

废停页岩气井改造同轴水平井闭式循环采热方法研究

赵亮洁

成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都

收稿日期: 2025年3月12日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月16日

摘要

本研究根据四川盆地焦石坝区志留系龙马溪组泥页岩储层及水平井的特征, 构建了单井同轴水平井闭式循环采热模型。结合有限元模拟探究了不同系统的采热效果, 分析了井身结构与注采参数的影响规律。研究表明, 在水循环速率 $1500\text{ m}^3/\text{day}$, 注入温度 20°C 及水平段长度 1500 m 条件下, 单井同轴水平井采热运行初期井口水温达 57.84°C , 采热功率为 2746.29 kW 。在循环采热10年后, 单井同轴水平井井口水温下降至 33.51°C , 采热功率下降到 980.43 kW 。水循环速率的增加会降低井口水温, 但会提高采热速率; 注入温度的增加可以提高井口水温, 但会降低采热速率; 水平段长度增加能够有效提高井口水温和采热速率。上述研究结果可为未来矿场应用提供一定的理论指导。

关键词

页岩气藏, 废停井, 地热能, 闭式循环

Research on the Closed-Loop Heat Extraction Method of Transforming Abandoned Shale Gas Wells into Coaxial Horizontal Wells

Liangjie Zhao

College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Mar. 12th, 2025; accepted: Apr. 7th, 2025; published: Apr. 16th, 2025

Abstract

Based on the characteristics of the Silurian Longmaxi Formation shale reservoir and horizontal wells

文章引用: 赵亮洁. 废停页岩气井改造同轴水平井闭式循环采热方法研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(4): 454-465.
DOI: 10.12677/ag.2025.154046

in the Jiaoshiba area of the Sichuan Basin, this study constructed a closed-loop heat extraction model for a single coaxial horizontal well. By employing finite element simulations, the heat extraction performance of different systems was investigated, and the influence patterns of wellbore structure and injection-production parameters were analyzed. The research demonstrates that under the conditions of a water circulation rate of 1500 m³/day, an injection temperature of 20°C, and a horizontal section length of 1500 m, the wellhead temperature of the single coaxial horizontal well reaches 57.84°C, with a heat extraction power of 2746.29 kW during the initial operation phase. After 10 years of circulation heat extraction, the wellhead temperature decreases to 33.51°C, and the heat extraction power drops to 980.43 kW. An increase in water circulation rate reduces the wellhead temperature but enhances the heat extraction rate, while an increase in injection temperature raises the wellhead temperature but lowers the heat extraction rate. Moreover, increasing the horizontal section length effectively improves both the wellhead temperature and the heat extraction rate. These findings provide theoretical guidance for future field applications.

Keywords

Shale Gas Reservoir, Abandoned Well, Geothermal Energy, Closed-Loop System, Enhanced Heat Extraction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2023 年, 国家能源局发布《加快油气勘探开发与新能源融合发展行动方案(2023~2025 年)》, 强调将地热能等新能源设施作为油气开发的重要配套, 为废弃油气藏资源化利用指明了新方向, 油区地热开发尤为前景广阔。闭式循环采热技术作为创新解决方案, 有效突破传统地热开发瓶颈。传统模式依赖地下流体抽取与回灌, 受限于致密储层低渗透率, 而闭式循环技术通过封闭系统热量交换, 规避了上述问题, 为页岩气藏地热开发提供了可行路径[1]。同轴换热系统因结构简单, 成本较低且环境友好的优点, 使其在地热能闭式循环开发技术中备受关注。Noorollahi 等[2]利用伊朗南部阿瓦士油田两个不同深度油井的数据建立了同轴换热模型。结果显示, 除质量流量和地温梯度外, 较大的换热器直径可以提高换热效率。Hu 等[3]建立同轴换热模型, 研究发现通过改变加热管的注入流速、注入温度和导热系数, 可以控制采热的效率。宋先知等[4]利用雄安新区的一口废弃井改造为同轴井进行了现场试验, 针对雄安新区地热储层, 完成同轴套管保温结构、高导热水泥的设计与研发并进行了数值模拟研究。Kwanggeun 等建造了四个 50 米深的同轴换热器, 考虑了不同施工条件下的同轴换热器, 并通过现场试验确定了影响同轴换热器热性能的因素[5]。郭海明等[6]介绍了河北工程大学中深度为 2500 m 的同轴套管式换热系统, 采用现场实验的方法进行了换热性能的研究, 通过地热井入口、出口以及循环工质流量等数据得到实验条件下的地热井取热量。刘倩[7]提出将废弃油井改造为多分支 U 型井的地热系统, 研究了工程注采方案 and 不同井布参数对采热性能的影响, 发现增加水平段长度和水平井段间距有助于提高采出温度和取热功率。闭式循环技术在地热开发中的应用正在逐步成熟, 特别是在非常规页岩气藏开发中展现出显著优势。非常规页岩气藏具有埋藏深度大、储层温度高的特点, 蕴含丰富的地热资源, 但其低渗透性和复杂的储层条件给传统地热开发技术带来了巨大挑战。针对这一问题, 本研究提出通过改造现有水平井构建闭式循环采热系统, 以提升地热开采效率。这一方案充分利用了水平井的水平段优势, 能够有效规避低渗透储层的限制, 其可行性已在多个案例中得到初步验证。闭式循环采热系统有望成为页岩气藏地热资源开发的重要技术

路径。

2. 废弃页岩气井闭式循环强化采热模型

基于页岩气储层水平井的工程特征，本研究构建了同轴水平井的闭式循环采热系统模型(如图 1)。同轴水平井通过密封人工压裂井段、安装封隔器和下入内管形成闭式循环回路，取热流体从环空注入，内管采出。充分利用现有井身结构，还为携热工质创造了超长加热路径。

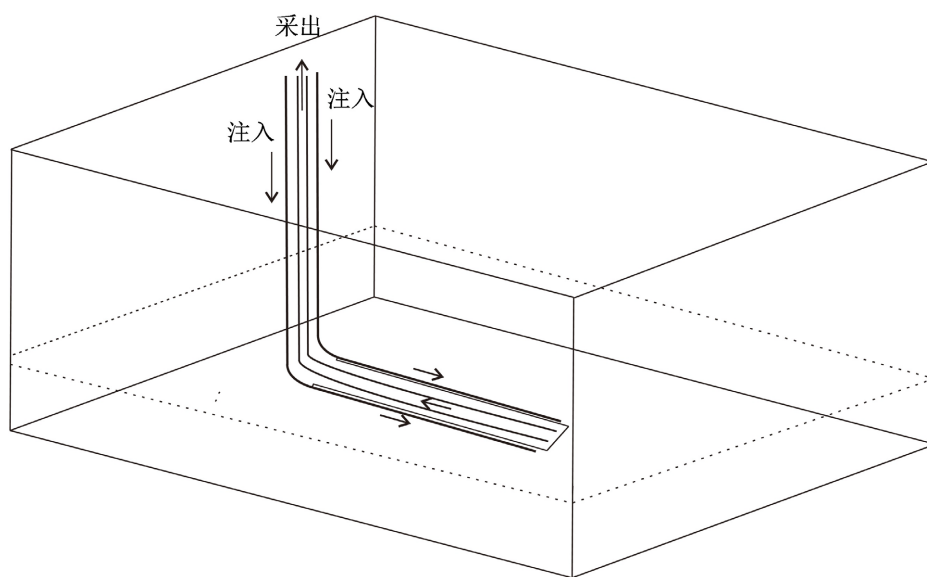


Figure 1. Schematic diagram of the coaxial horizontal geothermal well structure transformed from shale gas horizontal well
图 1. 页岩气水平井改造同轴水平地热井结构示意图

2.1. 基本假设

本文构建的页岩气藏闭式水循环采热模型主要基于以下假设：

- (1) 岩石是均匀、各向同性的坚硬岩体，其物性参数恒定；
- (2) 井筒内流体流动简化为一维流动，工作流体热交换主要为强制对流换热，不考虑流体的导热；
- (3) 热储内的热量传递主要通过热传导，不考虑地下水渗流的影响；
- (4) 井筒及回填材料质地均匀、各向同性且物性恒定。

2.2. 闭式循环采热数学模型

2.2.1. 连续性方程与动量守恒方程

在闭式循环采热过程中，循环流体的连续性方程和动量方程可表示为[8]：

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}_f) = 0 \quad (1)$$

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t} + \rho_f \mathbf{u}_f \cdot \nabla \mathbf{u}_f = -\nabla p - f_D \frac{\rho_f}{2d_h} \mathbf{u}_f |\mathbf{u}_f| + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中， ρ_f 表示循环流体的密度， kg/m^3 ； $\mathbf{u}_f$ 表示流体的速度矢量， m/s ； f_D 表示达西摩擦因子。右侧第二项为粘性剪切引起的压降； p 是循环流体的压力， Pa ； d_h 为管道平均水力直径， m ； $\mathbf{F}$ 表示体积力， N/m^3 。

闭式循环采热过程中，不考虑流体相态变化。对于单相液态流体，达西摩擦因子通过 Churchill 方程

计算得到, 如下式所示[9]:

$$f_D = 8 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + (c_A + c_B)^{-1.5} \right]^{1/12} \quad (3)$$

$$c_A = \left[-2.457 \ln \left(\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0.9} + 0.27 \left(\frac{e}{d_h} \right) \right) \right]^{16} \quad (4)$$

$$c_B = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16} \quad (5)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_f \mathbf{u}_f d_h}{\mu_f} \quad (6)$$

式中, Re 是雷诺数; e 为管道表面粗糙度, m ; d_h 为管道水力直径, m ; μ_f 表示循环水动态粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

2.2.2. 能量守恒方程

闭式循环采热过程中, 储层岩石内热传递方式为热传导, 不考虑岩石内部热源, 其能量守恒方程可表示为[10]:

$$\rho_r C_r \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_r \nabla T_r) \quad (7)$$

式中, ρ_r 为地层岩石密度, kg/m^3 ; C_r 为岩石等压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; T_r 为岩石温度, K ; λ_r 为岩石热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。

利用水作为携热工质进行闭式循环采热。考虑到粘性剪切产生的摩擦耗散热, 流体在套管内的能量守恒方程为[11]:

$$\rho_f A C_f \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f A C_f \mathbf{u}_f \cdot \nabla T = \nabla \cdot (A \lambda_f \nabla T) + f_D \frac{\rho_f A}{2d_h} |\mathbf{u}_f|^3 + Q_{\text{wall}} \quad (8)$$

式中, ρ_f 表示循环流体密度, kg/m^3 ; C_f 表示流体等压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; T 代表流体温度, $^\circ\text{C}$; $\mathbf{u}_f$ 表示流体速度矢量, m/s ; λ_f 表示流体热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; f_D 表示达西摩擦因子; Q_{wall} 是管壁与储层岩石热交换。

套管径向传热可表示为[12]:

$$Q_{\text{wall}} = (hZ)_{\text{eff}} (T_{\text{ext}} - T) \quad (9)$$

$$(hZ)_{\text{eff}} = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_0 h_{\text{int}}} + \frac{1}{r_N h_{\text{ext}}} + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{k_i} \right)} \quad (10)$$

式中, $(hZ)_{\text{eff}}$ 表示总传热系数 h 的有效值与管道湿周 Z 的乘积, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; T_{ext} 表示管道外部温度, $^\circ\text{C}$; r_0 是内管半径, h_{int} 和 h_{ext} 为管内外侧薄膜传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$; r_N 是壁层外半径, m 。

2.3. 模型验证

为检验数值模型的准确性, 结合 Liang 等[13]建立的解析模型进行验证, 建立 U 型连通井采热数值模型, 具体模型参数可见其论文。图 2 可见, 在循环采热 3600 天后, Liang 等解析模型计算出口温度为 40.17°C , 模拟结果为 40.79°C 。采热过程中两者最大误差为 3.70%。模型数值模拟结果与 Liang 等解析模

型结果有较高的吻合度，验证了数值模型的准确性。

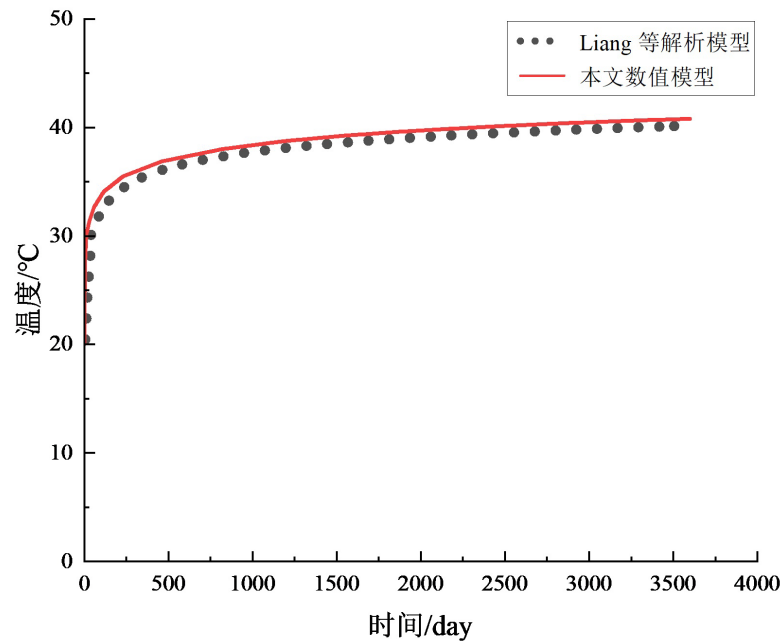


Figure 2. Model verification for unsteady heat transfer in closed-loop flow
图 2. 闭式循环非稳态流动传热模型验证

2.4. 网格划分

本研究采用混合网格剖分方法构建了精细的储层数值模型。其中，储层区域采用四面体网格进行离散化处理。对于循环井区域，采用边单元网格进行描述，该方法不仅简化了井筒区域的网格划分，而且保证了井筒内流体流动与热传导过程的精确刻画。在网格尺度上，岩石储层采用宏观尺度进行划分，最小单元尺寸设定为 16 m；而对于表征井筒内流体流动的一维线段，则采用精细化尺度划分，最小单元尺寸为 0.2 m，实现了井筒流动的精细模拟。整个闭式循环采热模型共包含 166,032 个四面体网格单元、1751 个边单元、2898 个三角单元以及 16 个顶点单元，网格平均质量系数达到 0.8185，表明模型具有优异的网格质量，为后续数值模拟的准确性提供了可靠保障。

2.5. 模型参数与边界条件

基于研究区的地质构造特征与水平井开采工程参数，建立尺寸均为 4000 m × 3000 m × 4000 m 的同轴水平井闭式循环采热数值模拟模型。模型全地层不同层段岩石热物性如表 1。所示。目的层为志留系龙马溪组泥页岩储层[14]，地热井垂深为 3522.04 m，造斜长度为 90.22 m。同轴水平井套管内径均为 226.16 mm，管材厚度均为 9.17 mm [15]。内管内径为 102 mm，管材厚度为 3.84 mm。全井段套管热导率均为 41 W/(m·K)，单井同轴水平井内管热导率为 0.1 W/(m·K)。井周加设水泥，热导率为 1.5 W/(m·K)，水泥环厚度为 4 cm。

基于研究区实际地质特征，研究基于焦石坝南部构造区白马向斜带 J01 井地温曲线(见图 3) [14]初始化全地层地温场。3000 m 以下地层为 J01 井实测温度，3000~4000 m 地层温度由地温梯度计算得到。地层压力采用静水压力模型。闭式水循环采热过程中，井壁与地层间为完整接触，导热性能优良，不存在射孔等复杂结构影响。忽略模型外边界与周缘地层之间的流体交换和热交换。

Table 1. Petrophysical parameters of geological stratigraphy [16]-[22]
表 1. 不同层段岩石物性参数[16]-[22]

埋深/m	岩性	热导率/W/(m·K)	恒压热容/J/(kg·K)	密度/kg/m ³
0~770	灰岩、白云岩	3.13	890	2750
770~2146	灰岩	2.9	800	2660
2146~3100	泥岩	2.19	820	2000
3100~3575	碳质泥页岩	2.39	1264	2610
3575~4000	灰岩	2.82	800	2660

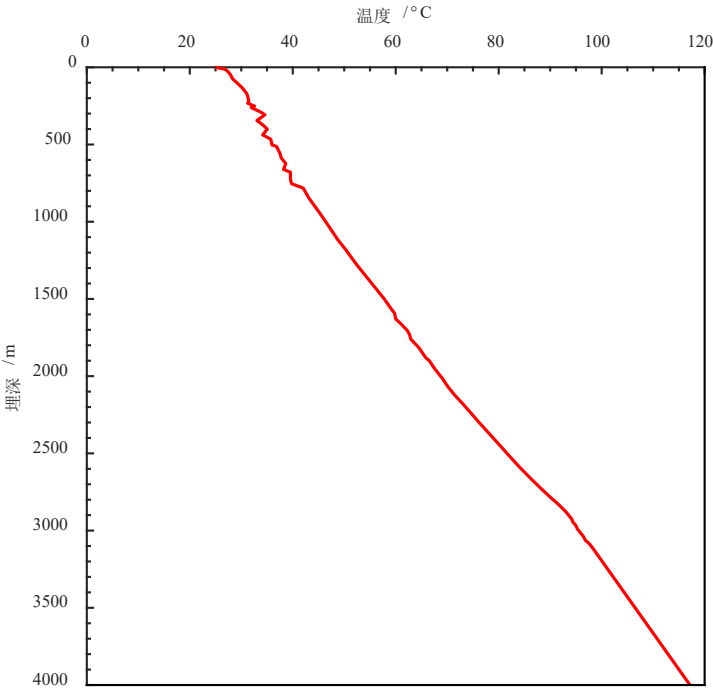


Figure 3. Geothermal temperature profile and initial geothermal field distribution of the full formation model
图 3. 全地层模型地温曲线和初始地温场分布

2.6. 数值模拟方案

Table 2. Parameter design of different heat extraction simulation schemes
表 2. 不同采热模拟方案参数设计

编号	水循环速率/(m ³ /day)	注水温度/°C	水平段长度/m
1	1500	20	1000
2*	1500	20	1500
3	1500	20	2000
4	1500	20	1500
5	1500	20	1500
6	1000	20	1500
7	2000	20	1500
8	1500	15	1500
9	1500	30	1500

为研究井身结构参数和工程参数对系统采热效果的影响规律，基于典型生产场景设计了多工况数值模拟方案(见表 2)。基础案例中，水循环速率为 $1500 \text{ m}^3/\text{day}$ ，注入温度为 20°C ，水平段长度为 1500 m 。为探明系统的采热可持续性，模拟运行时间为 10 年。

3. 模拟结果与分析

3.1. 同轴水平井采热效果与机理分析

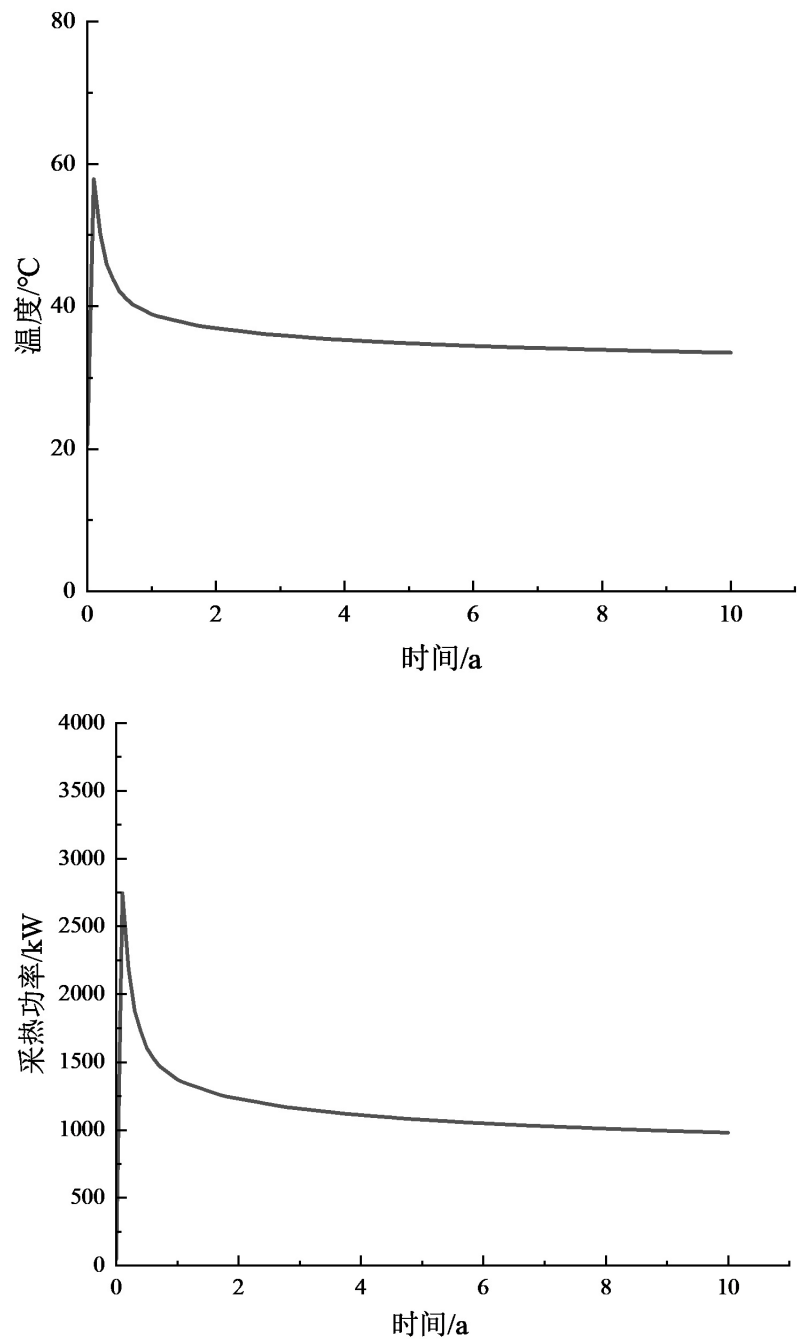


Figure 4. Comparison of heat extraction performance in the base case of a closed-loop system with coaxial horizontal well
图 4. 同轴水平井闭式循环系统基础案例采热效果对比

基于上述模型,结合数值模拟方法探究了枯竭页岩储层单井同轴水平井的闭式水循环采热效果,并与基础案例进行了对比分析。从图4可以看出,单井同轴水平井进行采热时,运行初期井口水温达 57.84°C ,采热功率为 2746.29 kW ;循环采热10年后,井口水温下降至 33.51°C ,采热功率降至 980.43 kW 。结果表明,利用页岩储层水平井改造地热井的采热系统具有良好的采热效果,能够通过较长的水平井段有效加热携热工质,可以在高循环流量下实现较高的出口温度。图5可知,废停页岩气井改造同轴水平井具有复杂的较长循环回路,能够增加流体与储层的接触面积和接触时间,有效提高管道内流体温度。

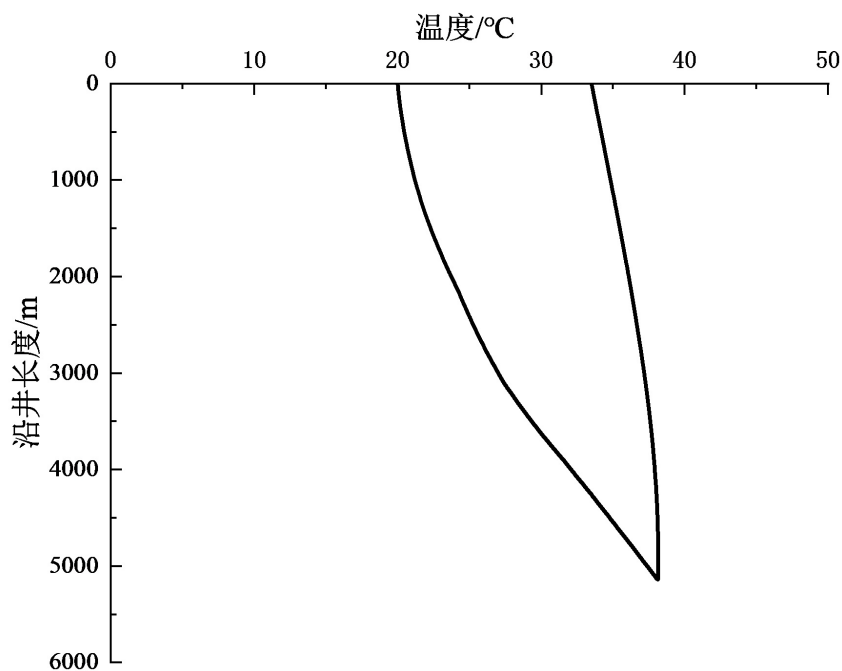


Figure 5. Fluid temperature along the wells in a coaxial horizontal well closed-loop system after 10 years of water circulation
图 5. 水循环 10 年同轴水平井闭式循环系统流体沿井温度分布曲线

3.2. 井身结构与注采参数敏感性分析

3.2.1. 水循环速率

为明确水循环速率对采热效果的影响规律,对比分析了同轴水平井采热系统水循环速率分别为 $1000\text{ m}^3/\text{day}$ 、 $1500\text{ m}^3/\text{day}$ 、 $2000\text{ m}^3/\text{day}$ 时的井口热水温度和采热功率,结果如图6所示。可以看出,闭式循环采热系统随着循环速率由 $1000\text{ m}^3/\text{day}$ 提高至 $2000\text{ m}^3/\text{day}$,同轴水平井的井口热水温度由 35.98°C 下降至 31.82°C ,采热功率由 773.24 kW 提升至 1143.84 kW 。水循环速率提升,流体流动速率加快,换热时间变短,但换热的流体体积增加。因此水循环速率提升,采出热水井口温度逐渐降低,系统采热功率增加。在工程实践应用中,建议结合地面供热系统温度需求对水循环速率优化调控,从而达到最佳的采热综合效益。

3.2.2. 注水温度

注水温度是影响闭式循环采热效果的重要因素。为明确注水温度对采热效果的影响规律,对比了注水温度为 15°C 、 20°C 和 30°C 时采出热水井口温度和采热功率。如图7所示,注水温度由 15°C 增加到 30°C ,循环采热10年后,同轴水平井采热系统的井口热水温度由 29.68°C 提升至 41.14°C ,采热功率由 1066.26 kW 下降到 808.16 kW 。随着注水温度的提升,采出热水温度提高,采热功率下降。在闭式水循环采热系

统中，过高的注水温度会减小流体与热储层之间的温差，从而降低采热效率。建议将注水温度控制在合理范围内，以实现热交换效率的最优化。

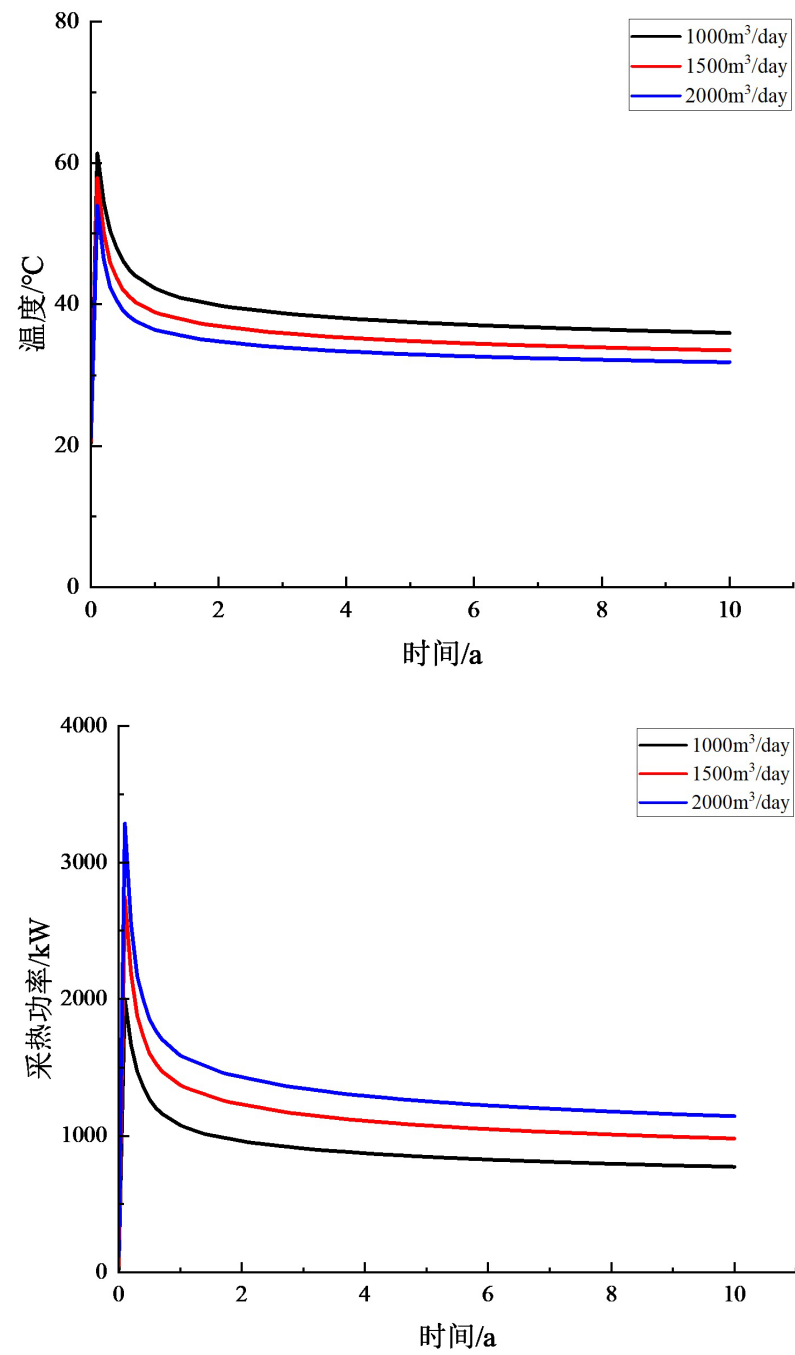


Figure 6. Comparison of heat extraction performance in a coaxial horizontal well closed-loop system under different circulation flow rates

图 6. 不同循环流量下 coaxial 水平井闭式循环系统采热效果对比

3.2.3. 水平段长度

水平段长度是控制井筒换热面积的关键因素。为探究水平段长度对闭式循环采热效果的影响规律，

模拟了水平段长度为 1000 m、1500 m 及 2000 m 三种情况下采热系统出口温度和采热功率,如图 8 所示,水平井水平段长度由 1000 m 延长至 2000 m,循环采热 10 年后,采出井井口温度由 31.87℃ 提高至 34.86℃,采热功率由 861.87 kW 提升至 1078.53 kW。水平段长度增加,采出井井口温度及系统采热功率提高。在保证钻井可行性和经济性的前提下,可以通过增加长水平段长度延长流体在井下的换热时间,可以有效提高系统出口温度和采热功率。

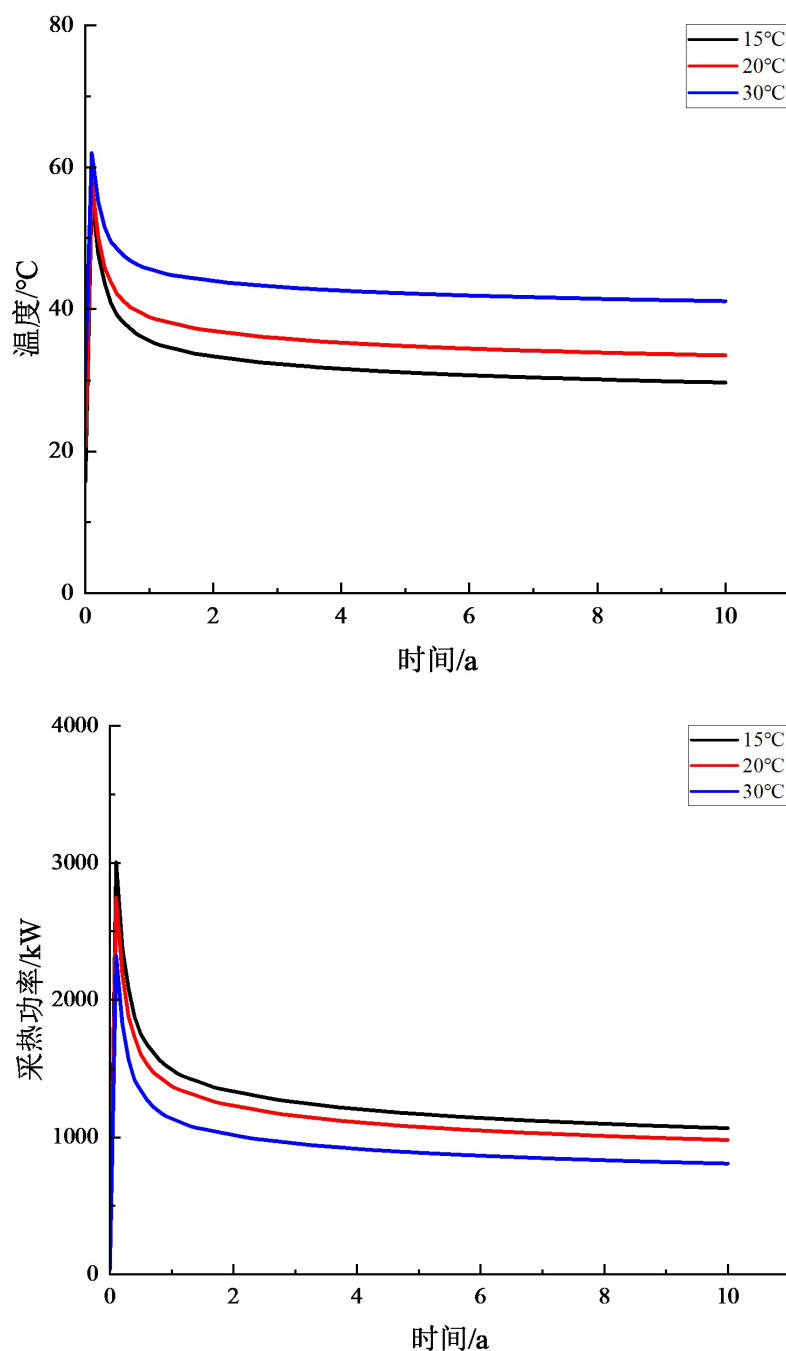


Figure 7. Comparison of heat extraction performance in a coaxial horizontal well closed-loop system under different injection temperatures

图 7. 不同注入温度下 coaxial 水平井闭式循环系统采热效果对比

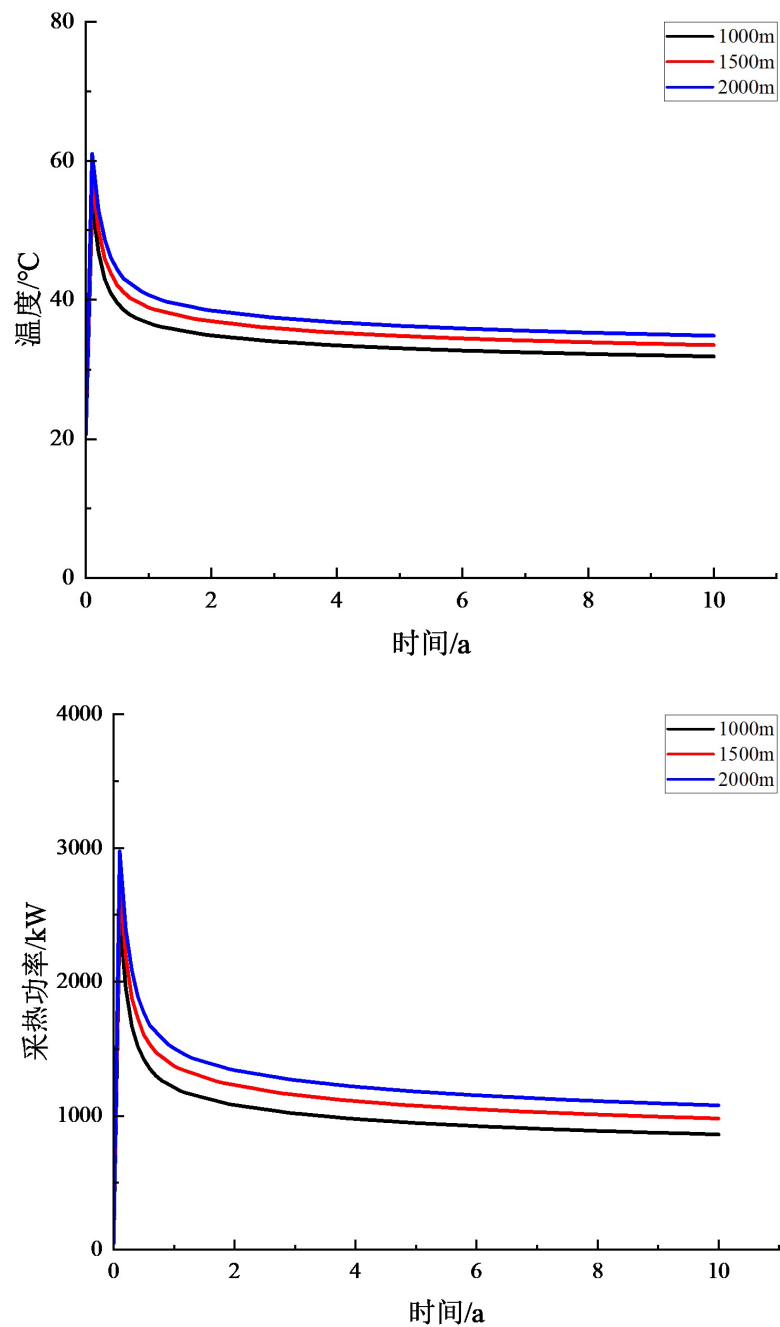


Figure 8. Comparison of heat extraction performance in a coaxial horizontal well closed-loop system under different horizontal section lengths

图 8. 不同水平段长度下同轴水平井闭式循环系统采热效果对比

4. 结论

(1) 在高循环流量 1500 m³/day，注入温度 20℃及单水平段长度 1500 m 条件下，同轴水平井运行初期井口水温达 57.84℃，采热功率为 2746.29 kW。在循环采热 10 年后，同轴水平井的井口水温下降至 33.51℃，采热功率下降到 980.43 kW。

(2) 水循环速率、注入温度、水平段长度及井间排距会影响闭式系统的采热效果。水循环速率的增加

会降低井口水温, 但会提高采热速率; 注入温度的增加能够提高井口水温, 但会降低采热速率; 水平段长度增加, 能够有效提高井口水温和采热速率。

(3) 实际应用中, 建议选取长水平段井组, 结合实际用热需求, 选取合适循环流量与注入温度, 以达到最优采热效果。

参考文献

- [1] Kabeyi, M.J.B. (2019) Geothermal Electricity Generation, Challenges, Opportunities and Recommendations. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, **5**, 53-95.
- [2] Noorollahi, Y., Pourarshad, M., Jalilinasrabad, S. and Yousefi, H. (2015) Numerical Simulation of Power Production from Abandoned Oil Wells in Ahwaz Oil Field in Southern Iran. *Geothermics*, **55**, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.01.008>
- [3] Hu, X., Banks, J., Wu, L. and Liu, W.V. (2020) Numerical Modeling of a Coaxial Borehole Heat Exchanger to Exploit Geothermal Energy from Abandoned Petroleum Wells in Hinton, Alberta. *Renewable Energy*, **148**, 1110-1123. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.141>
- [4] 宋先知, 张逸群, 李根生, 等. 雄安新区地热井同轴套管闭式循环取热技术研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(9): 971-981.
- [5] Oh, K., Lee, S., Park, S., Han, S. and Choi, H. (2019) Field Experiment on Heat Exchange Performance of Various Coaxial-Type Ground Heat Exchangers Considering Construction Conditions. *Renewable Energy*, **144**, 84-96. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.078>
- [6] 郭海明, 鲍玲玲, 李俊岩, 等. 中深层同轴套管式换热器换热性能实验[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(6): 63-68.
- [7] 刘倩. 多分支 U 型井闭式地热开采数值模拟研究[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(4): 392.
- [8] Barnard, A.C.L., Hunt, W.A., Timlake, W.P. and Varley, E. (1966) A Theory of Fluid Flow in Compliant Tubes. *Biophysical Journal*, **6**, 717-724. [https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(66\)86690-0](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(66)86690-0)
- [9] Churchill, S.W. (1977) Friction-Factor Equation Spans All Fluid-Flow Regimes. *Chemical Engineering (New York)*, **84**, 9192.
- [10] Bergman, T.L. (2011) Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons.
- [11] Lurie, M.V. (2008) Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527626199>
- [12] Coulson, J.M., Richardson, J.F., Backhurst, J.R., et al. (1999) Chemical Engineering: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer. Butterworth-Heinemann.
- [13] Liang, Y., Teng, B. and Luo, W. (2024) A New Semi-Analytical Model for Studying the Performance of Deep U-Shaped Borehole Heat Exchangers. *Renewable Energy*, **225**, Article ID: 120275. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120275>
- [14] 李春荣, 饶松, 胡圣标, 等. 川东南焦石坝页岩气区现今地温场特征[J]. 地球物理学报, 2017, 60(2): 617-627.
- [15] 李明飞, 徐绯, 窦益华. 再生老井二次射孔和三次射孔套管强度安全性评价[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(4): 453-459.
- [16] 张栋, 黄正均, 梁明纯, 等. 荷载条件下泥页岩热物性参数试验研究[J]. 中国测试, 2023, 49(2): 27-33.
- [17] 黄如玉, 孙靖杰, 李先. 西宁盆地新近系膨胀泥岩膨胀特性研究[J]. 四川建筑, 2019, 39(2): 191-193.
- [18] 朱世保, 唐波, 刘刚, 等. 重庆地区常见岩层的储热性能研究[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(7): 130-134.
- [19] 周霞, 梁波. 四川盆地元坝地区下侏罗统介壳灰岩特征与识别[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2017, 32(6): 35-43.
- [20] 杨友照. 基于第一性原理计算的碳酸盐岩及矿物热物理性质研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2020.
- [21] 高树生, 胡志明, 安为国, 等. 四川盆地龙王庙组气藏白云岩储层孔洞缝分布特征[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 103-109.
- [22] 聂海宽, 李沛, 党伟, 等. 四川盆地及周缘奥陶系——志留系深层页岩气富集特征与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 648-659.