

水热型地热水平井取热对流传热耦合机制

谷 峰, 李又武, 张 越, 高 英, 杨 鹏, 王安然, 崔景云
(中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100028)

摘要: [目的] 闭式取热技术只利用地层热量, 不抽采地热水, 近年来成为地热开发研究的重点领域之一, 但关注储层对流对传热影响的研究相对缺乏。[方法] 为了提高单井取热量, 提出水热型储层水平井闭式取热工艺, 增大井筒与储层的接触面积, 且充分利用储层对流。建立水平井、循环水、储层互相耦合的流动传热模型, 分储层自然对流、强制对流条件开展取热性能预测, 揭示储层对流场、温度场演变特征。[结果和结论] 结果表明: (1) 储层发育与水平段垂直的强制对流可有效缓解热突破, 对取热提升较为明显; 与水平段平行的强制对流与自然对流取热量无明显差异。 (2) 与上覆地层相比, 储层段对循环水温的提升占主导地位, 平均每米温度提升是上覆地层的 2.4 倍。 (3) 储层对流场和温度场演变具有高度耦合特性。当储层只存在自然对流时, 温度场变化范围与达西流动活跃区局限于井筒邻近区域, 沿径向方向扩展; 当储层发育强制对流时, 温度场和对流场在水平井筒两侧呈非对称分布, 低温区和低达西流速区位于对流下游方向。 (4) 储层温度动态恢复特征受对流条件控制。强制对流可加速对井筒周围区域热量补给, 促进温度恢复, 具备长年运行的条件。研究成果为水平井取热系统研究与设计提供借鉴。

关 键 词: 水热型地热; 水平井; 闭式取热; 对流传热耦合; 自然对流; 强制对流

中图分类号: P314 **文献标志码:** A

Convection - heat transfer coupling mechanism for closed-loop heat extraction from hydrothermal resources using horizontal wells

GU Feng, LI Youwu, ZHANG Yue, GAO Ying, YANG Peng, WANG Anran, CUI Jingyun

(CNOOC Gas and Power Group, Beijing 100028, China)

Abstract: [Objective] Closed-loop heat extraction technology, extracting geothermal energy without draining geothermal water, has emerged as a research focus in geothermal energy exploitation. However, there is a lack of studies on the impacts of convection in reservoirs on heat transfer. [Methods] To improve single-well heat extraction, this study proposed a technology of closed-loop heat extraction from hydrothermal reservoirs using horizontal wells. This technology aims to increase the contact area between wellbores and reservoirs while fully leveraging the convection in reservoirs. A flow and heat transfer model characterized by the coupling of horizontal wells, circulating water and reservoirs was established to predict the heat extraction performance under natural/forced convection in hydrothermal reservoirs and reveal the evolutionary characteristics of the convective and temperature fields in reservoirs. [Results and Conclusions] Key findings are as follows: (1) The forced convection perpendicular to the horizontal section in the reservoirs can effectively alleviate the thermal breakthrough, significantly enhancing the heat extraction efficiency. Minor differences were observed in heat extraction under natural convection and forced convection parallel to the horizontal section; (2) Compared to the overburden, the reservoirs exhibited a predominant temperature increase of circulating water, with the temperature increment per meter being 2.4 times higher than that in the overburden; (3) The evolutionary processes of convective and temperature fields in the reservoirs were highly coupled. In the presence of only natural convection in the reservoirs, the temperature field variation range and the Darcy flow active zone were limited to areas near the wellbore, spreading along the radial direction. In the case where forced convection occurred, the temperature and convective fields were asymmetrically distributed on both sides of the horizontal wellbore, with the lower temperature zone and the lower Darcy velocity zone located in the downstream direction of the convection; (4) The dynamic temperature recovery of the reservoirs were governed by convection conditions. Forced convection can promote temperature recovery by accelerating the heat supply to areas around the wellbore, creating favorable conditions for long-term operation. The results of this study provide a reference for the research and design of a heat extraction system using horizontal wells.

Keywords: hydrothermal resource; horizontal well; closed-loop heat extraction; convection - heat transfer coupling; natural convection; forced convection

收稿日期: 2023-11-08; 修回日期: 2024-08-13

基金项目: 中国海洋石油集团有限公司科技项目(CNOOC-KX 145 KXXM QD 2022-005)

第一作者: 谷峰, 1987 年生, 男, 河北辛集人, 博士研究生, 高级工程师。E-mail: gufenglyn@163.com

© Editorial Office of *Coal Geology & Exploration*. OA under CC BY-NC-ND

根据 2023 年第七届世界地热大会公布的数据, 我国地热供暖(制冷)面积已达 13.3 亿 m^2 ^[1]。地热规模化利用对我国能源结构调整、实现“碳达峰、碳中和”目标具有重要意义。从资源分类来看, 与浅层地热与干热岩相比, 水热型地热仍是当前地热开发利用产业的主力资源^[2-3]。传统水热型地热开发利用通过钻井采水-回灌的方式, 供热效率较高, 但该工艺对地热水储量及储层孔渗条件要求较高, 且尾水回灌容易发生储层阻塞和井壁腐蚀等问题^[4-6]。回灌效率较低成为了水热型地热大规模推广的瓶颈^[7]。

近年来, 井下同轴换热或中深层地埋管技术发展较为迅速。通过井筒内取热介质闭式循环取热, 做到“取热不取水”, 回避了尾水回灌的难题^[8-10]。该技术研究集中于解析解、数值解等不同模拟方法对取热量预测及取热影响因素分析^[11-15], 对循环流量、注入温度、井筒尺寸等因素对取热效果的影响有了较为成熟的认识。邹海江等^[16]结合井筒尺寸和埋深, 对直井同轴换热系统的平均供热成本做了测算。李奉翠等^[17]对该系统长期换热性能做了预测, 研究发现初始几年取热效果有较明显的下降趋势, 且地层温度恢复速率逐渐下降。同轴换热技术在我国陕西省部分地区实现了小规模商业化, 配合热泵机组, 单井供热规模 1.5~2.0 万 m^2 ^[18], 单井取热功率较钻井抽采地下热水的方式仍有很大差距^[19-20]。

前人的研究成果为该技术的工程化应用提供了重要参考, 但关于水热型储层对流过程对传热影

响及两者相互耦合关系的研究较少。部分学者在研究中, 将地下水水流速设为定值, 分析了取热效果及地层温度分布特征^[21-23]。同时, 地下水流速取定值更适用于浅层水源热泵系统, 对于中深层水热型储层, 无法真实地反映地热水流动状态, 很难准确地评价其取热性能。

基于上述问题, 笔者提出采用水平井技术在水热型储层中进行换热的新工艺。采用 COMSOL 软件, 建立流动传热耦合的 3D 有限元模型, 开展自然对流、强制对流情况下的取热效果预测, 揭示对流场、温度场的时空演变特征, 阐明不同对流条件下两者互相耦合机制, 最后预测水热型储层温度动态恢复能力, 以期对水平井取热系统的设计以及水热型地热环保可持续开发提供科学依据。

1 模型建立

1.1 物理模型

水热型地热水平井闭式取热系统工作流程如图 1 所示。直井段钻至地热储层后在储层段钻进水平段。循环介质在循环泵的驱动下, 从地表由套管和保温内管组成的环空注入井筒, 吸收热量后由保温内管返出地面。水平段的尾部用封隔器或水泥进行封隔, 使循环流体与地层隔开, 做到“取热不取水”。在储层段, 地热水存在自然对流和强制对流, 与井筒发生热传导与热对流; 在储层上覆段, 不考虑地层中的对流作用, 地层与井筒只发生热传导。

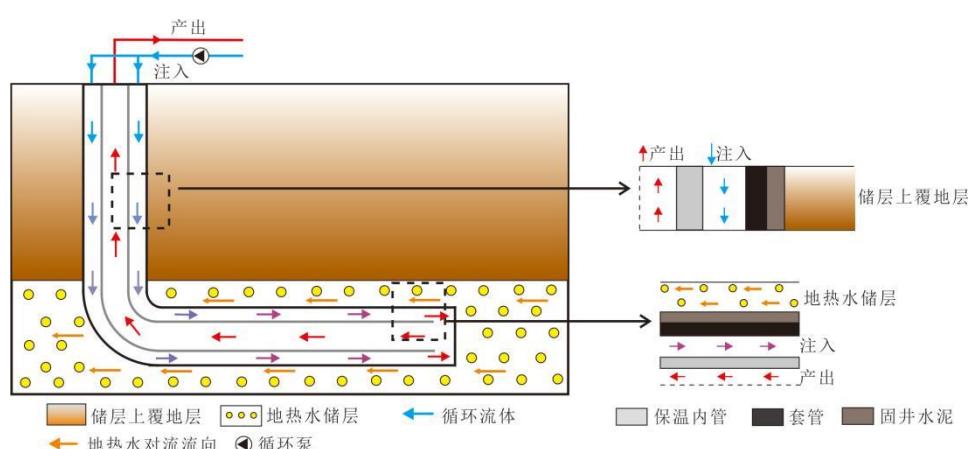


图 1 水热型地热水平井闭式取热系统

Fig.1 Schematic diagram showing the closed-loop heat extraction system of hydrothermal resources using a horizontal well

1.2 数学模型

该系统模型数学方程耦合了井筒内循环流体

的质量守恒方程、内管与环空之间的流动传热、循环流体与地层间的流动传热和地层内部的流动及传热过程, 同时考虑了流体的重力和管道流动的黏

性摩擦, 系统内各传热界面的控制方程如下^[24]:

1) 循环流体在内管的传热方程:

$$\rho_f C_f \pi r_1^2 \frac{\partial T_1}{\partial t} + \rho_f q C_f \frac{\partial T_1}{\partial z} - \nabla \cdot (\pi r_1^2 \lambda_f \nabla T_1) = \frac{T_2 - T_1}{R_1} + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_f \pi r_1^2}{D} |u_f| u_f^2 \quad (1)$$

2) 流体在井筒环空的流动传热方程:

$$\rho_f C_f \pi (r_3^2 - r_2^2) \frac{\partial T_2}{\partial t} + \rho_f q C_f \nabla T_2 - \nabla \cdot (\pi (r_3^2 - r_2^2) \lambda_f \nabla T_2) = \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_f \pi (r_3^2 - r_2^2)}{D} |u_f| u_f^2 + \frac{T_1 - T_2}{R_2} \quad (2)$$

f_D 根据 Churchill 模型计算^[25]。 R_1 、 R_2 由套管、内管管径、传热介质导热系数和界面对流系数决定, 对流系数由努塞尔公式计算^[26]。

3) 储层内部的传热方程:

$$(\rho c)_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial t} - \nabla (\lambda_{eff} \cdot \nabla T_s) + \rho_f C_w v_f \nabla T_s = \frac{(T_2 - T_s)}{R_2} \quad (3)$$

储层中的自然对流和强制对流符合达西定律:

$$v_f = -\frac{k}{\mu_f} (\nabla p_f - \rho_f g \nabla z) \quad (4)$$

公式中 ∇ 代表某一变量在某方向上的微分。本文采用水作为循环流体, 同时考虑不同温度下的密度、黏度、比热容等物性参数变化。参考美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 数据库^[27]计算水的物性参数。

1.3 几何模型

本次建模几何模型如图 2 所示。直井段、水平段长度分别设置为 2500、500m, 储层深度为 2450~2550m。井筒环空及内管的传热简化为一维模型, 地层为三维模型, 两者之间通过井筒环空的传热进行耦合。地层模型横截面为边长 100m 的正方形, 井筒轨迹位于模型中央。假设储层为均匀多孔介质, 孔隙率、渗透率各向均匀设定。在传热过程中, 储层和上覆地层的密度、比热容、导热系数随自身温度变化很小, 对取热效果的影响可以忽略不计, 故在本文模拟中以上 3 个参数取定值。具体地层参数和井身结构设置见表 1、表 2。本文考虑储层自然对流和与水平段垂直的 X 方向、与水平

段平行的 Y 方向强制对流 3 种情况, 分析储层对流过程对取热的影响, 选取 $X=-50m$ 截面和过水平段的 ab 截线来进行模拟结果展示与分析(图 2)。

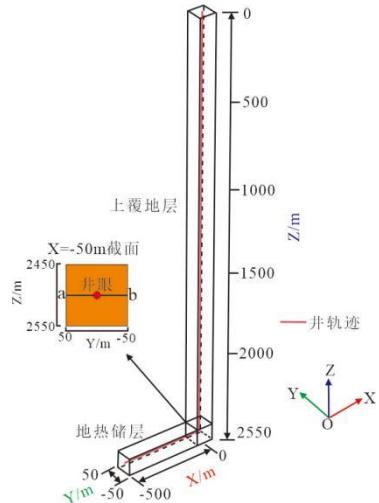


图 2 水热型地热井几何模型

Fig.2 Geometric model of a hydrothermal well

表 1 模型地层参数设置

Table 1 Parameter settings for strata in the model

参数	地热储层	上覆地层
密度/(kg m ⁻³)	2600	2300
比热容/(J kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	1000	900
导热系数/(W m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	2.3	2.2
孔隙率/%	10	2
渗透率/10 ⁻³ μm ²	100	0

表 2 模型井身结构及材料导热系数设置

Table 2 Parameter settings for casing program and material thermal conductivities in the model

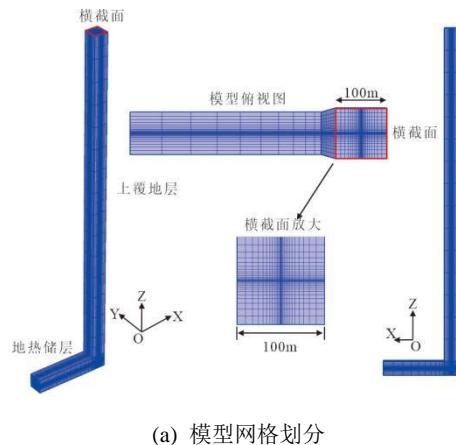
项目	数值
固井水泥外径/m	0.2445
套管外径/m	0.1799
套管内径/m	0.1661
保温内管外径/m	0.114
保温内管内径/m	0.076
固井水泥导热系数/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0.8
套管导热系数/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	40
保温内管导热系数/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0.02

模拟中设置地表温度 15°C, 地温梯度 3°C/hm, 地热储层内温度取定值, 为储层顶面 2450m 处的地层温度。储层垂向压力为静水压力, 横向强制对流压力梯度 4500[Pa/m]^[28]。模型边界温度设置为定温条件, 为原始地层温度。井口注入温度 10°C, 循环流量 600m³/d, 井出口压力为 0.1MPa。井筒内流体的初始温度设置为与原始地层温度相同, 计算时间为一个供暖季 120d。采用基于牛顿法的全耦合方法对模型进行求解, 将绝对容差作为收敛标准,

设置为 10^{-4} 。

1.4 网格划分与模型验证

实现模型空间离散化需要进行网格划分,在反映客观实际情况的同时尽可能减少网格数量,节省计算时间。首先,在模型的正方形横截面上建立四边形网格,对井筒附近区域进行了细化;再将横截面网格沿 z 轴方向划分至地热储层顶面。水平段网格采用同样的方法进行划分。网格的划分方法及不同网格数量的求解结果如图 3 所示。运行 120d 后的井出口温度随着网格数的增加而逐渐降低,当网格数超过 76000 时,出口温度趋于稳定,维持在 22.3°C,不再随网格数量的增加而降低。因此,在此模型离散中采用约 76000 的网格数。



(a) 模型网格划分

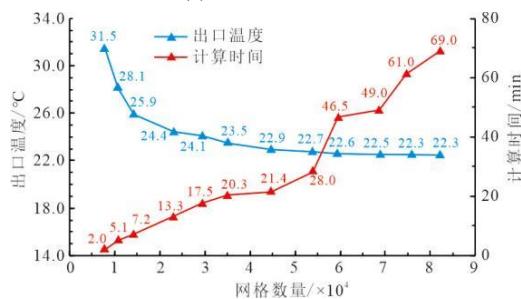


图 3 网格划分及对计算结果的影响

Fig.3 Gridding and its impacts on the calculation results

通过公开文献资料调研,业内尚未有现场实施的水平井闭式取热项目。无论是直井还是水平井闭式取热系统,井筒内循环流体的流动和传热机理一致,具有相同的控制方程。因此,本文选取文献中 HGP-A 直井闭式取热系统的测试结果对本次模型的准确性进行验证。井身结构和参数设置见表 3、表 4。采用本文的模型,输入 HGP-A 井的参数进行计算,结果与实测数据吻合度较高(图 4)。表明本文建模方法较为可靠,可以用于开展水平井取

热模拟。

表 3 HGP-A 导热系数设置^[29-30]

Table 3 Thermal conductivity settings of well HGP-A

[29-30]

结构参数	密度/ (kg m ⁻³)	比热容/ (J kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	导热系数/ (W m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
套管	8060	400	43.75
保温内管	7850	465	43.5
固井水泥	2140	2000	0.8
空气	0.225	1013	0.026
地层	2650	920	2.8

表 4 HGP-A 井身结构设置^[29-30]

Table 4 Parameter settings for the casing program of well

HGP-A^[29-30]

井身结构参数	数值
保温内管内径/m	0.0506
保温内管外径/m	0.089
套管内径/m	0.1617
固井水泥内径/m	0.1778
井眼内径/m	0.2159
井深/m	876.5

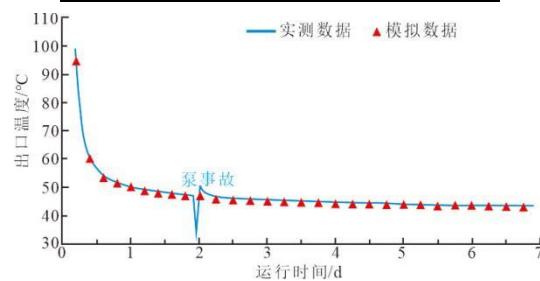


图 4 HGP-A 井模拟数据与实测数据对比(据[29-30]修改)

Fig.4 Comparison between the simulated and measured data of well HGP-A (modified after references [29-30])

2 取热效果

为了研究取热过程中不同储层对流条件下的地热水流动特征及其对取热性能的影响,本文分储层只存在自然对流、与水平段走向垂直的强制对流(沿 Y 轴)、与水平段走向平行的强制对流(沿 X 轴) 3 种情况开展计算分析。

2.1 出口温度及取热功率

图 5 显示了地热井出口温度和取热功率在一个供暖季期间内的变化。3 种对流条件下井出口温度峰值相近,约为 36.0°C;随后经过快速下降和缓慢下降两个阶段后维持近平稳运行。经过 120d 后,沿 Y 方向强制对流情况下出口温度和取热功率最高,为 23.5°C 和 342.2kW,与其他两类储层对流情况相比,减缓了热突破,在运行约 40 天后出口温

度和取热功率下降速度明显变缓。沿 X 轴的强制对流和储层只存在自然对流时取热效果接近, 出口温度分别为 22.5 和 22.3°C , 对应的取热功率分别为 316.8 和 315.1kW 。这是由于在地下取热过程中, 井筒内循环水与地层发生热交换, 传热方向发生在沿井筒径向方向。当储层强制对流沿 X 轴方向也就是和水平井段平行时, 对井筒附近的热量补给较少, 对取热效果的提升不明显。

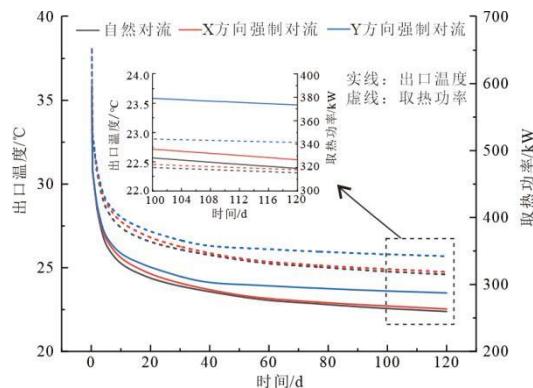


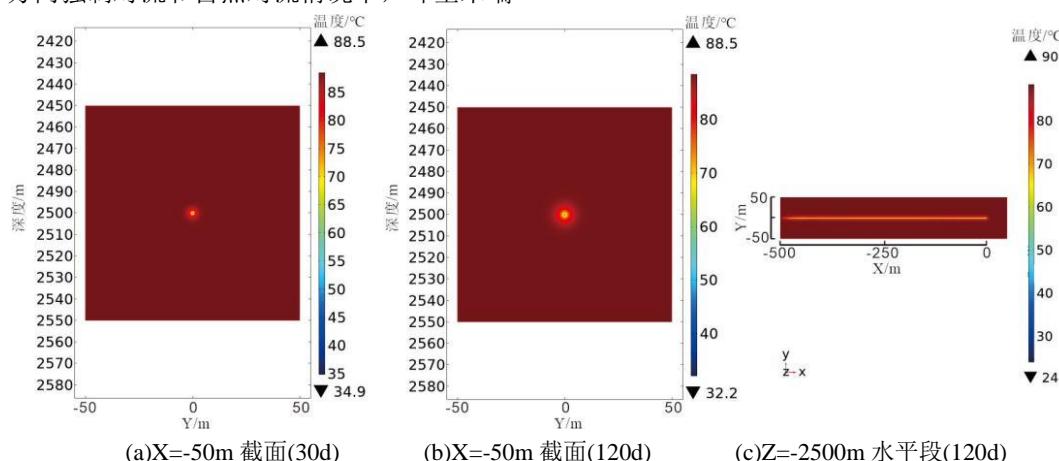
图 5 3 种储层对流情况下取热效果随时间变化

Fig.5 Time-varying heat extraction performance under three convection conditions of reservoirs

2.2 循环水温沿井轨迹分布

图 6 展示了循环水温度沿井轨迹分布特征。环空注入水温随着深度的增加持续升高, 在内管产出过程中温度几乎保持不变。3 种对流情况下环空循环水温度曲线在储层上覆地层范围内几乎重合。运行 120 d 后, 由 10.0°C 升高至 18.8°C , 平均每 100m 水温升高 0.36°C 。进入储层段, Y 方向强制对流条件下的循环水温提升明显高于其他两种情况, 至水平段末端温度提升至 23.6°C , 水平段内平均每 100m 水温升高 0.87°C , 较上覆地层提升 142% 。

在 X 方向强制对流和自然对流情况下, 环空末端



循环水温分别为 22.4 和 22.5°C , 平均每 100 m 较储层上覆直井段提升 81.8% 。无论储层存在哪一类对流情况, 水热型储层中水平段对取热的贡献明显高于上覆直井段。

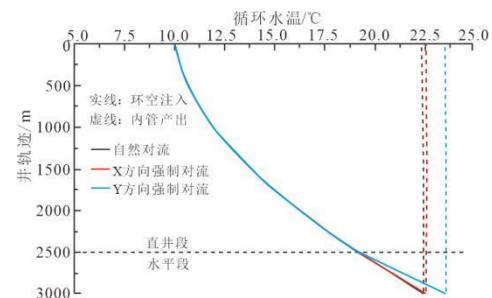


图 6 3 种对流条件下循环水沿井轨迹温度分布(120d)

Fig.6 Temperature distributions of circulating water along the well trajectory under three convection conditions of reservoirs (120d)

3 储层温度-对流场耦合机制

3.1 温度场演变特征

根据前文 3 种对流条件对单井取热性能的研究结果, 储层强制对流与水平井段平行时, 对取热几乎未产生显著影响。后文针对储层只存在自然对流和与水平井段垂直的强制对流两种条件开展储层温度场和流动场特征分析。图 7 展示了储层只存在自然对流时地层温度场随时间的变化。在取热过程中, 温降范围沿着径向方向逐步扩大。运行 120 d 后, 井筒周围温降半径约 10.5m 。近井地带储层温度降幅较大; 由于储层导热系数较低, 远离井筒方向, 温度下降梯度迅速减小。从储层温度横切面来看, 井筒两侧温度呈对称性分布。当只存在自然对流时, 储层温度沿径向方向的影响程度一致。

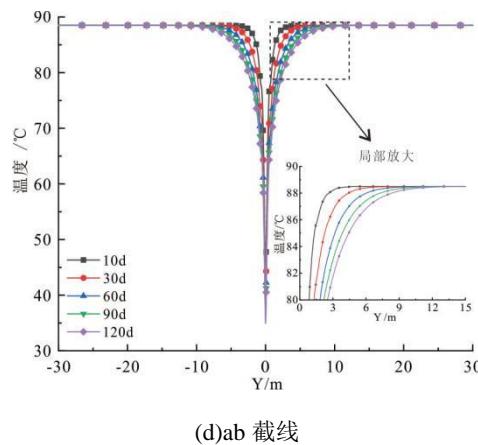


图 7 自然对流情况下地层温度场随时间变化

Fig.7 Time-varying formation temperature field under natural convection

图8展示了强制对流沿Y方向条件下的储层温度场分布。水平段径向温度分布与自然对流条件下截然不同，在井筒两侧储层温度呈现类似“r”形非对称分布。在对流下游方向，储层温度下降幅度较大，且随着取热的进行，波及范围逐渐扩大。这是因为在取热过程中，井筒邻近区域温度下降，在

对流压力梯度作用下，强制对流将井筒周边形成的低温区“携带”至对流下游区域。运行120d后，波及范围约26.0m。而在对流上游方向，井筒邻近区域持续接受远距离较高品位热量补给，储层温度等值线贴近井筒中心线，基本已经恢复到原始温度状态。储层切面温度也体现了相同的特征。

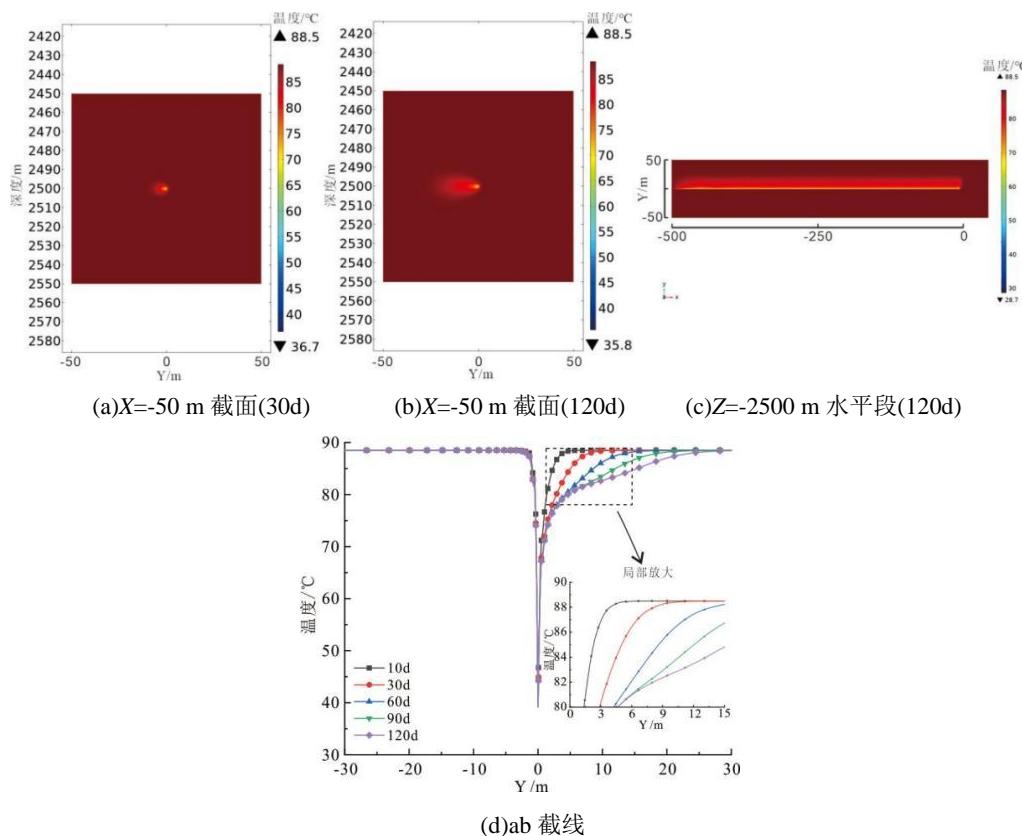


图 8 Y 方向强制对流情况下储层温度场随时间变化云图

Fig.8 Time-varying reservoir temperature field under forced convection along the Y axis

3.2 储层对流场特征

无论是自然对流还是强制对流，地热水在储层

中的流动符合达西定律。地热水流动与井筒、地层之间的传热是互相作用，双向耦合的关系。储层温度变化引起储层地热水物理性质的变化，造成达西

流动性质的改变,从而影响井筒内外传热;井筒内外的传热过程也直接导致储层温度的变化,影响地热水的流动状态。

图9显示了储层只考虑自然对流条件下取热过程中达西流场演变特征。总体来看,流动速度相对缓慢,绝大部分区域流速处于 10^{-12}m/s 数量级。井筒附近对流相对活跃,运行120d后,达西速度最高 $2.5\times10^{-8}\text{m/s}$ 。井筒附近的流速变化呈对称分布,由中心井点位置向四周逐渐降低。根据公式(4),自然对流由地热水的黏度、密度的变化驱动。在取热过程中,井筒附近储层温度下降;根据水的物理性质参数,地热水密度和黏度增大,驱动了井筒周围较为活跃的自然对流。远离井筒传热波及不到的区域,地热水物理性质保持稳定,地热井运行期间流速保持较缓慢的状态。

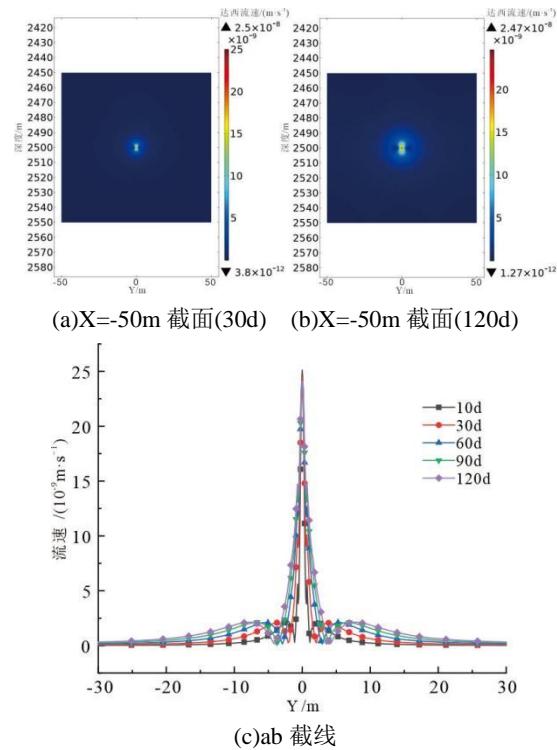


图9 自然对流条件下储层达西流速随时间变化

Fig.9 Time-varying Darcy velocity under natural convection

当储层存在与水平段垂直的强制对流时,储层对流场分布呈现与温度场相同的特征。井筒附近流动相对缓慢,在井筒两侧呈现与温度场分布类似的“r”形不对称性。取热过程中,储层温度降低,地热水密度和黏性增大,不利于流动。在同样的对流压力梯度作用下,流动变缓,对流的下游区域出现“低速区”。随着取热的进行,井筒附近储层温度进一步降低,地热水流动性进一步降低,低速区

范围逐步扩展。在强制对流上游方向受热量补给,储层地热水物理性质相对稳定,达西流低速区范围相对较小。而在传热波及不到的区域,地热水物理性质保持不变,达西流速只与对流压力梯度有关,速度稳定在 $1.3\times10^{-6}\text{m/s}$ 。运行120d后,在井筒附近达西流速降至 $7.5\times10^{-7}\text{m/s}$,对流下游方向低速区范围约26.0m;而上游方向,速度曲线逐渐向井筒靠拢,低速区波及范围仅5m左右(图10)。

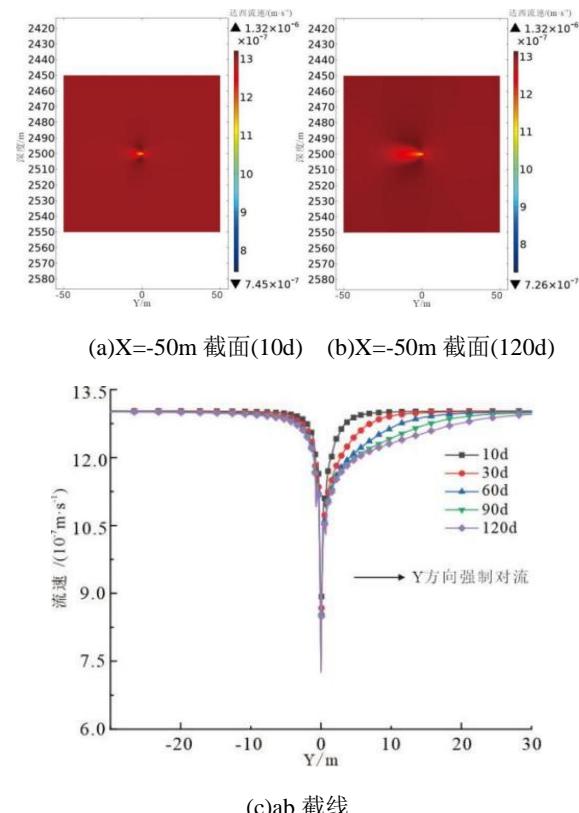


图10 Y方向强制对流条件下储层达西流速随时间变化

Fig.10 Time-varying Darcy velocity under forced convection along the Y axis

4 储层温度动态恢复特征

在一个供暖季结束至下一个供暖季之前,地层温度能否恢复是评价闭式取热系统能否持续稳定运行的关键。运行120d后,井筒邻近区域地层温度降至 32.2°C 。此时井筒附近温降区域与传热未波及的区域温差较大,地层温度恢复较快;经过60天,井筒邻近温度恢复至 81.2°C 。随着时间的推移,温度恢复速率变缓。经过240d恢复后,井筒邻近温度为 86.1°C ,较原始地温低 2.4°C (图11)。当储层只存在自然对流时,单纯靠储层岩石的导热能力,在文中取热条件下,无法恢复至原始温度。长年运行后,地热井取热效率将明显下降。

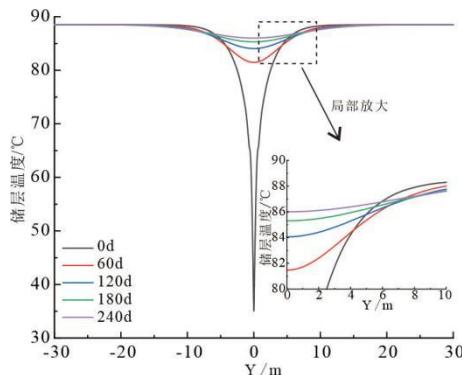


图 11 自然对流情况下地层温度恢复随时间变化(0d 为恢复起始时间)

Fig.11 Time-varying formation temperature recovery under natural convection (0d: the initial recovery time)

图 12 展示了储层存在 Y 方向强制对流情况下的地温动态恢复情况。运行 120d 后井筒邻近区域温度降至 36.2°C ，在强制对流作用下将井筒区域形成的低温带携带至下游区域。恢复初期，井筒附近储层温度与传热未波及的区域温差较大，温度恢复较快。恢复 60d 后，低温带中心温度恢复至 84.7°C ，冷锋面位于对流下游方向距离井筒 13m 处。随后地温恢复速度变缓，恢复 120、180d 后冷锋中心温度分别达到 85.9 和 86.5°C ，冷锋面依次向对流下游方向移动。恢复 240d 后，低温带移动至距离井筒 44m 位置，中心位置地层温度 86.9°C ，比原始储层低 1.6°C 。从局部放大图可以看到，在地热井运行 120 天后，对流下游方向地温波及半径 40m；温度恢复 240d 后地温曲线与 120d 地温线相交于 88.0°C ，比原始储层温度低 0.5°C ，交汇位置径向上距离井筒 26.9m。同时可以看到，对流下游方向大约 20m 范围的储层温度较取热前仅相差 0.5°C ，恢复程度较仅存在自然对流的情况显著提升。

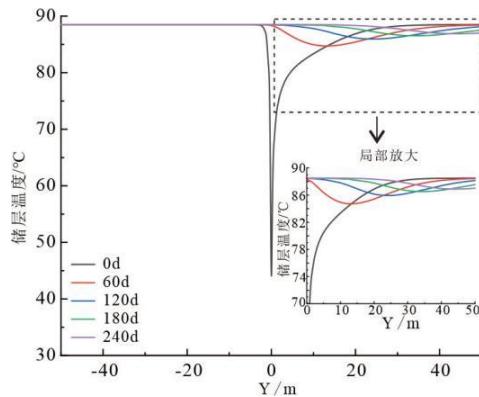


图 12 Y 方向强制对流条件下储层温度恢复情况

Fig.12 Reservoir temperature recovery under forced convection along the Y axis

在进行井距设计时，若钻井沿着储层对流方向排布，必须要考虑强制对流对地温场波及范围和恢复程度的影响。在文中对流参数条件下，恢复 240d，冷锋中心位于对流下游 44m。在沿着对流方向布井时，位于下游方向的井一是要避免井距过小，同时还要避开间歇期恢复后在下游区域形成的冷锋带。

5 结论

(1) 储层对流条件对地热井取热具有明显的控制作用。当强制对流垂直于水平段时，可有效缓解热突破，提升井壁内外的传热效果。当强制对流平行于水平段走向时，对储层-井筒之间的传热影响较小，取热效果与自然对流无明显差异。

(2) 水平段位于地热储层内，循环水可较充分地与储层进行传热。与上覆岩层相比，对循环水的温度提升幅度占主导地位，体现出水平井系统的优势。

(3) 受传热过程中地热水物理性质变化的影响，储层温度场和对流场体现出较强的耦合特性。自然对流条件下，传热波及范围较小，储层温度场、对流场以井筒为圆心沿径向方向拓展，井筒邻近区域地热水密度增大，驱动了较活跃的达西流动。强制对流条件下，储层温度场、对流场在井筒两侧呈非对称性分布，低温区和低速区位于对流下游方向；对流上游持续接受热量补给，温降范围较小。

(4) 储层对流条件决定了储层温度恢复能力。在垂直水平段的强制对流作用下，可显著提升储层温度恢复能力，经过 240d 基本恢复至原始温度。自然对流下，单纯靠岩石的导热能力难以恢复至原始温度条件。在实际工程设计井距时，要考虑在强制对流下游方向避开冷锋区域。

符号注释：

C_f 、 C_w 分别为循环水和地热水比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； C_{eff} 为考虑孔隙率的储层等效比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； D 为管流水力直径， m ； f_D 为摩擦因子，无量纲； g 为重力加速度， m/s^2 ； k 为储层渗透率， μm^2 ； p_f 为储层对流压差， Pa ； q 为循环流体流量， m^3/d ； r_1 、 r_2 和 r_3 分别为保温内管内半径，环空区域的内半径和外半径， m ； R_1 、 R_2 分别为保温内管内外壁的热阻系数， $(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})/\text{W}$ ； t 为运行时间， s ； T_1 、 T_2 分别为内管和环空内循环水温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_s 为地层温度， $^{\circ}\text{C}$ ； λ_{eff} 为考虑孔隙率的储层等效导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； λ_f 为循环流体导热系数，

$W/(m \cdot ^\circ C)$; u_f 为井筒内循环水流速, m/s ; v_f 为储层中地热水达西流速, m/s ; μ_f 为地热水黏度, $Pa \cdot s$; ρ_f 为水的密度, kg/m^3 ; ρ_{eff} 为考虑孔隙率的储层等效密度, kg/m^3 ; $(\rho C)_{eff}$ 为考虑孔隙率的储层等效体积比热容, 是 ρ_{eff} 和 C_{eff} 的乘积, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$ 。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 2023 第七届世界地热大会. 中国地热直接利用规模居世界首位 . [EB/OL]. <http://jx.people.com.cn/n2/2023/0918/c186330-40574420.html>. 2024-03-18.
- [2] 何淼, 龚武镇, 许明标, 等. 干热岩开发技术研究现状与展望分析[J]. 可再生能源, 2021, 39(11): 1447 – 1454.
HE Miao, GONG Wuzhen, XU Mingbiao, et al. Research status and prospect analysis of hot dry rock development technology[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(11): 1447 – 1454.
- [3] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1 – 9.
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1 – 9.
- [4] 曹倩, 方朝合, 李云, 等. 国内外地热回灌发展现状及启示[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(2): 203 – 211.
CAO Qian, FANG Chaohe, LI Yun, et al. Development status of geothermal reinjection at home and abroad and its enlightenment[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 203 – 211.
- [5] 许勇. 西安三桥地区孔隙型地热尾水回灌模拟及前景展望[D]. 西安: 长安大学, 2018.
XU Yong. Simulation and Prospect of Pore Type Geothermal Tail Water Reinjection in Sanqiao District of Xi'an: A cases study of geothermal reinjection wells of Huisen company[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [6] 赵军, 宋超凡, 尹洪梅, 等. 越流型单井系统含水层渗流传热规律研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(4): 333 – 345.
ZHAO Jun, SONG Chaofan, YIN Hongmei, et al. Investigating the seepage and heat transfer law of aquifers in the leaky type single-well system[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(4): 333 – 345.
- [7] 许天福, 姜振蛟, 袁益龙. 中深部地热资源开发利用研究现状与展望[J]. 中国基础科学, 2023, 25(3): 11-22.
XU Tianfu, JIANG Zhenjiao, YUAN Yilong. Research status and prospects of middle and deep geothermal resources exploitation and utilization[J]. China Basic Science, 2023, 25(3): 11–22.
- [8] HORNE R N. Design considerations of a down-hole coaxial geothermal heat exchanger[J]. Geothermal Resources Council, 1980, 4: 569–572.
- [9] KOHL T, BRENNI R, EUGSTER W. System performance of a deep borehole heat exchanger[J]. Geothermics, 2002, 31(6): 687 – 708.
- [10] 邓杰文, 彭晨玮, 朱超, 等. 中深层地埋管热泵供热系统运行特性实测研究[J]. 暖通空调, 2024, 54(4): 113-119.
DENG Jiewen, PENG Chenwei, Zhu Chao, et al. Field test and analysis on operation characteristics of medium-depth buried pipe heat pump heating systems[J]. Journal of HV&AC, 2024, 54(4): 113–119.
- [11] LUO Yongqiang, GUO Hongshan, MEGGERS F, et al. Deep coaxial borehole heat exchanger: Analytical modeling and thermal analysis[J]. Energy, 2019, 185: 1298 – 1313.
- [12] 焦开拓, 孙成珍, 白博峰, 等. 地下水渗流对中深层地埋管取热性能的影响规律[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 85 – 93.
JIAO KaiTuo, SUN Chengzhen, BAI Bofeng, et al. Effect of groundwater advection on heat transfer performance of deep borehole heat exchangers[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 85 – 93.
- [13] 张哲菲, 刘洪涛, 刘攀峰, 等. 中深层地热地埋管实际运行影响因素研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(12): 503 – 509.
ZHANG Zhefei, LIU Hongtao, LIU Panfeng, et al. Study on actual operation and influencing factors of middle-deep geothermal buried pipe[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(12): 503 – 509.
- [14] LE LOUS M, LARROQUE F, DUPUY A, et al. Thermal performance of a deep borehole heat exchanger: Insights from a synthetic coupled heat and flow model[J]. Geothermics, 2015, 57: 157 – 172.
- [15] ZANCHINI E, LAZZARI S, PRIARONE A. Improving the

- thermal performance of coaxial borehole heat exchangers[J]. Energy, 2010, 35(2): 657 – 666.
- [16] 邹海江, 李永鹏, 张林, 等. 陕北地区中深层同轴地埋管取热性能影响因素分析及优化[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(1): 152 – 158.
ZOU Haijiang, LI Yongpeng, ZHANG Lin, et al. Influencing factor analysis and optimization of heat extraction performance of moderately deep coaxial borehole heat exchangers in Northern Shaanxi, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(1): 152 – 158.
- [17] 李奉翠, 韩二帅, 梁磊, 等. 中深层地热井下同轴换热器长期换热性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 194 – 201.
LI Fengcui, HAN Ershuai, LIANG Lei, et al. Long-term heat transfer performance of underground coaxial heat exchanger for medium-deep geothermal[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 194 – 201.
- [18] 王沣浩, 蔡皖龙, 王铭, 等. 地热能供热技术研究现状及展望[J]. 制冷学报, 2021, 42(1): 14 – 22.
WANG Fenghao, CAI Wanlong, WANG Ming, et al. Status and outlook for research on geothermal heating technology[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(1): 14 – 22.
- [19] WANG Zhihua, WANG Fenghao, LIU Jun, et al. Field test and numerical investigation on the heat transfer characteristics and optimal design of the heat exchangers of a deep borehole ground source heat pump system[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 153: 603–615.
- [20] HUANG Yibin, ZHANG Yanjun, XIE Yangyang, et al. Thermal performance analysis on the composition attributes of deep coaxial borehole heat exchanger for building heating[J]. Energy and Buildings, 2020, 221: 110019.
- [21] SONG Xianzhi, ZHENG Rui, LI Gensheng, et al. Heat extraction performance of a downhole coaxial heat exchanger geothermal system by considering fluid flow in the reservoir[J]. Geothermics, 2018, 76: 190 – 200.
- [22] ZHANG Liang, YANG Linchao, GENG Songhe, et al. Numerical simulation on the heat extraction from the porous medium-low temperature geothermal reservoirs by self-circulation wellbore and its enhanced methods[J]. Renewable Energy, 2022, 194: 1009 – 1025.
- [23] KANG Wenkai, LIU Feng, YANG Feifan, et al. Simulation of heat transfer performance using middle-deep coaxial borehole heat exchangers by FEFLOW[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2020, 8(4): 315–327.
- [24] GU Feng, LI Youwu, TANG Dazhen, et al. Heat extraction performance of horizontal-well deep borehole heat exchanger and comprehensive comparison with the vertical well[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118426.
- [25] CHURCHILL S W. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes[J]. Mechanical Engineering (NY), 1977, 84: 91–92.
- [26] GNIELINSKI V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow[J]. Mechanical Engineering, 1976, 16(2): 8–16.
- [27] LINSTROM PJ, MALLARD W G. The NIST chemistry WebBook: A chemical data resource on the Internet[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2001, 46(5): 1059 – 1063.
- [28] WANG Gaosheng, SONG Xianzhi, SONG Guofeng, et al. Analyzes of thermal characteristics of a hydrothermal coaxial closed-loop geothermal system in a horizontal well[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 180: 121755.
- [29] MORITA K, YAMAGUCHI T, KARASAWA H, et al. Development and evaluation of temperature simulation code for geothermal wells[J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1984, 100(1161): 1045 – 1051.
- [30] MORITA K, BOLLMEIER W S, MIZOGAMI H. Analysis of the results from the downhole coaxial heat exchanger (DCHE) experiment in Hawaii[J]. Geothermal Resources Council, 1992, 16: 17–23.