

共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯 波

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin

CHEN Xuanyi, JIANG Zhenjiao, XU Hanying, and FENG Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104058>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting

张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79-79

含单裂隙非饱和带中轻非水相流体修复的数值模拟

Numerical simulation of light non-aqueous phase liquids remediation in the unsaturated zone with single fractures

赵科锋, 王锦国, 曹慧群 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 43-55

某氨氮污染地下水抽出-处理系统优化模拟研究

Simulation and optimization of a pumping and treating system for the remediation of ammonia polluted groundwater

王平, 韩占涛, 张海领, 孔贝贝, 张鑫馨 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 34-43

水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究

A numerical simulation study for controlling seawater intrusion by using hydraulic and physical barriers

吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 32-40

半干旱地区地表-地下水系统水热运移与裸土蒸发研究

Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas

马稚桐, 王文科, 赵明, 黄金廷, 卢艳莹, 侯昕悦, 王一 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 7-14

中试尺度下可渗透反应墙位置优化模拟——以铬污染地下水场地为例

A numerical simulation study of the position optimization of a pilot-scale permeable reactive barrier: a case study of the hexavalent chromium contaminated site

吕永高, 蔡五田, 杨骊, 边超, 李敬杰 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 189-195



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104058

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 等. 共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 191-199.

CHEN Xuanyi, JIANG Zhenjiao, XU Hanying, *et al.* Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 191-199.

共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的 控热机理与产能优化

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯 波

(吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130021)

摘要: 人工压裂是获取干热岩型地热资源的关键环节, 压裂后的人工裂隙带结构对开采条件下水热传递过程具有重要控制作用。结合我国共和盆地干热岩储层地质条件, 采用数值模拟方法着重分析干热岩不同产状人工裂隙带的渗透率与宽度对热储中水热传递过程的影响机理, 明确不同人工裂隙带结构条件下水热产出能力, 进而优化井间距。结果表明: 当人工裂隙带渗透率较小时(小于 5 D), 裂隙带规模越大, 开采井温度越高; 当渗透率较大时(大于 10 D), 在水平裂隙带中, 随着裂隙带规模的增加, 由于注入冷水的快速扩散导致整体低温区域增加, 开采井温度反而降低。在水平裂隙带中注入冷水主要为水平向流动, 随着渗透率的增加, 开采井温度更易受注入冷水的影响而降低; 但在垂直裂隙带及倾斜裂隙带中, 随着渗透率的增加, 垂向自由对流增强, 注入冷水更易于向储层底部高温区域流动, 经加热后到达开采井, 使得开采温度提升。综合比较, 同一井间距条件下, 低渗水平裂隙带以及高渗垂直裂隙带的产热能力较其他裂隙带更强。

关键词: 增强型地热系统; 人工裂隙带; FEFLOW; 数值模拟; 优化开采; 控热机理

中图分类号: P314; P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0191-09

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin

CHEN Xuanyi, JIANG Zhenjiao, XU Hanying, FENG Bo

(College of New Energy and Environment Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China)

Abstract: Hydraulic fracturing is necessary to obtain geothermal energy from the hot dry rocks. The structure of the artificial fractures plays an important role in controlling the water and heat transport during the heat production. In this study, we analyzed the influence of the permeability and width of artificial fracture zone on the coupled heat and flow processes in the Gonghe Basin, China. The results showed that in the fractured reservoir with permeability lower than 5 D, the outflow temperature increases with the width of the fracture zones. This is because the injected cold water can sufficiently merge with the thermal water in the reservoir, and has a weak influence on the water temperature close to the extraction well. A special situation occurs in the horizontal reservoir with permeability higher than 10 D, where the outflow temperature decreases with the increase of

收稿日期: 2021-04-07; 修订日期: 2021-06-22

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFB1501803)

第一作者: 陈炫沂(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质和地热地质研究。E-mail: chenxy0119@126.com

通讯作者: 姜振蛟(1986-), 男, 博士, 教授, 主要从事地热成因机理和地热储层结构研究。E-mail: zjjiang@jlu.edu.cn

fracture zone width, because the overall low temperature zone is increased due to the rapid diffusion of injected cold water. In the reservoir with horizontal fracture zone, outflow temperature decreases with the increase of the permeability, because the injected cold water easily arrives the production well. In contrast, in the vertical or tilted fracture reservoir, the outflow temperature increases with the permeability, because the free convection occurs strongly in the high-permeable reservoirs. A synthetic comparison suggested that under the same well distance, heat production is higher in the reservoirs with low-permeable horizontal fracture zone and with high-permeable vertical fracture zone, among other fracture zones.

Keywords: enhanced geothermal systems(EGS); hydraulic fracture zone; FEFLOW; numerical simulation; optimizing exploitation; heat control mechanism

地热能因其分布广泛、清洁和运行稳定等优势,得到国内外社会广泛关注。在我国,地热供暖与发电有望成为解决北方雾霾问题的主要途径。2018年,国家地热能发展规划报告中指出:截至2030年地热能开发在我国一次能源消费中占比将超过3%,比目前高出至少10倍。但是浅层中低温地热开发利用无法满足当今社会对地热资源的需求,开发中深层高温地热资源,特别是深部干热岩型地热资源,是未来地热能开发的重要方向。

我国陆域3.0~10.0 km深处干热岩总资源量为 2.52×10^{25} J,相当于 860×10^{12} t标准煤^[1],资源储量巨大。但随着埋藏深度的增加,热储层的孔渗参数迅速降低,导致中深层地热资源开采通常需借助于水力压裂等储层改造手段,增强热储层渗透性,为地下流体循环换热提供空间和通道,形成增强型地热系统^[2]。自1973年美国Fenton Hill建设首个增强型地热系统以来,欧洲、澳大利亚、日本、韩国等多个地区相继开展干热岩试采工作,并在法国Soulz地热场地建成可商业运行的增强型地热发电系统^[3]。我国于2010年开始进行干热岩开发理论和室内实验探索^[4],并于2021年首次实现了干热岩试验性发电,为我国的干热岩型地热资源开发利用奠定了坚实基础。

增强型地热系统采热效率受控于人工裂隙内部水热传递过程。实验室研究显示单条裂隙表面粗糙度的增加,可有效增加水岩作用面积,使得流经裂隙的流体温度提高^[5];随着流体流动速度的增加,水岩作用时间降低,导致流体温度降低,此时,裂隙表面粗糙度对流体温度影响相对减弱^[6-7]。在实际场地的地热资源开发过程中,研究者试图通过增加注入井和开采井之间的距离,提高水岩作用面积(或体积);通过控制注入和开采强度,降低井间水流运动速度,增加水岩作用时间,进而达到高效取热的目的。

但在实际高温地热系统,流体密度、黏度与温度密切相关,热量传输方式复杂、控制因素多样。高温地热系统按水热传递机理可分为热传导系统、传导-对流系统、强制对流系统以及自由对流系统4类^[8]。不同类型的水热传导系统中,布井方式不同。例如,在自由对流系统中,浅部开采、深部注水的方式更有利于抑制冷水突破;强制对流系统中,应将注水井布置在开采井的下游方向,防止注入的冷水在背景地下水场驱使下快速进入开采井。考虑天然条件下热储水热传递状态,对于优化开采方案具有重要意义。对于干热岩人工储层而言,人工裂隙产状、发育规模以及渗透能力是控制人工裂隙带内水热传递过程的重要因素,将对后续布井方式产生重要影响。

尽管目前大量研究通过数值模拟分析布井方式、注入流量、注入温度对热储内部水热传递过程及其对水热产出影响^[9-15],但尚未见有考虑不同干热岩体人工裂隙带产状控制下,储层内部水热传递机理和开采方案的对比。针对该问题,本次结合青海共和盆地地现实地地质条件,分析场地尺度裂隙带产状、宽度和渗透率对水热传递过程的影响,进而优化共和盆地干热岩型地热资源开采方案,评价其产能,为我国干热岩型增强型地热系统的构建与运行提供一定参考。

1 理论与方法

在开采条件下,干热岩储层内水流控制方程满足质量守恒:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = Q \quad (1)$$

$$q_i = -K f_\mu \left(\frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} e^i \right) \quad (2)$$

$$f_\mu = \frac{\mu_0}{\mu(T)} \quad (3)$$

式中: S ——储水系数;

t ——时间/d;

h ——水头/m;

Q ——单位体积注采强度/ d^{-1} ;

$i=1,2,3$ ——代表 x, y, z 方向;

q ——水流速度/ $(m \cdot d^{-1})$;

q_i ——达西流速/ $(m \cdot d^{-1})$;

K ——渗透系数/ $(m \cdot d^{-1})$;

ρ ——流体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$;

f_μ ——黏滞性方程, 表示温度空间变化对流体黏度及渗透系数的影响;

e^i ——单位向量(垂直方向为 1, 其余为 0);

μ_0 ——初始黏度/ $(Pa \cdot s)$;

$\mu(T)$ ——温度影响下黏度。

开采条件下热量传递过程满足能量守恒:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) - C_L \cdot q \cdot \nabla T + \rho C_L Q T_Q \quad (4)$$

式中: C ——等效体积热容;

C_L ——水的体积热容/ $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$;

λ ——等效热传导系数/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1})$;

∇ ——对空间的导数运算;

T_Q ——流体温度/K。

基于 FEFLOW 模拟软件, 水流运动方程式 (1) 及

热量迁移方程式 (4) 采用有限元法进行求解。通过计算水流运动方程获得流速分布, 为热量对流过程计算提供基础; 热量方程求解获得温度分布, 通过诱发密度和黏度变化, 改变流体渗透系数, 进而改变渗流场。目前该软件已广泛用于地热能领域开展水热耦合模拟研究, 计算精度高且稳定^[16-18]。

2 水文地质条件概化

共和盆地位于青海省东北部, 青海湖南侧, 东西长 210 km, 南北宽 90 km, 总面积 21 186 km², 见图 1 (a)。盆地地处东昆仑、西秦岭和祁连造山带之间, 四周断裂、褶皱及岩浆岩发育, 内部沉积有第四系和新近系地层, 基底普遍为印支-燕山期花岗岩^[19-21]。2010 年至今, 青海省水文地质工程地质环境地质调查院先后于共和盆地的共和县恰卜恰地区钻井 13 口, 井深均超过 1 000 m; 在 3 705 m 深处, 探明孔底温度高达 236℃, 并获得完整的温度随深度变化曲线, 见图 1 (b), 确定区内平均地温梯度大于 5℃/100 m^[22]。同时, 中国地质调查局在区内进行了详细的地热地质调查与勘探工作, 确定了区内 2 500 m 以深广泛存在干热岩体, 拟建设我国首个基于干热岩型地热资源的增强型地热系统。

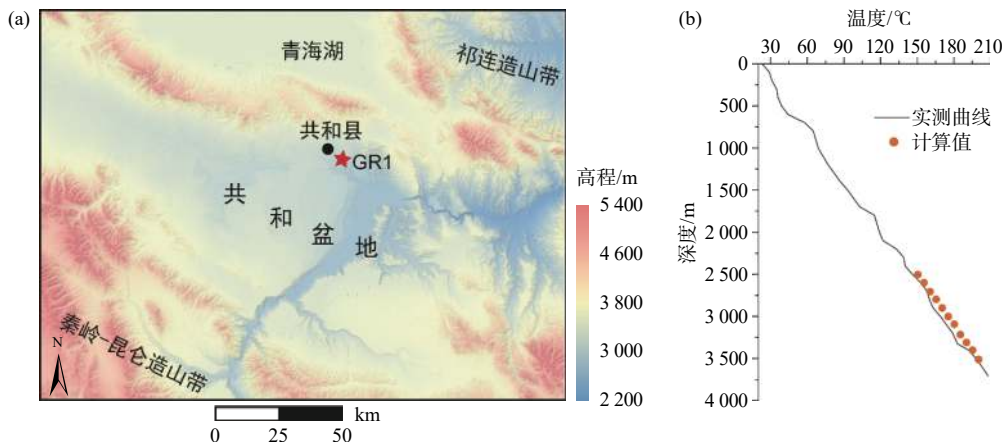


图 1 (a) 共和盆地地形特征及 GR1 干热岩勘探孔位置, (b) GR1 测温曲线及计算温度曲线

Fig. 1 (a) Topographic map of the Gonghe Basin and the location of geothermal well GR1, and (b) downhole temperature logs in well GR1 aligning with the calculated temperatures

3 概念模型

本次研究结合共和盆地实际温度与压力条件, 选取恰卜恰地区地下 2 500 ~ 3 500 m 干热岩储层作为模拟对象。根据 GR1 测温曲线, 设置模型顶面温度 150℃,

底面温度 200℃。考虑法国 Soultz 以及澳大利亚 Habanero 等国际典型干热岩场地人工储层压裂规模均小于 1 km³, 本次模拟区规模设计为 1 000 m × 1 000 m × 1 000 m。

由于共和盆地干热岩尚未完成储层水力压裂以及人工裂隙带结构表征, 本文设置了 3 种不同产状人

工裂隙带,分别为垂直人工裂隙带、水平人工裂隙带以及倾斜人工裂隙带(图 2)。参考典型干热岩压裂场地数据,将裂隙带宽度设计为 50~150 m,中值为 100 m^[23],裂隙带内渗透率取值范围为 0.1~20 D,中值取 5 D,裂隙带外围花岗岩体渗透率极低,设置为 10⁻⁵ D^[23]。此外,根据共和盆地研究区干热岩体岩性特征(花岗岩),确定岩体比热容为 2.85 MJ/(m³·K),热传导系数为 0.65 J/(m·s·K)^[22]。

按照边界及参数条件,模拟天然条件无水状态下,受纯粹热传导作用驱动,模型底部至顶部温度呈线性分布,计算温度垂向分布与 GR1 井实测温度曲线拟合较好,见图 1(b)。将计算后的温度分布作为后续开采条件下初始温度。

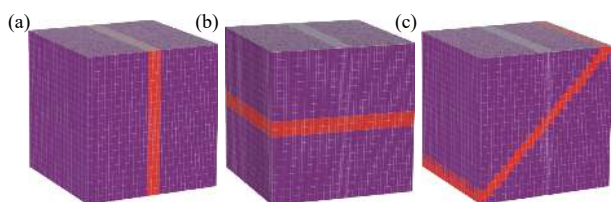


图 2 模拟区范围,包含 (a) 垂直人工裂隙带, (b) 水平裂隙带以及 (c) 倾斜裂隙带

Fig. 2 Model domain with (a) vertical artificial fracture zone, (b) horizontal fracture zone, and (c) tilted fracture zone

模拟采用定流量注入和定流量开采的方式,根据 Soultz 等^[24]干热岩场地增强型地热系统商业运行需求,本次模拟采用的循环流体为水,其比热容为 4.20 MJ/(m³·K),热传导系数为 1.86 J/(m·s·K),密度随温度和压力变化而变化,流量设置为 3 000 m³/d。为了平行对比不同裂隙产状裂隙带内在开采条件下的水热传递规律,所有模型的注采井均设置于模型中心裂

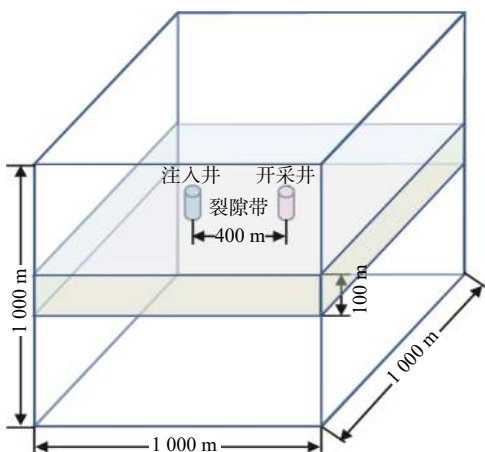


图 3 以水平裂隙带为例,模拟区范围及注采井位分布

Fig. 3 Well locations in a model with horizontal fracture

隙带内,两井间距固定为 400 m(图 3)。注入井位置设置为定温边界,温度恒定为 30℃,代表注入温度。开采井设置为零(传导)热通量边界,代表流体通过储层进入开采井过程中不发生热量损失。模型四周为隔水边界。对模型区域水平方向进行三角网格剖分,垂向分为 20 层,共计剖分为 334 700 单元。经过对剖分网格加密后,所得的水热计算结果基本一致,因此现有网格剖分方式下的模拟结果稳定可靠。

为了进一步验证模型规模对本次模拟结果的影响,分别将模拟区域范围设置为 1 km×1 km×1 km、2 km×2 km×1 km 和 3 km×3 km×1 km。在给定裂隙带渗透率为 5 D、宽度为 100 m、井间距为 400 m、开采强度为 3 000 m³/d 情况下,进行水热传递模拟,得到倾斜、垂直和水平裂隙结构条件下开采井稳定温度。结果显示(图 4),模拟区规模的进一步扩大对裂隙带内温度计算结果的影响可以忽略不计。为此,本次研究选用相对较小的 1 km³ 模型进行后续模拟研究,以提高计算效率。

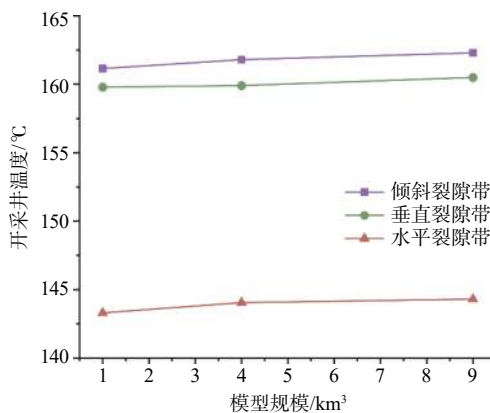


图 4 倾斜、垂直和水平裂隙带中的开采井温度随模型规模的变化曲线

Fig. 4 Stabilized temperature in extraction well in weak relation to the size of model domain

4 结果与讨论

4.1 不同产状裂隙带内部水热传递机理

首先以裂隙带渗透率为 5 D 为例,对比裂隙带宽度对水热传递过程的影响。如图 5 所示,裂隙带产状处于水平方向展布时,热量传输主要受注采井间压力差所引起的强制对流控制。以注入井为中心,低温区域随着注入流体迁移,呈现同心圆型向开采井扩展,进而导致开采井内温度降低,见图 5(a)-(c)。

在垂直裂隙带中,热量传输除了受注采过程引起的强制对流影响,还受到密度流引起的垂向自由对流

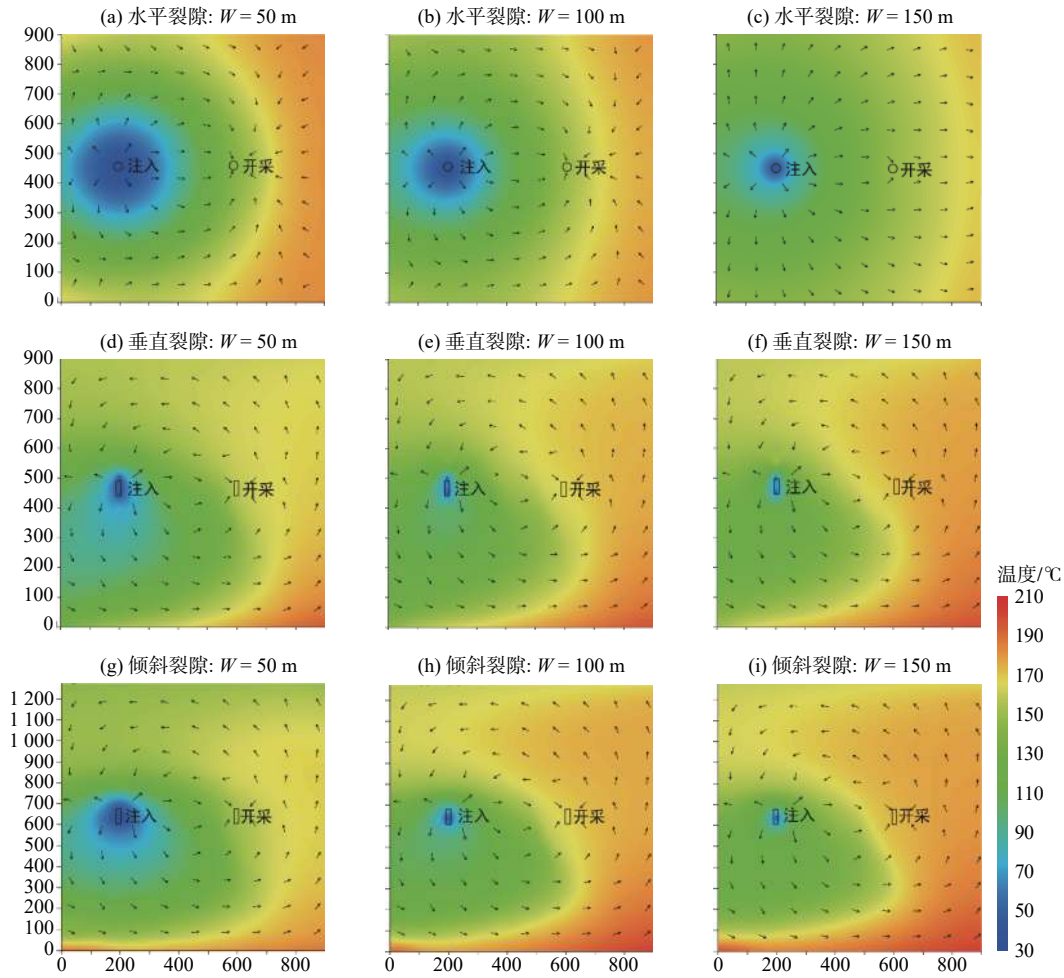


图 5 不同 W (裂隙带宽度) 下, 水平、垂直和倾斜裂隙带中部切面温度分布 (切面位置参考图 2 红色标注裂隙带位置)

Fig. 5 Temperature distribution in the central section of the horizontal fracture zone, vertical fracture zone and tilted fracture zone, with fracture zone width of 50, 100, 150 m, respectively (refer to the location of the fracture zone marked in red in Fig. 2 for the section location)

运动影响。即低温流体密度较高, 易于向储层下部运动, 而高温流体密度较低, 易于向上运动。注入的冷水并非直接进入开采井, 在密度差异趋势下, 向储层底部迁移, 经加热后进入开采井, 见图 5(d)-(f)。因此在渗透率为 5 D 条件下, 垂直裂隙带内注入冷水不易影响开采井, 开采温度降幅小于水平裂隙带, 见图 6(a)(b)。倾斜裂隙带水热传递过程及水热产出过程介于水平与垂直裂隙带之间, 与垂直裂隙带更为相似, 见图 5(g)-(i)。

裂隙带宽度的增加意味着人工储层空间体积及换热面积增大, 容纳和消化注入冷水的能力增强。因此不同产状裂隙带中, 随着裂隙带宽度的增加, 冷水影响范围均出现不同程度的减小, 使得开采井温度增加, 见图 6(b)(c)。

随着渗透性增加 (超过 10 D), 水平裂隙带中随着

裂隙带宽度的增加, 开采井温度出现降低的趋势, 见图 6(a)。这是由于高渗透水平裂隙带内垂向温度差异随着裂隙带宽度 (高度) 增加而增大。注入冷水后, 由于密度较高, 趋于向底部高温区域迁移, 导致储层温度下降速度增快, 使得开采井温度出现下降的趋势。

当固定裂隙带厚度为 100 m 情况下, 在水平裂隙带中, 由于受裂隙带顶板和底板约束, 垂向自由对流受限, 因此, 随着渗透率的增加, 井间强制对流方式增强, 导致了注入冷水的影响范围增大, 温度出现大幅度降低, 见图 7(a)-(c)。与水平裂隙带不同的是, 在垂直裂隙带内, 随着渗透率的增加, 垂向自由对流运动活跃, 冷水向储层底部运动并受热, 表现出较小的冷水影响范围, 见图 7(d)-(f)。而倾斜裂隙带的水热传递过程与垂直裂隙带较为相似, 见图 7(g)-(i)。渗透率越大, 垂直和倾斜裂隙带中开采井的稳定温度越

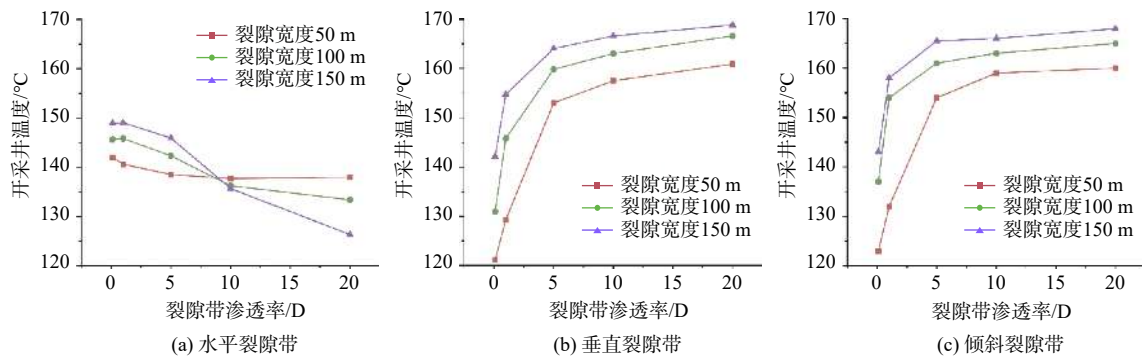


图 6 裂隙带宽度为 50~150 m, 水平裂隙带, 垂直裂隙带和倾斜裂隙带中的开采井温度随裂隙带渗透率变化曲线 (裂隙带位置如图 2 红色部分所示)

Fig. 6 Temperature varying with the fracture permeability in the model with (a) horizontal fracture zone, (b) vertical fracture zone and (c) tilted fracture zone

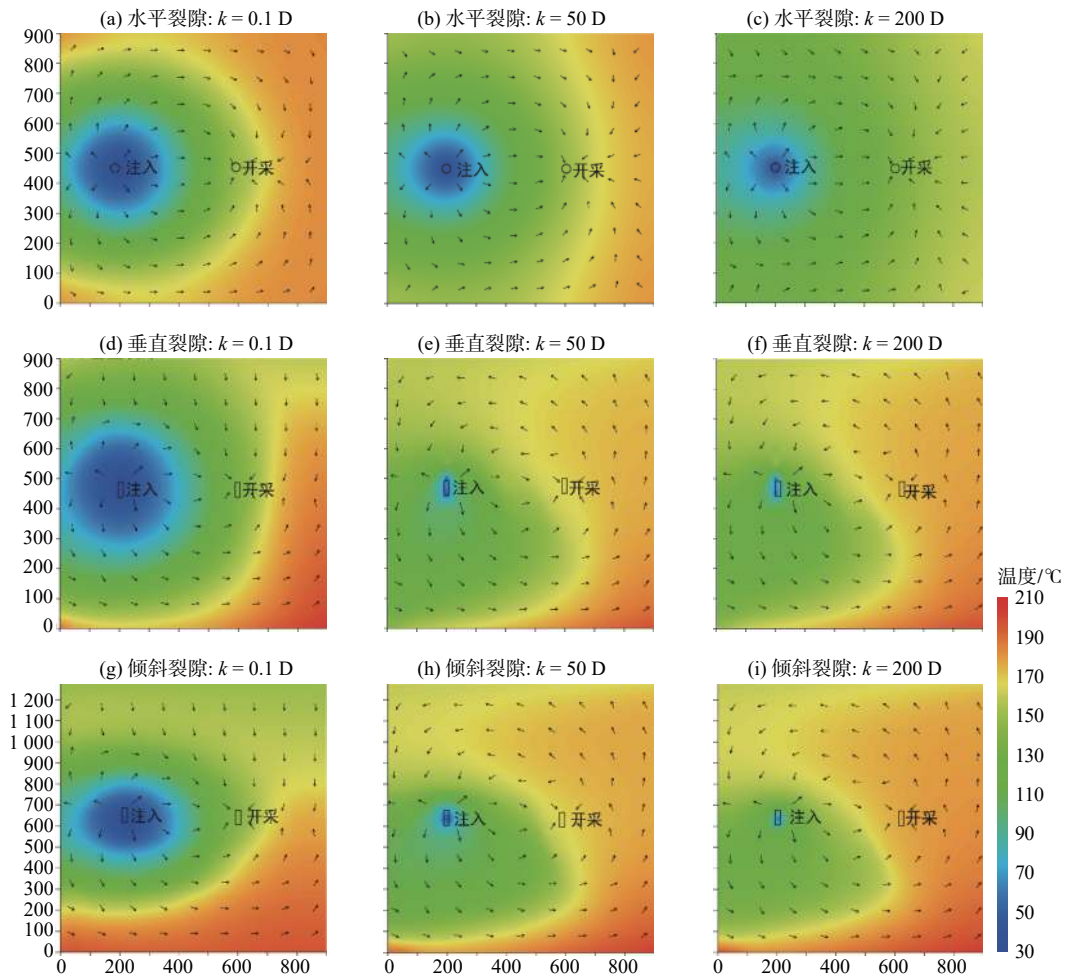


图 7 不同 k (裂隙带渗透率) 条件下, 水平、垂直和倾斜裂隙带中部切面温度分布 (切面位置参考图 2 红色标注裂隙带位置)

Fig. 7 Temperature distribution of the central section of (a-c) horizontal fracture zone, (d-f) vertical fracture zone and (g-i) tilted fracture zone, with fracture permeability of 0.1, 5, 20D, respectively

高, 当渗透率增加至 5 D 后, 开采井温度增长趋势变得较为平缓, 见图 6(b)(c)。

4.2 井间距对于水热传递的影响及井间距的优化

在地热能实际开采过程中, 井间距对于系统稳定

产热具有重要影响。以垂直裂隙带为例, 固定裂隙带渗透率和宽度, 得到不同井间距下温度随时间的变化曲线(图 8)。开采井温度先随时间呈上升趋势, 且上升幅度随着井间距的增加而提高, 之后开始下降, 运

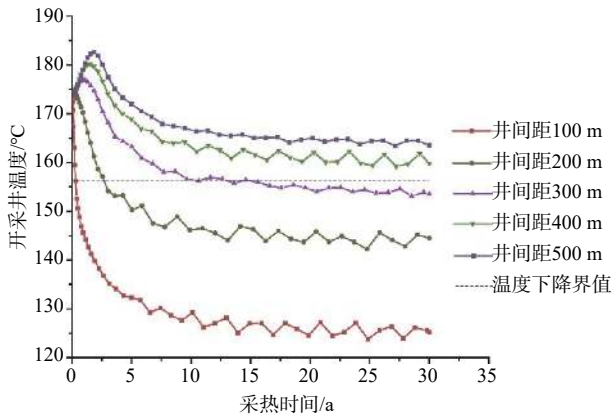


图 8 垂直裂隙带不同井间距条件下, 开采井温度随采热时间变化曲线

Fig. 8 Outflow temperature under the well separation of 100 m to 500 m

行 10 a 后开采井温度趋于稳定, 井间距越大, 开采井稳定温度越高。这是由于流体运动受密度差影响, 通过裂隙带底部流向开采井, 而底部温度大于开采井所在位置的温度, 使得开采井温度出现短暂上升。随着开采的进行, 注入的冷水逐渐到达并影响开采井, 使得出口温度开始缓慢降低。当注采过程达到稳定时,

开采井温度趋于恒定。随着井间距的增加, 注入冷水与热储层之间的换热时间和换热面积均增加, 开采井温度下降幅度减小。

为了维持较高的开采井温度, 需要较大的井间距。为保证开采强度, 井间距越大, 所需的注采压力将越大, 经济成本增加, 不利于商业性开发。综合考虑, 本次将最优井距优化目标设计为: 在最小井间距条件下, 保证开采期 30 a 内开采井温度下降幅度不超过 10%。以图 8 为例, 在宽度为 100 m, 渗透率为 5 D 的垂直裂隙带中, 最优井间距为 400 m。

结合上述优化目标, 通过模拟得到了不同产状、渗透率和宽度的裂隙带的最优井间距。如图 9 所示, 在水平裂隙带中, 渗透率小于 1 D 时, 随着裂隙带宽度由 50 m 增加至 150 m, 最优井间距由 550 m 减低至 450 m。渗透率大于 10 D 时, 最优井间距由 600 m 增加至 850 m。在垂直裂隙带中, 渗透率小于 1 D 时, 裂隙带宽度由 50 m 增加至 150 m, 最优井间距由 650 m 减低至 550 m; 渗透率大于 10 D 时, 最优井间距由 400 m 减低至 300 m。

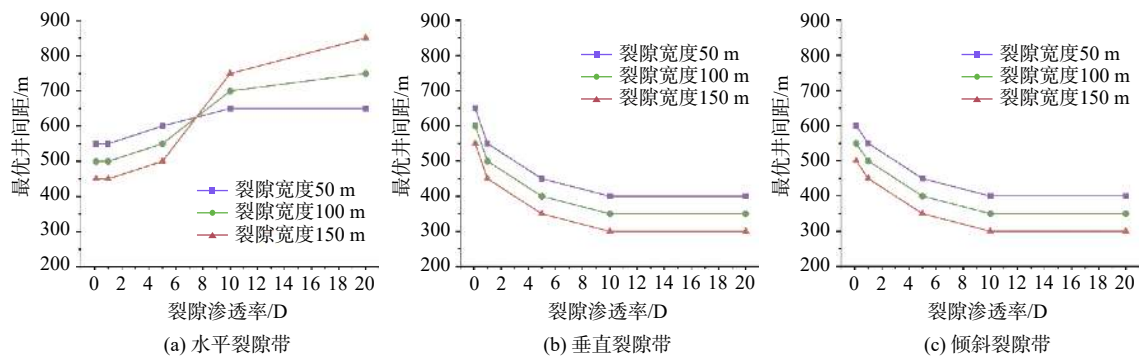


图 9 裂隙带宽度为 50 ~ 150 m, (a) 水平裂隙带, (b) 垂直裂隙带和 (c) 倾斜裂隙带的最优井间距随裂隙带渗透率变化曲线 (裂隙带位置如图 2 红色部分所示)

Fig. 9 Optimized well separation in the model domain with (a) horizontal fracture zone, (b) vertical fracture zone and (c) tilted fracture zone

裂隙带渗透率较小时 (小于 1 D), 同一井间距条件下, 水平裂隙带能够开采出更多的热量, 系统运行寿命也 longer。裂隙带渗透率较大时 (大于 1 D), 垂直和倾斜裂隙带的最优井间距小于水平裂隙带, 在同一布井条件下, 垂直和倾斜裂隙带能够开采出更多的热量, 系统运行寿命 longer。

以垂直裂隙带为例, 平均宽度为 100 m, 平均渗透率为 300 mD, 最优井间距建议为 500 m, 在开采强度为 3 000 m³/d 条件下, 系统初始开采井温度可达到 173°C, 运行 30 a 后开采井温度下降为 161°C, 温度降幅不超

过 10%。

5 结论与建议

(1) 开采条件下, 水平裂隙带中热量传输主要受注采井间压力差所引起的强制对流控制; 垂直和倾斜裂隙带中热量传输除了受强制对流影响, 还受到密度流引起的垂向自由对流运动影响。

(2) 在垂直和倾斜裂隙带以及低渗透性水平裂隙带中, 裂隙宽度的增加使得开采井温度增加, 但在高渗透性 (渗透率大于 10 D) 水平裂隙带中, 开采井温度

随着裂隙宽度的增加而减小。

(3) 最优井间距的确定取决于裂隙带的渗透率、宽度和产状等因素。当裂隙带渗透率小于 1 D, 同一宽度下的水平裂隙带中需要较小的井间距即可保证稳定的开采井温度; 而当裂隙带渗透率超过 1 D 时, 同一宽度下水平裂隙带中需要更大的井间距以维持热稳定。

参考文献 (References) :

- [1] 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算 [J]. *地球学报*, 2012, 33(5): 807 - 811. [LIN Wenjing, LIU Zhiming, MA Feng, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(5): 807 - 811. (in Chinese with English abstract)]
- [2] TESTER J W, ANDERSON B J, BATCHELOR A S, et al. The future of geothermal energy impact of enhanced geothermal systems [EGS] on the United States in the 21st Century [R]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [3] GÉRARD A, GENTER A, KOHL T, et al. The deep EGS (Enhanced Geothermal System) project at Soultz-sous-Forêts (Alsace, France) [J]. *Geothermics*, 2006, 35(5/6): 473 - 483.
- [4] 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展 [J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 42 - 45. [XU Tianfu, ZHANG Yanjun, ZENG Zhaofa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock) [J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 42 - 45. (in Chinese with English abstract)]
- [5] LUO S, ZHAO Z H, PENG H, et al. The role of fracture surface roughness in macroscopic fluid flow and heat transfer in fractured rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 87: 29 - 38.
- [6] HE R H, RONG G, TAN J, et al. Numerical investigation of fracture morphology effect on heat transfer characteristics of water flow through a single fracture [J]. *Geothermics*, 2019, 82: 51 - 62.
- [7] LI Z W, FENG X T, ZHANG Y J, et al. Experimental research on the convection heat transfer characteristics of distilled water in manmade smooth and rough rock fractures [J]. *Energy*, 2017, 133: 206 - 218.
- [8] JIANG Z J, XU T F, WANG Y. Enhancing heat production by managing heat and water flow in confined geothermal aquifers [J]. *Renewable Energy*, 2019, 142: 684 - 694.
- [9] PASHKEVICH R I, TASKIN V V. Numerical simulation of exploitation of supercritical enhanced geothermal system [R]. California: Proceedings of Thirty-fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2009.
- [10] 陈继良, 蒋方明. 增强型地热系统热开采性能的数值模拟分析 [J]. *可再生能源*, 2013, 31(12): 111 - 117. [CHEN Jiliang, JIANG Fangming. A numerical study on heat extraction performance of enhanced geothermal systems [J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(12): 111 - 117. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 雷宏武, 金光荣, 李佳琦, 等. 松辽盆地增强型地热系统(EGS)地热能开发热-水动力耦合过程 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(5): 1633 - 1646. [LEI Hongwu, JIN Guangrong, LI Jiaqi, et al. Coupled thermal-hydrodynamic processes for geothermal energy exploitation in enhanced geothermal system at Songliao basin, China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(5): 1633 - 1646. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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. [LING Lulu, SU Zheng, WU Nengyou. Effect of reservoir permeability on temperature field in EGS mining process [J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(1): 82 - 90. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 凌璐璐, 苏正, 翟海珍, 等. 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 [J]. *新能源进展*, 2015, 3(5): 367 - 374. [LING Lulu, SU Zheng, ZHAI Haizhen, et al. Numerical simulation study of the parameters effect on temperature distribution and mining life during EGS exploitation, Yangyi of Tibet [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2015, 3(5): 367 - 374. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 杨艳林, 靖晶, 王福刚, 等. CO₂ 增强地热系统中的井网间距优化研究 [J]. *太阳能学报*, 2014, 35(7): 1130 - 1137. [YANG Yanlin, JING Jing, WANG Fugang, et al. Optimal design of well spacing on CO₂ enhanced geothermal [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2014, 35(7): 1130 - 1137. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 岳高凡, 邓晓飞, 邢林啸, 等. 共和盆地增强型地热系统开采过程数值模拟 [J]. *科技导报*, 2015, 33(19): 62 - 67. [YUE Gaofan, DENG Xiaofei, XING Linxiao, et al. Numerical simulation of hot dry rock exploitation using enhanced geothermal systems in Gonghe Basin [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(19): 62 - 67.

- (in Chinese with English abstract)]
- [16] LO RUSSO S, CIVITA M V. Open-loop groundwater heat pumps development for large buildings: a case study[J]. *Geothermics*, 2009, 38(3): 335 – 345.
- [17] SCHILLING O, SHELDON H A, REID L B, et al. Hydrothermal models of the Perth metropolitan area, Western Australia: implications for geothermal energy[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(3): 605 – 621.
- [18] 党书生, 马致远, 郑磊. 咸阳地区地热采灌井最佳井距分析[J]. *地下水*, 2016, 38(1): 56 – 58. [DANG Shusheng, MA Zhiyuan, ZHENG Lei. An optimization of the distance between geothermal fluid[J]. *Ground Water*, 2016, 38(1): 56 – 58. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 孙知新, 李百祥, 王志林. 青海共和盆地存在干热岩可能性探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(2): 119 – 124. [SUN Zhixin, LI Baixiang, WANG Zhilin. Exploration of the possibility of hot dry rock occurring in the Qinghai Gonghe Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(2): 119 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 严维德, 王焰新, 高学忠, 等. 共和盆地地热能分布特征与聚集机制分析[J]. *西北地质*, 2013, 46(4): 223 – 230. [YAN Weide, WANG Yanxin, GAO Xuezhong, et al. Distribution and aggregation mechanism of geothermal energy in Gonghe basin[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(4): 223 – 230. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 赵振, 陈惠娟, 马建青, 等. 青海省共和盆地恰卜恰地区地热资源评价与开发利用[J]. *青海环境*, 2009, 19(2): 81 – 84. [ZHAO Zhen, CHEN Huijuan, MA Jianqing, et al. On terrestrial heat resource assessment and its exploitation and utilization in qiabuqia area, Gonghe basin, Qinghai[J]. *Journal of Qinghai Environment*, 2009, 19(2): 81 – 84. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 等. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. *中国地质*, 2018, 45(6): 1087 – 1102. [ZHANG Senqi, YAN Weide, LI Dunpeng, et al. Characteristics of geothermal geology of the qiabuqia HDR in Gonghe basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 2018, 45(6): 1087 – 1102. (in Chinese with English abstract)]
- [23] SANYAL S K, BUTLER S J. An analysis of power generation prospects from enhanced geothermal systems[C]//Proceedings World Geothermal Congress 2005, 2005.
- [24] GENTER A, EVANS K, CUENOT N, et al. Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS)[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 342(7/8): 502 – 516.

编辑: 张若琳