

# 地热储层单裂隙岩体渗流传热数值模拟研究

肖鹏<sup>1,2</sup>, 窦斌<sup>1,2</sup>, 田红<sup>1,2</sup>, 郑君<sup>1,2</sup>, 崔国栋<sup>1,2</sup>,  
夏杰勤<sup>1,2</sup>, Muhammad Kashif<sup>3</sup>

(1.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉430074;

2.地球深部钻探与深地资源开发国际联合研究中心,湖北武汉430074;

3.萨戈达大学地球科学系,巴基斯坦萨戈达40100)

**摘要:**研究地热储层裂隙岩体中的渗流传热过程对干热岩地热资源的开采具有重要的意义。本文以干热岩地热工程为背景,采用COMSOL Multiphysics数值模拟软件对地热储层单裂隙岩体中渗流传热机理进行了研究,并分析了流体注入速度和温度对岩体温度场的影响及其对干热岩地热工程的影响。研究发现流体参数对岩体温度场的影响主要体现在2个方面:一方面是对岩体温度场受扰动区域以及幅度的影响,另一方面是对岩体温度场达到稳态所需要时间的影响。流体注入速度的提升会降低系统的寿命和寿命期的出口法向总热量值,当考虑出口法向总热通量时,存在最佳流体注入速度,本研究中最佳流体注入速度为0.011 m/s。流体注入温度的提升会增加系统的寿命和系统的出口法向总热通量和总热量。研究为干热岩自热资源的开发与利用提供了理论依据,为工程运行参数的设计提供了参考依据。

**关键词:**地热储层;单裂隙;渗流传热;流体参数;数值模拟;干热岩开发

**中图分类号:**TK529;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)02-0016-13

## Numerical simulation of seepage and heat transfer in single fractured rock mass of geothermal reservoirs

XIAO Peng<sup>1,2</sup>, DOU Bin<sup>1,2</sup>, TIAN Hong<sup>1,2</sup>, ZHENG Jun<sup>1,2</sup>, CUI Guodong<sup>1,2</sup>, XIA Jieqin<sup>1,2</sup>, Muhammad Kashif<sup>3</sup>

(1.Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2.National Center for International Research on Deep Earth Drilling and Resource Development,  
Wuhan Hubei 430074, China;

3.Department of Earth Sciences, University of Sargodha, Sargodha 40100, Pakistan)

**Abstract:** Study of the percolation and heat transfer in fractured rock mass of geothermal reservoirs is of great significance to the exploitation of geothermal resources in hot dry rocks. In this paper, based on a hot rock dry geothermal project, the numerical simulation software of COMSOL Multiphysics is used to study the mechanism of seepage and heat transfer in single fractured rock mass of geothermal reservoirs, with analysis made of the influence of fluid injection velocity and temperature on the temperature field of rock mass and on the geothermal project of hot dry rocks. It is found that the influence of fluid parameters on the rock mass temperature field is mainly reflected in two aspects: influence on the disturbed region and amplitude of the rock mass temperature field, and influence on the time needed for the rock mass temperature field to reach the steady state. Increase of the fluid injection rate will reduce the system service life and the total outlet normal heat value during the service life. When considering the total outlet

收稿日期:2020-06-29;修回日期:2020-10-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.02.003

**基金项目:**国家自然科学基金项目“共和盆地储层干热岩人工裂隙与流体传热机理及热能效应研究”(编号:41674180);国家重点研发计划“未固结砂岩热储层保护与增效钻井技术及材料”(编号:2019YFB1504201)、“热储内多场耦合流动传热机理与取热性能优化”(编号:2019YFB1504203)、“砂岩储层水-热-化动态监测与模拟方法”(编号:2019YFB1504204)

**作者简介:**肖鹏,男,汉族,1994年生,博士研究生在读,地质工程专业,主要研究方向为干热岩勘查与开发,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,xiaopeng805@163.com。

**引用格式:**肖鹏,窦斌,田红,等.地热储层单裂隙岩体渗流传热数值模拟研究[J].钻探工程,2021,48(2):16-28.

XIAO Peng, DOU Bin, TIAN Hong, et al. Numerical simulation of seepage and heat transfer in single fractured rock mass of geothermal reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2021,48(2):16-28.

normal heat flux, there exists an optimal fluid injection rate, which is 0.011m/s in this study. Increase of fluid injection temperatures will increase the service life of the system and the total normal heat flux and total heat at the system outlet. This study provides a theoretical basis for the development and utilization of hot dry rock self-heating resources and a reference basis for the design of engineering operation parameters.

**Key words:** geothermal reservoir; single fracture; seepage and heat transfer; fluid parameters; numerical simulation; hot dry rock development

## 0 引言

常规的一次性不可再生能源如天然气、煤炭、石油等可开采储量越来越小且其开采难度越来越大,另外常规能源在使用过程中带来越来越多的环境问题<sup>[1]</sup>。干热岩地热资源由于其洁净无污染、储量大、空间分布广泛、开采过程安全且受环境影响小等优点,成为世界上各国重点关注的新能源,受到了国内外学者的广泛关注<sup>[2-3]</sup>。

干热岩型地热能资源的提取通常是使用换热效率较好的取热工质在人工储层的裂隙中与高温地热岩体发生对流换热来进行提取<sup>[4]</sup>。因此要实现较高的换热效率和储层地热资源开采率需要采用各种工程技术形成贯通的、体积破碎的储层以增大取热工质和储层裂隙岩体之间的换热面积<sup>[5]</sup>。储层裂隙是干热岩地热资源开采过程中主要的流体渗流通道,流体在流经裂隙时会发生明显的特征变化,这种特征变化会影响裂隙岩体中的渗流传热过程<sup>[6]</sup>。在地热储层裂隙岩体中的渗流传热过程是典型的热流耦合问题<sup>[7]</sup>,研究地热储层裂隙岩体内的渗流传热过程对地热开采工程具有十分重要的意义<sup>[8]</sup>。

由于流体性质的易变形和流体运动的复杂性,使得与流体相关的研究都比较难以开展,因此目前针对流体参数对渗流传热过程影响机理的相关报道还比较少见,相关的研究目前还仍然处于探索性的研究阶段。在实际工程中,地热储层是整个地热工程系统的一部分,其中注入流体压力、温度、流速、水化学以及出口流体压力等流体参数都是可以直接被调控的参数,因而具有很大的研究意义<sup>[9]</sup>。

地热储层的热开采过程与储层特征、工程系统运行参数以及各个物理场之间的耦合作用等诸多因素有关。由于实际地热储层的储层结构、采热机理、渗流场特征等与实验室尺度上的渗流传热地热储层模型之间存在着很大的差距<sup>[10]</sup>;同时地热储层裂隙岩体中的渗流—传热过程极其复杂,实验室模

拟条件通常情况下很难达到与工程实际相一致的实验模拟环境。因此研究结果往往与实际情况有很大的差距;现场原位试验虽然能够比较准确地反映工程实际情况,但是往往需要耗费很大的人力物力。因此在科学研究中往往需要借助于数值模拟研究来代替这方面的不足<sup>[11]</sup>。在科学研究中,如果能够建立与工程实际相似的数值模型,并采取适当的数值模拟软件,研究成果往往能够很好地指导工程实践。

Ma、Zhang、Huang等<sup>[12-14]</sup>采用物理模拟和数值模拟相结合的方法,通过3D打印技术制作了不同的粗糙表面,研究了粗糙裂隙中水流传热特性以及沿流动方向局部传热系数的分布规律。Jiang等<sup>[15]</sup>对水平裂隙中超临界CO<sub>2</sub>层流对流换热进行了试验研究,揭示了流量和初始岩体温度对流体温度和岩壁的影响,得到了断口局部传热性能。Kohl等<sup>[16]</sup>针对干热岩地热储层系统的长期运行过程,建立了二维单一裂隙数值模型,进行了数值模拟研究,模拟了干热岩储层中的温度场—渗流场—应力场的耦合机理,指出三场耦合过程在干热岩地热系统运行过程中的重要性。Rutqvist等<sup>[17]</sup>结合TOUGH 2和FLAC 3D两种数值模拟软件的理论与方法,进行了裂隙和多孔岩石中的多相流体流动、传热和变形(THM)三场耦合分析研究。孙健<sup>[18]</sup>在甘肃北山热—水—力三场耦合模型室内试验研究的基础上,采用了与模型试验相应的初始边界条件,研究了在数值模拟过程中裂隙岩体三场耦合效应的体现,分析研究了裂隙岩体应力场对温度场和渗流场的影响机理。Asai等<sup>[19]</sup>在恒定注水温度以及注水总量的前提下,设计了7种不同的流体注入方案(不同的注水方式,注水时间梯度等),研究了不同的流体注入方案对于EGS储层热开采率的影响,通过研究发现指数型流量注水方式是增加产量的最优选择。Jiang等<sup>[20]</sup>建立了EGS地下换热过程的三维瞬态模型,介绍了2种热传输方程以描述裂隙中的对流换热以及岩石基质中的热传导,并选用了设定的EGS

工程为例证明了模型的有效性以及合理性。Kolditz等<sup>[21]</sup>以结晶岩裂隙为研究对象,建立了干热岩储层开采过程中的换热过程数值模拟模型,通过对比2.5维和3维模型的热开采过程,分析了不同维度对于干热岩开采过程的影响。Zeng等<sup>[22]</sup>研究了西藏羊八井花岗岩干热岩地热储层中的热开采过程。基于深度在950~1350 m储层的地质数据资料建立了地热储层模型,研究发现羊八井地热双井系统下可以维持3.23~3.48 MW的地热发电20年。Zeng等<sup>[22-26]</sup>在后期进一步对比分析了水平井和垂直井的采热效率,他们发现水平井的采热效率要优于垂直井,并且水平井有利于降低注入泵压。

鉴于以上分析,本研究主要以干热岩地热工程为背景,开展“地热储层单裂隙岩体渗流传热机理数值模拟研究”,采用COMSOL Multiphysics数值模拟软件探究了地热储层裂隙岩体中的渗流传热过程,并分析了不同流体参数(注入流体温度、流体速度)对单裂隙岩体渗流传热过程的影响机理及其在地热工程中的作用,为地热资源的开发与利用提供了理论依据。

## 2 模型建立

### 2.1 地热储层单裂隙岩体渗流传热模型

干热岩地热工程中的储层岩体大多是多相不连续介质,储层岩体中充满了各种各样的结构面,为了简化研究,对建立的模型做出以下假设:

(1)忽略取热工质在储层岩体本身中的渗透,即取热工质仅在储层裂隙内运移,把储层岩体按照非连续介质来处理。

(2)假设储层岩体中仅存在单一裂隙,并且该

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由于在模型假设中质量力只考虑了重力,所以 $F_x = 0$ ;且在基本假设中取热工质的流动形式为层流,重力同粘性力相比较可以忽略,即 $F_y = 0$ ;同时

单裂隙可以看成平行板状裂缝,单裂隙的宽度为常数,裂隙面无限延伸且表面光滑,裂隙宽度远远小于裂隙长度。

(3)裂隙内取热工质为稳定的无内热源二维定常层流、常物性、不可压缩牛顿性流体,并忽略取热工质粘性耗散过程中产生的耗散热。

(4)取热工质所承受的质量力只有重力,且只沿 $x$ 方向流动,其温度随时间的推移发生变化。

建立描述取热工质地热储层在单裂隙岩体内流动的平行板裂隙模型(见图1),灰色区域为岩体区域,绿色区域为裂隙区域,其中 $L$ 表示裂隙长度, $d$ 表示裂隙宽度,并且 $L$ 远大于 $d$ , $T_w$ 为取热工质温度, $T_m$ 为储层岩体温度,岩体的初始温度 $T_{m0}$ 大于流体的初始温度 $T_{w0}$ 。此模型可以表征整个平行裂隙模型的渗流场和温度场的分布。

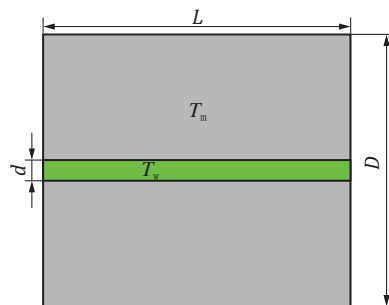


图1 单裂隙平行板裂隙模型

Fig.1 Parallel plate fracture model for a single fracture

### 2.2 基本耦合方程

在模型及其基本假设的基础上,可以得到简化后在渗流场影响下的温度场数值模型:

由于取热工质只沿着 $x$ 方向流动,即 $u_y = 0$ ,于是式(1)可简化为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u_x}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

## 2.3 边界条件以及基本参数

平行板裂隙渗流的特点及基本假定如下<sup>[27]</sup>:

(1) 渗流边界。裂隙上、下两个边界为不透水边界,裂隙的左右相对边界分别选取为取热介质的流入、流出边界。

(2) 温度边界。整个系统的初始温度取 373 K (100 °C),单裂隙岩体上下界面温度取  $T_m = 373$  K (100 °C),岩体两侧边界取绝热边界。

(3) 计算参数。研究区域选定为 0.2 cm × 45 cm × 40 cm,即岩层厚度为 40 cm,裂隙长度  $L = 45$  cm,裂隙开度  $d = 2$  mm,其他计算参数的选取如表 1 所示,其中岩石主要以花岗岩为研究对象。

表 1 单裂隙岩体渗流传热数值模拟研究参数

Table 1 Parameters for numerical simulation of seepage heat transfer in single fractured rock mass

| 参 数                                                                 | 数 值   |
|---------------------------------------------------------------------|-------|
| 岩石密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$                     | 2700  |
| 岩石热导率 $\lambda_s / [\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$ | 1.2   |
| 岩石比热容 $C_s / [\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$      | 870   |
| 水的密度 $\rho_l / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$                     | 998.2 |
| 水的热导率 $\lambda_l / [\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$ | 0.6   |
| 水的比热容 $C_l / [\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$      | 4200  |
| 水的动力粘度 $\mu / \text{mPa} \cdot \text{s}$                            | 0.1   |

(4) 网格划分。COMSOL Multiphysics 数值模拟软件具有自动划分网格的功能,在这里将网格设置里面的序列类型设置为物理场控制网格,单元大小设置为常规进行网格自动构建划分,设置如图 2 所示,划分的网格如图 3 所示。

## 3 结果与分析

### 3.1 模型验证

为了验证模型的正确性,将裂隙开度  $d$  改为 2



图 2 单裂隙网格划分设置情况

Fig.2 Mesh division setting for a single fracture

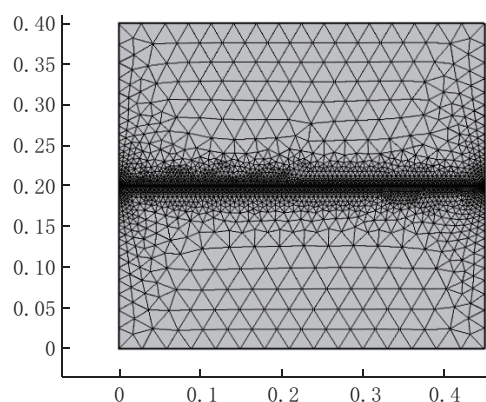


图 3 单裂隙网格划分结果(单位:m)

Fig.3 Mesh division of a single fracture

cm,流体注入速度设置为 0.0008 m/s 进行模拟,对本文建立的模型进行验证,得到的裂隙中心的温度分布如图 4 所示。

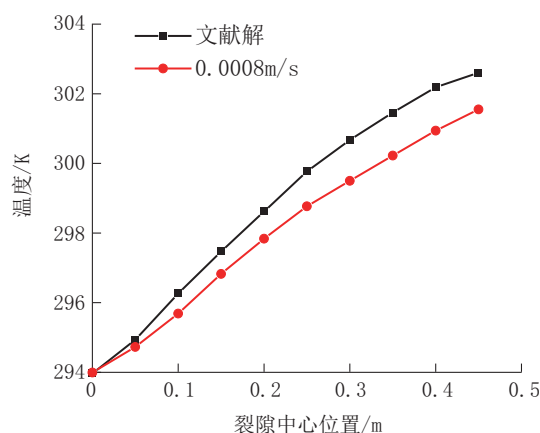


图 4 本研究与文献裂隙中心温度分布对比

Fig.4 Temperature distribution comparison between the present study and the literature

从图4可以看出本研究建立的模型和文献[27]中的数据基本一致,产生差异的原因可能是因为本研究中采用了与文献不同的数值模拟软件,因此保证了模型的合理性与正确性。

### 3.2 单裂隙岩体渗流传热温度场分析

采用以上研究参数并设置流体注入温度为 293

K(20℃),流体注入速度为 0.005 m/s 进行瞬态研究,可以得出当系统运行到 400 min 左右时,单裂隙岩体温度场基本上开始趋于稳定状态。分别取  $t=0$ 、30、90、150、240、360、480、600 min 时单裂隙岩体的温度场云图如图5所示。

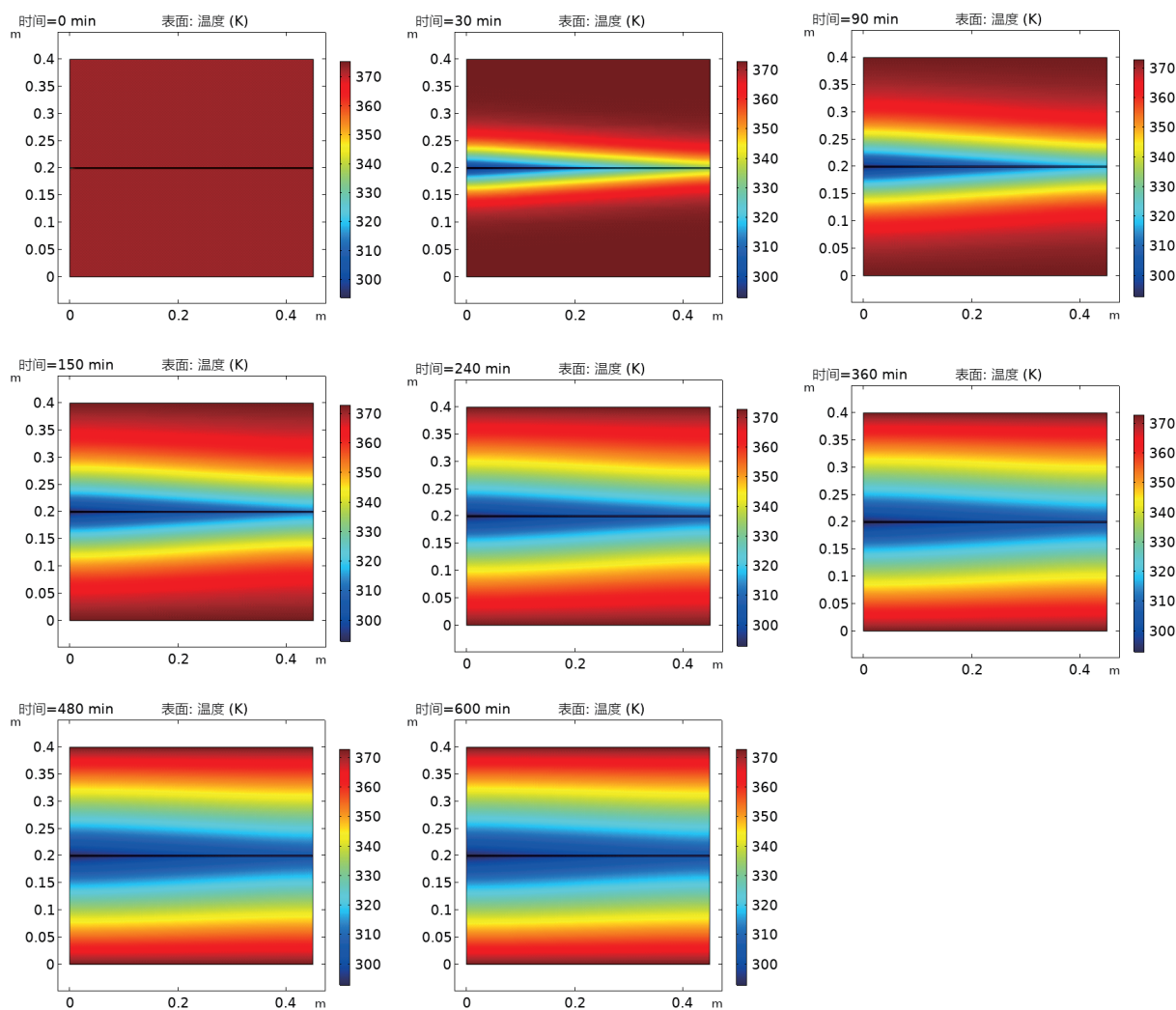


图5 单裂隙岩体温度场云图 ( $T=293\text{ K}$ ,  $v=0.005\text{ m/s}$ )

Fig.5 Temperature field nephogram evolution of single fractured rock mass ( $T=293\text{ K}$ ,  $v=0.005\text{ m/s}$ )

由图5中可以看出:在初始阶段,当流体进入单裂隙岩体后,由于与裂隙面之间存在温差,两者之间发生剧烈的对流换热作用,但流体在到达出口前就已经和岩体的温度达到动态平衡状态,因此岩体的温度场仅受到局部扰动。随着流体逐渐带走岩体中的热量,岩体温度场的扰动区域逐渐向出口方向和岩体的上下面扩展。同时可以发现岩体温度场在演化过程中沿着裂隙中心线总是保持对称。

稳定后的单裂隙岩体温度场和温度等值线分别如图6、7所示。可以看出沿着流体流动的方向,稳定后的岩体温度场等值线越来越稀疏,这是因为随着流体的流动,流体受岩体的加热同时岩体中的热量被流体带走,这就使得岩体和流体两者之间的温差减小,降低了岩体与流体之间的换热效率,从而使得靠近裂隙出口部位的岩体温度等值线分布比较稀疏。

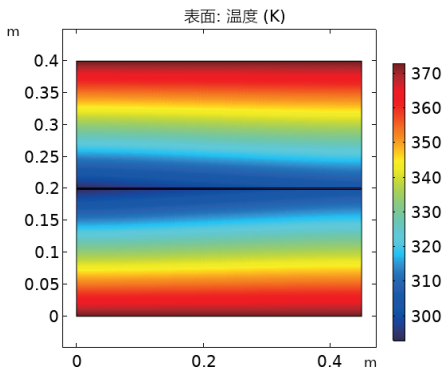


图 6 稳态单裂隙岩体温度场云图  
Fig.6 Steady-state single fractured rock mass temperature field nephogram

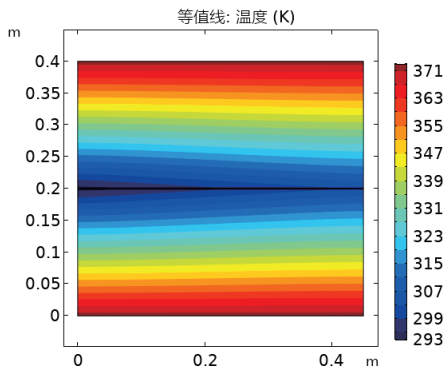


图 7 稳态单裂隙岩体温度等值线  
Fig.7 Steady-state single fractured rock mass temperature isoline

图 8 描述了流体出口边界上的法向总热通量随时间的变化情况,从图中可以看出,流体出口法向总热通量随着时间的发展首先迅速下降之后逐渐趋于稳定状态。这是因为当流体进入裂隙后迅速地吸收岩体中的热量并从出口带出,出口法向总热通量的值较大,之后随着岩体温度的降低,流体和岩体之间的对流换热作用减弱,出口法向总热通量随着时间的变化逐渐下降,并在 400 min 之后开始趋于稳定状态,此时岩体的温度场也处于稳定状态。这一规律也很好地验证了岩体温度场的演化规律及其机理。

### 3.3 流体注入速度对单裂隙岩体渗流传热过程的影响分析

流体注入速度在干热岩地热资源开采的过程中是极其重要的系统运行参数,在地热工程中一般称为流体回灌速度,为了探究流体注入速度对单裂

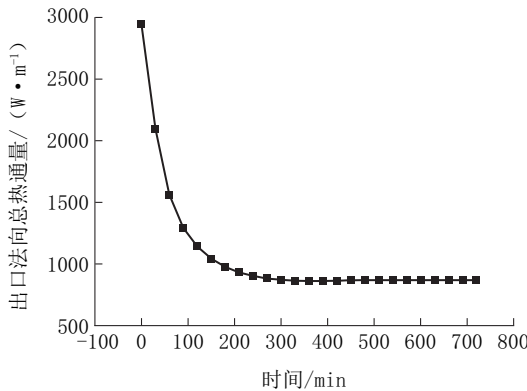


图 8 流体出口法向总热通量随时间的变化情况  
Fig.8 Normal total heat flux at the fluid outlet vs time

隙岩体渗流传热的影响,设置流体注入温度为 293 K,研究了不同流体注入速度(0.0001~0.001 m/s)下的单裂隙岩体渗流传热过程。

#### 3.3.1 流体注入速度对岩体温度场的影响

流体注入速度对岩体温度场有着重要的影响:一方面是对岩体温度场达到稳态时温度场分布特征的影响,另一方面是对岩体温度场达到稳态时所需要时间的影响。

图 9 为岩体在不同流体注入速度下稳态时的温度场云图,从图中可知随着流体注入速度的增大,岩体温度场中受扰动的区域面积越大,单裂隙岩体的平均温度越小(图 10),单裂隙岩体的平均温度 0.001 m/s 时要比 0.0001 m/s 时降低约 6.15%。这是因为流体注入速度的增大使得在单位时间内更多的低温流体进入岩体,从而使得单位时间内岩体中更多的热量被流体带走,这样也就扩大了岩体温度场的扰动范围和幅度,降低了岩体整体的平均温度。

不同的流体注入速度下,岩体温度场达到稳态时所需要的时间也不一致。图 11 为不同流体注入速度下岩体出口流体平均温度随时间的变化情况。可以看出流体速度越大,流体出口平均温度达到稳态时(即系统达到稳态)所需要的时间也就越短。

#### 3.3.2 流体注入速度与干热岩地热工程

在干热岩地热资源开发利用的过程中,出口温度(决定工程寿命)、出口法向总热通量以及出口总热量(决定工程效益)是 3 个极其重要的参数,流体注入速度与这几个参数具有密切的关系:当流体注入速度较大时出口温度下降的就会越快,地热工程的系统寿命(系统寿命定义为系统出口流体温度大

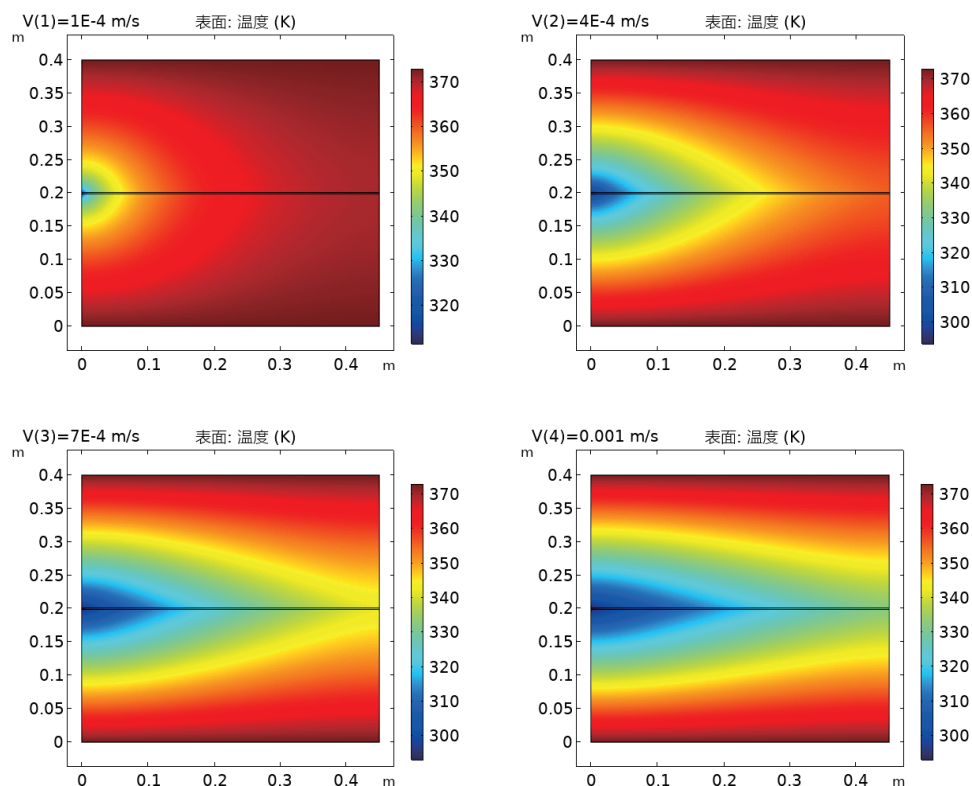


图9 单裂隙岩体在不同流体注入速度下的稳态温度场云图

Fig.9 Steady-state temperature field nephogram of single fractured rock mass at different fluid injection velocities

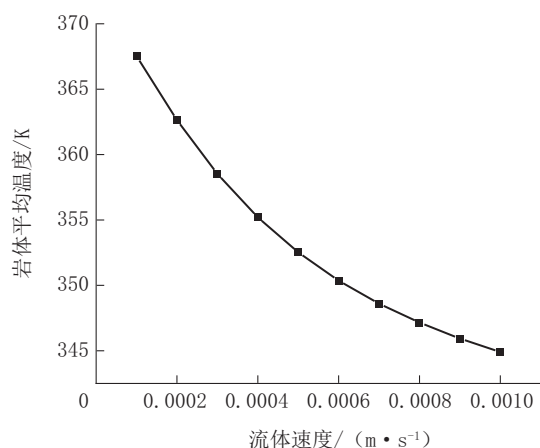


图10 单裂隙岩体平均温度随流体注入速度的变化情况

Fig.10 Average temperature of single fractured rock mass vs fluid injection velocity

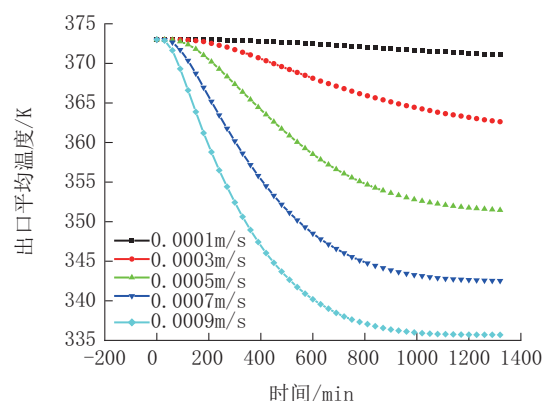


图11 不同流体注入速度下出口流体平均温度随时间的变化情况

Fig.11 Average outlet fluid temperature vs time at different fluid injection velocities

于生产要求温度的维持时间)也就越短。同时当流体注入速度较小时,流体可以被岩体充分加热,流体中含有的总热量便会增加,但是单位时间内流体从出口带出的热量会由于流体体积的减小而下降;如果流体的流速较大,虽然单位时间内流出的流体的体积会增加,但是流体由于没有被充分加热其中

携带的热量就会相对较小。因此在地热工程中在保证出口温度的情况下,也要追求出口法向总热流量和出口总热量的最佳值。因此存在最佳流体注入速度。在本研究针对最佳流体流速的选择展开了研究,确定生产温度为 303 K(30℃),分别对不同流体速度下(0.005~0.015 m/s)的系统寿命以及效

益进行研究。

图12为不同流体注入速度下出口流体平均温度随时间的变化情况,从图中可以看出流体注入速度越大出口流体平均温度下降越迅速,越容易趋于稳定状态,且在稳定时其温度值越低。同时可以看出随着流体注入速度的增大,系统的寿命就会越短(图13),0.015 m/s的系统寿命相比0.007 m/s的降低约81.82%。其中流体注入速度为0.005 m/s时的出口温度始终大于生产温度,后续不再讨论。

图14为不同流体注入速度下流体出口法向总热通量随时间的变化情况,从图中可以看出不同流体注入速度下的出口法向总热通量随着时间的推

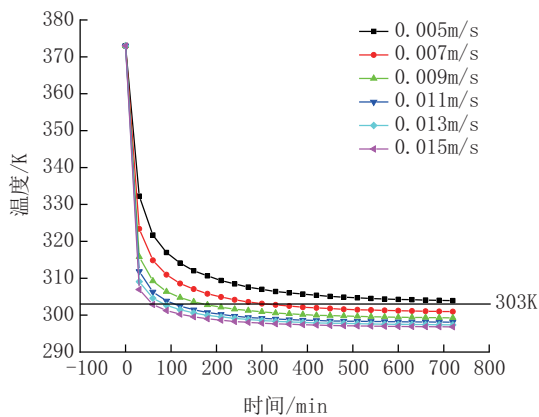


图12 不同流体注入速度下出口平均温度随时间的变化情况

Fig.12 Average outlet temperature vs time at different fluid injection velocities

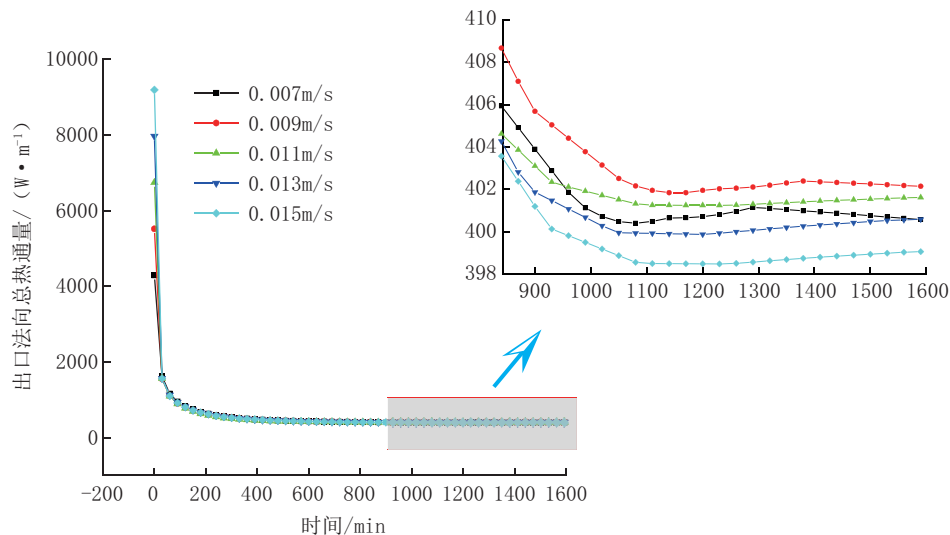


图14 不同流体注入速度下出口法向总热通量随时间的变化情况

Fig.14 Total normal heat flux at the outlet vs time at different fluid injection velocities

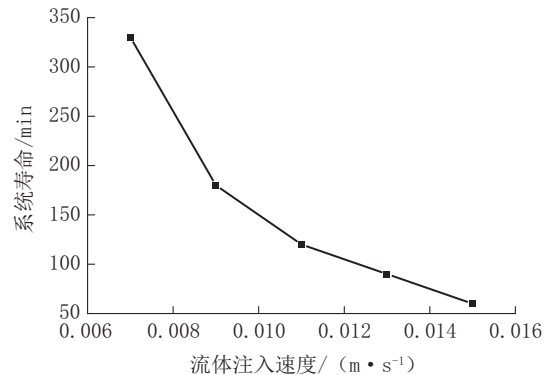


图13 流体注入速度与单裂隙岩体系统寿命的关系

Fig.13 Fluid injection velocity vs service life of the single fractured rock mass system

移都呈现出先迅速下降然后逐渐趋于稳定的规律。不同的是,在起始阶段出口法向总热通量随着流体注入速度的增大而迅速增大,其中起始阶段0.015 m/s时的出口法向总热通量要比0.007 m/s时的出口法向总热通量增加约114.27%,但是在稳定阶段存在最佳流体注入速度使得出口法向总热通量最大。图15为稳定期出口法向总热通量随流体注入速度的变化情况,此时0.009 m/s为最佳流体注入速度。

为了更进一步评价流体参数对系统运行和效益的影响,研究了系统在不同流体注入速度下寿命期间的出口法向总热量,如图16所示。出口法向总热量的计算公式如下:

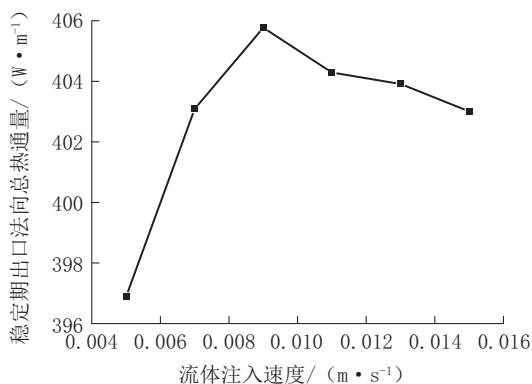


图15 系统稳定时出口法向总热通量随流体注入速度的变化情况

Fig.15 Total outlet normal heat flux vs fluid injection rate when the system is stable

$$Q = (T_w - T) \cdot \rho \cdot C \cdot v \cdot d \quad (3)$$

式中:  $Q$ ——出口法向总开采热量;  $T_w$ ——出口温度;  $T$ ——流体注入温度;  $\rho$ ——流体密度;  $C$ ——流体比热容;  $v$ ——流体速度;  $d$ ——裂隙开度。

从图16可以看出在寿命期内随着流体速度的增大出口法向总热量降低,其中0.015 m/s时的出口法向总热量要比0.007 m/s时降低约56.37%。

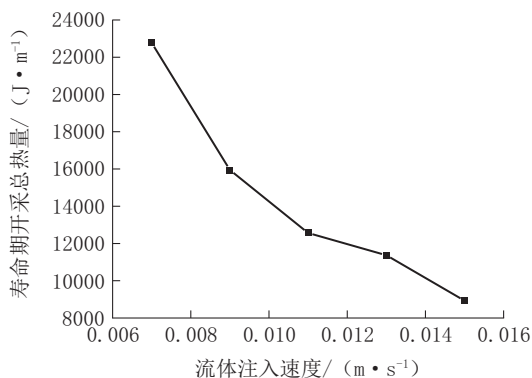


图16 在系统寿命期内出口法向总热量随流体注入速度的变化情况

Fig.16 Total outlet normal heat vs fluid injection velocity during the system service life

从以上分析可以看出,在地热工程开发过程中设计流体注入速度时,应该综合考虑能源的需求和设备的性能等。

### 3.4 流体注入温度对单裂隙岩体渗流传热的影响

流体注入温度在干热岩地热资源开采的过程中也是一个极其重要的参数,在地热工程中流体注

入温度称为回灌流体温度。为了探究流体注入温度对单裂隙岩体渗流传热的影响,在本研究中流体注入速度为0.005 m/s,流体注入温度的研究范围为273~323 K(0~50 °C),并以10 K为步长进行研究,研究流体注入温度对单裂隙岩体渗流传热的影响。

#### 3.4.1 流体注入温度对岩体温度场的影响

各流体注入温度下单裂隙岩体稳态温度场的分布情况如图17所示。从图中可以看出各流体注入温度下单裂隙岩体温度场的总体特征基本一致,但是随着流体注入温度的升高,稳态岩体温度场受扰动的区域面积逐渐减少,稳态岩体平均温度呈现出上升的趋势(如图18所示),其中流体注入温度为323 K(50 °C)时的稳态岩体平均温度要比273 K(0 °C)时增加约7.1%。同时从图17可以看出随着注入温度的升高,稳态岩体温度场的温度等值线越稀疏。图19为不同流体注入温度下岩体平均温度随时间的变化情况,可以看出,不同流体注入温度下,岩体温度场达到稳态所需要的时间也不一致,流体注入温度越低岩体达到稳定状态时所需要的时间就会越长。

产生以上现象的原因可以概括为:流体注入温度越高,则流体和岩体之间的温差就会越小,热量转移动力的降低使得岩体温度场扰动的区域和幅度均有所降低,同时降低了两者的换热效率,从而形成了比较稀疏的岩体温度等值线。

#### 3.4.2 流体注入温度与地热工程

为了探究流体注入温度在干热岩地热工程中的重要作用,研究了流体注入温度对系统出口平均温度、出口总热通量以及出口总热量的影响,选择273~323 K(0~50 °C)为流体注入温度的研究范围,以10 K为步长,333 K(60 °C)为生产温度,研究了不同流体注入温度对相关参数的影响机理。

不同流体注入温度下系统出口平均温度随时间的变化情况如图20所示。可以看出流体注入温度越高,则出口温度达到稳态时所需要的时间也就越短,这也验证了之前关于流体注入温度对岩体温度场达到稳态所需要时间的相关论述。同时可以发现,随着流体注入温度的升高,系统的寿命越长(见图21),其中流体注入温度为323 K(50 °C)的出口平均温度始终大于生产温度,因此后续不再讨论流体注入温度为323 K(50 °C)的相关情况。流体注入温度为313 K(40 °C)时的系统寿命相比于273 K

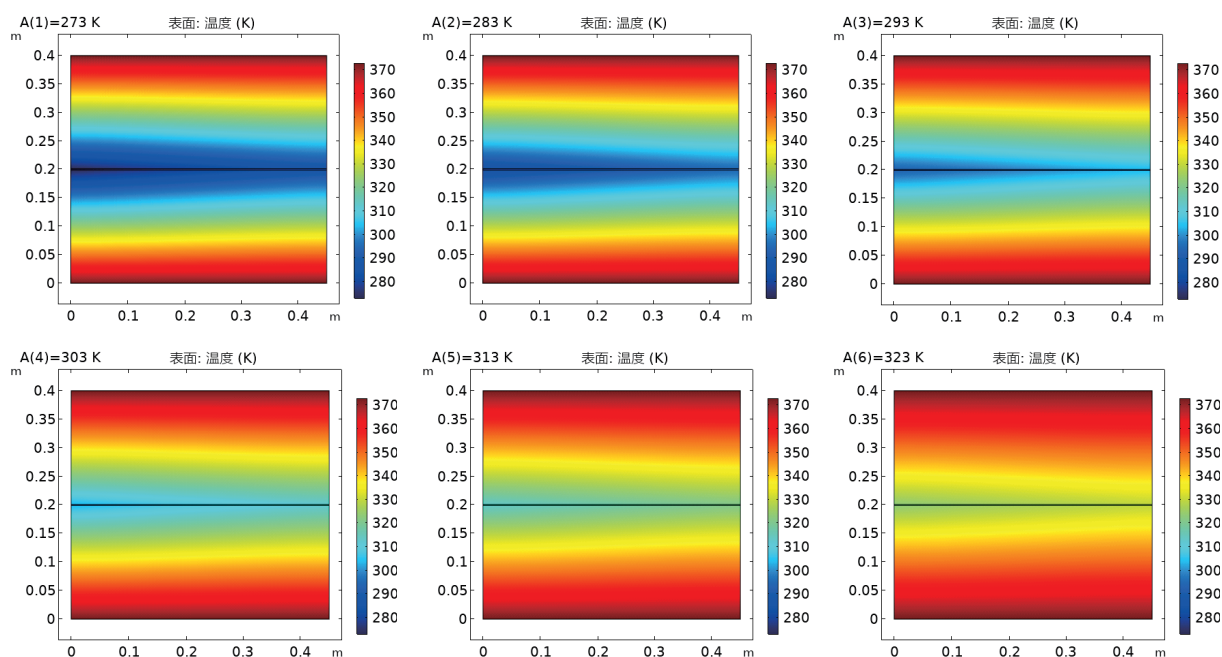


图17 各注入温度值下的单裂隙岩体稳态温度场云图

Fig.17 Steady-state temperature field nephogram of single fractured rock mass at each injection temperature

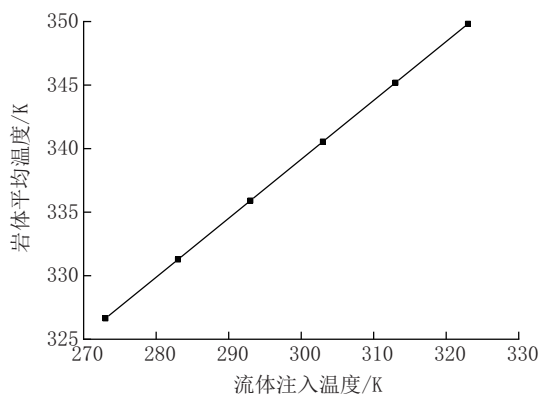


图18 稳态岩体平均温度随流体注入温度的变化情况

Fig.18 Average temperature of steady state rock mass vs fluid injection temperature

(0℃)时增加了约280%。

不同流体注入温度下出口法向总热通量随着时间的变化情况如图22所示。可以看出,不同流体注入温度下的出口法向总热通量随着时间的变化情况都具有相同的规律,即随着时间的推移,出口法向总热通量都先随时间的推移逐渐下降之后在某一位置逐渐趋于稳定状态,稳定时说明整个系统的温度场也处于动态平衡。同时稳定后的出口法向总热通量和注入流体温度之间基本上呈现出线性关系,流体注入温度为313 K(40℃)时的出口总热通量比273 K(0℃)时提升了262.74%,如图23所示。

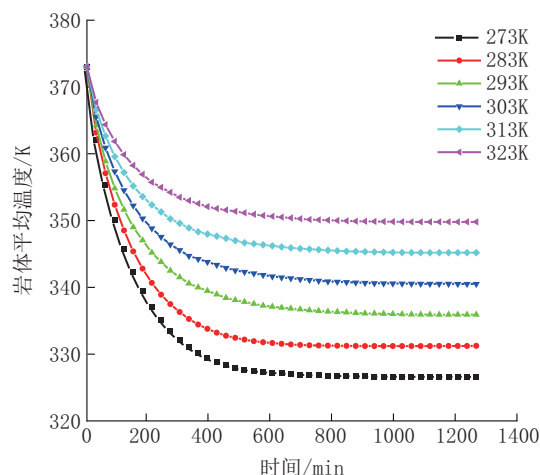


图19 不同流体注入温度下岩体平均温度随时间的变化情况

Fig.19 Rock mass average temperature vs time at different fluid injection temperatures

为了更进一步的评价系统的性能,研究了不同流体注入温度下,系统在寿命期开采出的总热量,得到不同流体注入温度下,系统在寿命期内的出口法向总热量如图24所示。从图中可以看出在寿命期内,出口法向总热量随着流体注入温度的升高而不断的增加,流体注入温度为313 K(30℃)时的出口法向总热量比273 K(0℃)时提升了约289.80%。因此在干热岩地热资源开发的过程中要综合考虑工程

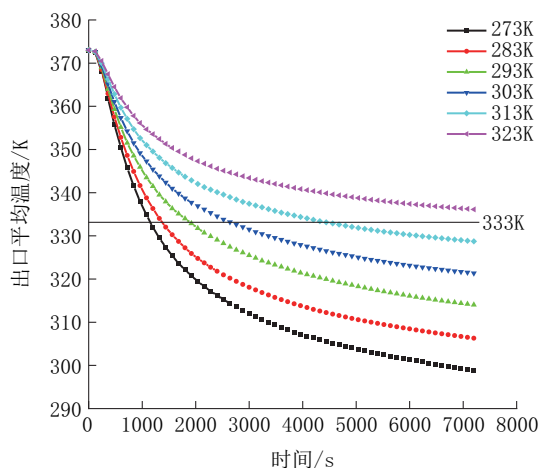


图20 不同流体注入温度下系统出口平均温度随时间的变化情况

Fig.20 Average outlet temperature vs time at different fluid injection temperatures

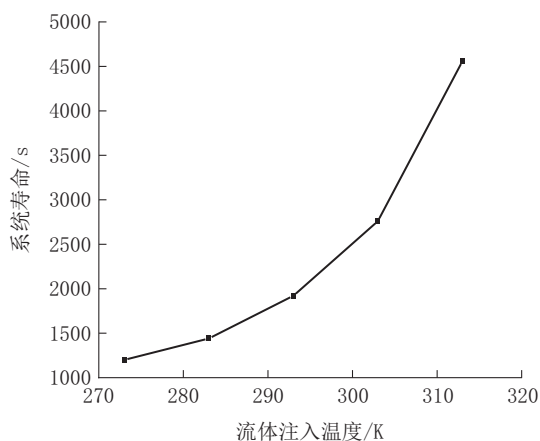


图21 流体注入温度与系统寿命之间的关系

Fig.21 Fluid injection temperature vs system life

能源的需求以及经济效益等来设计回灌流体温度。

#### 4 结论

通过对地热储层单裂隙岩体的渗流传热过程的数值模拟研究,可以得到以下几点结论:

(1)单裂隙岩体温度场分布演化特征。单裂隙岩体系统运行过程中受扰动的温度场向流体流动的方向和裂隙两侧逐渐发展,运行到400 min左右时开始趋于稳定,稳态时越靠近出口方向,岩体的等温线就会越稀疏,流体和岩体之间的热交换作用越弱。

(2)流体参数对渗流传热的影响。一方面流体注入速度的增加和注入温度的降低会增加岩体受

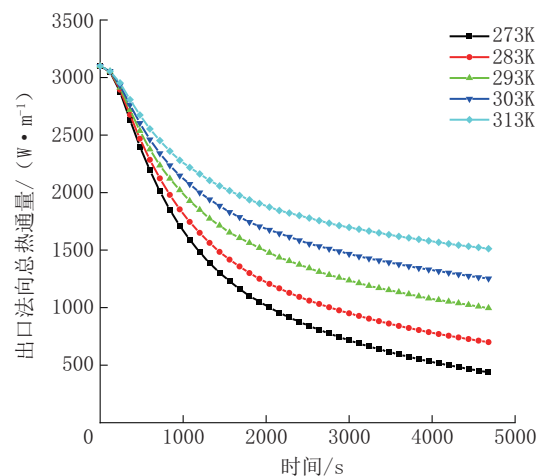


图22 不同流体注入温度下出口法向总热通量随时间的变化情况

Fig.22 Total normal heat flux at the outlet vs time at different fluid injection temperatures

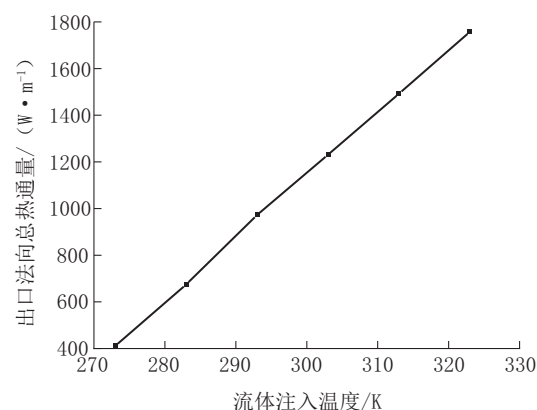


图23 出口法向总热通量稳定值随流体注入温度的变化情况

Fig.23 Steady value of the total outlet normal heat flux vs fluid injection temperature

扰动的幅度,这是因为这些变化增加了岩体和流体的换热效率。流体注入速度为0.001 m/s时岩体的平均温度要比0.0001 m/s降低约6.15%,流体注入温度为323 K(50℃)时岩体的平均温度要比273 K(0℃)时增加约7.1%;另一方面流体速度的增大和流体温度的升高会降低岩体温度场达到稳态时所需要的时间。

(3)流体参数对地热工程的影响。为了评价流体参数对地热工程的相关影响,定义了生产温度,出口法向总热量以及在系统寿命期的出口法向总热量,分别用于评价地热系统的寿命、效率以及效益。通过分析发现,流体注入速度的提升会降低系

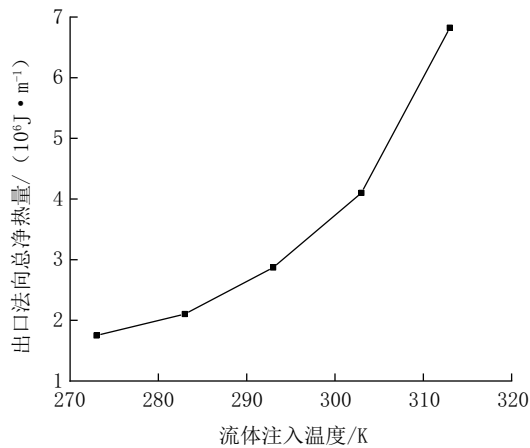


图24 在寿命期内的出口总热量随流体注入温度的变化情况

Fig.24 Total outlet heat vs fluid injection temperature during the system service life

统的寿命,流体注入速度为0.015 m/s的系统寿命相比0.007 m/s时降低约81.82%,并且降低了系统在寿命期的出口法向总热量值,其中流体注入速度为0.015 m/s时的出口法向总热量要比0.007 m/s时降低约56.37%,但是0.011 m/s时的出口法向总热通量值却是最高。流体注入温度的提升会增加系统的寿命,流体注入温度为313 K(40℃)时的系统寿命相比于273 K(0℃)时增加了约280%,同时也增加了系统的出口法向总热通量和总热量,流体注入温度为313 K(40℃)时的出口法向总热通量和总热量分别比273 K(0℃)时提升了262.74%、289.80%。

本研究可以为干热岩地热资源的开发利用工程提供理论指导,为工程运行参数的设计提供了参考依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学,2017,38(4):448-459.  
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017,38(4):448-459.
- [2] 郑敏.全球地热资源分布与开发利用[J].国土资源,2007(2):56-57.  
ZHENG Min. The distribution, development and utilization of global geothermal resources[J]. Land & Resources, 2007(2):56-57.
- [3] 贺凯.二氧化碳开发干热岩技术展望[J].现代化工,2018,38

- (6):56-58,60.  
HE Kai. Prospects for developing hot dry rock by carbon dioxide[J]. Modern Chemical Industry, 2018,38(6):56-58,60.
- [4] 张驰.干热岩单裂隙渗流-传热实验与数值模拟研究[D].长春:吉林大学,2017.  
ZHANG Chi. Experiment and numerical study of seepage heat transfer in a single fracture of hot dry rock[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [5] 翟海珍,苏正,凌璐璐,等.平行多裂隙模型中换热单元体对EGS采热的影响[J].地球物理学进展,2016,31(3):1399-1405.  
ZHAI Haizhen, SU Zheng, LING Lulu, et al. Impact of heat transfer unit on EGS heat extraction in the multi-parallel fracture model[J]. Progress in Geophysics, 2016,31(3):1399-1405.
- [6] 张万鹏.用近接型相似微小地震对判明干热岩热储层主要裂隙方位的研究[D].焦作:河南理工大学,2012.  
ZHANG Wanpeng. The azimuth determination research of the main fractures in hot dry rock reservoir by proximity similar microseismic doublets[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.
- [7] Zhang L., Jiang P., Wang Z., et al. Convective heat transfer of supercritical CO<sub>2</sub> in a rock fracture for enhanced geothermal systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,115:923-936.
- [8] 孙致学,徐轶,吕抒恒,等.增强型地热系统热流固耦合模型及数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(6):109-117.  
SUN Zhixue, XU Yi, LÜ Shuhuan, et al. A thermo-hydro-mechanical coupling model for numerical simulation of enhanced geothermal systems[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(6):109-117.
- [9] Brown D., DuTeaux R., Kruger P., et al. Fluid circulation and heat extraction from engineered geothermal reservoirs[J]. Geothermics, 1999,28(4):553-572.
- [10] 李正伟,张延军,张驰,等.花岗岩单裂隙渗流传热特性试验[J].岩土力学,2018,39(9):3261-3269.  
LI Zhengwei, ZHANG Yanjun, ZHANG Chi, et al. Experiment on convection heat transfer characteristics in a single granite fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39(9):3261-3269.
- [11] 白兰兰,陈建生,王新建,等.裂隙岩体热流模型研究[J].人民黄河,2007,29(5):61-63.  
BAI Lanlan, CHEN Jiansheng, WANG Xinjian, et al. Study on cracked rock thermal current model[J]. Yellow River, 2007,29(5):61-63.
- [12] Ma Y., Zhang Y., Yu Z., et al. Heat transfer by water flowing through rough fractures and distribution of local heat transfer coefficient along the flow direction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018,19:139-147.
- [13] Ma Y., Zhang Y., Huang Y., et al. Experimental study on flow and heat transfer characteristics of water flowing through a

- rock fracture induced by hydraulic fracturing for an enhanced geothermal system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 154:433-441.
- [14] Huang Y., Zhang Y., Yu Z., et al. Experimental investigation of seepage and heat transfer in rough fractures for enhanced geothermal systems[J]. *Renewable Energy*, 2019, 135:846-855.
- [15] Jiang P., Zhang L., Xu R. Experimental study of convective heat transfer of carbon dioxide at supercritical pressures in a horizontal rock fracture and its application to enhanced geothermal systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 117:39-49.
- [16] Kohl T., Evansi K.F., Hopkirk R.J., et al. Coupled hydraulic, thermal and mechanical considerations for the simulation of hot dry rock reservoirs[J]. *Geothermics*, 1995, 24(3):345-359.
- [17] Rutqvist J., Wu Y.S., Tsang C.F., et al. A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(4):429-442.
- [18] 孙健. 裂隙岩体热-水-力三场耦合米级尺度模型试验及数值模拟研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
- SUN Jian. Meter-scale experimental and numerical study of the thermal-hydrological-mechanical coupling fractured rocks [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [19] Asai P., Panja P., McLennan J., et al. Effect of different flow schemes on heat recovery from Enhanced Geothermal Systems (EGS)[J]. *Energy*, 2019, 175:667-676.
- [20] Jiang F., Luo L., Chen J. A novel three-dimensional transient model for subsurface heat exchange in enhanced geothermal systems [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, 41:57-62.
- [21] Kolditz O. Modelling flow and heat transfer in fractured rocks: dimensional effect of matrix heat diffusion [J]. *Geothermics*, 1995, 24(3):421-437.
- [22] 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.
- [23] Zeng Y., Zhan J., Wu N., et al. Numerical investigation of electricity generation potential from fractured granite reservoir by water circulating through three horizontal wells at Yangbajing geothermal field[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 104:1-15.
- [24] 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.
- [25] Zeng Y.-C., Zhan J.-M., Wu N.-Y., et al. Numerical investigation of electricity generation potential from fractured granite reservoir through a single vertical well at Yangbajing geothermal field[J]. *Energy*, 2016, 114:24-39.
- [26] Zeng Y.-C., Zhan J.-m., Wu, N.-Y., et al. Numerical simulation of electricity generation potential from fractured granite reservoir through vertical wells at Yangbajing geothermal field[J]. *Energy*, 2016, 103:290-304.
- [27] 郑鑫, 郭春, 徐建峰, 等. 单裂隙岩体的热流固耦合数值模拟与分析[J]. *现代隧道技术*, 2018, 55(S2):1263-1268.
- ZHENG Xin, GUO Chun, XU Jianfeng, et al. Numerical simulation and analysis of coupled heat-fluid-solid in single fractured rock mass[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(S2):1263-1268.

(编辑 荐华)