

西藏羊易 EGS 开发储层温度场与开采寿命影响因素数值模拟研究*

凌璐璐, 苏正[†], 翟海珍, 吴能友

(中国科学院广州能源研究所, 中国科学院天然气水合物重点研究实验室, 广州 510640)

摘要: 西藏羊易地区具有丰富的地热能, 单井开发潜力接近 10 MW, 对其深部热储进行 EGS 开采, 可缓解西部能源紧缺问题。本文建立二维理想 EGS 开发模型, 探讨深层地热开采过程中开采流量、注采方式、注入温度等参数对热储温度场分布及开采寿命的影响。基于羊易温度信息设计了 12 个数值模型, 对比研究发现, 开采流量对 EGS 开采的影响较大, 为保证开采 50 年内的商业利用价值, 最大开采流量应控制在 0.028 kg/s 以下; 考虑到钻井成本, 注采方式的选择以高注高采和中注高采为最佳; 注入温度对热储开采影响较小, 可选择 40°C ~ 80°C 之间任意温度的地热尾水进行回灌, 实现地热资源梯级利用。

关键词: EGS; 热储; 温度场; 开采寿命; 流量

中图分类号: TK529

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.05.008

Numerical Simulation Study of the Parameters Effect on Temperature Distribution and Mining Life during EGS Exploitation, Yangyi of Tibet

LING Lu-lu, SU Zheng, ZHAI Hai-zhen, WU Neng-you

(Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: There is a rich geothermal energy in Yangyi area of Tibet and the potential energy of single well can be up to 10 MW. Utilization of Enhanced Geothermal System (EGS) technology in the exploitation of deep geothermal energy can alleviate the western energy shortage problem. An idealized 2D EGS numerical model was built to discuss the influence of production flow, injection-production pattern, injection temperature and other parameters on reservoir temperature distribution and mining life during the process of deep geothermal exploitation. 12 cases were designed based on the temperature information of Yangyi and the conclusions are as follows: production flow has a great influence on EGS exploitation, maximum production flow should be controlled below 0.028 kg/s to ensure commercial exploitation value for 50 years; considering the drilling cost, it is better to take high-injection-high-production and middle-injection-high-production pattern; the influence of injection temperature on the reservoir is small, any tail water between 40°C ~ 80°C can be reinjection into EGS reservoir to achieve the utilization of geothermal gradient.

Key words: EGS; geothermal reservoir; temperature distribution; mining life; flow rate

0 引言

西藏羊易地区具有丰富的地热能, 热流体产量大, 地温梯度高, 热源品质好, 是我国目前探明的温度最高的基岩裂隙型高温地热田。前期勘探已钻遇接近 300°C 的高温热储, 单井发电潜力接近 10 MW, 深部高温热储的发电潜力更是不可估量, 具有建立高

载荷地热电站的热源前景^[1-6]。合理地开发利用可以解决周边的工业及生活用电问题, 缓解西藏地区的能源紧缺现状^[1,7-8]。

深层地热能是一种高效、清洁、稳定的能源, 在未来可再生能源中的角色不可忽视。增强型地热系统 (Enhanced Geothermal System, EGS) 是开发深层地热能的有效技术手段, 其基础理念是恢复储存在

* 收稿日期: 2015-06-15 修订日期: 2015-08-12

基金项目: NSFC-广东联合基金项目 (U1401232); 广东省自然科学基金重大基础培育项目 (2014A030308001); 中科院广州能源所所长基金培育项目 (y107a41001)

[†] 通信作者: 苏正, E-mail: suzheng@ms.giec.ac.cn

地下岩石中的热能，首先通过岩石压裂技术（如水力压裂）诱发新裂隙或增强天然裂隙形成人工热储，之后利用热传输流体在裂隙网中的循环流动将地下热能提取到地面用于生产发电，冷却后的流体再次注入热储形成一个闭合的回路^[9-12]。

由于缺乏成熟的 EGS 商业示范，科学界对其机理尚未完全掌握。然而了解 EGS 热-流过程对地热开采和储层可持续性来说是至关重要的^[1]，尤其是在开采过程中热储的温度场变化情况和 EGS 的开采寿命是首要考虑的问题。鉴于我国目前 EGS 正处于探索过程，还没有实际的工程，本文选择数值模拟手段对深层地热开采的基础问题进行探讨研究。数值模拟技术不但能够描述地下流体行为和热储演变过程，可靠的模型还可以用于地热能的评估和预测^[1,13-26]。

本文使用数值模拟方法评估对 EGS 开采影响的重要敏感性参数，分析 EGS 开采过程中的热储温度场变化，试图为未来的工程实施提供数据参考和技术借鉴。模型参数是影响流体运移的重要因素，从而改变储层的温度场分布，最终决定热储的热效率和开采寿命^[1]。针对热储的模型参数研究，选择西藏羊易地热田作为研究对象，假想在羊易地区建立地热发电示范。以羊易地热田的温度信息为依据，建立二维理想数值模型，针对开采流量、注采方式、注入温度等参数设计多组模型案例，了解 EGS 在开采 50 年内的温度场变化情况，对比在不同参数条件下 EGS 温度场的分布及开采寿命，分析热储的可持

续开采能力，探讨在 EGS 开采前期的参数选择和场地设计^[1]。

1 地质背景

羊易热田位于西藏当雄县羊八井区吉达乡南羊易村西侧，东距拉萨 72 km。北起恰拉改曲与朗朗曲交汇处以北，南至朗某错罗分水岭，东西以第四系地层与基岩分界线为界，为一南北向断裂控制的短线盆地，盆地地表为第四系沉积岩，西部有火山岩出露。地表出露更新界第三系和第四系地层，下伏基岩为喜山花岗岩斑岩及斑状花岗岩。下更新统地层均为河湖相砂砾粘土层。羊易地热田的岩浆岩主要可以分为两类：喜山早期酸性侵入岩和喜山晚期中性喷出岩。前者的主要成分是花岗斑岩和斑状花岗岩。喜山晚期中性喷出岩为中新统火山岩。由上面岩性分析可见，西藏羊易地区基岩地层主要为花岗岩^[1,27]。

构造地质环境决定了羊易地质具备地热开发的潜力。图 1 为羊易的地理位置及浅层垂向地层的温度分布，从图中可以看出羊易地区多断层、喷泉、热泉、沸泉，水热活动十分丰富，热显示较为明显，浅层地温梯度约为 50℃/100 m^[28]。据勘探结果，羊易深部高温热储盖层地温梯度为 (47~72)℃/100 m，此地区在 1 800 m 深度的温度接近 300℃。本文以 300℃ 温度基础作为羊易热储的关键信息，建立假想地热热储模型，进行多参数多方案的数值模拟计算及分析^[1]。

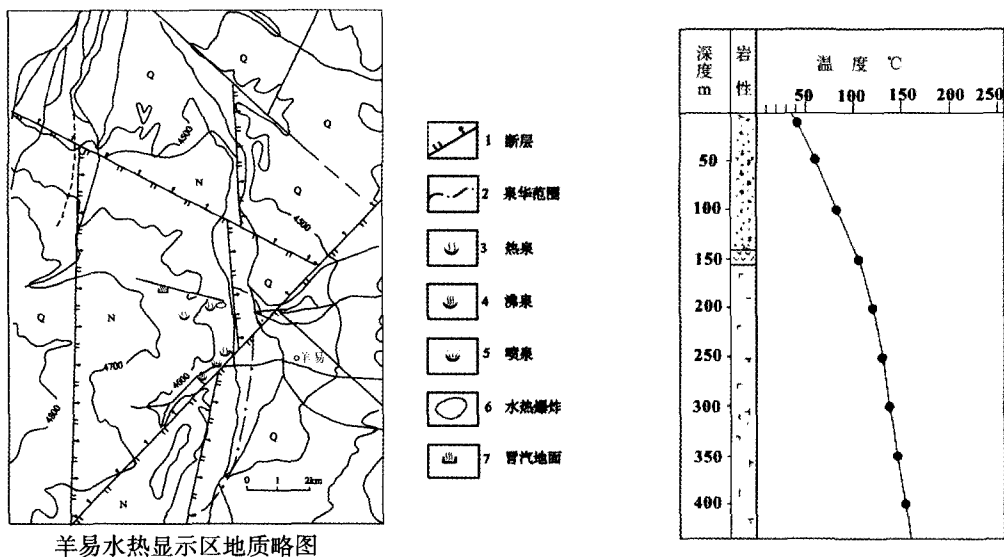


图 1 羊易地理位置及垂向温度分布^[1]

Fig. 1 Geographic location and vertical temperature distribution of Yangyi

2 开发模型

2.1 模型设计

EGS 的热储温度是工程设计选择的首要对象，高品质的地热资源能够降低发电成本^[29]。本文以羊易地热田温度信息为依据，建立假想二维地质模型，进行 EGS 地热能的开采模拟。设计 400 m × 400 m 的剖面二维网格，x 方向以步长递增的方式增加网格宽度，两侧井筒处网格宽度为 0.1 m。注入井和生产井分别位于模型两侧，注入点和开采点对应的网格位于模型中间位置。z 方向均分为 40 个网格，每个网格厚度为 10 m，起始网格为地表以下 3 000 m 深度。羊易深层地热开采概念模型见图 2^[1]。

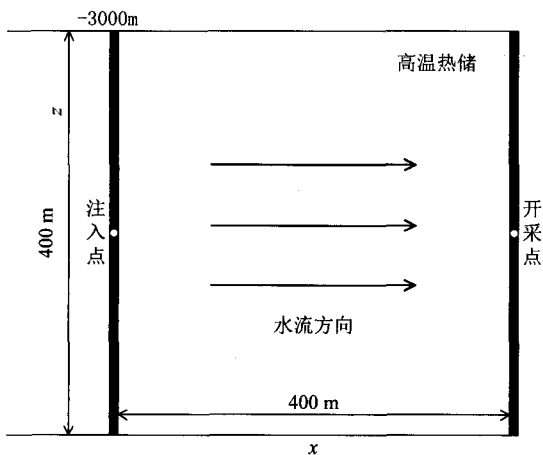


图 2 羊易深层地热开采概念模型

Fig. 2 Concept model of deep geothermal exploitation, Yangyi

2.2 计算模型

热储的参数决定了流体的运移速率、温度场分布和地热能开采寿命等^[1]。数值模拟方法可以通过量化各个参数值，分析不同参数对开采结果的影响，为工程的实施提供借鉴和参考。根据国内外文献和 TOUGH2 手册中的案例^[24-26,30-32]确定模型的基本热物理参数，如表 1 所示。

分别对控制流量、注入温度和注采方式设计了不同的方案，对各模型方案进行了详细的分析，研究了热储模型的参数敏感性，各方案之间具有一定的对比度和参考价值，模型方案如表 2 所示。

表 1 模型热物理学参数

Table 1 Thermal and physical parameters of numerical model

参数	数值
岩石密度	2 600 kg/m ³
渗透率	10 ~ 13 m ²
孔隙度 (井筒)	0.99
孔隙度 (热储)	0.2
导热系数 (井筒)	2.51 W/(m·°C)
导热系数 (热储)	2.2 W/(m·°C)
比热容 (井筒)	920 J/(kg·°C)
比热容 (热储)	775 J/(kg·°C)
热储温度	300°C
注入水温度	80°C
注水率/开采率	0.014 kg/s

表 2 不同参数设计的模型方案

Table 2 Model cases of different designing parameter

模型案例	编号	数值/方式
控制流量	1	0.014 kg/s
	2	0.028 kg/s
	3	0.069 kg/s
注采方式	4	低注高采
	5	低注中采
	6	中注高采
	1	中注中采
	7	高注高采
	8	高注中采
	9	40°C
	10	50°C
注入温度	11	60°C
	12	70°C
	1	80°C

2.3 初始边界条件

初始地层压力为静水平衡压力条件，根据重力、水密度和地层深度进行计算。初始系统温度为 300°C，即所有模型网格的温度一致。模型四周设置为无流量边界。注入点为给定流量、给定温度边界。开采点为给定流量边界。假设热储中已经充满用于 EGS 循环的地热流体，即模型为饱和水状态。另外，假设流体在注入井与生产井循环过程中的水损 (water loss) 为零。本文模拟所使用软件为 TOUGH2 并行版本的 EOS3 模块，是专门用于模拟地下水-热活动的数值模拟器，主要包含水和空气两种组分^[1,30,33]。

3 计算结果

根据表 1 中的热物理学参数、表 2 的模型方案和初始边界条件进行数值模拟计算,设计开采年限为 50 年,分别针对控制流量、注采方式和注入温度三个参数进行分析,对比各不同参数对开采热储温度场分布的影响,以及不同参数对 EGS 寿命的影响。

3.1 控制流量

流量不但决定了地热能的发电功率,直接反映工程需求,而且是影响热储寿命的重要开采参数,研究流量对热储的温度场影响十分必要。设计了三种不同数值的控制流量方案,进行 50 年的热储定量开采模拟,了解流量值对热储温度分布的影响。基础方案的开采流量为 0.014 kg/s,对比方案的流量分别是基础方案的 2 倍和 5 倍,为 0.028 kg/s 和 0.069 kg/s。根据表 2 的编号,此处的三个流量方案分别方案 1、方案 2、方案 3。为维持 EGS 热储中

流体的平衡状态,设计模拟注入流量与开采流量在数值上是一致的。

根据以上方案设计,用 TOUGH2 的 EOS3 模块进行模拟计算,得到了基础方案在开采 50 年内的温度场变化情况,如图 3 所示。开采第 1 年,只有注入点周围出现了较小范围的降温。开采第 5 年,由于垂直方向的重力作用,冷水向下运移的距离大于水平运移的距离,垂向上的温度影响范围约为 215 m,水平方向约为 60 m。开采第 10 年,温度降低的影响范围到达模型底部,并在水平方向上延伸到 180 m。开采第 20 年,水平方向的温度场变化范围为 360 m,垂直方向几乎没有变化。开采第 30 年,温度变化影响范围到达开采井所在的模型边界。开采第 50 年,热储有超过一半的范围发生了不同程度的温度降低,以注入点为中心到开采点的发生梯度降低,此时开采点的温度约为 270℃,热储仍具有较大的开采潜力。

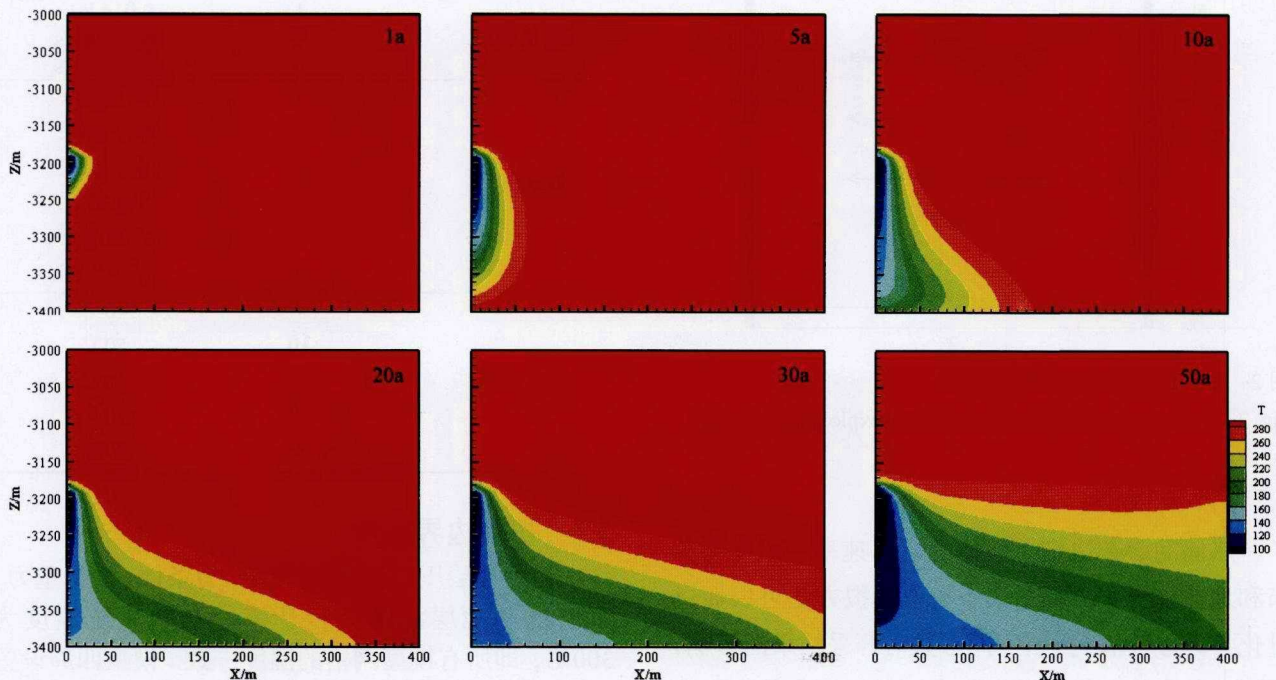


图 3 EGS 开采 50 年内热储温度场分布

Fig. 3 Temperature distribution of EGS reservoir in 50 years

将开采点至注入点连线上的温度进行作图对比,如图 4 所示。这些控制点不但描述了注入点、开采点周围的温度变化,也可以反映整个热储的降温情况。整体上看,方案 1 的热储温度较为稳定,到开采 30 年时,曲线温度有略微降低,第 50 年时

大约降低到 250℃附近。方案 2 在开采前 20 年都较为稳定,到第 30 年,曲线开始逐渐衰退,开采结束后,大部分降低至 200℃以下。方案 3 的降温幅度则较为明显,整个曲线几乎只有 80℃,说明热储下半部分已经完全冷却。

开采第 1 年，方案 1 和方案 2 的降温范围不到 50 m，方案 3 的降温影响范围约在 100 m 左右，其余范围内几乎没有发生温度降低。第 5 年，各方案在第 1 年的基础上有略微降低。第 10 年，方案 3 的影响范围接近 350 m，且 80℃ 低温带接近 100 m。第 20 年，方案 2 的开采影响范围接近模型边界，方案 1 和方案 2 接近开采井的温度曲线逐渐开始分离，

方案 3 降温幅度明显，开采点已降低至 230℃。第 30 年，方案 2 的曲线发生了整体降温，但大部分仍维持在 250℃ 左右，方案 3 有超过 1/2 的距离已经降低至 80℃，其余部分也不足 200℃。第 50 年，方案 1 曲线也发生了整体的降温，热储大部分温度降到 250℃ 附近，方案 2 的曲线进一步衰退，方案 3 在开采点与注入点连线上几乎只有 80℃。

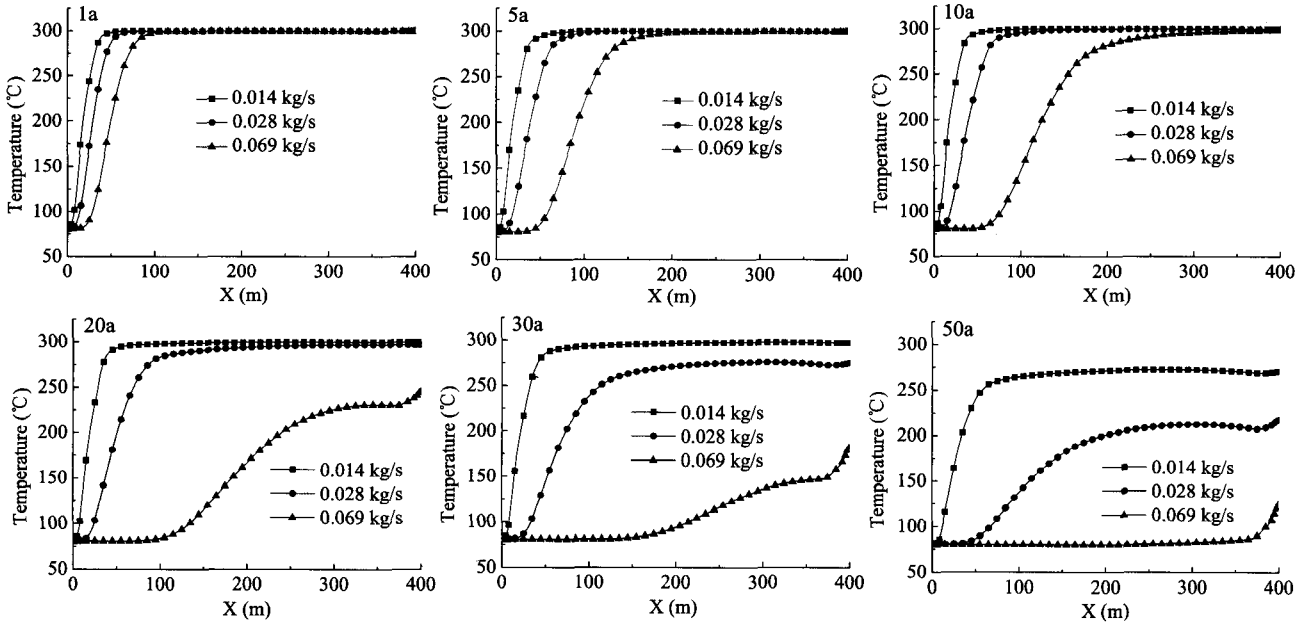


图 4 注入点与开采点连线温度变化

Fig. 4 Temperature distribution between injection and production point

根据美国麻省理工大学 (MIT) 的报告，当开采温度低于 150℃ 时，EGS 热储就已经失去了商业利用价值^[34]。可以通过观察开采点的温度变化情况，确定热储的开采寿命，图 5 为三种流量开采方案 50 年内开采点的温度变化情况。从图中可以看出，方案 1 在开采的前 25 年，温度几乎没有发生变化，之后曲线有缓慢的下降趋势，到 50 年时仍有 270℃ 的开采温度，热储仍具有较大的开采潜力，热储寿命大于 50 年。方案 2 在开采前 20 年温度维持稳定，20 年后曲线呈现线性下滑，最终开采点温度为 220℃，仍然可以维持开采，热储寿命大于 50 年。方案 3 的开采点温度只维持了 10 年，之后曲线就开始大幅度降落，到 38 年的时候降低至 150℃，此时 EGS 系统达不到商业开采的需求，热储寿命已尽。

量的上限是 0.028 kg/s，流量越小，开采点的温度变化越缓慢，地热能的工程稳定性越高，但过小的流量不一定能达到工程开采的实际需求。当流量超过 0.028 kg/s，热储的开采寿命将会逐渐降低，并且不利于后期的热储温度恢复。

根据上述三种流量方案的计算结果对比，以及开采点温度变化情况的分析，在保证热储温度 (>150℃) 和开采寿命 (>50 年) 的条件下，开采流

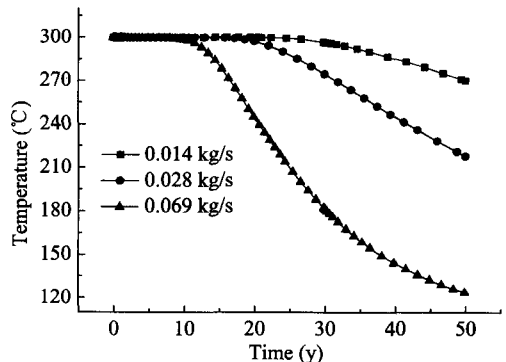


图 5 不同开采流量条件下开采点的温度变化情况

Fig. 5 Temperature changes under different production flow at production point

3.2 注采方式

不同的注采方式,对应不同的钻井深度,决定了 EGS 工程前期的投入成本。根据注入点和开采点在模型中的位置,共设计了低注高采、低注中采、中注高采、中注中采、高注高采、高注中采 6 种注采方案,高、中、低三个点位分别对应模型纵坐标的 $-3\ 000\text{ m}$ 、 $-3\ 200\text{ m}$ 和 $-3\ 400\text{ m}$ 。案例没有设计低采模式,是因为冷水由于密度大在重力作用下会先发生下沉,如果低点位开采会较快地抽取到冷水,缩短 EGS 热储的寿命。

根据数值模型的结果进行对比,发现低注高采和低注中采,中注高采和中注中采,高注高采和高注中采的温度分布是分别相似的,仅仅在开采点附近有微小的区别,即得出开采点对结果的影响与注入点对结果的影响相比作用微小甚至可以忽略。因此,选取低注高采、中注高采和高注高采三个方案的 50 年热储温度场分布进行出图展示,如图 6 所示。低注高采经过 50 年的地热能开采,模型的二维温度场左下角出现了一片冷却区域,垂向和水平的影响距离分别为 100 m 和 250 m 。热储温度整体降低面积较小,未超过模型的 $1/2$,开采点发生第一梯度的温度降低,约

为 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。注入点左下角到开采点温度呈现出稳定的梯度降低。中注高采方案在注入点一侧有小面积细长条的低温区域。在开采点一侧,高采比中采方案(即基础方案)的温度降低速度略快一些。相对于低注模型,中注模型的冷却带面积较小,开采点位置温度降低幅度差别不大。高注高采模型的冷却带出现在模型左上角,呈细长条状。EGS 热储整体温度降低影响范围较大,超过了模型面积的 $5/8$ 。

对比注采方式不同的 6 个案例,可以得出,在同一种注入模式的条件下,开采点的位置对结果影响较小。对热储温度和寿命影响较大的是注入点的选取位置,低点位注入会在热储内聚集较大范围的冷却区域,热储开采点的温度几乎没有发生变化;中点位注入的冷却区域面积较小,开采点温度降低幅度也不大,大约在 $270\text{ }^{\circ}\text{C}$;高点位注入的模拟结果与中点位的结果下半部分是相似的,不同之处是在模型上半部分也有降温,对整个热储温度影响的面积较大。为避免系统大面积降温和大范围的低温区形成,选择中间点位注入模式更为理想,其次为高点位注入。EGS 开采 50 年内,开采点的位置可以任选,为降低钻井施工投入成本,建议对地热能进行高点位开采。

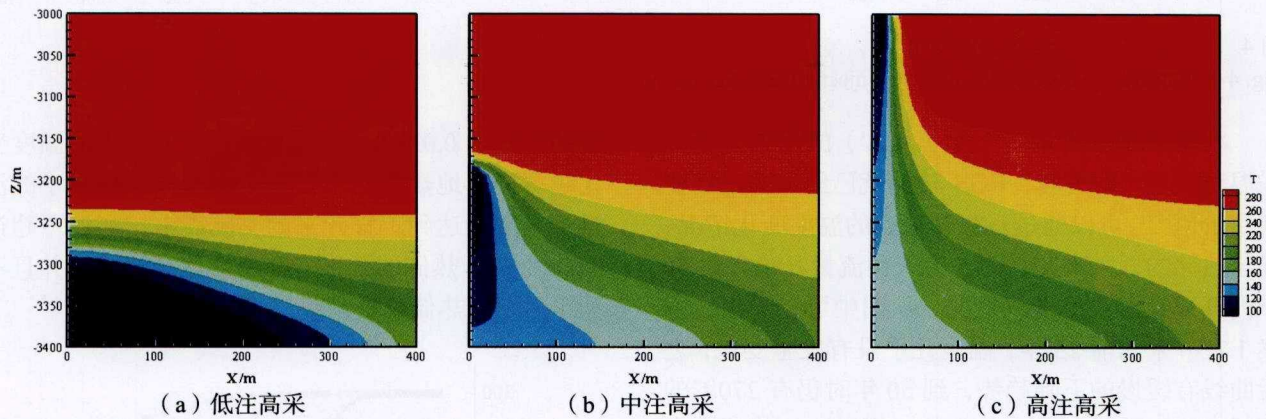


图 6 EGS 开采 50 年时热储温度场分布

Fig. 6 Temperature distribution of EGS reservoir at 50 years

3.3 注入温度

采出的高温地热能一般用于发电,发电后的余热可以进行供暖、养殖等二次利用,进行充分的梯级利用之后残余的地热水再进行生产回注,形成 EGS 开采的水循环过程,循环可以大大减少水资源的浪费,同时避免了地热尾水的污染。经梯级利用后的热水剩余温度,即循环注入水的温度,分别设计了注入温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的

开采模拟方案,观察注入水温对开采的影响。

根据不同注入温度方案的数值模拟结果发现,注入温度对热储二维温度场分布的影响较小。图 7 显示了不同注入温度条件下,开采点温度随时间的变化情况。注入水温度对开采点的影响前期并不明显,后期才逐渐显现出来。大约 20 年后,开采点温度开始下降,表明 EGS 稳定开采的寿命至少有 20 年,50 年后温度最大降低为 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$,最小降低为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,

各模型相差范围在 6℃ 内，注入水温度越低，开采点的温度降低幅度越大。

EGS 使用的注入水，一般是开采利用后的地热尾水，既然不同注入温度对模型的影响在可接受的范围内，则可待地热能源进行充分的梯级利用后，再进行回注。80℃ 以上的地热水还具有可观的商业价值，40℃ 以下利用价值则较小，为保持热储可持续性 & 地热能充分利用，可选择 40℃ ~ 80℃ 之间任意温度的地热尾水进行生产回注。

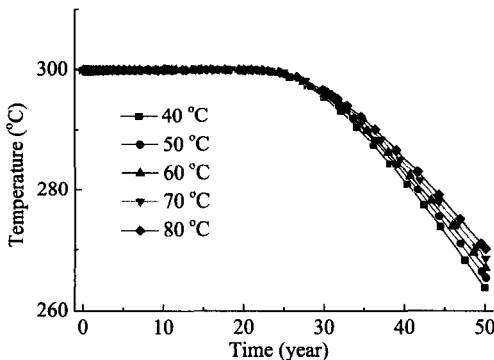


图7 不同注入温度条件下开采点的温度随时间变化

Fig. 7 Temperature changes under different injection temperature at production point

4 讨论

采用数值模拟的方法，建立了西藏羊易地区的二维 EGS 开采模型，计算得到的结果具有一定的参考价值，可为未来工程实施提供开采方案和技术参考。但是鉴于地层非均质、非理想的实际情况，模型存在一定的不确定性和有待改进之处。

研究结果不确定性主要为地质参数的不确定性，相关地质参数缺少原位测定的相关数据，参数多取自文献和相关资料，结果不一定是准确的。但是最主要的温度参数是实际测得的，对结论的可靠性提供了一个重要的保障。另外，参数的选取基于对 EGS 已有知识的了解进行了慎重的选择，保证所有参数在合理的范围内，其中一些参数的选取是依据实际的场地数据。数值的选取仅为定量，可根据不同的场地变化或者开采变动进行调整，模型的合理性和稳定性才是未来地热能产量预测的重要前提，一旦得到场地实测数据并对模型进行拟合和调整，基于物理模型建立的数值模型就可以应用到实际中，为地热能的开采提供能量评估、方案决策和寿命预测。

本文仍有许多有待解决的问题和改进之处。比如模型有待根据实际场地进行改进，若进行示范工程，可建立三维复杂网格系统以及符合实际的不规则边界网格。在获得地质参数之后，可以建立真实的数值模型进行计算与评估，可与实际工程进行对比拟合，之后可以用来对 EGS 地热能进行预估和风险评估。另外有待解决的问题有，进一步对其他参数进行详尽的数值评估，比如地层厚度、开采模式、边界条件等。

5 结论

以羊易地热田温度信息为依据，建立 EGS 二维模型，用数值模拟的方法分析了开采流量、注采模式和注入温度等对 EGS 开采的影响，得到的结论可为工程实施提供数据参考和借鉴：

(1) 开采流量对热储开采影响较大，开采流量与热储温度降低呈现出正相关，在保证 50 年商业开采价值的条件下，最大开采流量应控制在 0.028 kg/s 以下。

(2) 注采模式对开采结果的影响主要体现在注入点的位置上，中点注入模式优于高点位注入，低点位不作考虑，在考虑钻井成本的前提下，选择高注高采和中注高采都是比较理想的方案。

(3) 注入温度对模型结果的影响较小，可以在充分进行地热能梯级利用后，用 40℃ ~ 80℃ 之间任意温度的地热尾水进行回灌生产，实现循环利用。

开采流量、注采模式和注入温度是影响地热能开采的几个重要参数。通过对参数的优化，建立合理的模型，可延长 EGS 热储的生产寿命，提高开采点的热能效率，最小化热损失等。

参考文献：

- [1] 凌璐璐, 苏正, 吴能友. 增强型地热系统开采过程中热储渗透率对温度场的影响[J]. 可再生能源, 2015, 33(1): 82-90.
- [2] 梁廷立. 羊易地热田勘探工作方法的初步研究[C]//中国西藏高温地热开发利用国际研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 1993: 154-159.
- [3] 卢润, 安玉仙, 梁廷立. 西藏羊易地热田开发方案论述[C]//中国西藏高温地热开发利用国际研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 1993: 105-114.
- [4] 朱梅湘, 徐勇. 羊易地热田的水热蚀变及其热田演化[C]//中国西藏高温地热开发利用国际研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 1993: 125-133.

- [5] 夏抱本, 张家诚. 西藏地热活动规律初探[C]//中国西藏高温地热开发利用国际研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 1993: 1-7.
- [6] 苏正, 王晓星, 胡剑, 等. 我国增强型地热系统选址问题探讨[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 0386-0391.
- [7] 多吉, 曾毅, 焦兴义, 等. 西藏地热发电的回顾与思考[C]//中国地热资源开发与保护——全国地热资源开发利用与保护考察研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2007: 36-39.
- [8] 王绍亭, 陈新民. 西藏地热资源及地热发电的现状与发展[J]. 中国电力, 1999, 32(10): 79-81.
- [9] 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.
- [10] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] 汪集旸. 李四光教授倡导的中国地热研究[J]. 第四纪研究, 1989, (3): 279-285.
- [12] 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.
- [13] VECCHIARELLI A, SOUSA R, EINSTEIN H H. Parametric study with geofrac[C]//a three-dimensional stochastic fracture flow model: Thirty-eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2013.
- [14] SIFFERT D, HAFFEN S, GARCIA M H, et al. Phenomenological study of temperature gradient anomalies in the buntsandstein formation, above the Soultz geothermal reservoir, using TOUGH2 simulaitons[C]//Thirty-eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2013.
- [15] ZENG Y C, WU N Y, SU Z, et al. Numerical simulation of heat production potential from hot dry rock by water circulating through a novel single vertical fracture at Desert Peak geothermal field[J]. Energy, 2013, 63: 268-282.
- [16] ZENG Y C, WU N Y, SU Z, et al. Numerical simulation of electricity generation potential from fractured granite reservoir through a single horizontal well at Yangbajing geothermal field[J]. Energy, 2014, 65: 472-487.
- [17] ZENG Y C, SU Z, WU N Y. Numerical Simulation of Heat Production Potential from hot dry rock by water circulating through two horizontal wells at Desert Peak geothermal field[J]. Energy, 2013, 56: 92-107.
- [18] 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]. 地球物理进展, 2014, 29(3): 1391-1398.
- [19] 翟海珍, 苏正, 吴能友. 苏尔士增强型地热系统的开发经验及对我国地热开发的启示[J]. 新能源进展, 2014, 2(4): 286-294.
- [20] 蒋林, 季建清, 徐芹芹. 渤海湾盆地应用增强型地热系统的地质分析[J]. 地质与勘探, 2013, 49(1): 167-178.
- [21] 张亮, 裴晶晶, 任韶然. 超临界 CO₂ 在干热岩中的采热能力及系统能量利用效率研究[J]. 可再生能源, 2014, 3(1): 114-119.
- [22] 雷宏武, 金光荣, 李佳琦, 等. 松辽盆地增强型地热系统地热能开发热-水动力耦合过程[J]. 吉林大学学报, 2014, 44(5): 1633-1646.
- [23] 那金, 冯波, 兰乘宇, 等. CO₂ 化学刺激剂对增强地热系统热储层的改造作用[J]. 中南大学学报, 2014, 45(7): 2447-2458.
- [24] DEO M, ROEHNER R, ALLIS R, et al. Reservoir modeling of geothermal energy production from stratigraphic reservoirs in the Great Basin[C]//Thirty-eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2013.
- [25] CHEN J L, LUO L, JIANG F M. Analyzing heat extraction and sustainability of enhanced geothermal systems(EGS) with a novel single-porosity model: Thirty-eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering[C]. Stanford: Stanford University, 2013.
- [26] HOFMANN H, WEIDES S, BABADAGLI T, et al. Integrated reservoir modeling for enhanced geothermal energy systems in central Alberta, Canada[C]//Thirty-eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2013.
- [27] 于进洋. 西藏羊易高温水热型地热井筒温度场[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [28] 秦进生. 西藏羊易地热田的水热蚀变及地热地质意义[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(2): 161-165.
- [29] TELLIER N A, DUCHANE D V. 干热岩——一个高温地热概念: 中国西藏高温地热开发利用国际研讨会论文集[C]. 北京: 地质出版社, 1993: 173-178.
- [30] PRUESS K, OLDENBURG C, MORIDIS G. TOUGH2 user's guide (Version 2.0)[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.
- [31] XIONG Y, HU L T, WU Y S. Coupled geomechanical and reactive geochemical simulations for fluid and heat flow in enhanced geothermal reservoirs[C]//Thirty-eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2013.
- [32] PELUCHETTE J, ANDERSON B J. Optimization of integrated reservoir, wellbore, and power plant models for enhanced geothermal systems[C]//Thirty-eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2013.
- [33] ZHANG K N, WU Y S, PRUESS K. User's guide for TOUGH2-MP—a massively parallel version of the TOUGH2 code[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.
- [34] The future of geothermal energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems on the United States in the 21st Century[R]. Massachusetts Institute of Technology, 2006.

作者简介:

凌璐璐(1988-), 女, 硕士, 研究实习员, 主要从事增强型地热系统数值模拟研究。

苏正(1980-), 男, 博士, 研究员, 主要从事天然气水合物及地下流体动力学数值模拟研究。

翟海珍(1990-), 女, 博士研究生, 主要从事增强型地热系统研究。

吴能友(1965-), 男, 博士, 研究员, 主要从事天然气水合物和增强型地热系统研究。