

基于平行多裂隙模型的美 国沙漠峰地 热田 EGS 热恢复研究

翟海珍^{1,2} 苏正¹ 凌璐璐¹ 吴能友¹

(1. 中国科学院可再生能源重点实验室, 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 恢复是保证增强型地热系统长期稳定的有效措施, 本文以美国沙漠峰地热田为例, 采用平行多裂隙模型对其进行采热-热恢复过程数值模拟研究。结果表明: 热恢复过程初期温升迅速梯度大, 后期明显减慢。热恢复的主要影响因素为热恢复温度初场及热恢复时间周期。热储激发程度与流体流量共同决定了热恢复温度初场, 二者对热恢复过程的影响效应与热开采过程相一致。换热单元体厚度、流体流量及采热-热恢复周期均与产出温度和热储寿命呈负相关。系统循环流量为 100 kg/s、换热单元体厚度为 100 m、采热-热恢复周期为 5 年时, 热储寿命达 34.0 年, 较连续开采延长 11.9 年。

关键词 增强型地热系统; 热恢复; 平行多裂隙模型; 沙漠峰

中图分类号: TK521 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2017)01-0134-07

Study of EGS Heat Recovery by Multi-Parallel Fracture Model at Desert Peak Field, USA

ZHAI Hai-Zhen^{1,2} SU Zheng¹ LING Lu-Lu¹ WU Neng-You¹

(1. Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Heat recovery is an effective way to ensure the long-term stable operation of EGS. Based on the geological background of American Desert Peak field, we studied the heat extraction and heat recovery process with multi-parallel fracture model. The results suggest that, in the initial period of heat recovery process, temperature rises rapidly in a large gradient, while slows down in the latter period. Two main affecting factors of the recovery process are the initial temperature field and the recovery time period. For affecting the initial temperature of the recovery process together, the stimulation degree of the reservoir and the fluid flow has the same impact on the heat recovery process as on the heat extraction process. The thickness of heat transfer unit (HTU), fluid flow, and the heat extraction and recovery period are negatively correlated with outlet temperature and lifetime. The system with a circulation fluid flow of 100 kg/s, thickness of HTU of 100 m, heat extraction and recovery period of 5 years, has a lifetime of 34.0 years, which is prolonged for 11.9 years compared to continuous heat extraction.

Key words EGS; heat recovery; multi-parallel fracture mode; desert peak

0 引 言

增强型地热系统 (Enhanced Geothermal System, EGS) 商业可行性的主要目标是在储层内流体与岩体充分接触的条件下, 使生产井保持高流量和高温度, 同时确保足够长的储层寿命^[1,2]。然而随着 EGS 开发工程的进行, 热储岩体的温度下降, 当温

度降低至一定的范围后 (一般为热储温度下降 10% 或出水温度下降 10%), 热量传输缓慢, 地热能开采效率低^[3-7]。此时需要停止热开采并对储层进行热恢复, 使低温区温度重新升高, 以实现较高效率的回采过程。研究表明热储层的激发程度对热开采过程

收稿日期: 2016-05-24; 修订日期: 2016-12-18

基金项目: NSFC-广东联合基金项目 (No.U1401232); 广东省自然科学基金重大基础培育项目 (No.2014A030308001); 中科院广州能源所所长基金 (No.y107a41001)。

作者简介: 翟海珍 (1990-), 女, 博士研究生, 主要从事增强型地热系统数值模拟研究。通信作者: 苏正, 研究员, Email: suzheng@ms.giec.ac.cn

有显著影响, 热储激发程度低将导致产出温度下降快, 储层热采率低, 热储芯部热量难以得到开采, 此时对热储层实施热恢复非常关键^[8]。

目前对于中低温地热热恢复过程的研究已较为充分。Prichett^[9] 研究了热开采和热恢复过程中压力、温度和蒸汽量的演化特征; Thomas 等^[6] 对法国贝塞尔市某低温双井式加热系统的热恢复进行了数值模拟研究, 结果表明热开采 - 热恢复周期越短, 采热量越大; Rybach 等^[10] 分别给出了高焓、低温双井系统及地源热泵系统等不同地热利用形式温度场恢复重建的时间尺度, 论证了地热能的可再生性。对于高温地热资源 EGS 的热恢复研究尚不广泛, 但随着 EGS 热开采的商业化, 对其热恢复研究也会日趋重要^[7]。目前, Fox 等^[11] 利用多裂隙模型研究了裂隙数目对热恢复过程的影响, 发现多裂隙 EGS 储层对于维持较高流体产出温度呈正效应; 陈继良等^[12] 研究了热补偿对 EGS 采热过程的影响, 热补偿效应对产出温度的影响与热储内流场形态密切相关, 并不总是提高 EGS 产出温度。

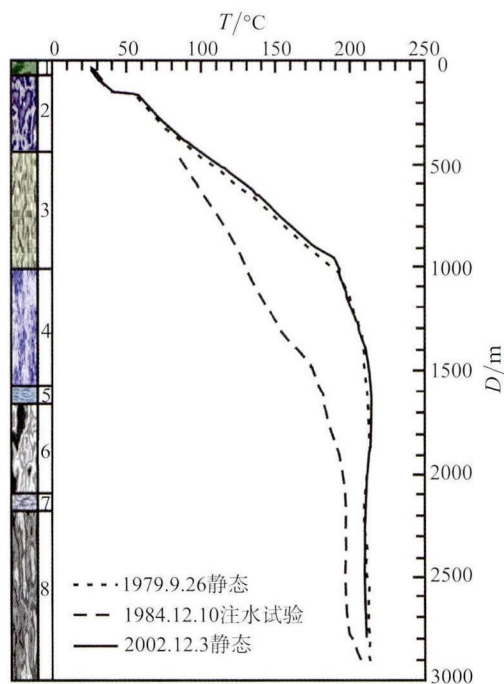


图 1 沙漠峰 DP 23-1 井岩层分布及测温曲线^[14]。构造: 1. 特拉基 + 沙漠峰; 2. Chloropagus 组; 3. 流纹岩层; 4. pT1 变质沉积物层; 5. pT2 石英二长闪长岩; 6. pT2 变质沉积岩; 7. pT2 角闪石花岗闪长岩; 8. 二云母花岗闪长岩

Fig. 1 Lithology, completion and downhole survey data, well DP 23-1^[14]. Formations: 1. Truckee+Desert Peak; 2. Chloropagus Formation; 3. Rhyolite Unit; 4. pT1 Metasediments; 5. Quartz Monzodiorite (pT2); 6. pT2 Metasediments; 7. Hornblende Diorite (pT2); 8. Two-Mica Granodiorite

本文结合美国沙漠峰地热田开发的基本资料, 采用引入围岩的平行多裂隙模型进行储层的热恢复研究, 在热恢复过程中停止冷流体的注入, 热储岩体以热传导形式完成热恢复。通过数值模拟方法探究采热 - 热恢复过程中的流体温度特征及岩体温度场演化, 分析采热 - 热恢复周期, 换热单元体厚度及流体流量等因素对此过程的影响, 为地热田热恢复策略的制定提供参考。

1 地质背景

美国沙漠峰 EGS 项目选址于 Nevada 州 Reno 市东北方向 130 km 处的沙漠峰水热型地热田东部边缘, 由 ORMAT 内华达州公司与美国能源部共同出资, 旨在调研在此处建立地下人工热储层和增强型地热系统开发深层地热资源的在技术和经济上的可行性。其目标是建立一个发电功率为 2~5 MW 独立、双循环发电 EGS 示范工程^[13,14]。

2002~2005 年间以 DP23-1 井为切入点完成了该区的 EGS 资源潜力评价。图 1 所示为 DP23-1 井的岩性和温度分布。勘探的目标层段位于 1219~2743 m 间, 始于第 4 层 pT1 变质沉积物层的下部, 止于第 8 层二云母花岗闪长岩层的中部。储层以花岗闪长岩为主, 密度分布基本均匀。储层温度介于 207~216°C 之间, 平均温度 210 °C^[13-15]。

2 引入围岩的平行多裂隙概念模型

EGS 热储层是热岩体中被激发裂隙体系的一小部分, 激发的热储层被更大区域的未激发的高温岩体包围。本文仅考虑上覆层及下伏层高温岩体对热储层的影响, 构建引入围岩的平行多裂隙模型。如图 2 所示, 假设热储层内裂隙平行等间距展布, 裂隙宽度为 δ , 换热单元体厚度为 D , 裂隙长度为 L , 上覆层及下伏层围岩体的厚度均为 H 。热储层及围岩体的初始温度均为 T_{r0} , 冷流体以温度 T_{f0} 流速 u_f 由裂隙下方入口处进入裂隙通道, 在裂隙中流动并与两侧高温岩体发生热交换。

热储层内裂隙数目:

$$n = \frac{W}{D} + 1 \quad (1)$$

其中, W 为热储层水平幅宽, D 为换热单元体厚度。

单条裂隙内流体流速:

$$u_f = \frac{Q}{n\delta W \rho_f} \quad (2)$$

其中, Q 为注入流量, δ 为裂隙宽度, ρ_f 为流体密度。

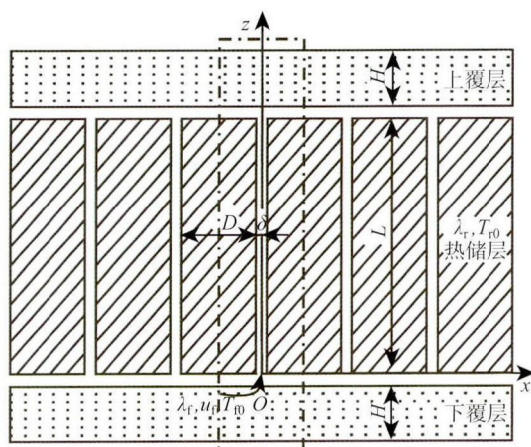


图2 引入围岩的EGS平行多裂隙概念模型^[7]。(δ和L分别为裂隙宽度和长度、D为换热单元体厚度、H为上覆层和下伏层围岩体的厚度、 T_{r0} 为热储层及围岩体的初始温度、 T_{f0} 和 u_f 分别为冷流体注入温度和流速。)

Fig. 2 EGS multi-parallel fracture conceptual model with surrounding rock^[7]. (δ and L respectively denote width and length of the fracture, D represents thickness of HTU, H represents thickness of the upper and underlying layer of surrounding rock, T_{r0} represents original temperature of the reservoir and surrounding rock, T_{f0} and u_f respectively represents temperature and velocity of the inlet fluid.)

为简化研究,对研究对象作如下假设:1)岩体为均质各向同性的不渗透块体,无岩体孔隙流体产出,在低孔渗条件下,该假设可认为近似可靠;2)岩体热传导系数较低,水岩界面处热阻忽略不计,即裂隙面上流体温度与岩体温度相等,这一假设的合理性已在很多实际案例中得到证实^[11,16];3)裂隙中水流方向为单向,且为匀速;4)不考虑系统中的热辐射效应,该假设的合理性已由实验证明^[17];5)裂隙流体的热量增量为单边水岩热交换的两倍(基于系统对称性);6)系统运行时裂隙流体始终为液相;7)忽略温压条件变化对系统热物性的影响,即整个热开采过程中岩体的热传导系数、比热容、密度及流体的密度、比热容均为常数;8)忽略上覆层及下伏层围岩体与热储层界面处裂隙内流体流动和热效应。

为评估热储层的热恢复性能,本文引入了相对热恢复率的概念。当流体产出温度保持为热储层初始温度不下降时,产出温度与注入温度平均温差最大为 ΔT_{max} ,这表明热储层可完全恢复。对于80年的采热-热恢复过程,周期为40年的热开采和热恢复过程对应的平均温差最小为 ΔT_{min} 。采用不同生产方案对应的平均温差 ΔT 和 ΔT_{max} 、 ΔT_{min} 即可定义相对热恢复率 R_c :

$$R_c = \frac{\Delta T - \Delta T_{min}}{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}} \quad (3)$$

3 计算与结果

综合地质与地球物理资料确定沙漠峰EGS开发层段水平面积为 $800\text{ m} \times 800\text{ m}$,垂向位于 $-1219 \sim -1719\text{ m}$,厚度 500 m ;上覆、下伏围岩层厚度取 200 m 。假定热储层激发均匀,裂隙宽度为 10 cm ^[18,19]。岩体初始温度为 210°C ,注入流体流量为 100 kg/s ,温度为 60°C 。

平行多裂隙模型的可靠性已经得到验证^[11],本文的数值模拟采用Fluent通用计算流体力学软件提供的求解平台进行数值求解。考虑到模型区域的对称性,模拟时选取基本换热单元(heat transfer unit, HTU)进行计算,即图2中点划线框选区域的一半为计算区域。将裂隙区x方向等分为宽度 2.5 cm 的网格,z方向等分为高度 1 m 的网格;对于岩石换热单元体区,z方向等分为高度 1 m 的网格,为减少网格数量,加快计算速度,x方向分为50个网格,首个网格长度为 2.5 cm 。网格总数为46000,该网格系统已进行过网格无关性校验,能够保证足够的计算精度。

裂隙入口设为定速度入口,并给定流体初始温度 60°C ,裂隙出口设为自由流,左边界设为对称面,右边界为壁面。岩体初始温度为 210°C ,上下边界设为绝热边界,右边界为对称面,左边界为壁面。仅考虑流体的流动换热及岩体内的热传导效应,求解连续性方程和能量方程,方程的相对误差值分别为 1.0×10^{-3} 及 1.0×10^{-6} ,绝对误差限值为1.0。岩石和流体的热物性参数参考前人研究用水平,取值见表1^[20,21]。

表1 流体和岩体的热物性参数

Table 1 Thermophysical properties of fluid and rock

	密度 $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比热容 $c / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	导热系数 $\lambda / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	黏度 $\mu / \text{Pa} \cdot \text{s}$
流体	900	4200	0.609	0.0003
岩体	2820	1170	2.8	-

3.1 热开采与热恢复过程中水岩温度场演化

本文采用平行多裂隙模型对沙漠峰EGS热储层热开采与热恢复过程进行数值模拟研究,图3所示为交替进行热开采和热恢复过程(每一阶段的热开采和热恢复时间均为10年)80年的岩体换热单元体温度场的演化,其中换热单元体厚度为 100 m ^[6,8,11,22]。岩体首先在冷流体入口处出现温降,冷却区域呈三角形向外扩散,温降沿流体流动方向扩散速度最快。第一阶段热开采结束后,冷却区域在z方向扩散至

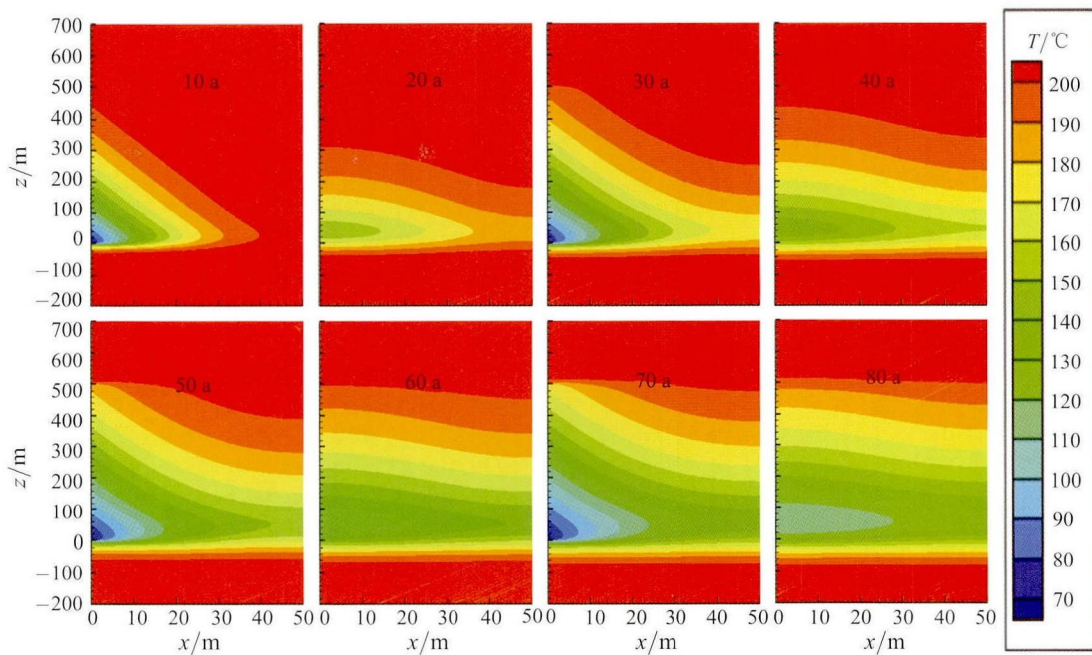


图 3 沙漠峰地热田交替进行四个阶段采热 - 热恢复过程的热储层温度场演化

Fig. 3 The temperature field evolution of heat reservoir during the process of four phases heat extraction and recovery of Desert Peak field. Time for each phase of heat extraction and recovery period is 10 a

-20~440 m, x 方向扩散至 40 m。热恢复过程在热开采结束后的温度分布的基础上进行, 未被冷流体影响的高温区将热量传导至冷却区, 冷却区呈纵向收缩, 横向扩张的趋势, 第一阶段热恢复过程结束后, z 方向冷却区域压缩至 -30~300 m 段, 且温度水平升高, x 方向已出现热穿透。随着热开采进行, 冷却区在 z 方向不断向上、下层扩散, 温度水平逐渐下降。热恢复过程则在热开采后温度场基础上使冷却区面积收缩, 温度水平提高。

采热 - 热恢复过程中岩体边界面的温度曲线如图 4 所示, 由图可更清楚地看出经热恢复过程后, 裂隙边界面的温度水平明显高于采热阶段结束时的水平, 与冷流体的温差变大, 与连续进行热开采相比, 采热效率提高。随着热开采的进行, 温度水平逐渐下降, 与冷流体的温差逐渐缩小, 因此采热也逐渐削弱, 接近储层寿命。

裂隙出口温度随时间的变化曲线如图 5 所示, 在热恢复阶段裂隙出口温度升高, 热恢复初始阶段由于温差较大, 热恢复作用强, 温升梯度大, 随着温差缩小温升逐渐放缓。初始热开采阶段储层温度水平较高, 因此第一阶段热恢复过程温升不明显, 而在第二阶段的热恢复过程就可看到明显的温升, 由于冷流体采热使近裂隙区出现较大温降, 在热恢复阶段由于温差较大, 导致近裂隙区温升迅速且明显。与连续开采的温降曲线对比可发现, 经热恢复后产出

温度高于持续开采时的温度, 采热效率提高。由图 3 可见第三阶段采热完成后, 热储层内热量均得到不同程度的开采, 流体产出温度降至 186.2°C, 经过 10 年的热恢复裂隙出口温度恢复至 201.2°C, 仍可进行 3.0 年的热开采。若以高温岩体初始温度降低 10% 为界线考察热储寿命 [21], 则考察温度为 189°C, 连续开采时热储寿命为 22.1 年, 以 10 年为周期交替进行热开采与热恢复, 热储寿命可延长至 31.2 年。

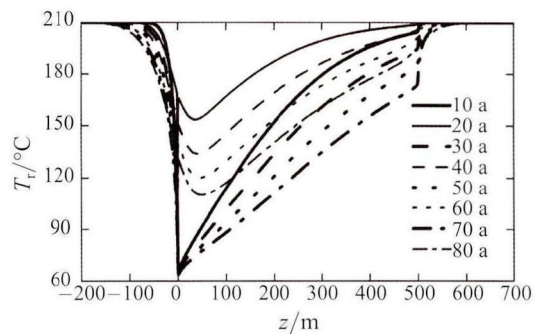


图 4 交替进行四个阶段采热 - 热恢复后岩体界面温度曲线
Fig. 4 The temperature curve of the rock interface after four phases heat extraction and recovery

3.2 热开采 - 热恢复周期对热恢复的影响

由于储层热恢复过程需要一定时间, 而工业生产中不允许有供电间歇。因此, 可在一个地热田内建立一套组合开发系统, 以便当一个系统效率低下停

止热开采作业后，另一系统可立即开启作业，且其有效作业时间必须长于前一系统储层恢复时间(假设是最简单的两套系统配合形式)，这样就可以保障电力的连续供应。因此研究储层热恢复周期对 EGS 多井系统的设计有重要意义。

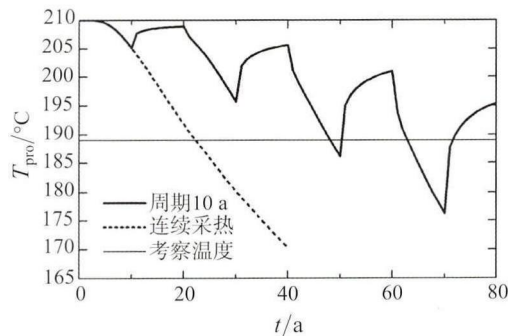


图 5 交替进行四个阶段的采热 - 热恢复过程的裂隙出口温度
Fig. 5 The outlet temperature curve during four phases heat extraction and recovery

热开采 - 热恢复周期对裂隙出口温度的影响如图 6 所示，由图可见，采热 - 热恢复周期越短，产出温度水平越高。当热恢复周期较长时，可以发现在热恢复过程后期温度基本趋于稳定，这是热储层中纵向热传导的结果，即上层高温岩体流入的热量与传导至低温区的热量相等，热恢复达到平衡状态。热恢复过程长期进行将使热储层高温区热量大量被传导至冷却区，高温区温度水平下降，流体无法被加热至较高温度，不利于 EGS 的长期高效热开采，因此热恢复过程时间不宜过长。

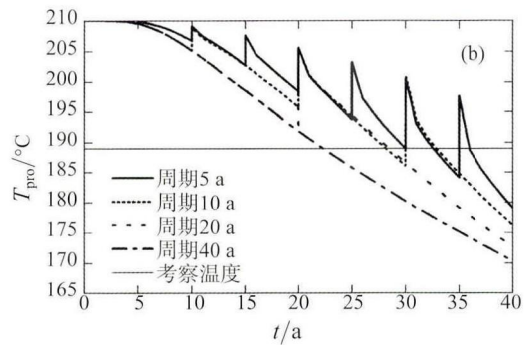
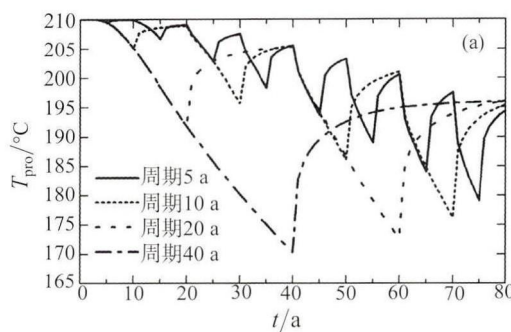


图 6 采热 - 热恢复周期对裂隙出口温度的影响
(a) 热开采和热恢复过程; (b) 为便于分析数据, 将热恢复过程数据剔除, 仅余下热开采过程
Fig. 6 Impact of the heat extraction and recovery period on the outlet temperature (a) heat extraction and recovery process; (b) for convenience of data analysis, heat recovery data is eliminated, and left heat extraction process only

不同采热 - 热恢复方案对应的相对热恢复率见表 2, 由表可知, 以 5 年为周期的采热 - 热恢复生产方案的相对热恢复率 R_c 最大, 为 39.40%, 热储层寿命最长为 34.0 年, 比连续开采的寿命长 11.9 年。随采热 - 热恢复周期延长, 相对热恢复率降低, 热储层寿命缩短。

3.3 换热单元体厚度对热恢复的影响

换热单元体的厚度对储层热开采过程影响明显, 在定流量的热储层中, 换热单元体厚度与产出温度及热采率呈负效应。对热恢复过程的影响如图 7 所示, 其中换热单元体厚度分别为 40 m、100 m 和 200 m^[6,8,11,22], 热开采 - 热恢复周期均为 10 年, 交替进行四个阶段的热开采和热恢复过程。其中虚线为对应算例连续热开采时流体产出温度曲线。由图可见, 随换热单元体厚度增大, 流体的产出温度降低, 热储层寿命缩短, 但热恢复过程温升明显。

表 3 所示为不同换热单元体厚度的热储层模型交替进行热开采和热恢复时的的相对热恢复率及热储寿命, 由表可见换热单元体厚度为 100 m 时相对热恢复率最高, 即热储层激发程度较高或较低都无法取得最佳热恢复效果。换热单元体厚度为 40 m 时, 产出温度保持在较高水平, 岩体内温度梯度小, 储层热恢复作用弱, 因此不会显著影响采热效果。换热

表 2 采热 - 热恢复周期对储层热恢复的影响

Table 2 Impacts of the heat extraction and recovery period on the recovery of the reservoir

热开采 - 热恢复方案	循环流量 $Q/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	作用时间/a	平均温差 $\Delta T/^\circ\text{C}$	产能系数/%	储层恢复系数 $R_c/\%$	热储寿命/a
1×40 a (无热衰减)	100	80	150.00	113.74	100.00	-
8×5 a	100	80	139.02	105.41	39.40	34.0
4×10 a	100	80	137.46	104.23	30.77	31.2
2×20 a	100	80	135.10	102.44	17.75	28.6
1×40 a	100	80	131.88	100.00	0.00	22.1

单元体厚度为 200 m 时, 近裂隙区整体温度水平低, 尽管热恢复过程温升高, 但采热过程中换热单元体芯部的热量仍难以快速传导至界面处, 故流体产出温度下降快, 热储寿命短, 连续热开采时热储寿命仅 6.8 年, 采取交替进行热开采、热恢复过程的热采方案寿命仅能延长至 8.8 年。

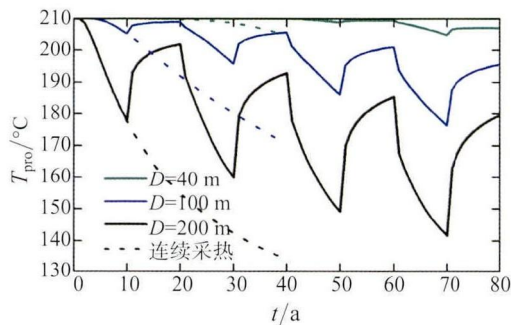


图 7 换热单元体厚度对裂隙出口温度的影响

Fig. 7 Impact of the HTU thickness on the outlet temperature

表 3 换热单元体厚度对储层热恢复的影响

Table 3 Impact of HTU thickness on the recovery of the reservoir

换热单元体厚度	热开采 - 热恢复方案	平均温差 $\Delta T / ^\circ\text{C}$	相对热恢复率 $R_c / \%$	热储寿命/a
40 m	1×40 a	149.09	4.63	-
	4×10 a	149.13		
100 m	1×40 a	131.88	30.77	22.1
	4×10 a	137.46		
200 m	1×40 a	101.76	20.34	6.8
	4×10 a	111.57		

3.4 流量对热恢复的影响

EGS 通过注入冷流体将热储层中的热量采出, 冷流体的流量不仅关系到采热量, 也会影响热储层中温度场的分布。图 8 所示为裂隙内冷流体的流量对采热和热恢复过程裂隙出口温度的影响, 其中换热单元体厚度为 100 m。由图 8 可见, 流量越大, 温降幅度越大, 热开采阶段结束后的温度水平越低, 热恢复阶段的升温幅度虽大, 但热储层整体温度水平

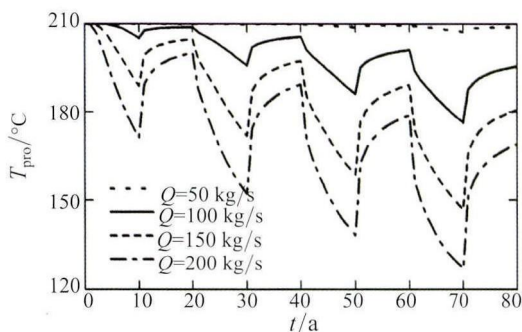


图 8 流体流量对裂隙出口温度影响

Fig. 8 Impact of fluid flow on the outlet temperature

仍较低; 流量越小, 采热连续性越好, 温降保持在较小范围内, 经热恢复后可长期保持高温开采。

4 分析与讨论

热恢复过程主要由热传导作用控制, 由傅里叶导热定律可知, 单位时间内通过给定截面的热量, 正比例于垂直于该截面方向上的温度变化率和截面面积, 即热流密度仅与介质的导热系数及温度梯度相关。热储层岩体的导热系数可视为常数, 因此热开采后储层内的温度分布及热恢复的时间周期决定了热恢复后的温度场分布。

上文分别研究了采热 - 热恢复周期、换热单元体厚度和流体流量对热恢复的影响。与之前的研究对比可发现: 换热单元体厚度和流体流量对热开采和热恢复过程具有相同的影响效果。热开采过程的影响因素决定了热开采过程的温度场分布 (即热恢复的温度初场), 热恢复过程正是在热开采过程的基础上进行的 (即对热开采结束后的热储温度场进行恢复)。因此, 热开采过程的影响因素对于热恢复过程有相同的影响效果。而对于采热 - 热恢复周期, 周期越短越有利于热能的高效开采。热恢复过程初始阶段的温升梯度大, 后期则愈趋缓慢, 较短的热恢复周期将热恢复过程控制在高效恢复区, 减少纵向高温区向低温区的热传导, 高温区保持较高温度, 可保证流体被加热至较高温度, 热储寿命也相应延长。

引入围岩的平行多裂隙模型可模拟采热 - 热恢复过程热储岩体及裂隙流体的温度场演化, 分析热恢复过程的主要影响因素, 但模型仍存在不足之处。首先, 实际地层中由于地温梯度的存在, 岩体温度随地层加深而升高, 因此, 各位置围岩体对储层热恢复影响不同。下一步需考虑地热田的地温梯度, 综合研究围岩体对储层热恢复的影响。其次, 热开采会造成热储层的温降, 引起岩体的收缩, 裂隙宽度变大, 流动阻力减小; 相反, 热恢复过程则会使热储层内冷却区的温度回升, 岩体膨胀, 裂隙宽度变窄, 流动阻力增大。流体流阻的变化不仅影响采热效果, 对于定流量地热田还会影响泵功的消耗及采热的经济性。因此, 下一步需考虑温度变化引起的热储岩体的胀缩效应, 可通过实验方法量化该效应, 对目前的计算结果进行修正。

5 结论

EGS 热开采过程引起储层温度降低, 流体产出温度降低, 为保证 EGS 的长期稳定高效热开采, 对储层热恢复过程的研究具有重要意义。本文采用平行多裂隙模型对美国沙漠峰地热田进行热恢复过程

数值模拟研究。结果表明：热恢复过程能有效抑制热开采造成的储层温度场的衰减，延长储层寿命。热恢复初期温度迅速升高，温升梯度大，后期温升缓慢梯度小。热恢复过程主要由热恢复温度初场及热恢复时间周期控制。热储层激发程度与流体流量共同决定热恢复过程的温度初场，二者对热恢复过程与热开采过程的影响效应一致。换热单元体厚度与流体流量均与产出温度和热储寿命呈负相关。采热-热恢复周期与产出温度及热储寿命亦呈负相关性。系统循环流量为 100 kg/s，换热单元体厚度为 100 m 时，连续开采时热储寿命为 22.1 年，以 10 年为周期交替进行热开采与热恢复，热储寿命可延长至 31.2 年。若采热-热恢复周期为 5 年，热储寿命可延长至 34.0 年。若换热单元体厚度为 200 m，连续开采时热储寿命仅为 6.8 年，以 10 年为周期交替进行热开采与热恢复，热储寿命仅可延长至 8.8 年。

参考文献

- [1] Tester J W, Anderson B, Batchelor A, et al. The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century [M]. Massachusetts Institute of Technology, 2006
- [2] Breede K, Dzebisashvili K, Liu X, et al. A Systematic Review of Enhanced (or Engineered) Geothermal Systems: Past, Present and Future [J]. *Geothermal Energy*, 2013, 1(1): 1-17
- [3] Sanyal S K. Sustainability and Renewability of Geothermal Power Capacity [C]//Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005
- [4] Axelsson G, Stefánsson, Björnsson G. Sustainable Utilization of Geothermal Resources for 100-300 Years [C]//Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005
- [5] Vogt C, Marquart G, Kosack C, et al. Estimating the Permeability Distribution and its Uncertainty at the EGS Demonstration Reservoir Soultz-sous-Forêts Using the Ensemble Kalman Filter [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(8): W08517-W08531
- [6] Wu B, Zhang X, Jeffrey R G, et al. Perturbation Analysis for Predicting the Temperatures of Water Flowing Through Multiple Parallel Fractures in a Rock Mass [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2015, 76: 162-173
- [7] Sanyal S K. Geothermal Power Capacity, Sustainability and Renewability of [M]. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 2012: 804-817
- [8] Mégel T, and Rybach L. Production Capacity and Sustainability of Geothermal Doublets [C]//Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, 2000, 849-854
- [9] Prichett J W. Modeling Post-abandonment Electrical Capacity Recovery for a Two-Phase Geothermal Reservoir [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 1998, 22, 521-528
- [10] Rybach L, Mégel T, Eugster W J. At What Time-Scale are Geothermal Resources Renewable? [C]//Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, 2000: 867-873
- [11] Fox D B, Sutter D, Beckers K F, et al. Sustainable Heat Farming: Modeling Extraction and Recovery in Discretely Fractured Geothermal Reservoirs [J]. *Geothermics*, 2013, 46: 42-54
- [12] 陈继良, 罗良, 蒋方明. 热储周围岩石热补偿对增强型地热系统采热过程的影响 [J]. *计算物理*, 2013, 30(6): 862-870
CHEN Jiliang, LUO Liang, JIANG Fangming. Thermal Compensation of Rocks Encircling Heat Reservoir in Heat Extraction of Enhanced Geothermal System [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2013, 30(6): 862-870
- [13] Lutz S J, Jr A S, Schochet D, et al. Geological Characterization of Pre-Tertiary Rocks at the Desert Peak East(EGS)Project Site, Churchill County, Nevada [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 2003, 27: 865-870
- [14] Robertson-Tait A, Morris C, Schochet D. The Desert Peak East EGS Project: a Progress Report [C]//Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005
- [15] 曾玉超, 苏正, 吴能友, 等. 双竖直井开采美国沙漠峰深层地热数值模拟 [J]. *矿冶工程*, 2013(2): 8-13
ZENG Yuchao, SU Zheng, WU Nengyou., et al. Numerical Simulation of Deep Geothermal Energy Mining by Two-vertical Wells System at Desert Peak Field, USA [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2013(2): 8-13
- [16] Ogino F, Yamamura M, Fukuda T. Heat Transfer From Hot Dry Rock to Water Flowing Through a Circular Fracture [J]. *Geothermics*, 1999, 28: 21-44
- [17] 田鲁鲁. 裂隙岩体渗流-传热耦合模型试验及数值模拟研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009
TIAN Lulu. Experimental and Numerical Study on The Thermo-Hydrological Coupling of Fractured Rocks [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009
- [18] 郭剑, 陈继良, 曹文灵, 等. 增强型地热系统研究综述 [J]. *电力建设*, 2014, 35(4): 10-24
GUO Jian, CHEN Jiliang, CAO Wenjong, et al. Research Review on Enhanced Geothermal System [J]. *Electric Power Construction*(in Chinese), 2014, 35(4): 10-24
- [19] Genter A, Cuenot N, Dezayes C, et al. How a Better Characterization of a Deep Crystalline Reservoir Can Contribute to Improve EGS Performance at Soultz [C]//1st European Geothermal Review. Mainz: Germany, Geothermal Energy for Electric Power Production, 2007: 34-40
- [20] Shaik A R, Rahman S S, Tran N H, et al. Numerical Simulation of Fluid-Rock Coupling Heat Transfer in Naturally Fractured Geothermal System [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31: 1600-1606
- [21] 胡剑, 苏正, 吴能友, 等. 增强型地热系统热流耦合水岩温度场分析 [J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(3): 1391-1398
HU Jian, SU Zheng, WU Nengyou, et al. Analysis on Temperature Fields of Thermal-Hydraulic Coupled Fluid and Rock in Enhanced Geothermal System [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(3): 1391-1398
- [22] Li M, Gou Y, Hou Z, et al. Investigation of a New HDR System With Horizontal Wells and Multiple Fractures Using the Coupled Wellbore-reservoir Simulator TOUGH2MP-WELL/EOS3 [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73: 6047-6058