

引用格式:陈劭颖,王伟,杨清纯,等.干热岩储层多簇缝网压裂热流固顺序耦合模型研究[J].油气藏评价与开发,2022,12(6):869-876.
CHEN Shaoying, WANG Wei, YANG Qingchun, et al. Sequential coupling thermal-hydro-mechanical model for multiple cluster of fracturing network fracturing in dry hot rock reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(6): 869-876.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.06.005

干热岩储层多簇缝网压裂热流固顺序耦合模型研究

陈劭颖,王伟,杨清纯,张立松

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,山东 青岛 266580)

摘要:针对干热岩储层压裂的热流固耦合模型计算复杂且难以实现大规模多簇缝网压裂模拟的问题,提出了一种干热岩压裂顺序耦合模拟方法,建立了单簇裂缝和多簇缝网的裂缝扩展热流固顺序耦合模型,实现了大规模干热岩多簇缝网压裂的热流固顺序耦合模拟。利用多簇缝网热流固顺序耦合模型讨论了地层温度、干热岩脆性指数、应力场、排量等关键参数对多簇缝网扩展的影响。模拟结果表明:较高的温差、较大的岩石脆性指数以及较大的注入排量能促进缝网的扩展,而较大的应力差不利于缝网的扩展。

关键词:水力压裂;干热岩储层;热流固耦合;多簇缝网;数值模拟

中图分类号:TE319

文献标识码:A

Sequential coupling thermal-hydro-mechanical model for multiple cluster of fracturing network fracturing in dry hot rock reservoir

CHEN Shaoying, WANG Wei, YANG Qingchun, ZHANG Lisong

(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: In order to solve the problem that thermal-hydro-mechanical coupling model of hot-dry-rock (HDR) reservoir fracturing is complex and it is difficult to achieve large-scale multiple cluster of fracturing network simulation, a sequential coupling simulation method of HDR fracturing is proposed. By establishing a fracture expansion thermodynamic solid sequential coupling model of single cluster fracture and multi-cluster fracture network, the thermal-hydro-mechanical sequential coupling simulation of large-scale HDR fracture network is realized. The influence of brittleness index, stress field displacement and other key parameters on the propagation of fracture network are analyzed in this model. The results showed that high temperature difference, large brittleness index and large injection pumpage could promote the propagation of fracture network, but large stress difference is not conducive to the propagation of fracture network.

Keywords: hydraulic fracturing; hot-dry-rock (HDR) reservoir; thermal-fluid-solid coupling; multiple cluster of fracturing network; numerical simulation

干热岩地热资源主要是指埋藏深度为3~10 km,地层温度处于150~650 °C的深层岩石中所储存的热量,是地热资源的重要组成部分^[1-2]。开发干热岩需

要建立增强型地热系统(EGS),其核心是向储层钻井并压裂形成一定规模的复杂裂缝网络^[3]。地热储层的水力压裂本质为热流固耦合问题,不同于常规水

收稿日期:2022-07-01。

第一作者简介:陈劭颖(1996—),女,在读硕士研究生,从事岩石力学相关工作。地址:山东省青岛市黄岛区中国石油大学(华东),邮政编码:266555。E-mail:1277709783@qq.com

通信作者简介:张立松(1982—),男,博士,副教授,从事岩石力学相关工作。地址:山东省青岛市黄岛区中国石油大学(华东),邮政编码:266555。E-mail:lisongzhang1982@163.com

基金项目:山东省自然科学基金“基于YADE种群平衡法的原始储层条件下煤岩破碎一块体滑落—井眼坍塌演化机理研究”(ZR2021ME024);中央高校基本科研业务费专项基金“基于种群平衡法的破碎性煤层钻井眼坍塌微观演化机理”(19CX02034A)。

力压裂的流固耦合问题,这使得开展干热岩水力压裂热流固耦合分析具有重要的工程意义^[4-5]。

目前,国内外学者对干热岩水力压裂热流固耦合模型开展了大量研究。胡剑等^[6]构建了针对增强型地热系统单裂隙热流耦合的数学模型,模型研究了热流耦合时水岩温度场的演化,分析了热流耦合下的热传导过程;TOMAC等^[7-8]利用PFC软件建立了增强型地热系统水力压裂热流固耦合模型,并分析了温度对裂缝起裂和扩展的影响;赵阳升等^[9]将固体变形、水渗流、温度场方程分别作为单独的系统进行耦合迭代求解,提出了高温岩体地热开发的块裂介质热流固耦合数学模型;赵延林等^[10]提出考虑裂隙岩体温度-渗流-应力耦合的双重介质模型,对不同介质分别建立以温度、水压力和节点位移为求解量的三维有限元格式;郑鑫^[11]等基于导热微分方程,建立了单裂隙岩体稳态温度场的数学模型,计算了流体及岩石温度场的分布,并对单裂隙岩体的流固耦合传热进行了数值模拟;张伟等^[12]利用COMSOL软件建立了干热岩压裂热流固耦合模型,分析了低温压裂液注入过程中温差引起的热应力及其对裂缝萌生的影响;张奇^[13]将页岩气储层压裂改造问题视为应力场、渗流场及温度场的全耦合作用过程,建立了页岩层介质的热一流一固全耦合模型,并提出了Matlab与COMSOL基于增量迭代法的有限元联合求解方法;部分国内外学者从初始裂隙分布、岩体地应力状态、压裂工程参数等方面开展了干热岩储层裂缝扩展规律分析^[14-15];ROUSSEL等^[16]讨论了岩石参数、裂缝维度和水平主应力差对储层压裂应力场的影响;李宁^[17]通过室内实验与数值模拟相结合的方法,研究了低温冲击和温度场变化对干热岩压裂裂缝扩展规律的影响;王伟等^[18]基于扩展有限元法建立了裂缝扩展流固耦合模型,对裂隙分布、地应力状态、压裂工程等参数对碳酸盐岩地热储层岩体裂缝扩展行为进行了分析。

已有研究在干热岩压裂热流固耦合模型及缝网扩展规律方面取得了一定成果,但仍存在不足,部分耦合模型预测精度不高,而直接耦合模型求解复杂计算效率低。现有直接耦合模型主要针对单条裂缝进行分析,难以进行大规模多簇缝网压裂的模拟,因此,现阶段耦合模型主要集中在流固、热固部分耦合

模型和热流固直接耦合模型。针对上述不足,考虑干热岩压裂温度场、渗流场、应力场耦合,提出一种计算效率高、收敛性好的干热岩压裂顺序耦合方法,并建立干热岩压裂单簇裂缝及多簇缝网热流固顺序耦合模型。

1 干热岩压裂热流固耦合方程

1.1 热传递方程

结合傅里叶定律和能量守恒原理,在干热岩压裂过程中的热传递方程可表示为^[19]:

岩石基质

$$\lambda_m \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \left[(1 - \phi_m) \rho_m c_m + \phi_m \rho_l c_l \right] \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

岩石裂缝

$$\lambda_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho_l c_l \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式(1)一式(2)中: λ_m 为岩石基质的导热系数, $W/(m \cdot K)$; x 、 y 分别为求偏导数; T 为温度, K ; ϕ_m 为基质单元的孔隙度; ρ_m 为干热岩密度, kg/m^3 ; c_m 为干热岩基质比热容, $kJ/(kg \cdot K)$; ρ_l 为流体密度, kg/m^3 ; c_l 为流体比热容, $kJ/(kg \cdot K)$; t 为时间, s ; λ_f 为裂缝单元的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

1.2 流体流动

压裂液在水力裂缝中的流动包括切向流和法向流两个部分,压裂液切向流动方程为^[20]:

$$q = -\frac{w^3}{12\mu} \nabla p_h \quad (3)$$

式中: q 为cohesive单元内单位厚度截面流量, m^3/s ; p_h 为裂缝内流体压力, Pa ; w 为裂缝宽度, m ; μ 为缝内流体黏度, $Pa \cdot s$ 。

压裂液在水力裂缝中的法向流动会发生滤失现象,压裂液在裂缝面的法向渗流为:

$$\begin{cases} q_u = c_u (p_i - p_u) \\ q_d = c_d (p_i - p_d) \end{cases} \quad (4)$$

式中: q_u 、 q_d 分别为压裂液在裂缝上、下表面的渗流流量, m^3/s ; c_u 、 c_d 分别为压裂液在裂缝上、下表面的滤失系数; p_u 、 p_d 分别为压裂液在裂缝上、下表面的

孔隙压力, Pa; p_i 为 cohesive 单元中间流体压力, Pa。

1.3 固体控制方程

对于干热岩压裂中的热固耦合,干热岩的平衡方程为:

$$\sigma_{ij} - p\delta_{ij} - \frac{E}{1-\nu}\alpha\Delta T\delta_{ij} = 0 \quad (5)$$

式中: σ_{ij} 为应力张量, Pa; δ_{ij} 为单位矩阵; E 为单元的弹性模量, Pa; α 为单元热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; ΔT 为单元的温度变化, K。

干热岩变形几何方程为:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (6)$$

式中: ε_{ij} 为应变张量; $u_{i,j}$ 和 $u_{j,i}$ 为位移张量。

考虑干热岩在压裂过程中满足线弹性变形,其本构方程为:

$$\sigma_{ij} = E\varepsilon_{ij} \quad (7)$$

对于干热岩压裂中的流固耦合,基于有效应力与虚功原理,得到水力压裂过程中岩石孔隙流体流动的应力平衡方程为^[21]:

$$\int_V (\sigma_{ij}^e - Ip_i) \delta\varepsilon_{ij} dV = \int_S f \delta v_{ij} dS + \int_V F \delta v_{ij} dV \quad (8)$$

式(7)一式(8)中: σ_{ij}^e 为储层基质的有效应力, Pa; I 为单位矩阵; $\delta\varepsilon_{ij}$ 为储层基质虚应变; δv_{ij} 为储层基质虚速度场; f 为单位面积的面力, Pa; F 为单位体积的体力, Pa。

2 干热岩压裂热流固顺序耦合方法

ABAQUS 中的渗流-应力单元是现阶段应用最广的水力压裂模拟单元,但该单元不具有温度选项,因此,提出一种适用于干热岩压裂的热流固顺序耦合方法,改善 ABAQUS 渗流-应力单元应用范围,使其能在干热岩储层水力压裂模拟中得到应用。基于 ABAQUS 渗流-应力单元的热流固顺序耦合方法的计算流程为:①建立热固耦合模型,对低温压裂液注入引发的温差应力场进行热固耦合分析;②将热固耦合模型中的温差应力场作为载荷导入流固耦合模型;③实现热流固顺序耦合模拟(图1)。研究证明,该方法具有计算效率高、收敛性好的特点。

3 干热岩压裂有限元模型

利用顺序耦合方法,建立干热岩压裂单簇裂缝和多簇缝网热流固顺序耦合模型,模型中考虑了温度场、应力场、渗流场耦合的影响。本次模拟中,采用 ABAQUS 软件中的孔隙压力 Cohesive 单元,描述水力裂缝的起裂和扩展、裂缝内流体的切向流动和裂缝表面的法向滤失问题。模型中 Cohesive 单元的损伤模式遵从牵引分离准则,裂缝的断裂准则采用最大主应力准则,并采用对渗流结点进行合并的方式,实现水力裂缝和天然裂缝的交叉和扩展。模型所采用的基本参数如表1所示。

3.1 单簇裂缝有限元模型

单簇裂缝压裂数值模拟分为2部分(图2),模型中包括了沿最大主应力方向扩展的水力裂缝,以及压裂液注入点和长度为16 m的射孔。水力裂缝与随机分布的 0° 、 15° 、 30° 、 45° 的天然裂缝相交,这4条天然裂缝又与其他不同角度的天然裂缝相交。压裂液由水力裂缝的中心位置注入,进入射孔后利用液体

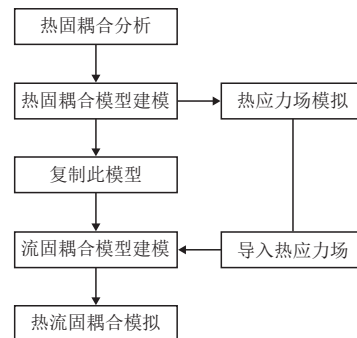


图1 热流固顺序耦合流程
Fig. 1 Flow chart of heat-fluid-mechanical sequence coupling

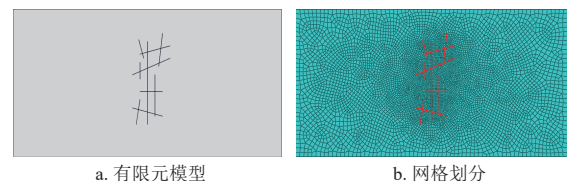


图2 单簇裂缝压裂数值模型
Fig. 2 Numerical model on single-cluster fracturing

压力促使水力裂缝起裂、扩展以及沟通天然裂缝形成单簇裂缝。

单簇裂缝热流固顺序耦合有限元模型的模拟结果(图3)表明:在温度场、应力场、渗流场的综合作用下,实现了主水力裂缝的扩展及和天然裂缝的沟通,最终,压裂形成了单簇裂缝。

3.2 多簇缝网有限元模型

多簇缝网有限元模型和网格划分如图4所示。模型中包括了3条沿最大主应力方向扩展的水力裂缝,3个压裂液注入点和3条长度为16 m的射孔。水力裂缝与12条随机分布的0°、15°、30°、45°的天然裂缝相交,天然裂缝又与其他不同角度的天然裂缝相

交,其中有2条天然裂缝贯通了3条主水力裂缝。压裂液由水力裂缝的中心位置注入,进入射孔后利用液体压力促使水力裂缝起裂、扩展以及沟通天然裂缝形成多簇缝网。

多簇缝网热流固顺序耦合有限元模型的模拟结果(图5)表明:在温度场、应力场、渗流场的综合作用

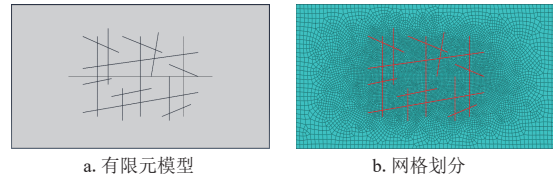


图4 多簇缝网压裂数值模型
Fig. 4 Numerical model on multiple cluster fracturing

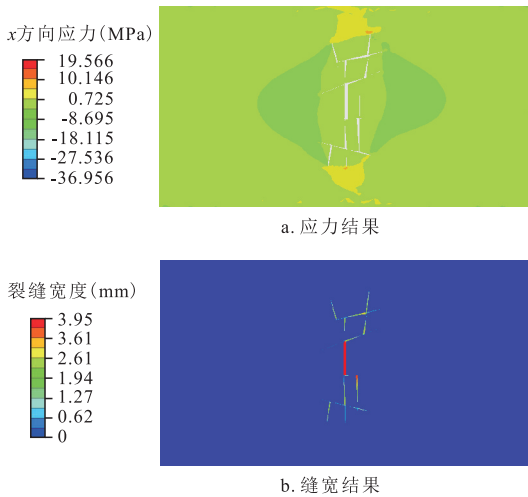


图3 单簇裂缝数值模拟结果
Fig. 3 Numerical results on single-cluster fracturing

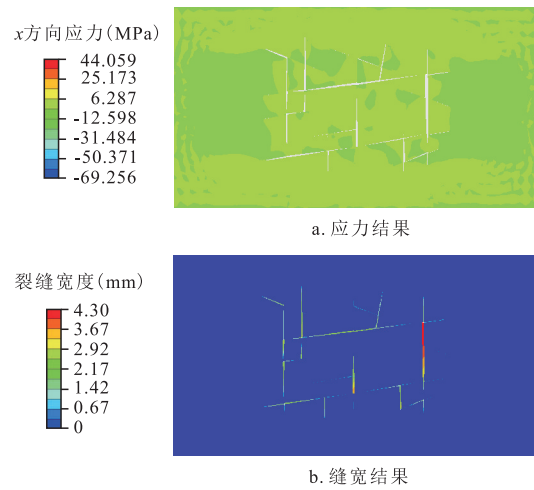


图5 多簇缝网数值模拟结果
Fig. 5 Numerical results on multiple cluster fracturing

表1 模型基本参数
Table 1 Basic parameters of model

| 参数名称 | 参数值 | 参数名称 | 参数值 |
|--|---------------------|----------------------------|----------|
| 模型尺寸(m) | 200×400 | 压裂液黏度(Pa·s) | 0.001 |
| 网格基本尺寸(m) | 0.5~2.0 | 射孔长度(m) | 16 |
| 储层渗透率(10 ⁻³ μm ²) | 0.000 1 | Cohesive单元厚度(m) | 0.001 |
| 储层孔隙率(%) | 10 | 黏性正则化系数 | 0.000 1 |
| 压裂液密度(kg/m ³) | 1 000 | 原地地应力(MPa) | 50/65/50 |
| 储层弹性模量(GPa) | 15 | 初始孔隙比 | 0.1 |
| 储层泊松比 | 0.15 | 压裂液流量(m ³ /min) | 6 |
| 损伤强度(MPa) | 6/20/20 | 储层温度(°C) | 100 |
| 单元损伤位移(m) | 0.001 | 压裂液温度(°C) | 10 |
| 滤失系数 | 1×10 ⁻¹⁴ | 注入时间(s) | 4 000 |

下,实现了3条主水力裂缝的扩展及和天然裂缝的沟通,并且实现了多簇裂缝之间的沟通,最终压裂形成了多簇缝网。

4 干热岩压裂裂缝扩展规律

干热岩地层的压裂施工与常规水力压裂施工不同,具有高温、高压的特点。尤其是低温压裂液注入高温地层会导致较大的热诱导应力,对压裂裂缝的扩展产生影响。同时,低温压裂液会对岩石产生低温冲击,不同力学性质的岩石在低温冲击下也会表现出不同的裂缝扩展特性。因此,基于热流固顺序耦合多簇缝网模型,重点研究了干热岩压裂中较大温差应力下的裂缝扩展规律,提出利用脆性指数来评价干热岩在低温压裂液冲击下裂缝的扩展能力,并探究了应力差和压裂排量对缝网扩展的影响。

4.1 温度场的影响

针对温度场对干热岩压裂缝网扩展的影响,从

裂缝的破裂、延伸压力和裂缝长度、宽度以及缝网面积几个方面进行了分析。模型中地层温度的变化为100 °C到500 °C,热储温度越高,压裂液与热储的温差越大。由图6a可知,干热岩地层的破裂压力和延伸压力随温度升高而降低。由图6b可知,水力裂缝的缝长随温度升高由196.8 m上升至280.5 m,而裂缝的平均缝宽由1.43 mm下降至1.11 mm。

对于整个干热岩压裂缝网来说,在压裂液温度一定,热储温度较高时,裂缝的压裂总面积更大,裂缝总长度更大。压裂液温度及热储温度变化对缝网扩展的影响规律表明:压裂液与热储间较大的温差会促使裂缝的扩展,更容易压裂形成大规模缝网(图6c—图6d)。

4.2 脆性指数影响

大量相关实验表明,低温压裂液冲击对不同力学性质的岩石的压裂效果不同^[22],进而最终影响缝网的压裂效果。为评价干热岩在水力压裂过程中形成复杂裂缝的能力,研究采用干热岩的脆性指数来表征,岩石的脆性指数越高,在外力作用下岩石越容

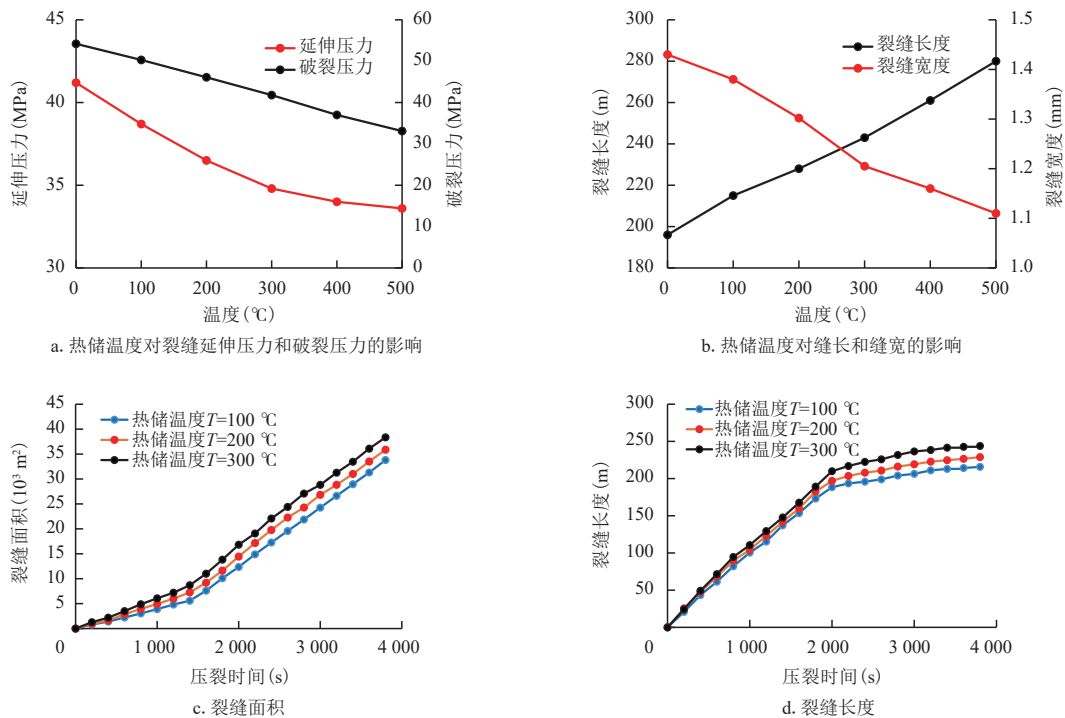


图6 热储温度对缝网扩展的影响

Fig. 6 Effect of formation temperature on propagation of fracture network

易发生脆性变形。

基于能量演化计算的脆性指数计算公式为^[23]:

$$B = \frac{U_p^e}{U_p} \quad (9)$$

式中: B 为脆性指数; U_p^e 为峰值弹性能; U_p 为峰值总能量。

模拟脆性指数分别为0.6、0.7、0.8时压裂缝网的扩展(图7),结果表明:岩石脆性指数越大,裂缝面积和长度越大,且在干热岩压裂热应力作用下更容易产生微裂缝,容易形成复杂裂缝网络。

4.3 应力差影响

模拟应力差分别为5、10、15 MPa时压裂缝网的扩展(图8),结果表明:在裂缝压裂时间一定的情况下,随应力差增加,缝网的压裂面积降低,缝网的总长度降低。综上所述,随着应力差增加,缝网的压裂面积、总长度降低,这是由于在较大的应力差作用

下,水力裂缝难以开启天然裂缝,最终影响缝网的扩展效果。

4.4 排量影响

模拟水力压裂过程中压裂液的排量分别为0.1、0.2、0.3 m³/s时压裂缝网的扩展(图9),结果表明:在压裂时间一定的情况下,随排量增大,缝网的压裂面积显著增大,且缝网的总长度大幅增加,说明压裂液排量越大,其在地层中的造缝效果越好,越容易在主裂缝之外形成复杂的分支缝和交叉缝,实现主裂缝与天然裂缝的沟通。因此,在裂缝延伸时,排量的大小决定着裂缝最终的长度、宽度和延伸压力,间接影响了整个压裂的最终效果。

4.5 影响因素灵敏度分析

为了明确热储温度、岩石脆性指数、地应力及排量对缝网扩展的影响程度,对以上因素的计算结

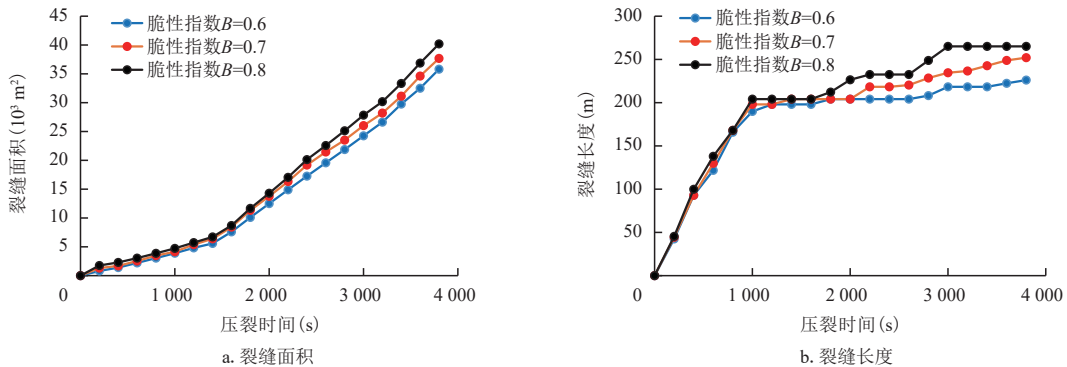


图7 脆性指数对缝网扩展的影响

Fig. 7 Effect of brittleness index on propagation of fracture network

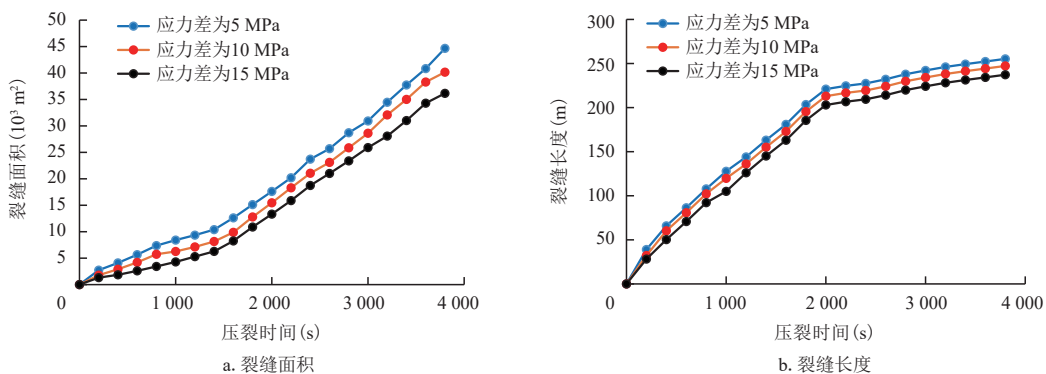


图8 应力差对缝网扩展的影响

Fig. 8 Effect of principal stress difference on propagation of fracture network

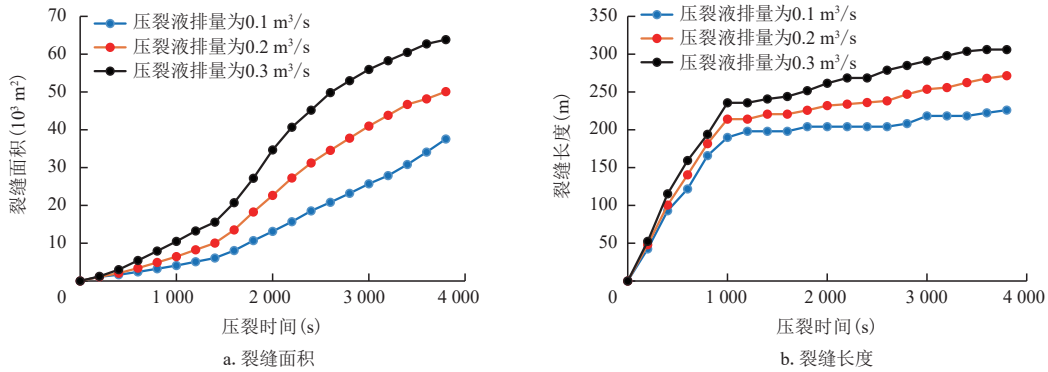


图9 排量对缝网扩展的影响
Fig. 9 Effect of pumpage rate on propagation of fracture network

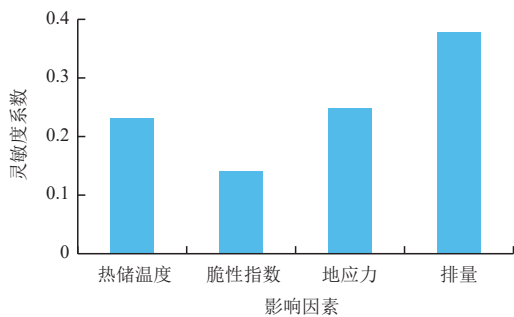


图10 影响因素灵敏度分析
Fig. 10 Sensitivity analysis of influencing factors

果进行了归一化分析,并对灵敏度系数进行了计算(图10),结果表明:影响因素中排量对压裂影响最大,为压裂的主控因素,地应力及热储温度次之,脆性指数对于压裂的影响程度最小。

5 结论

1) 提出了干热岩水力压裂热流固顺序耦合方法,一定程度上解决了地热储层模拟水力压裂中温度场耦合难以实现的问题,并利用ABAQUS软件实现干热岩压裂中的单簇裂缝、大规模多簇缝网的热流固顺序耦合模拟。

2) 对于热储温度对干热岩压裂缝网扩展结果的影响,模拟结果表明,随热储温度增加,干热岩地层的破裂压力和延伸压力降低,裂缝宽度降低,缝网长度及缝网面积增加,说明较大的温差能够促进多簇缝网的扩展。

3) 对于脆性指数对缝网扩展的影响,模拟结果表明,岩石脆性指数越高,缝网长度及缝网面积增加。说明在压裂液对岩石的低温冲击作用下,脆性指数高岩石越容易发生脆性开裂,更容易形成大规模压裂缝网。

4) 应力场对缝网扩展的影响,主要表现在随着应力差降低,裂缝更容易发生扩展,缝网的压裂面积增加。而排量对缝网扩展的影响表现为,随着排量增大,缝网压裂面积和长度的改造效果显著。

参考文献

- [1] GHASSEMI A. A review of some rock mechanics issues in geothermal reservoir development[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30(3): 647-664.
- [2] 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 and Technology Review, 2012, 30(32): 42-45.
- [3] 解经宇,王丹,李宁,等.干热岩压裂建造人工热储发展现状及建议[J].地质科技通报,2022,41(3):321-329.
XIE Jingyu, WANG Dan, LI Ning, et al. Development status and suggestions of hot dry rock hydraulic fracturing for building geothermal reservoirs[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3): 321-329.
- [4] 李龙龙,姚军,李阳,等.分段多簇压裂水平井产能计算及其分布规律[J].石油勘探与开发,2014,41(4):504-508.
LI Longlong, YAO Jun, LI Yang, et al. Productivity calculation and distribution of staged multi-cluster fractured horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4): 504-508.
- [5] TOMAC I, SAUTER M. A review on challenges in the assessment of geomechanical rock performance for deep

- geothermal reservoir development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82(3): 3972–3980.
- [6] 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.
- [7] TOMAC I, GUITERREZ M. Formulation and implementation of coupled forced heat convection and heat conduction in DEM[J]. *Acta Geotechnica: An International journal for Geoengineering*, 2015, 10(4): 421–433.
- [8] TOMAC I, GUITERREZ M. Coupled hydro–thermo–mechanical modeling of hydraulic fracturing in quasi–brittle rocks using BPM–DEM[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(1): 92–104.
- [9] 赵阳升, 王瑞凤, 胡耀青, 等. 高温岩体地热开发的块裂介质固流热耦合三维数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(12): 1751–1755.
ZHAO Yangsheng, WANG Ruifeng, HU Yaoqing, et al. 3D numerical simulation for coupled THM of rock matrix–fractured media in heat extraction in HDR[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(12): 1751–1755.
- [10] 赵延林, 曹平, 赵阳升, 等. 双重介质温度场–渗流场–应力场耦合模型及三维数值研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(S2): 4024–4031.
ZHAO Yanlin, CAO Ping, ZHAO Yangsheng, et al. Dual media model for thermo–hydro–mechanical coupling and 3D numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S2): 4024–4031.
- [11] 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, XUN Jianfeng, et al. Numerical simulation and analysis of the coupled Heat–Fluid–Solid in single fractured rock mass[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(S2): 1263–1268.
- [12] 张伟, 曲占庆, 郭天魁, 等. 热应力影响下干热岩水压致裂数值模拟[J]. *岩土力学*, 2019, 40(5): 2001–2008.
ZHANG Wei, QU Zhanqing, GUO Tiankui, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing in hot dry rocks under the influence of thermal stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(5): 2001–2008.
- [13] 张奇. 低渗透页岩层压裂改造的热一流–固耦合机理及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
ZHANG Qi. Coupled thermal–hydro–mechanical mechanism and its application for fracturing reform of low permeability shale reservoirs[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [14] KOH J, ROSHAN H, RAHMAN S S. A numerical study on the long term thermo–poroelastic effects of cold water injection into naturally fractured geothermal reservoirs[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(5): 669–682.
- [15] WATANABE N, WANG W Q, MCDERMOTT C I, et al. Uncertainty analysis of thermo–hydro–mechanical coupled processes in heterogeneous porous media[J]. *Computational Mechanics*, 2010, 45(4): 263.
- [16] ROUSSEL N P, SHARMA M M. Optimizing Fracture Spacing and Sequencing in Horizontal–Well Fracturing[J]. *SPE Production and Facilities*, 2011, 26(2): 173–184.
- [17] 李宁. 增强型地热系统水力压裂裂缝扩展规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
LI Ning. Investigation into hydraulic fracture propagation mechanism in enhanced geothermal system[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [18] 王伟, 付豪, 邢林啸, 等. 基于扩展有限元法的碳酸盐岩地热储层岩体裂缝扩展行为[J]. *地球科学*, 2021, 46(10): 3509–3519.
WANG Wei, FU Hao, XING Linxiao, et al. Crack propagation behavior of carbonatite geothermal reservoir rock mass based on extended finite element method[J]. *Earth Science*, 2021, 46(10): 3509–3519.
- [19] 张广明, 刘合, 张劲, 等. 储层流固耦合的数学模型和非线性有限元方程[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1657–1662.
ZHANG Guangming, LIU He, ZHANG Jin, et al. Mathematical model and nonlinear finite element equation for reservoir fluid–solid coupling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1657–1662.
- [20] 衡帅. 页岩气储层水力压裂网状裂缝形成机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
HENG Shuai. Mechanism study of hydraulic fracturing network fracture in shale gas reservoir[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [21] ZHANG G M, LIU H, ZHANG J, et al. Three–dimensional finite element simulation and parametric study for horizontal well hydraulic fracture[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 72: 310–317.
- [22] 张乐, 张伟, 贺甲元, 等. 急剧冷却作用下高温岩石细观损伤与增渗机制研究[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(2): 551–560.
ZHANG Le, ZHANG Wei, HE Jiayuan, et al. Study on meso damage and seepage enhancement mechanism of high temperature rocks under rapid cooling[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(2): 551–560.
- [23] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1974, 11(10): 389–392.

(编辑 余聪)