煤炭等其他能源进行经济性对比分析。结果表明:在30 a内矿井水回收热量的累积价值相当于采煤获得的理论货币价值。

笔者以徐州关闭/废弃卧牛山煤矿副井井筒为研究对象,提出重构井筒后利用同轴套管换热器(以开环方式)循环蓄水储热技术方案。在此基础上建立了立井蓄热的流固耦合数值模型,采用COMSOL软件分别模拟自然冷却模式和长期储热模式下井筒矿井水流动传热情况,分析地温梯度、岩土热物性、筒体长径比、注入流量和温度等因素对蓄热性能的影响。研究结果可为关闭/废弃矿井井筒矿井水储热和地热回收的实施提供参考。



## 1 矿井水-岩土耦合蓄热模型

### 1.1 矿井概况及初始温度场测定

卧牛山煤矿,位于徐州市铜山区西郊九里山大彭镇境内,曾是徐州矿务集团主力矿井之一,于1962年建成投产,2008年关闭。矿井地面共布置主、副井和西、东两风井,其中,副井净断面为圆形,净径4.5 m,井筒壁厚0.35 m,生产时期连通-150 m与-330 m 2个水平,担负矿井进风任务。

受条件所限该矿井暂无法开展现场蓄热试验,主要在技术上模拟预研井筒储热的可行性。设计了一种重构废弃井筒蓄/取热方案:在井盖保持密封且底部充填的基础上打钻开孔、安装同轴套管,根据实际需要选择采取壁后注浆保温和防渗措施,建设高160 m、容积约2 500 m<sup>3</sup>的蓄水池,潜水位在地表下18 m处,结构设计如图1所示。井筒跨季节蓄热的基本原理为:非供暖季,来自热源的上游各分支管集中通过换热器的外腔/内管往井筒内充注热水,同时从内管/外腔取冷水,经过外端热源加热后回灌,如此循环。冬季与非供暖季循环原理类似,不再赘述。

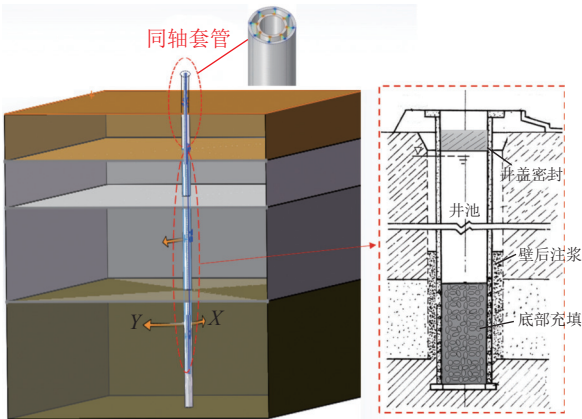


图1 井下蓄热水池示意

Fig.1 Schematic diagram of underground heat storage reservoir

矿井地下水和地层温度场的初始值对数值计算结果有重要影响。为建立符合工程背景的数值仿真模型,现场钻孔后通过道万直读式温深仪(图2)测定自然条件下的井水温度 $T$ 分布如图3所示。可以看出,地表下8~32 m处矿井水温度恒定,几乎不受气温波动影响,可认为周围地层为恒温带。深度 $D>32$  m的较深层围岩处于增温带,在大地热流作用下形成约0.023 4 k/m的地温梯度。

### 1.2 数学模型

#### 1.2.1 基本假设

关闭/废弃矿井井筒水体储热问题复杂。为便于模拟研究,作出假设:①考虑到地下井筒距地表较深,

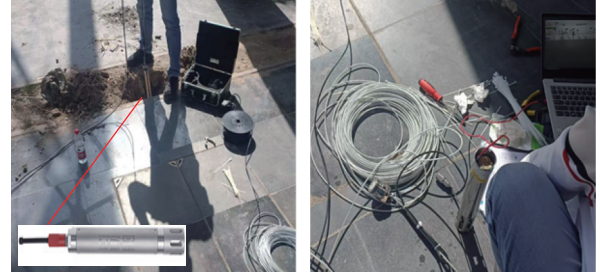


图2 矿井水温度测试现场环境

Fig.2 Mine water temperature testing field environment

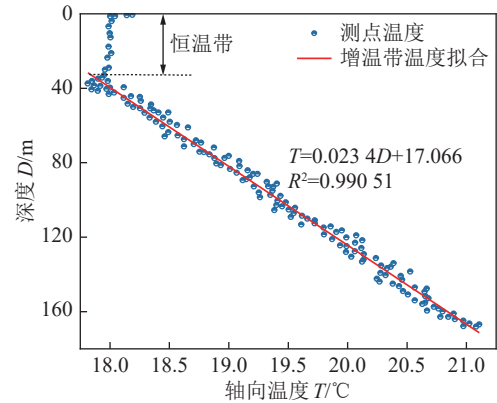


图3 自然状态下矿井水轴向温度分布

Fig.3 Axial temperature profile of mine water under natural conditions

顶部盖层保温隔热措施良好,不受地表温度波动的影响;②由于矿井水的矿化度很小,忽略矿井水内部矿物质的水化反应放热和流体流动黏性耗散所产生的热和摩擦损失;③将围岩假设为各向同性且均匀的固体介质,不考虑地下水水分迁移对传热的影响。④管道与蓄水池盖层之间接触良好,忽略接触热阻和换热器自身污垢热阻。

#### 1.2.2 控制方程

储热过程中地下蓄水坝体的热质传递过程整体遵循连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

流体的连续性方程即质量守恒方程,可表达为

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: $\rho_f$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $t$ 为运行时间,s;  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 分别代表流体微元在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的速度分量,m/s。

作为不可压缩流体,水的密度在一定温度范围内变化很小,若看作常数,即 $\rho_f = \text{const}$ ,则此时式(1)简化为

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

不可压缩流体动量守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho_f u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho_f f_x \\ \frac{\partial(\rho_f v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho_f f_y \\ \frac{\partial(\rho_f w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f w \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho_f f_z \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{V}$  为流体微元体的速度向量;  $p$  为流体微元体的压力, Pa;  $\boldsymbol{\tau}$  为微元体表面的切向应力, Pa;  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的单位质量力,  $\text{m/s}^2$ 。

地下井筒中流体能量守恒基本控制方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}T) = \nabla \cdot (a \nabla T) + S_T + Q_V \quad (4)$$

式中:  $a$  为热扩散率,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $S_T$  为黏性耗散项;  $Q_V$  为体积热源项。

其中, 若将进出水管道内的流体流动简化看作轴向速度梯度为 0 的一维塞流并忽略黏性耗散, 采用图 4 所示的热阻网络描述传热过程, 则内套管的温度分布<sup>[20]</sup> 可表示为

$$A_i \rho_f c_p \left( \frac{\partial T_{f1}}{\partial t} - v \frac{\partial T_{f1}}{\partial z} \right) - A_i \lambda_f \frac{\partial^2 T_{f1}}{\partial z^2} = \frac{(\partial T_{f2} - \partial T_{f1})}{R_1} \quad (5)$$

式中:  $A_i$  为内管的横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $c_p$  为流体恒压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $v$  为管内流速,  $\text{m/s}$ ;  $\lambda_f$  为流体导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $T_{f1}$ 、 $T_{f2}$  分别为内管和环腔中流体温度,  $\text{K}$ ;  $R_1$  为单位长度热阻,  $\text{m} \cdot \text{K}/\text{W}$ , 其计算公式为

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_1 h_1} + \frac{1}{2\pi \lambda_t} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{1}{2\pi r_2 h_2} \quad (6)$$

式中:  $r_1$  为内管内径,  $\text{m}$ ;  $r_2$  为内管外径,  $\text{m}$ ;  $\lambda_t$  为管壁导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $h_1$ 、 $h_2$  分别为内管和环腔中流体与管壁面间的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

内外管之间的环腔也可表示为

$$A_o \rho_f c_p \left( \frac{\partial T_{f2}}{\partial t} - v \frac{\partial T_{f2}}{\partial z} \right) - A_o \lambda_t \frac{\partial^2 T_{f2}}{\partial z^2} = \frac{(T_{f1} - T_{f2})}{R_1} + \frac{(T_{\text{wall}} - T_{f2})}{R_2} \quad (7)$$

式中:  $A_o$  为环腔的横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $T_{\text{wall}}$  为外管道外壁温度,  $\text{K}$ ;  $R_2$  为单位长度热阻,  $\text{m} \cdot \text{K}/\text{W}$ , 其计算公式为

$$R_2 = \frac{1}{2\pi r_3 h_3} + \frac{1}{2\pi \lambda_t} \ln \frac{r_4}{r_3} \quad (8)$$

式中:  $r_3$  为外管内径,  $\text{m}$ ;  $r_4$  为外管外径,  $\text{m}$ ;  $h_3$  为流体与外管内壁间的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

管内对流换热系数  $h$  可用 Gnielinski 特征数方程<sup>[21]</sup> 计算

$$h = \frac{\lambda_f (f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3} - 1)d_e} \quad (9)$$

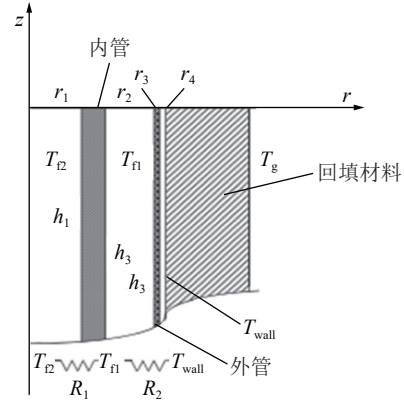


图 4 套管式换热器热阻网络

Fig.4 Thermal resistance network of double-pipe heat exchanger

式中:  $f$  为达西摩擦因子;  $d_e$  为当量直径, 为 4 倍截面积与湿周长度之比,  $\text{m}$ ;  $Re$  为雷诺数;  $Pr$  为普朗特数。

套管外的井筒矿井水考虑径向流动, 因此不简化为一维管道流, 但与管内流体流动守恒。

对于围岩, 若忽略孔隙水或裂隙水的流动, 即忽略对流弥散作用, 仅考虑其均质整体(含孔隙水)的热传导, 则其温度分布遵循非稳态导热微分方程

$$\rho_r c_p \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_r \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_r \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_r \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) \quad (10)$$

式中:  $\rho_r$  为岩土密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_r$  为岩土比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\lambda_r$  为岩土导热率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

### 1.2.3 初始条件和边界条件

为确定水体散热的热影响半径, 对于自然冷却工况, 初始条件为: ① 井筒内充满温度均匀的高温热水; ② 徐州地区恒温带温度一般为  $16.6 \sim 17.1^\circ\text{C}$ , 略高于年平均气温<sup>[22]</sup>。参考 1.2.2 节的现场勘测结果, 将地表下  $10 \sim 30 \text{ m}$  (模型中取  $z=0 \sim -20 \text{ m}$ ) 设置温度为  $17^\circ\text{C}$  的恒温黏土层, 在恒温带以下的变温岩土带设置  $0.023 \text{ K/m}$  的地温梯度。

蓄热工况下, 矿井原始水温与周围地层温度一致; 水体顶部初始参考压力为大气压力,  $101325 \text{ Pa}$ 。

数值模拟计算的边界条件如下。

1) 地面  $10 \text{ m}$  以下处可以忽略地表温度波动的影响, 且井筒轴向的两端面积远小于井筒侧壁面面积, 换热量较小, 可设置计算域围岩的顶部和底部两端为绝热面, 即

$$\partial T / \partial z = 0 \quad (11)$$

2) 在井筒内水体蓄热的过程中, 热量向围岩的扩散需要一定时间, 故将所计算区域围岩边界(根据

热影响半径确定)设置为恒定温度条件,不受蓄热影响,其轴向温度分布为

$$T(z) = \begin{cases} 17, & -20 < z < 0 \\ 17 - 0.023(z + 20), & h < z \leq -20 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $h$  为围岩底部深度方向坐标, m。

3) 流体和固体壁面间对流换热的热通量表示为

$$q = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} = h_i(T_w - T_f) \quad (13)$$

式中:  $\lambda_s$  为固体壁面热导率,  $W/(m \cdot K)$ ;  $h_i$  为表面对流换热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $T_w$ 、 $T_f$  分别为壁面和流体的温度,  $K$ 。

4) 对于自然冷却工况设置压力点约束, 顶端表压为 0; 蓄热工况设置进水口为质量流量入口, 出水口为压力出口。进水口质量流率可表示为

$$M_s = \sum_i \rho u_i A_i \quad (14)$$

式中:  $\rho$  为入口流体密度,  $kg/m^3$ ;  $u_i$  为与换热器注水口连通的上游各支管流速,  $m/s$ ;  $A_i$  为支管横截面积,  $m^2$ 。进水口上游温度可通过检测实时出水口温度, 再调用前端热源(太阳能集热器或工业余热)对水的瞬态加热功率函数计算确定, 即

$$T_{inj} = T_o + \frac{Q_h}{c_p M_s} \quad (15)$$

式中:  $T_{inj}$  为换热器入口温度,  $K$ ;  $T_o$  为换热器出口温度,  $K$ ;  $Q_h$  为热源对流体的有效加热功率,  $W$ 。

## 2 数值建模及模型标定

### 2.1 模拟方法

基于前述数学模型和计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法, 在 COMSOL 软件中建立了废弃井筒矿井水流动及与围岩传热相耦合的数值模型, 图 5 展示了本研究的模拟计算流程图。

对井筒蓄热工况按照原始几何尺寸建模, 其剖面图如图 6 所示。矿井水中浸没的同轴套管换热器由内外两段(一长一短)热力管道组成, 管材为结构钢外敷聚氨酯保温材料。内管通至距井筒蓄水池底部 5 m 处, 长度在 190 m 以上, 外径可取 380 ~ 500 mm; 外环腔通至蓄水池顶部, 距潜水位 1 m。采用上供下回的方式, 质量流量为 9.05 kg/s, 外管半径 500 mm, 环腔宽为 250 mm 时, 相当于入口平均流速为 0.015 m/s。假设入口水温为 80 °C, 根据流体参数计算  $Re$ , 可以得出入口处的流动状态为湍流, 即

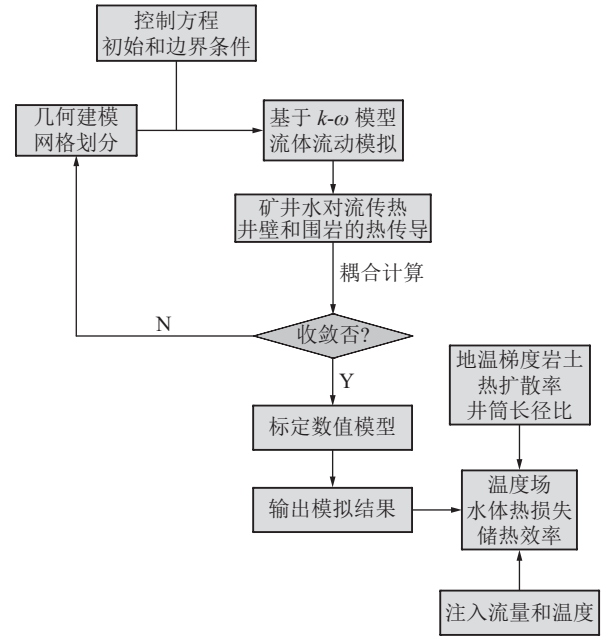


图 5 利用废弃井筒矿井水储热的数值模拟流程

Fig.5 Flow chart of numerical simulation for thermal energy storage using mine water in abandoned shafts

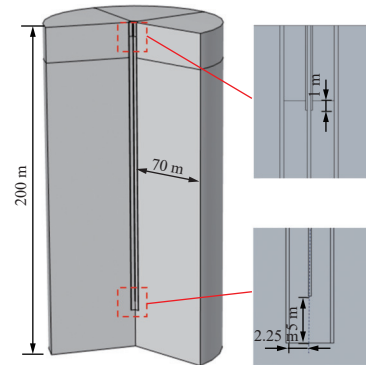


图 6 矿山井筒蓄热物理模型

Fig.6 Physical model of thermal energy storage in mine shaft

$$Re = \frac{\rho u_{inj} d_e}{\mu} = 18\,225 > 2\,300 \quad (16)$$

式中:  $u_{inj}$  为入口流速,  $m/s$ ;  $\mu$  为动力黏度,  $Pa \cdot K$ 。

目前在工程上常用的分析湍流的模型有标准  $k-\varepsilon$  模型、Realizable  $k-\varepsilon$  模型、 $k-\omega$  模型、SST(Shear Stress Transport)和 LES(Large Eddy Simulation)等, 本文选择双方程 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)  $k-\omega$  湍流模型, 采用壁函数对壁面处理。相比  $k-\varepsilon$  模型, 其在计算内部流动时结果更加精确。

计算区域上部 20 m 深度范围内地层为黏土, 下部为砂岩、砂页岩和灰岩互层, 可取平均值估计, 岩土热物性参数参考徐州市实际地热能开发研究项目的实测结果<sup>[23]</sup>。作为循环工质的水在 15 ~ 90 °C 范围的热物性参数来源于 NIST(National Institute of Standards and Technology)热力学数据库, 在此温度



范围内水的密度和比热容变化不大,取 30 ℃ 作为参考温度。模型相关计算参数和材料参数见表 1、表 2。

表 1 模拟计算参数  
Table 1 Simulation calculation parameter

参数	数值	参数	数值
井底深度/m	178	注水深度/m	19
井筒净径/m	5.2	取水深度/m	173
内管半径/mm	130	恒温带土壤温度/℃	15
外管半径/mm	225	地温梯度/(K · m <sup>-1</sup> )	0.023
管厚/mm	2	入口水温/℃	80
围岩半径/m	70	入口流量/(kg · s <sup>-1</sup> )	9.05
地层深度/m	200	初始水温/℃	15

表 2 模型相关材料参数  
Table 2 Material parameters related to the model

材料类型	比热容/ (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	热导率/ (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )
黏土	1 600	1 890	1.79
砂岩	830	2 780	1.81
砂页岩	1 370	2 380	1.44
灰岩	1 195	2 680	2.57
混凝土	920	2 500	1.74
管材	1 340	1 760	0.17
水	4 180	995.62	0.61

由于模型在几何结构上对称,根据对称面选取整体的一半区域作为建模计算对象,或在必要时简化为二维轴对称模型。为在求解大型非线性模型中保证较高的鲁棒性的同时节省计算内存,采用 Boussinesq 假设处理热浮力流;瞬态求解器使用全耦合(Fully Coupled)方法结合代数多重网格(Algebraic Multi-Grid, AMG)迭代求解器,基于广义最小残差法求解非线性方程组;时间步进采用隐式向后差分公式(Backward Differentiation Formula, BDF)。

2.2 模型标定与验证

目前利用废弃矿井井筒储热的案例相对较少。本文建立的数学模型是针对用于改造井筒的同轴钻孔换热器(BHE)构建的,并在此基础上开展模拟。此外,与油气行业中枯竭/废弃油气井改造为地热井类似,仅在尺寸上有差异。重构后矿井井筒整体可看作由内管与 1 个上部直径较小、下部直径较大且相互连通的环腔组成的中浅层大型同轴套管地热换热器。下部筒体可储存温度高于 50 ℃ 的热水,相当于对矿井水和井筒周围地层岩土耦合蓄热。

2.2.1 网格无关性验证

数值模型网格质量对计算流体力学(CFD)模拟结果的可靠性至关重要。本文三维模型网格划分采用用户控制的非结构化四面体网格,管道壁设置为薄层结构,周围进行局部加密。流固边界处划分边界层网格,对计算结果影响较小的岩体径向远端部分设置相对稀疏的网格。

选择进口温度 80 ℃、流量 9 kg/s 的边界条件,井筒和围岩初始温度均为 19.1 ℃ 的初始条件对数值模型进行网格无关性验证。检测不同网格数下连续蓄热 7 d 后测点 A(x=0.5 m, y=0 m, z=-20 m)、测点 B(x=0.5 m, y=0 m, z=-40 m)、测点 C(x=0.5 m, y=0 m, z=-60 m)处温度情况,如图 7 所示。可以看出,当划分网格数由 57 万增至 81 万时,各测点温度均没有出现明显差异,可以认为此时已达到了模拟需要的计算精度,出于节省计算资源考虑,可选择数量为 577 672 的网格进行后续立井蓄热数值模型的计算。

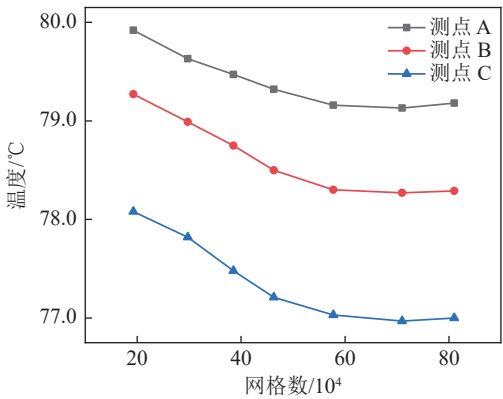


图 7 网格数量无关性验证

Fig.7 Validation of grid mesh sensitivity

2.2.2 案例 1

为使得数值模型的输出尽可能地接近实际储热系统的观测数据,选取 HOLMBERG 等<sup>[24]</sup>对于中深层同轴 BHE 蓄热性能研究的试验数据,对模型进行标定并验证。该热响应测试采用聚乙烯作为 BHE 的管材,中心套管底部在地下 182 m 深,从地下 17 m 处测量 BHE 的进出口温度,实际有效长度 165 m。井筒及围岩初始温度均为 8.5 ℃,水作为载热循环工质,由内管进、外环腔出,调整参数如表 3 所示。

图 8 为运行 57.8、99.1 h 后井筒内不同深度流体温度分布的模拟结果与实测结果对比。随着深度的增大,内管、环腔内流体的温度分别减小、增大,这与文献 [24] 趋势相符。在不同测点处流体温度的平

表 3 案例 1 数值模拟参数

Table 3 Numerical simulation parameters of case 1

参数	数值	参数	数值
围岩热导率/(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	3.53	钻孔直径/mm	115
外管直径/mm	114	内管直径/mm	40
管壁热导率/(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	0.42	内管壁厚/mm	2.4
质量流率/(kg · s <sup>-1</sup> )	0.57	加热功率/kW	6.35

均相对误差为 0.7%，偏差较小，这表明本文采用的方法建立数值模型具有可行性。

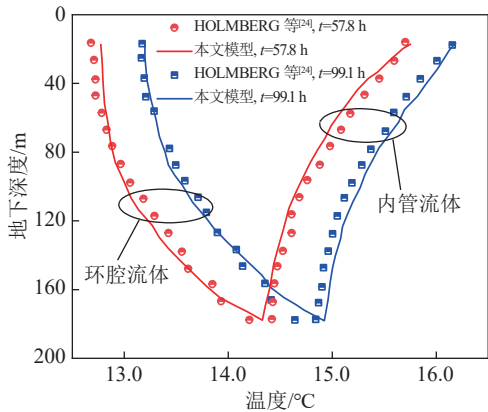


图 8 模拟结果与实测数据对比

Fig.8 Comparison of simulation results with measured data

2.2.3 案例 2

试验来自文献 [20]，其搭建的微型试验平台主要由能量供给装置(恒温水箱)、同轴套管换热器、储热砂箱、转子流量计、热电偶和数据采集装置组成。循环水以恒定温度流入环形空间，再从内管顶部流出。调整本文模型相关参数见表 4。在距土壤顶部 0.35 m、钻孔中心轴线 0.08 m 处和距土壤底部 0.35 m、钻孔中心轴线 0.08 m 处设置 2 个测点检测土壤温度，图 9 展示了 2 个测点在 72 h 内的温度变化，对比可以发现各测点试验数据与模拟的温度变化趋势基本相同，经过连续不断地向砂箱蓄热装置循环充注定温热水，土壤的温度在开始阶段迅速上升，运行 24 h 后趋于稳定。

数值模拟计算得到的土壤测点温度略低于实验值，上升较为缓慢，造成偏差的原因可能是试验中土壤的温度受外界(环境温度波动等)影响较大，而在模拟条件下忽略了这些因素。两测点实测数据与模拟值变化趋势一致，平均误差为 5.8%，在允许的工程计算偏差范围内，验证了本文所建立的井筒蓄热工况数理模型及计算方法的合理性。

2.2.4 案例 3

为进一步验证深井蓄/取热模型的准确性，选取

表 4 案例 2 数值模拟参数

Table 4 Numerical simulation parameters of case 2

参数	数值	参数	数值
土壤热导率/(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	1.8	钻孔深度/m	1.4
土壤密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	998	土壤比热容/(J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	957
钻孔直径/mm	150	内管直径/mm	22.5
管壁厚度/mm	2	外管直径/mm	67.5
质量流率/(kg · s <sup>-1</sup> )	0.028	进口温度/°C	41

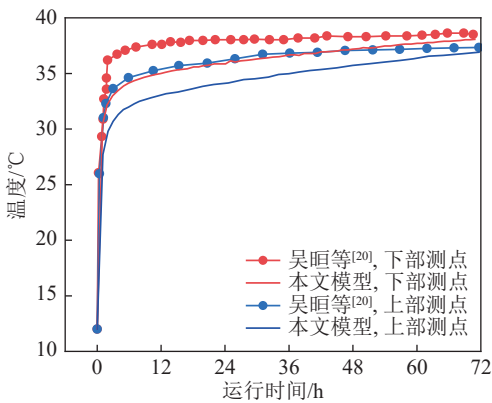


图 9 模拟结果与试验数据对比

Fig.9 Comparison between simulation results and measured data

废弃油井地热回收的相关文献中数值解进行了对比，参数及边界条件见文献 [25]。从图 10 可以看出，生产热水 1 a 后环空和内管内部流体的温度分布随深度的变化趋势一致，数值上相对误差较小。该废弃油井取热和矿井井筒蓄热过程在本质上原理相同，可以间接验证本文数值模型及方法的可行性。造成误差的原因可能是所采用的湍流模型公式和时间步进方法存在一定差异。

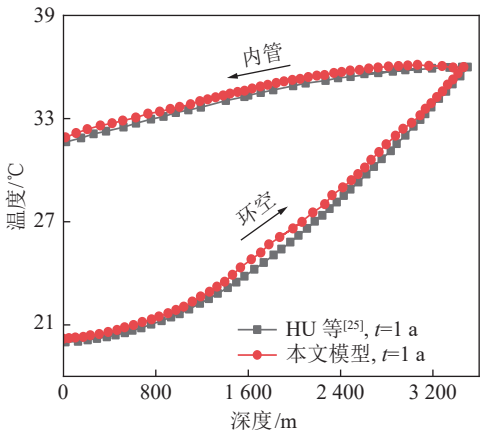


图 10 模拟结果与文献[25]数值解对比

Fig.10 Comparison of simulation results with numerical solutions in the Ref. [25]



### 3 模拟结果分析

#### 3.1 自然冷却工况

##### 3.1.1 储热温度及热损失非稳态演化特性

露天情况下,地球表层水体受到太阳辐射等环境影响、会出现“温跃层”,并在温跃层内出现明显温度梯度变化。主要研究地下矿井井筒内热水(盐度忽略不计)在自然冷却状态下与围岩间的对流换热特性,并分析不同外在条件下的热分层情况。

不考虑储热期,假设在围岩尚未受传热影响的情况下,井筒内已快速充注满 50 ℃ 温度均匀的水,此时停止充水,入口速度为 0。围岩恒温层  $T_0=16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,增温层地温梯度  $0.023\text{ K/m}$ 。三维模型尺寸  $160\text{ m}\times 160\text{ m}\times 160\text{ m}$ ,围岩上层为 12 m 深的黏土,下层为灰岩,筒体底部距表面 160 m。

自然散热期(3 a)井筒内平均水温 and 壁面处平均热流密度变化如图 11a 所示。可以看出,水与围岩间由于存在温差而整体平均温度逐渐减小,且减小速率不断降低,600 d 后平均水温达到 20 ℃ 左右,之后趋于平稳。储存 3 a 后,水平均温度仅比围岩高 0.69 ℃。初始阶段,热水与壁面间温差最大,壁面处对流换热的热流密度也处于最大值,热水迅速被冷却。而在 0~100 d 时间段平均热通量急剧下降,说明该阶段热损失最大,热水所含有的热量迅速转移到了井筒周围地层中,相当于对岩土蓄热。储存 400 d 后,自然对流换热平均热流密度趋近于 0,可以认为此时井筒内热水与围岩之间的传热以热传导为主。

为了进一步研究 0~100 d 时间段的传热特性,采用非线性回归分析方式,经过多次迭代得出井筒水体瞬态热损失随时间呈二阶指数衰减函数变化,如图 11b 所示。可以看出,热损失在前 10 d 急剧下

降,到第 10 d 时热损失  $q_1$  为 10.33 kW。前 10 d 损失的总热量计算公式为

$$Q_1 = \int_0^{t_1} q_1 dt = 63.46\text{ GJ} \quad (17)$$

同理,经过计算得出热水储存 100 d 损失热量 213.47 GJ,3 a 共损失热量  $Q_t=350.46\text{ GJ}$ 。在前 10 d 损失的热量占前 100 d 热损失的 29.73%,占 3 a 累计热损失的 18.11%。

##### 3.1.2 地温梯度和岩土热扩散率对自然散热影响

图 12 展示了不同地温梯度  $G$  下热水自然冷却 320 d 后地下热储沿井筒长度方向的温度场,图 13 展示了立井深度方向的平均水温分布曲线图。可以看出,在不考虑地温梯度的情况下,相当于热储层整体受远端温度均匀且热通量不断减小的边界热源冷却,此时水体沿井筒轴向温度梯度较小,由水温不同而产生的密度差异也很小,热分层并不明显。水体顶层平均温度为 22.97 ℃,底层 21.64 ℃,最大温差 1.33 ℃。随着地温梯度的增大,沿井筒轴向深度方向水温呈先降低后增加的趋势。这主要可能有两方面原因:一方面,在 -20 m 以浅的岩土恒温带,近壁面的水体在遇冷下沉过程中不会因为受额外地热影响而出现“逆温”现象,继而抑制自然对流,故水温仍可以维持上高下低的分布。随着深度的增加,在围岩进入增温带后,底部热水和围岩间温差较小,对流换热造成的热损失也相对较小。另一方面,围岩底层受到大地热流影响,等效于在一定程度上抵消了深部水体向外的散热。因此,尽管灰岩的热扩散系数比黏土高,下部水体却更容易储存热量。综上所述,针对徐州卧牛山煤矿 ( $G=0.023\text{ k/m}$ ) 废弃井筒的改造,建议在实际工程中采用保温注浆技术,以提升矿井水储热后的保温性能。

为分析矿井水自然散热对围岩介质的热扰动,

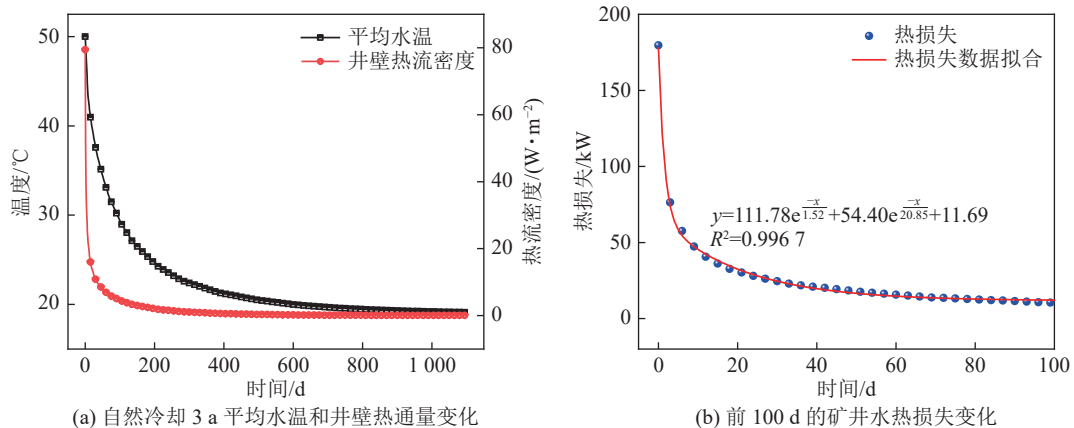


图 11 自然冷却条件下井筒内水温和散热量变化

Fig.11 Variations of water temperature and heat dissipation in shaft under natural cooling conditions

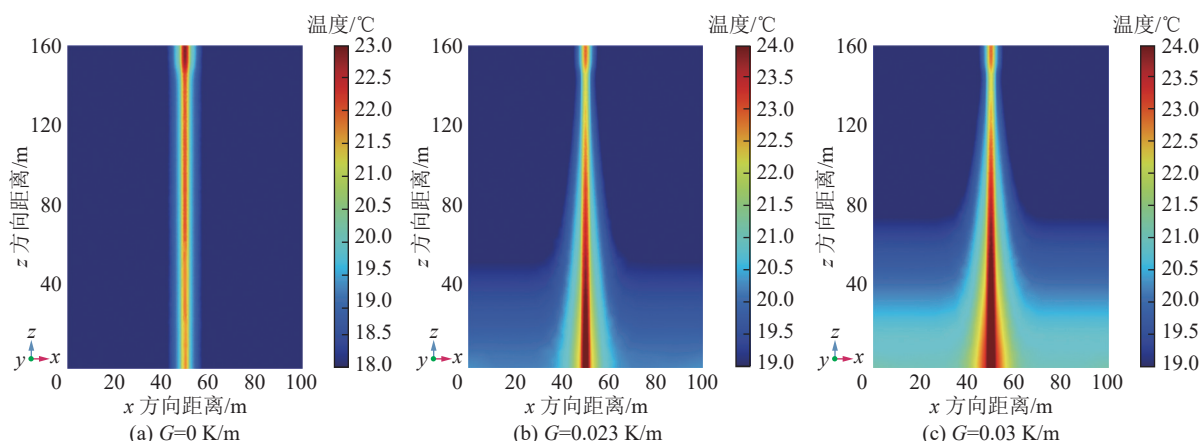

 图 12  $t=320$  d 时不同地温梯度下热储温度场

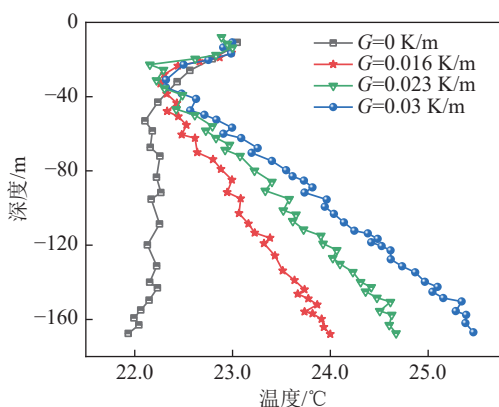
 Fig.12 Temperature field of heat storage under different geothermal gradients at  $t=320$  d

 图 13 不同地温梯度时竖井轴向水温分布( $t=320$  d)

 Fig.13 Axial water temperature profiles in vertical shafts under different geothermal gradients ( $t=320$  d)

参考地埋管换热器的热影响半径<sup>[26]</sup>, 引入不同深度井筒蓄热的热影响半径为: 岩土无量纲温度  $(T-T_0)/T_0=0.5\%$  所在位置至井筒外壁面的径向距离。其中,  $T_0$  为岩土径向远端边界温度。

图 14 展示了对于不同热扩散率的围岩, 立井中热水平均热影响半径随时间的变化。对于热扩散系数  $a=6\times 10^{-7}$ ,  $8\times 10^{-7}$ ,  $10^{-6}$   $\text{m}^2/\text{s}$  的岩土, 所对应储热 1 100 d 后热影响半径分别为 23.05、32.24、37.35 m, 增长率依次为 39.4% 和 15.9%。因此, 井筒蓄水储热的热影响半径与岩土热扩散率相关性较大。一般情况下, 当热扩散率增大, 热影响半径也随之增大, 但同比增长减少会减少, 这与黄帅等<sup>[27]</sup> 关于地埋管热影响半径的相关研究结论一致。此外, 随着储热时间增加, 热影响半径增大的速率也会逐渐减小, 第 2、3 年的平均热影响半径分别在前一年的基础上增加了 42.4% 和 16.2%。进一步模拟可得, 第 5、10、20 年, 3 类岩土的平均热影响半径分别为 38.36、57.91、105.39 m。因此针对运行时间少于 10 a 的周

期性蓄取热工况, 建议参考选择 70 m 作为井筒蓄热计算区域半径。

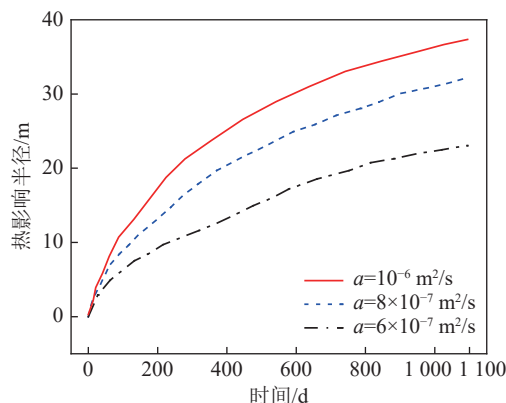


图 14 不同热扩散率下热影响半径随时间变化

Fig.14 Variation of thermal influence radius with time under different thermal diffusivity

### 3.1.3 井筒长径比对自然散热影响

在井筒蓄水容积均为  $2\,500\text{ m}^3$ , 其他参数(地温梯度、岩土物性等)相同的情况下, 模拟比较长径比  $L/d=17.5, 35.5, 54.5, 75.5$  的筒体对应的平均水温变化, 如图 15 所示。

从图 15 可以看出, 在前 400 d, 长径比越大的井筒内水体降温越快, 热损失较大, 但从另一个角度来说, 却更适宜用热水作为工质间接对岩土储热。随着冷却时间的增加, 在第 3 a 时对于长径比较大的筒体平均水温已逐渐趋于平稳, 降温速率也相对较小, 且由于地温梯度的影响, 围岩初始平均温度更高, 故最终平均水温也较高。实际在井筒跨季节蓄热运行中, 自然冷却期不会持续超过 1 a, 要使供暖季能够更多地取用矿井水中的热量, 应选用长径比较小的井筒在非供暖季进行储热; 而出于矿井水中储存的余热可能不足以维持全供暖季负荷的考虑, 在冬季

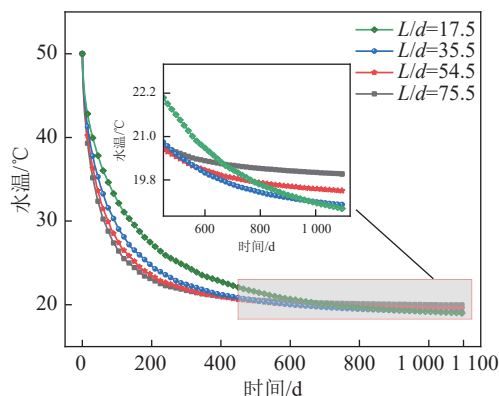


图 15 不同长径比下平均水温随冷却时间变化

Fig.15 Variation of average water temperature with cooling time under different slenderness ratio

需要同时利用井筒开发 100 ~ 300 m 深岩土中浅层地热能, 故储热井筒深度也不宜过浅, 一般  $L/d$  可取 30 ~ 50。

### 3.2 蓄热模式工况

#### 3.2.1 注入流量对蓄热性能的影响

在长期未加热的自然状态下, 井筒内矿井水与围岩间达到动态热平衡, 此时计算域整体在不同深度上均与围岩无穷远端温度相同(式(12)), 可在非供暖季开始对矿井水蓄热。模拟条件如下: 井筒长径比为 35.5, 排水管(内管)管径 0.5 m, 环空外径 1 m, 进出口方式为外环空进、内管出, 岩土恒温层温度 16.8 °C、变温层  $G=0.023$  K/m, 进水口上游温度 80 °C, 连续蓄热 150 d。图 16、图 17 展示了不同进口流量下, 出口水温、单位井深蓄热量(包括矿井水自身内能增量和向围岩的散热量)和储热效率随时间变化情况。当质量流率  $\dot{M}$ 、入口温度  $T_{inj}$  恒定时, 定义储热效率  $\eta_s$  表达式<sup>[28]</sup>为

$$\eta_s = \frac{Q_s}{Q_{ideal}} = \frac{c_p \int_0^{t_{stop}} (T_{inj} - T_{outlet}) \dot{M} dt}{\dot{M} c_p (T_{average\_inj} - T_{initial}) t_{stop}} \quad (18)$$

$$= \frac{\int_0^{t_{stop}} (T_{inj} - T_{outlet}) dt}{(T_{average\_inj} - T_{initial}) t_{stop}}$$

式中:  $Q_s$ 、 $Q_{ideal}$  分别为井筒水体实际蓄热量和理想情况下蓄热量, J;  $T_{inj}$ 、 $T_{outlet}$ 、 $T_{average\_inj}$ 、 $T_{initial}$  分别为入口温度、出口温度、蓄热过程中的平均入口温度、初始平均水温, K;  $t_{stop}$  为蓄热结束时间, s。

由图 16a 可以看出, 随着蓄热系统运行时长的增加, 取水口水温在开始迅速增加, 之后趋于平稳, 且注入流量越高, 温升越快。运行 150 d 后, 注入流量 3、5、7、9 kg/s 对应的出口水温分别为 72.32、75.21、76.55、77.29 °C。由于生产的较冷水来自井筒底部, 在忽略内部套管热短路的情况下, 这表明较低的注入流速不易破坏轴向的水温分层; 而流速较高时虽然湍流强度和流体扰动加剧, 利于短时间迅速将整体加热至接近注入温度的高温, 但却不利于后续蓄热。正如图 16b 所示, 在前 120 h 蓄热量与注入流量正相关; 在 200 ~ 600 h 对于注入流量高的井筒内部对流传热量率先趋于平稳, 因此蓄热量在这段时间较低; 而在此之后, 不论流速大小井筒内部水温均达到稳态, 对流传热量差距不大, 这时流速高更有利于与围岩间换热, 故单位井深蓄热量又与注入流量正相关。计算可知, 经过 150 d 连续运行, 注入流量  $\dot{M}=9$  kg/s 比  $\dot{M}=3$  kg/s 总蓄热量多 11.3%, 达到 2 510.18 GJ, 其中水的焓变为 638.66 GJ, 可见储存的热量大部分转移到围岩中, 热损失比(矿井水散热量与总蓄热量之比)为 74.6%。

从图 17 可以看出, 一方面, 储热效率随连续运行时间的增加而降低; 另一方面, 对于长期连续蓄热工况, 注入流量较低时储热效率更高。当注入流量

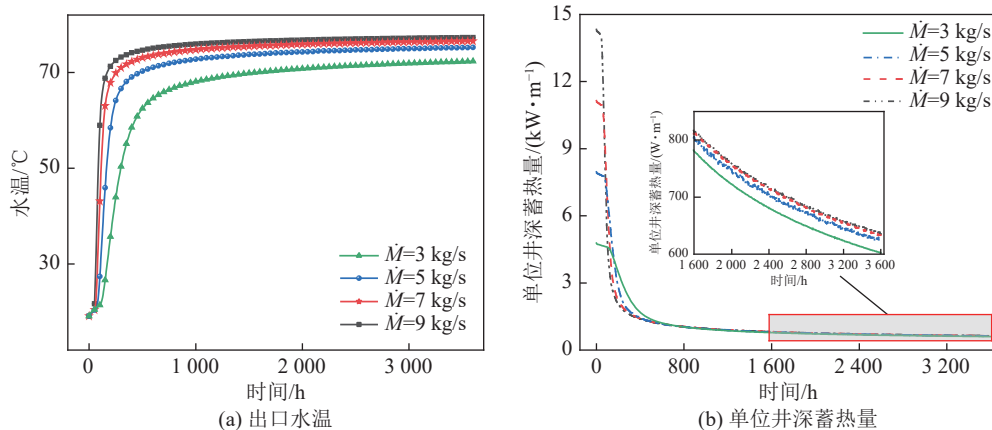


图 16 不同注入流量下生产水温和蓄热量变化

Fig.16 Variation of production temperature and heat storage capacity under different injection flow rates



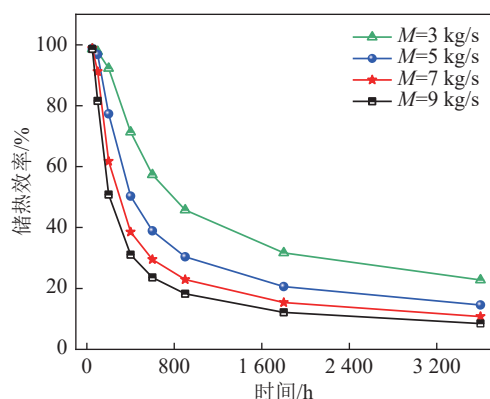


图 17 注入流量对储热效率的影响

Fig.17 Effect of injection flow rate on heat storage efficiency

由 9 kg/s 降至 3 kg/s 时,第 30 d 储热效率由 20.21% 增至 49.73%。显然,连续运行超过 30 d 后各工况储热效率均显著降低,主要原因是一定时间内井筒中矿井水所能储存的热量是有限的,而向岩土散热存在一定延迟效应。在实际蓄热运行时,应采用间歇蓄热模式,通过水温传感器检测温度,过热时停止运行,低于一定温度时再重新开启,以节约能源和提高储热效率。

### 3.2.2 注入温度对蓄热性能的影响

图 18 展示了对于 9 kg/s 的入口流量,连续蓄热 600 h 后不同注入温度下的竖井储热效率和矿井中水的热损失比。在注入流量等其他条件相同时,提高注入温度可以增大储热效率,两变量间呈二次多项式关系。这是因为在采用上供下回的进出口方式时,更高的热源温度会增大井筒轴向水温梯度,进出口温差更大,随着流动循环单位时间内直接蓄存在水中的热量也更多。

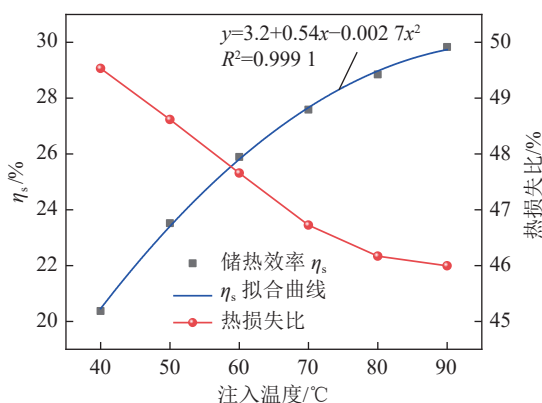


图 18 注入温度对储热效率和热损失比的影响

Fig.18 Effect of injection temperature on heat storage efficiency and heat loss ratio

此外,对于开环蓄热过程,上游热源温度越低,总体平均水温会更快地达到极大值接近稳态(局部

仍有扰动),此时以与围岩间瞬态传热为主,热损失率也因此更高,运行 600 h 蓄热量已有接近 50% 转移到围岩中。由于储热效率、水的热损失与注入温度分别正相关及负相关,且随着温度上升而变化速率减小,综合考虑储热效率和热损失,建议实际运行时入口温度可控制在 75 ~ 85 °C。

### 3.2.3 太阳能周期性间歇蓄热模拟分析

目前普遍认为,传统季节蓄热型水箱容积与集热器面积的比值  $R_v$  存在一个最优区间<sup>[29-30]</sup>,要在维持较高的太阳能保证率和集热效率的同时,不使整体水温低于所需值。参考常规跨季节太阳能蓄热系统,选取平板集热器总面积共 1 000 m<sup>2</sup>,采用串并联方式组合,平均集热器效率为 0.6,在不设保温层的情况下对容积 2 500 m<sup>3</sup>、长径比 35.5 的竖井进行了为期 5 月的周期性蓄水储热模拟。基本运行模式如下:每日 8:00—18:00 水泵开启,注入流量为 9 kg/s,其余时间关闭。当井筒底部水温超过 70 °C 时立即停止蓄热,直到温度低于 60 °C 时在白天再次开启。

基于 Meteonorm 专业气象软件获取徐州市典型年逐时气象数据,自 1 月 1 日开始。其中 45°倾斜面上太阳辐照量如图 19 所示,太阳辐射主要集中在 4—9 月。

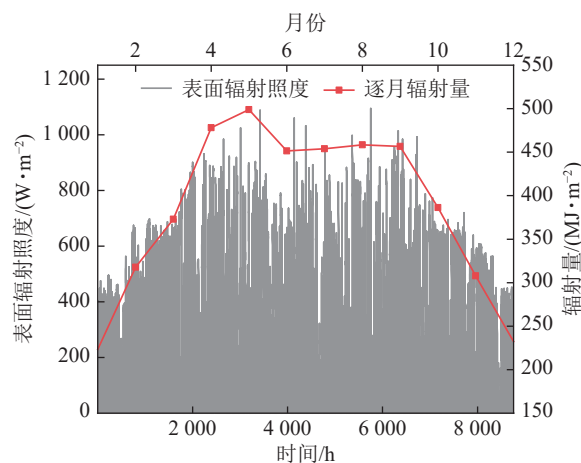


图 19 徐州市典型年太阳辐射数据

Fig.19 Typical annual solar radiation data of Xuzhou City

图 20 展示了全阶段(对应 3 000 ~ 6 600 h)井筒内平均水温和壁面热损失的变化。可以看出:在储水容积与集热器面积之比  $R_v=2.54$  的间歇蓄热工况下,随着水温不断升高,太阳能蓄热量传到围岩的热损失波动峰值增加。经计算,到 3 442 h 时平均水温方能达到 70 °C,井筒内水的焓值增量  $\Delta H$  为 550.1 GJ,水体热损失比达 70.28%,其中与地表环境间的传热损失可忽略不计,相当于以岩土蓄热为主。

之后蓄热系统停止运行,处于自然冷却状态以防止水温过高。因此,如果仅以太阳能在非供暖季对与地面储罐容积相同的地下井筒蓄水池间歇储热,考虑沿程热损耗等因素,为保证季节性蓄热后矿井水温度达到冬季长期持续供暖的热源要求(不低于  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),同时蓄热过程中也需要避免矿井水过热而降低太阳能集热效率,建议蓄水容积与集热器面积的比值取  $2.5 \sim 3.0\text{ m}^3/\text{m}^2$ 。

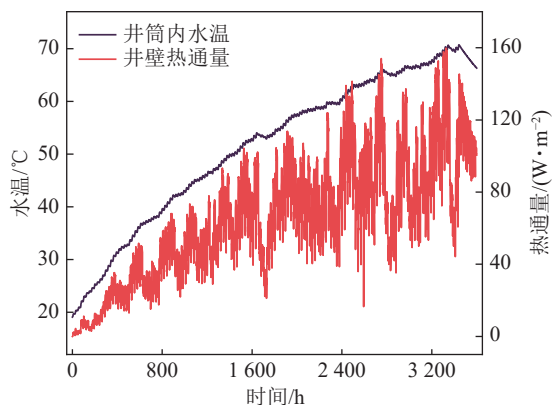


图 20 蓄热阶段水温和热损失变化

Fig.20 Variations of water temperature and heat loss during thermal energy storage phase

## 4 结 论

1)井筒内储存的热水经过自然冷却,平均温度和热损失在前 3 月迅速降低,之后不断衰减。热水在前 10 d 对围岩的散热量分别占前 100 d 和 3 a 累计热损失的 29.73% 和 18.11%。

2)地温梯度对自然条件下矿井水温度分层有显著影响,并对自然对流散热有抑制作用,高地温梯度( $\geq 0.03\text{ k/m}$ )更利于井筒深部热水的保温。在蓄水容积不变的情况下,长径比  $L/d$  越大的井筒短期温降更快,但经过长期冷却最终水温更高,建议在实际工程应用中可选择  $L/d$  为  $30 \sim 50$  的井筒进行跨季节蓄-取热。

3)蓄热模式下更适宜采用较低的注入流速,减少因内部湍流扰动而破坏轴向的水温分层,同时要避免水整体过热,以提高储热效率。井筒储热效率与注入温度正相关,应在节约能耗的前提下采取更高的注入温度。

4)在未保温注浆情况下,长期连续或间歇蓄热运行后矿井井筒热损失均占总蓄热量的  $1/2$  以上,建议对于太阳能跨季节井筒蓄热系统,蓄水容积与集热器面积之比取  $2.5 \sim 3.0\text{ m}^3/\text{m}^2$ ,以维持水温和满足冬季直接取热供暖需求。

## 参考文献(References):

- [1] 袁亮,杨科.再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J].煤炭学报,2021,46(1):16-24.  
YUAN Liang, YANG Ke. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 16-24.
- [2] 袁亮,姜耀东,王凯,等.我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J].煤炭学报,2018,43(1):14-20.  
YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 14-20.
- [3] 褚召祥,田家丰,李晓昭.关废矿山(地)热能开发与储用[J].科学通报,2025,70(1):8-16.  
CHU Zhaoxiang, TIAN Jiafeng, LI Xiaozhao. Legacy mines: Geothermal energy exploitation and storage[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(1): 8-16.
- [4] 霍冉,徐向阳,姜耀东.国外废弃矿井可再生资源开发利用现状及展望[J].煤炭科学技术,2019,47(10):267-273.  
HUO Ran, XU Xiangyang, JIANG Yaodong. Status and prospect on development and utilization of renewable energy in abandoned mines abroad[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 267-273.
- [5] 文志杰,姜鹏飞,宋振骐,等.关闭/废弃矿井抽水蓄能开发利用现状与进展[J].煤炭学报,2024,49(3):1358-1374.  
WEN Zhijie, JIANG Pengfei, SONG Zhenqi, et al. Development status and progress of pumped storage in underground space of closed/abandoned mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1358-1374.
- [6] BU X B, HUANG S H, LIU S, et al. Efficient utilization of abandoned mines for isobaric compressed air energy storage[J]. Energy, 2024, 311: 133392.
- [7] MENÉNDEZ J, ORDÓÑEZ A, RODRIGO Á, et al. Energy from closed mines: Underground energy storage and geothermal applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 108: 498-512.
- [8] GUO P Y, WANG M, DANG G J, et al. Evaluation method of underground water storage space and thermal reservoir model in abandoned mine[J]. Rock Mechanics Bulletin, 2023, 2(2): 100044.
- [9] 芮振华,刘月亮,张政,等.地热储能技术研究进展及未来展望[J].石油科学通报,2024,9(2):260-281.  
RUI Zhenhua, LIU Yueliang, ZHANG Zheng, et al. Research progress and prospect of geothermal energy storage technology[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(2): 260-281.
- [10] ZHOU X Z, XU Y J, ZHANG X J, et al. Large scale underground seasonal thermal energy storage in China[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102026.
- [11] GUO P Y, ZHENG L G, SUN X M, et al. Sustainability evaluation model of geothermal resources in abandoned coal mine[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 144: 804-811.
- [12] 王健.废弃矿井采空区储热蓄冷数值模拟研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.

- WANG Jian. Numerical simulation study on thermal storage and cold storage in abandoned mine goaf[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [ 13 ] PHILIPPE G, ABDOULAYE G, HAÏKEL B H, et al. Installation of a thermal energy storage site in an abandoned mine in Picardy (France). Part 1: Selection criteria and equipment of the experimental site[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(5): 174.
- [ 14 ] LI B Y, ZHANG J X, CHENG J P, et al. An analytical solution to periodical heat transfer problems of multilayer rocks for thermal energy storage in underground mines[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104320.
- [ 15 ] LI B Y, ZHANG J X, YAN H, et al. Numerical investigation into the effects of geologic layering on energy performances of thermal energy storage in underground mines[J]. *Geothermics*, 2022, 102: 102403.
- [ 16 ] SUN Y X, ZHANG X, LI X H, et al. A geothermal energy heat exchange system suitable for abandoned mines and its optimization[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2023, 59(9): 1749–1766.
- [ 17 ] 刘志强, 宋朝阳. 闭坑矿井竖井井筒开发再利用科学探索[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 18–24.  
LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang. Scientific exploration of development and reutilization of vertical shafts in closed mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 18–24.
- [ 18 ] WANICZEK S, OCHMANN J, BARTELA Ł, et al. Design and construction challenges for a hybrid air and thermal energy storage system built in the post-mining shaft[J]. *Journal of Thermal Science*, 2022, 31(5): 1302–1317.
- [ 19 ] PEREZ SILVA J, MCDERMOTT C, et al. The value of a hole in coal: Assessment of seasonal thermal energy storage and recovery in flooded coal mines[J]. *Earth Science, Systems and Society*, 2022, 2(1): 10044.
- [ 20 ] 吴珏, 潘亚楠, 侯正芳, 等. 蓄取热工况下同轴套管式地埋管换热器周围土壤温度变化规律[J]. *流体机械*, 2023, 51(6): 46–52, 75.  
WU Xuan, PAN Yanan, HOU Zhengfang, et al. Study on soil temperature variation around coaxial casing ground heat exchanger under heat and release storage condition[J]. *Fluid Machinery*, 2023, 51(6): 46–52, 75.
- [ 21 ] ABRAHAM J P, SPARROW E M, TONG J C K. Heat transfer in all pipe flow regimes: Laminar, transitional/intermittent, and turbulent[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(3-4): 557–563.
- [ 22 ] 刘爱斌, 翟如伟, 景家俊, 等. 江苏徐州城市规划区浅层地温能潜力评价及环境效益分析[J]. *地质与资源*, 2017, 26(3): 296–302.
- LIU Aibin, ZHAI Ruwei, JING Jiajun, et al. Potential assessment and environmental benefit analysis of shallow geothermal energy in the urban planning area of Xuzhou, Jiangsu province[J]. *Geology and Resources*, 2017, 26(3): 296–302.
- [ 23 ] 孟彦丽. 适宜性评价方法及典型城市地埋管地源热泵系统调查评价研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.  
MENG Yanli. Suitability evaluation method and investigation and evaluation of ground source heat pump system in typical cities[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [ 24 ] HOLMBERG H, ACUÑA J, NÆSS E, et al. Thermal evaluation of coaxial deep borehole heat exchangers[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 65–76.
- [ 25 ] HU X C, BANKS J, WU L P, et al. Numerical modeling of a coaxial borehole heat exchanger to exploit geothermal energy from abandoned petroleum wells in Hinton, Alberta[J]. *Renewable Energy*, 2020, 148: 1110–1123.
- [ 26 ] 李晓星, 胡夏闽, 张正威. 竖直埋管换热器热响应半径计算方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 248–253.  
LI Xiaoxing, HU Xiamin, ZHANG Zhengwei. Calculation method of thermal response radius for vertical borehole heat exchangers[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(17): 248–253.
- [ 27 ] 黄帅, 朱科, 董建锴, 等. 中深层地埋管换热器取热稳定性及热影响半径[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(6): 119–127.  
HUANG Shuai, ZHU Ke, DONG Jiankai, et al. Operation stability and heat-affected radius of medium-deep borehole heat exchanger[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(6): 119–127.
- [ 28 ] SHAH L J, ANDERSEN E, FURBO S. Theoretical and experimental investigations of inlet stratifiers for solar storage tanks[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(14): 2086–2099.
- [ 29 ] GUO F, ZHANG J, SHAN M, et al. Analysis on the optimum matching of collector and storage size of solar water heating systems in building space heating applications[J]. *Building Simulation*, 2018, 11: 1–12.
- [ 30 ] ARAÚJO A, FERREIRA A C, OLIVEIRA C, et al. Optimization of collector area and storage volume in domestic solar water heating systems with on-off control: A thermal energy analysis based on a pre-specified system performance[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219: 119630.