单裂隙增强型地热储层的产热能力数值模拟分析

张晨雨，姜振蛟，王金鑫，李思源，黄 亮
（吉林大学 地下水资源与环境教育部重点实验室，吉林 长春 130021）

摘 要：受地应力各向异性和天然裂隙影响，深部地热储层在压裂改造中普遍存在裂隙优势发育的现象，形成近似单裂隙的人工热储层。单裂隙地热储层能否提供具有商业开发价值的热能，目前仍存在较大争议。针对该问题，文章基于单裂隙地热系统假设，模拟研究了不同裂隙结构参数和井场参数影响下的地热系统产热能力。结果表明：裂隙张开度由 1.0 降至 0.1，有助于延缓热突破，降低热损失率 37.7%；而将注、采井间距由 141 m 增至 424 m 或优化注入流量由 1 m^3/min 增至 3 m^3/min，系统采热能力分别提升 3.1 MW 和 10.6 MW。单裂隙地热系统可以通过对裂隙结构参数精确设定与调整以及井场优化达到理想的采热效果。在储层含有一条张开度小于 0.1 mm 的水平裂隙情况下，当井间距超过 420 m、注入流量小于 1 m^3/min、注入温度超过 30.0 ℃，系统运行 30 a 内的热损失率可控制在 15%以内，采热能力稳定在 12 MW 以上。

关键词：增强型地热系统；单裂隙；产热能力；数值模拟
中图分类号：TK521；P314 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2026)01-0052-08

0 引言

深部地热资源储量巨大，是极具开发前景的可再生清洁能源。然而，深部地热储层普遍存在原生渗透性差、水热循环不畅的问题[1]，须依靠水力压裂等改造手段形成人工裂隙网络，为渗流与换热提供循环通道。

以往研究普遍认为，构建复杂人工裂隙网络是实现深部地热能高效开发的重要前提[2,3]。但在实际工程中，受地应力各向异性和天然裂隙分布影响，裂隙往往沿优势方向扩展，形成结构单一的增强型地热储层。此类储层在运行中易发生冷水突破和水热短路，导致热采效率显著下降。传统观点认为，当裂隙结构趋于单一、近似单条裂隙时，系统不具备商业开发价值。然而，Wang L[4]在研究中发现，单裂隙地热系统在合理条件下仍可输出较高热能。在充分认识裂隙空间结构的基础上，能否通过井场参数优化，在裂隙结构单一的地热储层中实现高效热能获取，目前鲜有报道，因此，本文对该问题做了仔细研究。

针对单裂隙岩体水热传递过程，已有大量实验与数值模拟成果。在实验室尺度（厘米级），通过渗流实验修正了地热系统渗流方程，如线性立方定律和非线性 Forchheimer 方程；在渗流-换热实验中，完善了裂隙与基质间的换热模型。在工程尺度（百米至千米级），研究者通过单裂隙模型探讨张开度变化对渗流及换热过程的影响，并基于该结构发展了示踪反演方法，用于表征裂隙张开度分布特征。

综合以往单裂隙地热储层渗流与传热过程数值模拟成果，本文以单裂隙地热储层、代表裂隙结构单一、次级裂隙不发育的情况，分析裂隙产状、张开度、布井方式、注/采方式对采热能力的影响。研究结果显示，通过对单裂隙系统的裂隙结构参数进行精确设定与调整，并结合井场的优化设计，可以显著提升系统的采热效率。以青海共和增强型地热系统实际储层条件作为基础，构建数值模型。该地热系统始建于 2019 年，示踪试验结果表明注、采井之间存在强优势通道，可视为单裂隙地热系统[5]。为排除地热储层天然条件（储层温度、压力、涌水量等）对分析结果的影响，采用系统运行初期和末期产热能力的相对变化量作为评价地热系统产热效果的指标，即以 30 a 地热系统运行过程中热损失率下降幅度不超过 15%为基准[6-9]，明确单裂隙地热储层能够实现高效热能获取的基本条件，为深部地热能高效可持续开发提供科学依据。

收稿日期：2025-04-17。
基金项目：国家自然科学基金（3A4213192425）。
通信作者：姜振蛟（1986-），男，博士，教授，研究方向为多场耦合数值模拟与储层非均质反演。E-mail：zjjiang@jlu.edu.cn

1　研究方法

1.1　裂隙介质水热耦合数值模拟方法

假设裂隙和基质中的渗流过程均符合达西定律并遵循质量守恒定律。基质中的渗流过程控制方程为

$$\frac{\partial(\rho_f\cdot\theta)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_f v_r)=-Q_1 \tag{1}$$

裂隙中的渗流过程控制方程为

$$b\frac{\partial\rho_f}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_f v_f b)=bQ_1 \tag{2}$$

式(1),(2)中:t 为时间,s;ρ_f 为流体密度,kg/m^3;v_r 为基质中渗流速度,m/s;Q_1 为基质与裂隙间水流交换量,kg/(m^3·s);θ 为基质孔隙度;b 为裂隙张开度,m;v_f 为流体在裂隙中的运移速度,m/s。

$$v_f=-\frac{\hat{k}}{\mu}\cdot(\nabla p-\rho_f g) \tag{3}$$

式中:p 为流体压力,Pa;g 为重力加速度,g=9.806 65 m/s^2;μ 为流体的动力粘度,Pa·s;$\hat{k}$为裂隙渗透率,m^2,与裂隙张开度之间的关系为

$$\hat{k}=\frac{b^2}{12} \tag{4}$$

基质和裂隙中的热量传递均满足能量守恒。基质中热量传递以热传导为主，而忽略其中的对流传热,其控制方程为

$$\rho C\frac{\partial T}{\partial t}-\nabla\cdot(\lambda\nabla T)=-Q_2 \tag{5}$$

在对流和热传导的共同控制下，裂隙中的热量传递控制方程为

$$b\cdot\rho C\frac{\partial T}{\partial t}+b\cdot\rho_f C_f v_f\nabla T-\nabla\cdot(b\lambda\nabla T)=bQ_2 \tag{6}$$

式(5),(6)中:T 为温度,℃;Q_2 为基质与裂隙间热量交换量,W/m^3;ρC 为体积比热容,J/(m^3·℃);λ 为导热系数,W/(m·℃);C_f 为流体的定压热容,J/(kg·℃)。

本文采用 COMSOL 数值模拟工具,基于有限单元法对渗流和传热控制方程进行求解。渗流和传热方程求解采用顺序耦合方式,在计算过程中,首先对渗流控制方程进行数值求解，获得压力及渗流速度空间分布后，用于热量迁移控制方程计算温度空间分布;获得温度空间分布后,更新流体密度和粘度，用于下一个时间步长的渗流方程求解。重复上述过程则可获得渗流场和温度场计算结果。时间步长根据求解收敛情况自适应控制。

1.2　地热系统性能的评价指标

以产热温度、采热能力和热损失率作为核心评价指标,其中,地热系统采热能力的计算式[10]为

$$E=mC_f(T_{out}-T_{in}) \tag{7}$$

式中:E 为地热系统的采热能力,W;m 为开采井的流体质量流量,kg/s;T_{in} 和 T_{out} 分别为注入温度和开采温度,℃。

热损失率 η 为

$$\eta=1-\frac{E_\tau}{E_0} \tag{8}$$

式中:E_τ为系统运行时间 τ 时的采热能力,W;E_0 为初始采热能力,W。

1.3　概念模型和方案设计

在综合考虑实际工程特征的基础上，构建单裂隙增强型地热系统的三维概念模型,见图 1。

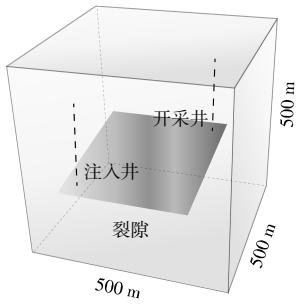


图 1　单裂隙三维增强型地热储层概念模型

Fig.1 Conceptual model of three-dimensional enhanced geothermal reservoir with single fracture

模拟区范围为 500 m×500 m×500 m，底部温度为 200.0 ℃,温度梯度为 0.03 ℃/m,顶部温度为 185.0 ℃。储层岩性为花岗岩,密度为 2 650 kg/m^3、比热容为 980 J/(kg·K)、导热系数为 3 W/(m·K),假设岩体的热物理参数不随温度和压力变化而发生改变。在天然状态下,花岗岩储层裂隙不发育,即基质渗透率和孔隙度趋近于零。采热循环流体采用清水,比热容为 4.18 kJ/(kg·K)、导热系数为 0.6 W/(m·K)、动力粘度为 1×10^{-3} Pa·s、流体密度在常温条件下为 1 000 kg/m^3。模拟过程中假设水的比热容、导热系数和动力粘度不随温度变化,但水的密度与温度密切相关[11]。此外,水在储层循环流动过程中,尽管温度变幅较大,但是储层处于高压状态(共和地区地热储层埋深超过 4 km,静水压力超过 40 MPa),因此水保持液态,忽略储层

内部流体的相态变化。热能获取采用一口注入井和一口开采井相结合的形式，井筒直径为 0.1 m。此次研究中忽略井筒内部渗流与传热过程，以开采井的井底流量和温度作为依据，评述裂隙结构和井场参数影响。

在上述概念模型基础上，对比不同井场参数和裂隙结构参数控制下的渗流与传热规律，评价单裂隙增强型地热系统的产热能力。基础案例中，假设裂隙张开度均匀、大小为 1.0 mm，裂隙位于储层高度 250 m 处，呈水平状态；注、采流量固定为 1 m^3/min、注、采井间距设定为 424 m、注入温度为 30.0 ℃。参数取值如表 1 所示[12-14]。

表 1　模拟案例的井场参数和裂隙结构参数

Table 1 Well site parameters and fracture structure parameters for simulation cases

参数		基础案例	取值
裂隙结构	裂隙壁面结构	均匀	均匀与非均匀
	张开度大小/mm	1.0	0.1,0.5,1.0
	裂隙倾角/(°)	0	0,10,30
井场	注、采流量/(m^3·min^{-1})	1	1,2,3
	注、采井间距/m	424	141,283,424
	注入温度/℃	30.0	30.0,60.0,90.0

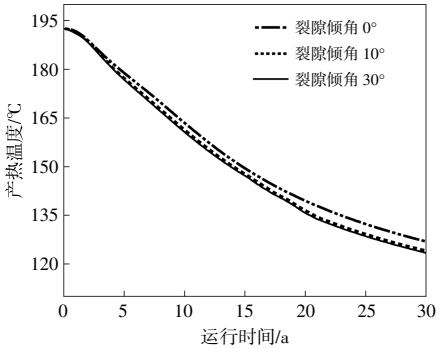
2　结果和讨论

2.1　不同裂隙结构条件下的渗流与传热规律

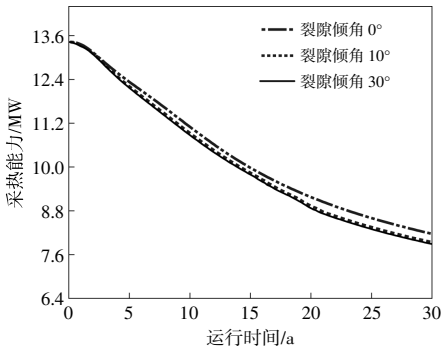
2.1.1　裂隙倾角的影响

在基础案例条件(表 1)下，开采 30 a 不同倾角的裂隙系统产热温度和采热能力变化见图 2。

由图 2 可见，地热系统运行过程初期，注入的冷水尚未波及开采井，开采井温度保持相对稳定。随着开采的持续进行，注入冷水的影响范围逐渐扩展至开采井，导致开采井的产热温度逐年下降。基础案例中开采井的温度由 192.5 ℃降至 127.0 ℃，降幅为 65.5 ℃，对应的热损失率为 40.9%，产热能力为 8.1 MW。当裂隙倾角增至 10°时，30 a 后的开采温度降至 125.0 ℃，热损失率上升至 42.2%，产热能力下降至 7.8 MW；若裂隙倾角继续增大为 30°，开采温度进一步降至 123.0 ℃，热损失率增至 43.0%，产热能力进一步降低至 7.7 MW。裂隙倾角增大会加剧由重力和温度差异共同作用引起的密度流效应，导致注入冷水向开采井运移速率加快。在高倾角条件下(如 30°)，冷水优先沿注入井与开采井之间的最短路径快速通过，而向周围高热储层扩散作用减弱，致使冷水波及范围缩小(图 3)。这种流动模式导致注入流体与裂隙围岩换热不充分，采出温度下降快，系统热损失率升高，采热能力随之下降。Wang L[4]通过模拟也发现，产热温度随裂隙倾角增大出现下降趋势，并提出井间距设计应充分考虑裂隙倾角以避免过早热突破。定量分析表明，倾角从 0°增大为 30°，热损失率增大 2.1%，产热能力降低 0.4 MW。



(a)产热温度



(b)采热能力

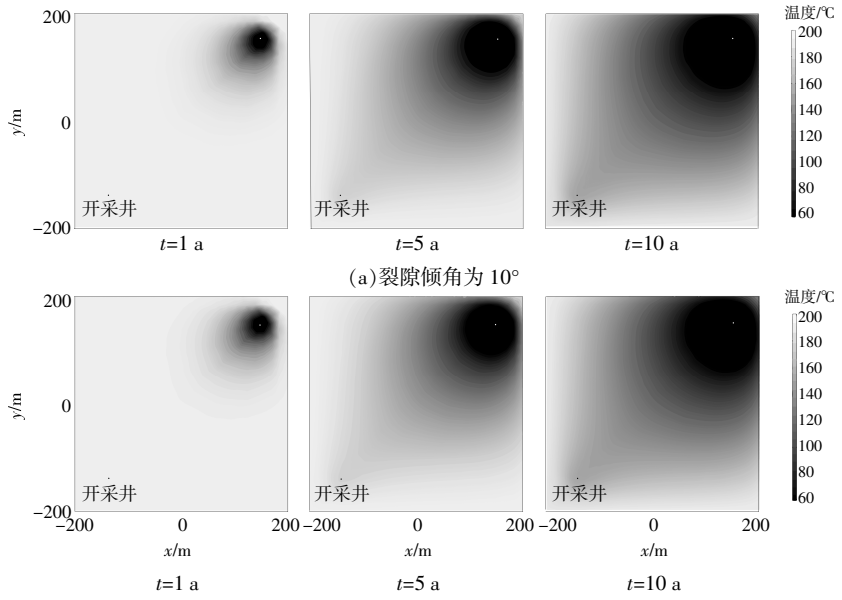
图 2　不同倾角的裂隙系统产热温度和采热能力变化趋势

Fig.2 Variation of production temperature and heat extraction capacity in fracture system with different dip angles

2.1.2　裂隙张开度的影响

维持其他参数与基础案例(表 1)一致，开采 30 a 不同张开度的裂隙系统产热温度和采热能力变化如图 4 所示。

由图 4 可见：当张开度由 1.0 mm 降低至 0.5 mm 时，系统热损失率由 40.9%降至 12.5%，30 a 时采热能力由 8.1 MW 升至 11.8 MW；当张开度继续降至 0.1 mm 时，热损失率进一步降至 3.2%，采热能力跃升至 13.1 MW。在注、采流量恒定条件下，裂隙张开度较大时，注入流体倾向于沿着注、采井连线方向运移[4]，注、采井连线附近的裂隙围岩温度快速下降，冷水与接触围岩的温差也随之快速降低，最终减缓了换热速率，并加速了开采温

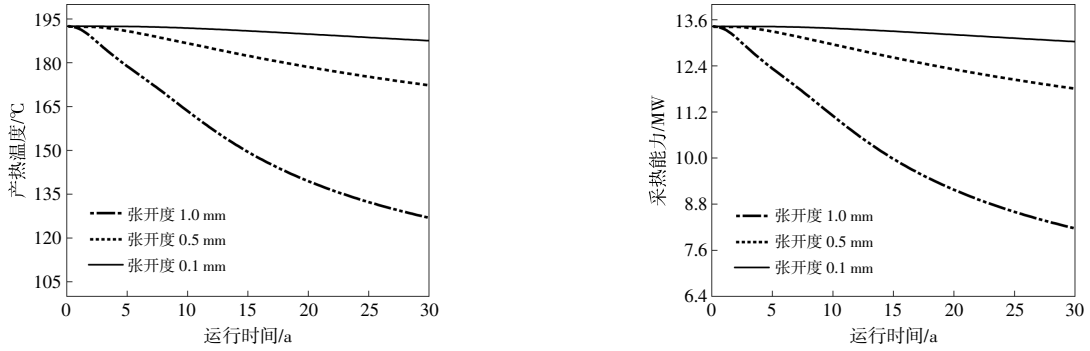


(a)裂隙倾角为 10°

(b)裂隙倾角为 30°

图 3　裂隙倾角为 10°和 30°条件下温度场的时空演化

Fig.3 Spatiotemporal evolution of the temperature field under fracture dip angles of 10° and 30°



(a)产热温度　　(b)采热能力

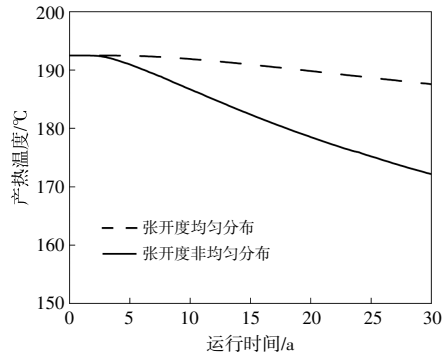
图 4　不同张开度的裂隙系统产热温度和采热能力变化趋势

Fig.4 Variation of production temperature and heat extraction capacity in fracture systems with different apertures

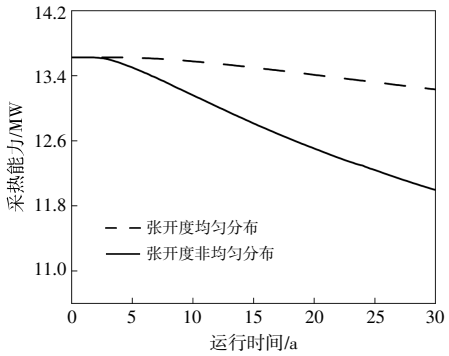
度的下降；当裂隙张开度减小，过水断面面积缩减,冷水在裂隙中的平均渗流流速增大,迫使更多的注入流体偏离注、采井间连线,有效抑制了“热短路”现象。这种偏离导致参与换热的裂隙围岩范围更广、平均温度更高,进而提高了整体的换热效率。同时,较窄的裂隙也增大了与裂隙围岩直接接触换热的冷水比例，进一步提升了换热效率。然而，更小的裂隙张开度需要更大的驱动压差维持抽注流量,增加了泵送能耗。

进一步对比平均张开度为 0.1 mm 时,张开度均匀分布与非均匀分布(标准差为 0.04 mm、相关长度为 200 m）的裂隙结构对开采井温度的影响如图 5 所示。

由图 5 可见，非均匀裂隙的空间变异显著改变了开采井温度，并导致热突破时间早于张开度均匀分布的情形。这是因为非均匀裂隙结构中的局部高渗透区域易形成优势渗流通道，造成注入冷水集中通过这些优势渗流路径,使得与冷水集



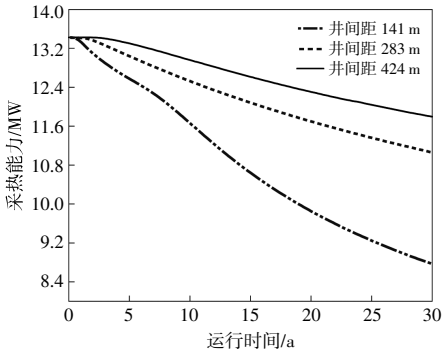
(a)产热温度



(b)采热能力

图 5 张开度均匀和非均匀分布的裂隙系统产热温度和采热能力变化趋势

Fig.5 Variation of production temperature and heat extraction capacity in fracture systems with uniform and non-uniform aperture distributions



(b)采热能力

图 6 不同井间距的裂隙系统产热温度和采热能力变化趋势

Fig.6 Variation of production temperature and heat extraction capacity in fracture systems with different well spacings

中换热的高张开度区域温度快速下降，影响冷水与围岩的接触换热,导致采热能力整体降低。

2.2 井场参数对单裂隙地热系统热损失率及产热能力的影响分析

2.2.1 井间距对热损失率及产热能力的影响分析

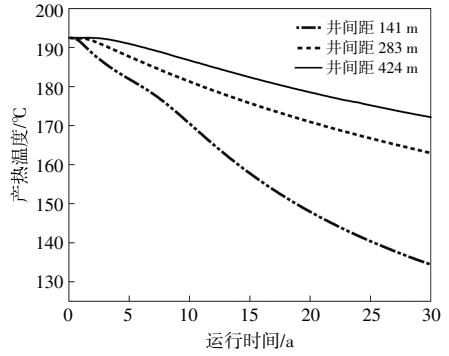
在壁面结构为均匀裂隙、张开度大小为 0.5 mm、裂隙倾角为 0°、注、采流量为 1 m^3/min、注入温度为 30.0 ℃的情况下,对比注、采井间距由 424 m 缩短为 141 m 时开采井温度的变化趋势，如图 6 所示。

由图 6 可见,在 424 m 井间距(水平距离 300 m）条件下,30 a 内开采井温度由 192.5 ℃降至 172.0 ℃，采热能力为 11.8 MW，热损失率为 12.5%。当井间距缩短至 141 m 时,开采井温度则由 192.5 ℃降至 134.0 ℃,采热能力降至 8.7 MW,热损失率显著增至 35.7%。井间距从 424 m 减至 141 m 后,热损失率增加了 23.2%,采热能力降低了 3.1 MW。随着井间距的增加,流体渗流路径延长,增加了热突破时间,并增大了冷水与储层接触面积,换热更加充分,减缓了开采井温度的下降[15],进一步降低热损失率,提高采热能力。刘恒伟[15]同样指出,注、采井间距过小会造成冷水快速突破至开采井,导致产能剧烈波动和能效下降。因此,在合理范围内通过增大井间距,能降低系统热损失,提高地热系统采热能力。

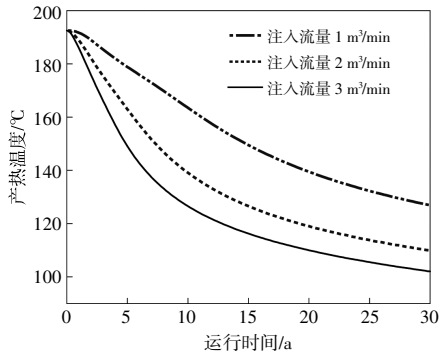
2.2.2 注入流量对热损失率及产热能力的影响分析

在基础案例参数条件(表 1)下,对比不同注入流量(1,2,3 m^3/min)条件下采出井温度的变化趋势,如图 7 所示。

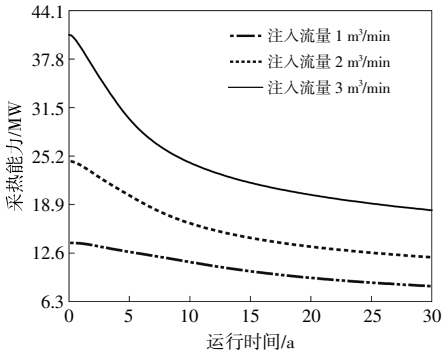
由图 7 可见,随着注入流量的增大,热损失率上升，但采热能力也随之提高。当注入流量为 1 m^3/min 时,30 a 内采出井温度从 192.5 ℃降至 127.0 ℃,30 a 时的采热能力为 8.1 MW,热损失率为 40.9%;当注入流量增至 3 m^3/min 时,30 a 时采出井温度进一步降至 102.0 ℃，热损失率增至 54.4%,但采热能力显著提升至 18.7 MW。将注入流量从 1 m^3/min 增至 3 m^3/min,会造成热损失率



(a)产热温度



(a)产热温度



(b)采热能力

图 7　不同注入流量的裂隙系统产热温度和采热能力变化趋势

Fig.7 Variation of production temperature and heat extraction capacity in fracture systems with different injection flow rates

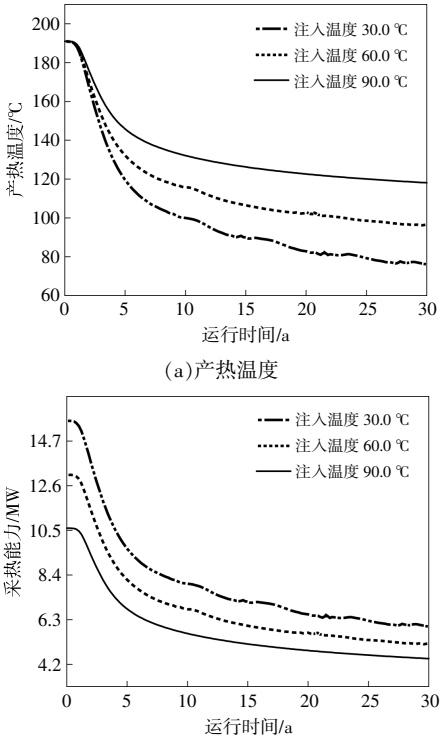
增加 13.5%,但同时能大幅提高系统采热能力(增加 10.6 MW)。这表明,更高的注入流量会造成储层热量补充不足,导致开采井温度下降,热损失率更高;但同时由于循环流量的增加,也会显著提高采热能力[16]。其原因在于,流量增大时,相同时间内更多的注入流体参与了储层换热,提高了换热效率。然而,这也会加速裂隙附近储层的热量消耗,导致开采井温度下降更快,注、采流体的温差减小。尽管如此,采热能力受到开采流量和注、采流体温差的共同影响,在给定案例条件下,流量增加对采热能力的正面贡献远大于温差减小带来的负面影响,最终表现为整体采热能力的提升。

因此,在实际工程应用中,结合地质和热储特性,在可接受的热损失率范围内,合理增加注、采流量,有利于提高采热能力。

2.2.3　注入温度对热损失率及产热能力的影响分析

在壁面结构为均匀裂隙、张开度大小为 1.0 mm、裂隙倾角为 0°、注、采流量为 1 m³/min、注、采井间距为 141 m 情况下,对比不同注入温度(30.0,60.0,90.0 ℃)对采出井温度的影响,如图 8 所示。

由图 8 可见,较高的注入温度可以降低热损失率,但也会降低产热能力[16]。当注入温度为 30.0 ℃时,30 a 内采出井温度降至 79.5 ℃,30 a 时的采热能力为 6.1 MW,热损失率为 61.1%;当注入温度提升至 90.0 ℃时,30 a 内采出井温度降至 119.5 ℃,采热能力降至 4.6 MW,热损失率为 56.2%。将注入温度从 30.0 ℃提高至 90.0 ℃,热损失率降低 4.9%,但采热能力降低 1.5 MW。这是因



(a)产热温度

(b)采热能力

图 8　不同注入温度的裂隙系统产热温度和采热能力变化趋势

Fig.8 Variation of production temperature and heat extraction capacity in fracture systems with different injection temperatures

为较高温度的注入流体导致其与地层间的温差减小,换热速率变慢,从而减缓了采出温度的下降速率。然而,较高的注入温度虽然能保持较高的产热温度,降低系统热损失率,但注入流体温度的增加意味着采出流体的热回收率显著降低。马永法[16]在垂直井闭式循环地热系统研究中也指出,注入温度升高能有效抑制热突破、延长系统运行周期,但也因循环流体在进入储层时与地层温差减小,造成单位体积所提取的热能显著下降,从而降低热效率,并建议在追求稳定运行和最大产能之间权衡选择注入温度。

综上所述,裂隙倾角、张开度、井间距、注入流量和注入温度等因素均可影响地热系统的采热能力和热损失率。较大的裂隙倾角、裂隙张开度以及张开度的空间变异性均会导致地热储层中冷水沿着优势通道集中流动现象,减少与储层的有效接触换热面积,造成开采井温度快速下降而增加热损失率,并造成采热能力的迅速下降。其中,较大的裂隙倾角会加剧密度流效应,促使冷水下移并快速流动;较大的张开度则降低了注、采井之间阻

力,冷水更容易沿最短路径穿透储层;而张开度在空间上的不均匀分布会产生由高张开度区域连通形成的优势渗流通道, 冷水会优先选择这些阻力较小的路径流动。这些因素均使冷水更容易绕过大部分储层,集中在少数通道中流动,降低采热能力。

优化井场参数可以提高系统的采热能力、降低热损失率。通过增大注、采井间距可以有效延缓热突破,增加冷水与热储层的有效接触面积,从而提升长期采热性能;通过提高注、采流量,可以有效增加换热效率, 却会导致采出井的温度快速下降; 而采用更高温度的注入流体可减缓采出井温度下降,同时也降低了系统采热能力。在实际工程中应综合考虑这些因素,降低热损失率,增加采热能力,提高地热系统的运行效率。

在给定案例条件:注入流量为 1 m^3/min,注、采井间距为 424 m,注入温度为 30.0 ℃时,地热系统热损失率可以降至 15%以内,采热能力维持在 12 MW 以上。说明即使在单裂隙地热储层中,通过精确设定与调整裂隙结构, 合理优化注、采参数,依然可以获取足够高的热能。

3 结论

本文建立了单裂隙地热储层渗流-传热数值模型,模拟裂隙结构单一、次生裂隙不发育的地热系统产热能力,系统梳理了开采井温度、采热能力以及热回收率随裂隙结构、井距、注入流量以及注入温度的变化规律,得出以下结论。

①裂隙结构特征显著影响地热系统的热能获取效率。裂隙倾角增大会加剧密度流效应,导致冷水向采井加速渗流,降低与围岩的换热效率,从而提高热损失率、降低采热能力;裂隙张开度越大,冷水越易沿最短路径穿透储层,换热范围减小,热损失率上升; 裂隙张开度的不均匀分布易形成优势通道,流体流动集中,进一步削弱整体换热效率。

②井场参数对系统产热性能具有主控作用。增加注、采井间距能够显著延缓冷水突破,扩大流体与储层的接触面积,提高换热效率;注入流量的增大会提升单位时间内的采热能力, 但也加剧开采温度的降低; 注入温度升高可减缓产热温度下降趋势,但同时减弱了注、采温差。优化井距、流量与注入温度参数组合,是提升系统性能的关键。

③研究结果证明了单裂隙地热系统经过井场参数优化条件,可以提供足够高的热能,以满足商业开发的需求。对于张开度小于 0.1 mm 的单条水平裂隙地热储层,注、采井间距超过 420 m,注入流量小于 1 m^3/min、注入温度超过 30.0 ℃的条件下,系统在运行 30 a 内热损失率小于 15%,并保持 12 MW 以上的稳定采热能力。

参考文献:

[1] 袁益龙,侯兆云,雷宏武,等.增强型地热系统井筒-储层耦合数值模拟分析 [J]. 可再生能源,2015,33(3):421-428.

[2] 肖鹏,闫飞飞,窦斌,等.增强型地热系统水平井平行多裂隙换热过程数值模拟 [J]. 可再生能源,2019,37(7):1091-1099.

[3] 王奕雅,于海龙,黄刘洋,等.干热岩增强型地热系统平行三裂隙传热影响因素分析[J].可再生能源,2022,40(9):1181-1188.

[4] Wang L,Jiang Z,Li C.Comparative study on effects of macroscopic and microscopic fracture structures on the performance of enhanced geothermal systems[J].Energy,2023,274:127300.

[5] 朱贵麟,刘东林,周殷竹,等.青海共和盆地干热岩人工储层示踪试验研究[J].中国地质,2025,52(2):416-424.

[6] Rybach L,Mongillo M.Geothermal sustainability -a review with identified research needs [J].GRC Transactions,2006,30:1083-1090.

[7] Aliyu M D,Chen H P.Sensitivity analysis of deep geothermal reservoir:Effect of reservoir parameters on production temperature[J].Energy,2017,129:101-113.

[8] 崔翰博,唐巨鹏,姜昕彤.水流损失和热补偿共同作用对增强型地热系统(EGS)产能影响的研究[J].应用力学学报,2020,37(1):200-208,482.

[9] Pandey S N,Vishal V.Sensitivity analysis of coupled processes and parameters on the performance of enhanced geothermal systems[J].Scientific Reports,2017(7):17057.

[10] 王佳铖,赵志宏,陈进帆,等.深层地热能开采与储能系统模拟研究[J].隧道与地下工程灾害防治,2024,6(1):84-93.

[11] Dipippo R.Geothermal Power Plants:Principles,Applications,Case Studies and Environmental Impact [M].Amsterdam:Butterworth-Heinemann,2008.

[12] Guo B,Fu P,Hao Y,et al.Thermal drawdown-induced flow channeling in a single fracture in EGS [J]. Geothermics,2016,61:46-62.

[13] Tsang Y W,Tsang C.Channel model of flow through fractured media [J].Water Resources Research,1987,23(3):467-479.

[14] Shi Y,Song X,Wang G,et al.Numerical study on heat extraction performance of a multilateral-well enhanced geothermal system considering complex hydraulic and natural fractures [J].Renewable Energy,2019,141:950-963.

[15] 刘恒伟,肖鹏,窦斌,等.储层特征对水平井多裂隙增强型地热系统采热过程影响的数值模拟研究[J].地质科技通报,2022,41(3):341-348.

[16] 马永法,周学军,袁利娟,等.垂直井闭循环地热系统热提取性能和注入优化数值模拟 [J]. 可再生能源,2024,42(10):1302-1312.

Numerical simulation analysis of heat production capacity of single fracture enhanced geothermal reservoir

Zhang Chenyu, Jiang Zhenjiao, Wang Jinxin, Li Siyuan, Huang Liang

(Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: Influenced by anisotropic in-situ stress and natural fractures,deep geothermal reservoirs often exhibit preferential fracture development during hydraulic stimulation,resulting in the formation of artificially created geothermal reservoirs that approximate a single-fracture system. Whether such single-fracture geothermal reservoirs can provide commercially viable thermal energy remains a topic of considerable debate. This paper,based on the assumption of a single-fracture geothermal system,investigates the system's heat generation capacity under the influence of varying fracture structural parameters and well location parameters. The simulation results indicate that reducing the fracture aperture from 1.0 to 0.1 effectively delays thermal breakthrough and decreases the heat loss rate by 37.7%. Furthermore,increasing the distance between injection and production wells from 141 m to 424 m,or optimizing the injection flow rate from 1 m^3/min to 3 m^3/min,enhances the system's heat recovery capacity by 3.1 MW and 10.6 MW,respectively. With detailed characterization of fracture structures and optimization of well field configurations,single-fracture geothermal systems can achieve favorable thermal recovery performance. Assuming a horizontal fracture with an aperture less than 0.1 mm,the system can maintain a thermal loss rate of less than 15% over 30 years of operation and sustain a heat extraction capacity above 12 MW, under the conditions that the well spacing exceeds 420 m,the injection rate is below 1 m^3/min,and the injection temperature is above 30.0 ℃.

Keywords: enhanced geothermal system; single fracture; heat extraction capacity; numerical simulation