

## 实验室尺度高地温梯度模拟地层的实现方法研究

张德谦, 雷海燕, 戴传山

### Simulation achievement of lab-scale formations with high geotemperature gradient

ZHANG Deqian, LEI Haiyan, and DAI Chuanshan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201050>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式

A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan

李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 刘慧中, 郭镜 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 36-46

#### 胶东典型花岗岩热储地下水水化学特征及热储研究

A study of the hydrochemical characteristics and geothermal water of typical granite geothermal reservoir in the Jiaodong area

王晓翠, 孙海龙, 袁星芳 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 186-194

#### 基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199

#### 红层砂岩高温后效蠕变试验研究

Creep tests of red-bed sandstone after high temperature

李畅, 任光明, 孟陆波, 代晗, 张晓东, 李科 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 71-71

#### 井筒自循环技术开采干热岩地热的试验研究

Experimental study on influence factors of wellbore self-circulation mining hot dry rocks

亓兆伟, 闫方平, 傅大庆, 邱建强 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 198-208

#### 共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯波 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 191-199



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201050

张德谦, 雷海燕, 戴传山. 实验室尺度高地温梯度模拟地层的实现方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 152-157.  
ZHANG Deqian, LEI Haiyan, DAI Chuanshan. Simulation achievement of lab-scale formations with high geotemperature gradient[J].  
Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 152-157.

## 实验室尺度高地温梯度模拟地层的实现方法研究

张德谦, 雷海燕, 戴传山

(天津大学机械工程学院, 天津 300350)

**摘要:** 地热井与周围热储层的传热过程对地热井产热性能研究有重要意义。由于实际工程中在地热井周边布置测点较难, 无法获取地热井周围热储层的参数变化, 进而为地热热储模拟结果提供验证, 故以往大多地热热储模拟仅将地热井作为源项处理, 未考虑地热流体和储层的耦合流动换热。实验室条件下的模拟试验方便布置测点, 可为热储-井筒耦合流动传热模型提供试验验证, 其中如何实现实验室尺度下有温度梯度的模拟地层是试验研究的关键, 目前尚未有类似研究。基于传热学基本原理, 研究了实验室条件下有较高温度梯度多孔地层的快速实现方法, 通过确定模拟热储层和热储盖层几何尺寸、优选填充多孔介质和实现恒定温度的模拟热储层, 设计了一套实验室尺度下有高温梯度梯度的模拟地层系统, 通过分层加热与边界动态热补偿方法, 较快实现了热储层温度分别为 60, 65, 70 °C 下模拟地层的线性温度分布, 采用有限体积法得到的数值模拟与试验结果的相对误差在 $\pm 2.5\%$  范围内, 二者吻合较好。文章设计搭建的模拟地层系统可为开展地热井筒-热储耦合模拟试验提供条件, 进而为开发的地热热储-井筒耦合传热数值软件提供试验验证。

**关键词:** 实验室尺度; 热储层; 热储盖层; 分层加热; 模拟地温梯度

中图分类号: P341

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0152-06

## Simulation achievement of lab-scale formations with high geotemperature gradient

ZHANG Deqian, LEI Haiyan, DAI Chuanshan

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** The heat exchange between geothermal wells and surrounding formations is important to the heat production of geothermal wells. Due to the difficulty in arranging measurement points around geothermal wells in real engineering, it is hard to verify the results of geothermal reservoir modelling, thereby verify the modelling results. Therefore, geothermal wells are only considered as source/sink in most of the previous geothermal reservoir modeling, and the coupled flow and heat transfer between the geothermal fluid and the reservoir is not considered. In contrast, lab-scale experiments are convenient to arrange the measurement points, and the experimental results can verify the coupled geothermal reservoir-wellbore numerical model. However, how to achieve the lab-scale formations with geotemperature gradients is the key issue, and there are no similar studies yet. In this paper, based on the basic principles of heat transfer, a lab-scale simulated formation with high geotemperature gradient is quickly achieved. By determining the geometric size of the simulated geothermal reservoir and caprock, selecting the filled porous media and a simulated reservoir with constant temperature, a

收稿日期: 2022-01-26; 修订日期: 2022-03-29

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0604305)

第一作者: 张德谦(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事地热能开发利用方面的研究。E-mail: [marble@tju.edu.cn](mailto:marble@tju.edu.cn)

通讯作者: 雷海燕(1974-), 女, 博士, 副教授, 主要从事地热能开发利用方面的研究。E-mail: [leihy@tju.edu.cn](mailto:leihy@tju.edu.cn)

simulated formation with high geotemperature gradient is designed. Through the layered heating and boundary dynamic thermal supplementation method, the linear temperature distribution of the simulated formation at the reservoir temperature of 60 °C, 65 °C and 70 °C, respectively, are achieved. The relative error between the numerical simulation obtained by the finite volume method and the experimental results is within the range of  $\pm 2.5\%$ , indicating that the simulated and experimental results are in good agreement, which can provide experimental conditions for the coupled reservoir - wellbore heat transfer experiment. The simulated formation system designed and established in this paper can provide experimental conditions for the reservoir-wellbore heat transfer experiment, and then verify the developing numerical software of coupling the reservoir-wellbore flow and heat transfer.

**Keywords:** lab-scale; geothermal reservoir; reservoir caprock; layered heating; high geotemperature gradient

中低温地热资源采灌过程中的传热机理研究可揭示井内流体沿程的热力学参数变化及对周围热储层的影响,对预测不同开采模式和井间距下地热热储的动态变化和地热资源评价有重要意义。

众多学者开展了地热热储模拟的研究<sup>[1]</sup>,主要包括高温地热发电装机容量预测<sup>[2]</sup>、超临界地热流体的相变传热过程<sup>[3]</sup>、增强型地热系统(EGS)开发过程中的水-热耦合过程<sup>[4-8]</sup>、CO<sub>2</sub>封存及其作为循环介质从热储层的取热过程<sup>[9-12]</sup>、储层内示踪剂运移过程的数值模拟<sup>[13]</sup>、采用 iTOUGH2 的储层水文参数(渗透率、孔隙度等)反演<sup>[14-16]</sup>、以及热储层的动态变化和地热资源评价<sup>[17-21]</sup>等,采用的数值模拟方法包括通用商业软件 TOUGH2、iTOUGH2、OpenGeoSys、COMSOL、AQUA3D 及自编程序等。以上研究通过建立热储层的概念模型和数学模型,开展了地热单井、地热对井和群井系统的多尺度研究,分析热储的热-水-力多场耦合机理,基于示踪试验的非均质热储参数反演,模拟周期性开采条件下热储温度场、渗流场、应力场的演化特征,并预测开采井热突破时间,提出采灌方案优化设计,预测和评估热储性能,进行地热资源评价,同时也讨论不同热储层之间的相互作用及断层对热储性能的影响。但以上研究大多未考虑地热流体自井底到井口过程中的沿程传热过程,仅将地热井视为源汇处理,在一定程度上影响了计算结果的精确性。由于实际热储层地质条件的复杂性和经济条件限制,热储层内的温度、压力测点难以布置,从而难以利用现场监测数据验证数值模拟结果。而实验室条件下,填充多孔介质的热物性参数控制、测点布置、以及换热过程的数据采集都容易实现,可以验证数值模拟结果。因此,如何实现实验室条件下的模拟地层成为研究地热流体采灌过程中流动传热机理的关键,目前为止还未有相关研究。

本文首先研究了实验室条件下有高温梯度模拟地层的快速实现方法,包括模拟地层的加热模式选择、多孔介质材料的选择、地层几何尺度的确定、考虑室内环境温度变化的试验装置热补偿方式等,其中如何实现实验室尺度下有温度梯度的模拟地层是试验研究的基础和难点。在此基础上,搭建了实验室尺度的地热井筒-热储耦合传热模拟系统,通过分层加热和边界热补偿方法实现了模拟地层的温度梯度,为后续研究提供基础条件。

## 1 试验系统

本文搭建的热储-井筒耦合传热试验系统(图 1)主要包括 4 部分:模拟饱和和热储层、模拟热储盖层、温

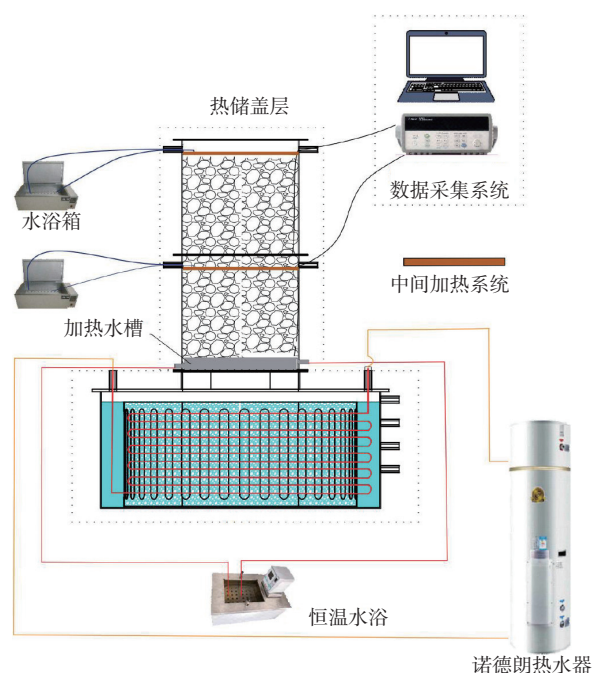


图 1 试验系统图

Fig. 1 Schematic diagram showing the experimental system

度实现系统、数据采集系统。

1.1 模拟饱和热储层和热储盖层

模拟饱和热储层为高 0.6 m、直径 1.3 m 的柱状腔体,内置高 1.3 m、直径 1.1 m 的柱形栏栅(图 2),内部布设连接恒温水浴的直径为 0.02 m 的波纹管,用于均匀加热多孔介质砂砾。

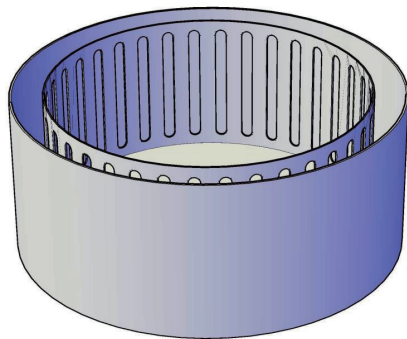


图 2 模拟饱和热储层  
Fig. 2 Simulated geothermal reservoir

模拟饱和热储层上方为模拟热储盖层,为直径 0.5 m、高 2 m 的圆柱结构,由 4 段高度和直径均为 0.5 m 的不锈钢圆筒通过法兰串联而成。为尽量减少环境温度变化造成的热储盖层温度波动,其外采用导热系数 0.058 W/(m·K)、厚 0.05 m 的气凝胶保温。

热储层和热储盖层内腔体均填充粒径 1~2 mm 的方解石砂砾,热物性参数如表 1 所示,其中砂砾密度和孔隙度通过称重法测量。充填过程中,尽量使颗粒均匀分布,力保模拟饱和热储层和热储盖层为各向同性均质介质。

表 1 方解石砂砾热物性参数  
Table 1 Thermophysical properties of calcite particles

| 参数 | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 孔隙度  | 比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ) | 导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) |
|----|--------------------------|------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 数值 | 2 574                    | 0.45 | 1 230~1 280                                 | 1.6~2.2                                    |

1.2 温度实现装置

如图 3 所示,来自恒温水浴的恒温水通过循环泵进入热储层内置的波纹盘管,与砂砾换热后再回到恒温水浴循环,直至热储层达到设定的均匀温度。由于热储盖层高 2 m,前期试验准备结果表明,若仅通过底部热储层导热实现盖层温度梯度至少需 15 d 以上。为缩短试验周期,本文在模拟热储盖层底部放置一高 0.1 m、直径 0.48 m 的圆柱形水槽,通入恒定温度的流体加热上部的盖层多孔介质。此外,分别在热储盖层不同高度处布置直径为 3 mm 的不锈钢盘管,在辅助加热的同时尽量减少对热储盖层的结构影响。每层

加热盘管通入不同恒定温度的流体,可较快实现模拟热储盖层的温度梯度。由于热储盖层散热损失主要发生在温度较高的下段,故在 1.2 m 高度范围内的盖层外壁保温层外缠绕通入恒温水的橡胶管,通过调节水管分布密度保证壁面的绝热边界。而 1.2 m 以上的热储盖层段通过热储层底部传热和盖层中间加热盘管维持壁面绝热边界。热储盖层顶端通过变频空调可近似维持 21 °C 的环境温度。

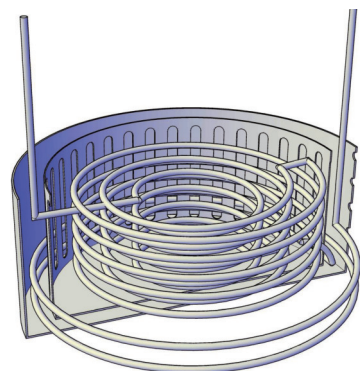


图 3 不锈钢波纹盘管布置  
Fig. 3 Layout of stainless coil

1.3 数据采集系统

试验过程中需要采集的数据主要为流体和地层的温度分布,采用铜-康铜热电偶作为测温传感器,并在试验前进行标定。在高度方向上自模拟热储盖层底部起,每隔 0.1 m 处的水平方向布置测点。考虑到试验过程中近井筒处的地层温度变化较大,在径向 0.07 m 范围内,每隔 0.01 m 布置 1 个测点,0.07 m 以外每隔 0.02 m 布置 1 个测点,相邻编号测点呈 45°。其中,0.4 m 和 0.8 m 高度处分别为加热盘管的进口和出口位置,水平方向分别布置 14 个测点(图 4),其余各层水平方向设置 17 个测点(图 5)。

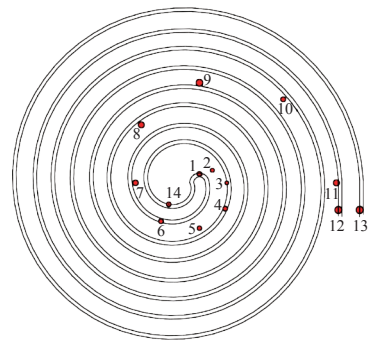


图 4 加热盘管进出口处温度测点布置  
Fig. 4 Temperature measurement points at the inlet/outlet of coil

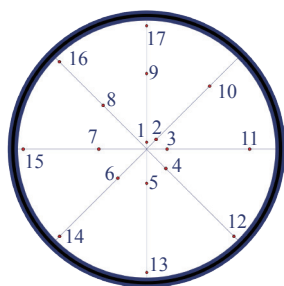


图5 热储盖层内径向温度测点布置

Fig. 5 Layout of radial temperature measurement point

#### 1.4 地温梯度的实现

通过恒温水浴制备 60 °C 的恒温水,在循环泵作用下进入热储层及盖层底部的加热水槽,与多孔介质砂砾循环换热。在环境温度 20 °C 时,经过 2 500 min (42 h) 后,热储盖层内温度基本达到稳定,实现了高度 ( $H$ ) 方向的温度梯度,如图 6 所示。

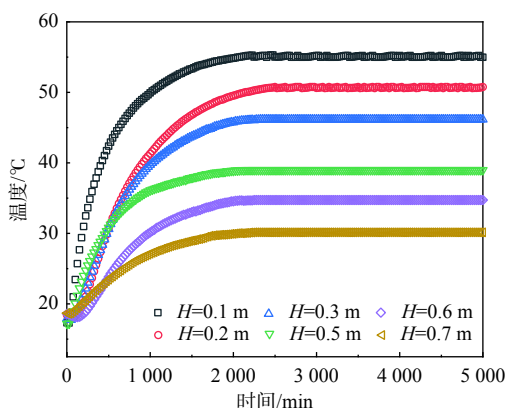
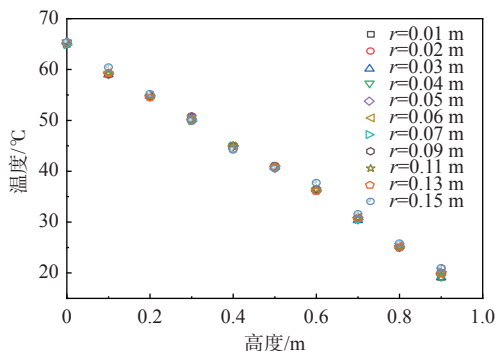


图6 热储盖层温度变化

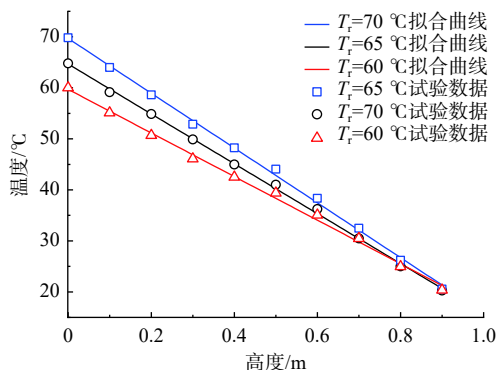
Fig. 6 Change in temperature of reservoir caprock with time

## 2 试验结果

图 7 为热储温度 ( $T_r$ ) 为 65 °C 时,热储盖层的温度

图7 热储盖层高度方向温度分布 ( $T_r=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ )Fig. 7 Change in temperature of the caprock with height ( $T_r=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

分布;图 8 为热储温度分别为 60, 65, 70 °C 时,不同热储盖层高度下距井筒中心轴线径向距离 ( $r$ ) 0.07 m 处的温度分布。可以看出,热储层的径向温度分布均匀且相差不大,近似实现了模拟地层的温度梯度。

图8 不同温度梯度下的盖层温度分布 ( $r=0.07\text{ m}$ )Fig. 8 Temperature profile of reservoir caprock under different geotemperature gradients ( $r=0.07\text{ m}$ )

## 3 分析与讨论

半无限大地层的非稳态传热可近似用式(1)描述。热储盖层周边可视为绝热边界,上、下面设为恒温边界,其中上表面为地面环境温度,下表面为热储层温度。利用有限差分法求解方程(1)。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial H^2} \right) + Q$$

$$T|_{H=0} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad 0 \leq r \leq 0.15\text{ m}$$

$$T|_{H=0.9} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad 0 \leq r \leq 0.15\text{ m}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0.15} = 0$$

$$T|_{t=0} = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

式中:  $T$ ——温度/ $^{\circ}\text{C}$ ;

$a$ ——导热系数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ;

$Q$ ——内热源/ $\text{W}$ ;

$t$ ——时间/ $\text{s}$ 。

图 9 为模拟热储层温度为 60 °C 时,利用有限体积法计算得到的地层温度分布和试验值的对比。可以看出,不同高度下的热储盖层平均温度均随时间逐渐上升,当试验进行至 83 h,盖层温度基本达到稳定,且径向距离 0.01 m 和 0.15 m 处的温度差别不大,说明热储盖层水平方向上温度分布较均匀。此外,还可明显看出,1.2 m 高度范围内的热储盖层温度的计算温度高于试验值。这是因为热储下部温度较高,与环境

的换热损失大,壁面热量补偿不足以弥补此热损失,导致温度试验值低于理论值。此外,多孔介质物性参数的计算值和试验值存在差异也是影响因素,而热储盖层上部(1.5 m处)的温度与环境温度接近,散热损失小,底部热储层传递热量及边界保温可补偿此热损失,因此二者差别不大。

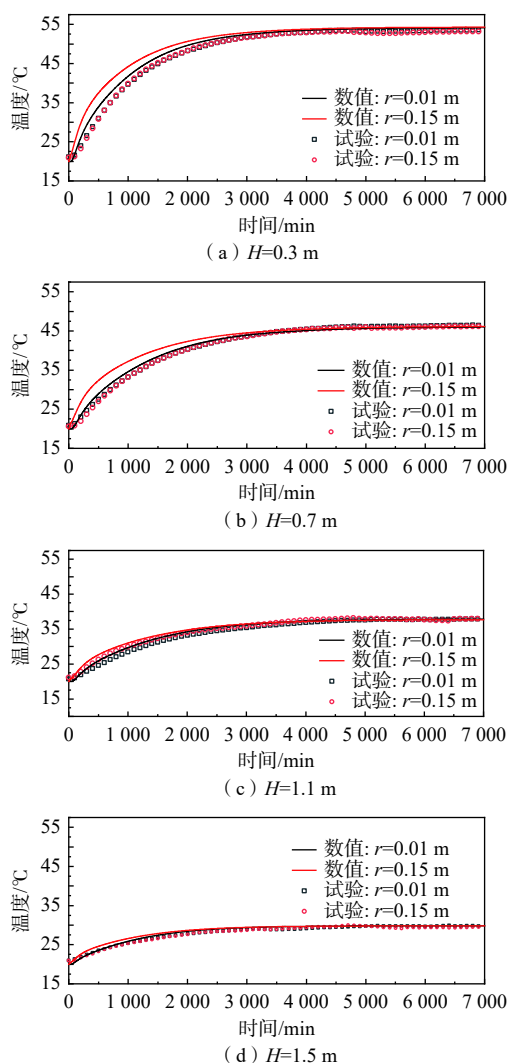


图 9 热储盖层径向温度的数值和试验对比  
Fig. 9 Comparison of numerical and experiment results of caprock temperature at different radial distance

为分析热储盖层温度的试验误差,此处定义 $\theta = (T_{\text{exp}} - T_{\text{cal}}) / T_{\text{cal}}$ ,其中 $T_{\text{cal}}$ 和 $T_{\text{exp}}$ 分别为热储盖层温度的计算值和试验值。图 10 给出了热储盖层不同高度下 $\theta$ 随时间的变化。可以看出,当热储盖层温度稳定时,其平均温度的试验相对误差在 $\pm 2.5\%$ 以内。

## 4 结论

(1) 本文设计搭建了实验室尺度下的模拟地层系

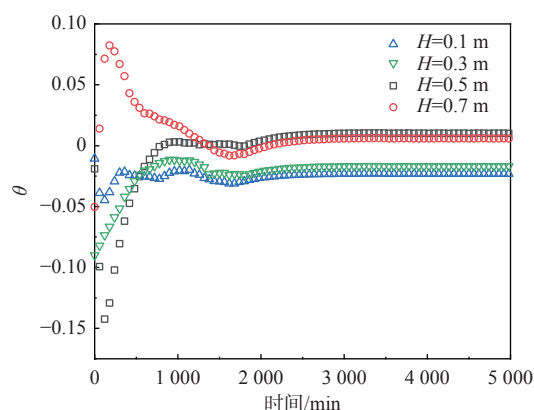


图 10 热储盖层温度的相对误差随时间的变化  
Fig. 10 Change in relative error of the reservoir caprock temperature with time

统,通过热储层内对流换热、热储盖层内分层加热和边界动态热量补偿,得到了模拟热储层温度分别为 60, 65, 70 °C 时,高度方向上热储盖层的温度分布和对应径向上温度趋于均匀的稳定时间,实现了不同模拟热储层温度下的热储盖层近似线性温度分布。

(2) 试验结果与模拟计算得到的温度分布的对比表明,二者相对误差在 $\pm 2.5\%$  范围内,验证了试验方案的可行性。

本文建立的模拟地层系统可为地层内相关研究提供试验平台。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] LI Gensheng, LI Jiayan, SONG Xianzhi, et al. Research advances in multi-field coupling model for geothermal reservoir heat extraction[J]. Energy Reviews, 2022, 1: 100009.
- [ 2 ] SEYEDRAHIMI-NIARAQA M, BINA S M, ITOI R. Numerical and thermodynamic modeling for estimating production capacity of NW Sabalan geothermal field, Iran[J]. Geothermics, 2021, 90: 1 – 21.
- [ 3 ] FENG Guohong, WANG Yu, XU Tianfu, et al. Multiphase flow modeling and energy extraction performance for supercritical geothermal systems[J]. Renewable Energy, 2021, 173: 442 – 454.
- [ 4 ] 雷宏武. 增强型地热系统(EGS)中热能开发力学耦合水热过程分析[D]. 长春: 吉林大学, 2014. [ LEI Hongwu. Coupling mechanics with thermal-hydrodynamic processes for heat development in enhanced geothermal systems[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] CHEN Yun, MA Guowei, WANG Huidong, et al.

- Evaluation of geothermal development in fractured hot dry rock based on three dimensional unified pipe-network method[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 136: 219 – 228.
- [ 6 ] 王晓星,吴能友,张可霓,等.增强型地热系统开发过程中的多场耦合问题[J].水文地质工程地质,2012,39(2): 126 – 130. [ WANG Xiaoxing, WU Nengyou, ZHANG Keni, et al. Multi-field coupling for enhanced geothermal system development[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(2): 126 – 130. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] RAJABI M M, CHEN Mingjie, BOZORGPUR A, et al. Stochastic techno-economic analysis of CO<sub>2</sub>-circulated geothermal energy production in a closed reservoir system[J]. *Geothermics*, 2021, 96: 102202.
- [ 8 ] ALIYU M D, ARCHER R A. A thermo-hydro-mechanical model of a hot dry rock geothermal reservoir[J]. *Renewable Energy*, 2021, 176: 475-493
- [ 9 ] GUDALA M, GOVINDARAJAN S K, YAN Bicheng, et al. Numerical investigations of the PUGA geothermal reservoir with multistage hydraulic fractures and well patterns using fully coupled thermo-hydro-geomechanical modeling[J]. *Energy*, 2022, 253: 124173.
- [ 10 ] BORGIA A, OLDENBURG C M, ZHANG Rui, et al. Simulations of CO<sub>2</sub> injection into fractures and faults for improving their geophysical characterization at EGS sites[J]. *Geothermics*, 2017, 69: 189 – 201.
- [ 11 ] 张志雄,谢健,戚继红,等.地质封存二氧化碳沿断层泄漏数值模拟研究[J].水文地质工程地质,2018,45(2): 109 – 116. [ ZHANG Zhixiong, XIE Jian, QI Jihong, et al. Numerical simulation of CO<sub>2</sub> leakage along faults from geologic carbon dioxide sequestration[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 109 – 116. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] MAHMOODPOUR S, SINGH M, BÄR K, et al. Thermo-hydro-mechanical modeling of an enhanced geothermal system in a fractured reservoir using carbon dioxide as heat transmission fluid-A sensitivity investigation[J]. *Energy*, 2022, 254: 124266.
- [ 13 ] FINSTERLE S. ITOUGH2-EOSINT: A nonisothermal two-phase flow simulator for water and multiple tracers user's guide[R]. California: Finsterle GeoConsulting Kensington, 2021.
- [ 14 ] BJARKASON E K, O'SULLIVAN J P, YEH A, et al. Inverse modeling of the natural state of geothermal reservoirs using adjoint and direct methods[J]. *Geothermics*, 2019, 78: 85 – 100.
- [ 15 ] 王景瑞,胡立堂,尹文杰. iTOUGH2反演模型在地下水模拟中的应用[J].水文地质工程地质,2015,42(1): 35 – 41. [ WANG Jingrui, HU Litang, YIN Wenjie. Application of iTOUGH2 to groundwater modeling[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(1): 35 – 41. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] TESCIONE I, TODESCO M, GIORDANO G. Geothermal fluid circulation in a caldera setting: The torre alfina medium enthalpy system (Italy)[J]. *Geothermics*, 2021, 89: 101947.
- [ 17 ] JALILINASRABADY S, TANAKA T, ITOI R, et al. Numerical simulation and production prediction assessment of Takigami geothermal reservoir[J]. *Energy*, 2021, 236: 121503.
- [ 18 ] 王宽. 基于TOUGH2数值模拟软件的延津地区热储采灌研究[J]. *地下水*, 2019, 41(1): 14 – 16. [ WANG Kuan. Research on thermal storage and irrigation in Yanjin area based on TOUGH2 numerical simulation software[J]. *Ground Water*, 2019, 41(1): 14 – 16. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 姜英博. 五龙口地热区地热资源评价及开发利用研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022. [ JIANG Yingbo. Research on the evaluation and utilization of geothermal resources in Wulongkou geothermal area[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 刘东林,闫佳贤,田光辉,等. 基于TOUGH2.0东丽湖地区雾迷山组热储资源潜力评价[J]. *工程勘察*, 2015, 43(8): 52 – 57. [ LIU Donglin, YAN Jiaxian, TIAN Guanghui, et al. Assessment on geothermal potential in the Wumishan Formation of Dongli Lake area based on TOUGH2.0 program[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2015, 43(8): 52 – 57. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] VINCENT K K. Geothermal reservoir modeling and in field rejection design, constrained by tracer test data: Case study for geothermal field in KENYA. Undefined Faculty of Industrial Engineering[D]. Iceland: University of Iceland, 2014.

编辑:汪美华

实习编辑:刘真真