

基于扩展有限元的现场尺度水力裂缝扩展机制 模拟研究

曹志成¹, 陈秋¹, 崔俊艳², 解经宇^{1*}, 张卫强¹, 蒋国盛³

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116; 2. 中国地质科学院, 北京 100037;

3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要:干热岩储层水力压裂形成复杂缝网对于建设增强型地热系统(EGS)至关重要。为了深入认识干热岩储层水力裂缝扩展机制,揭示工程参数和地质参数对水力裂缝扩展的影响规律,本文以青海共和盆地某干热岩储层为研究对象,基于扩展有限元(XFEM)数值模拟软件ABAQUS展开研究,建立现场尺度的干热岩储层模型,实现热流固耦合分析水力裂缝的扩展机制。结果显示:正断型应力状态下,裂缝发生了很明显的朝向Z轴的转向,走滑型应力状态下,裂缝扩展主要沿水平方向,有轻微倾向于Z轴转向的趋势,逆冲型应力状态下,裂缝沿水平方向扩展;随着弹性模量的增大,裂缝的起裂压力减小,裂缝延伸的注水压力也减小,弹性模量越大裂缝起裂的时间越早,泊松比越大水力裂缝的破裂压力越大,破裂压力整体呈现出正断型>走滑型>逆冲型;随着温度的升高,水力裂缝破裂压力减小,大约降低2~3 MPa左右,3个应力状态下都呈现出相同的趋势。本文丰富了干热岩水力裂缝扩展的数值模拟手段,相关研究成果可为干热岩储层中水力压裂扩展预测与不同参数对其的影响分析提供技术支撑。

关键词:水力压裂;储层裂缝;干热岩;扩展有限元;现场尺度;热流固耦合

中图分类号:TE37;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)05-0085-08

Simulation research of field-scale hydraulic fracture extension mechanism based on XFEM

CAO Zhicheng¹, CHEN Qiu¹, CUI Junyan², XIE Jingyu^{1*}, ZHANG Weiqiang¹, JIANG Guosheng³

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Hydraulic fracturing of hot dry rock(HDR) reservoirs to form a complex network of seams is essential for the construction of enhanced geothermal systems (EGS). In order to deeply understand the mechanism of hydraulic fracture extension in HDR reservoirs and reveal the influence of engineering and geological parameters on hydraulic fracture extension, in this paper, a HDR reservoir in the Gonghe Basin of Qinghai Province is taken as the research object, and based on the extended finite element method (XFEM) numerical simulation software ABAQUS, a field-scale HDR reservoir model is established to realize the thermo-hydro-mechanical coupling and to analyze the extension mechanism of the hydraulic fracture. The results show that: (1) In the normal fracture-type stress state, the crack undergoes a very obvious turning toward the Z-axis, in the strike-slip-type stress state, the crack expands mainly

收稿日期:2024-07-03; 修回日期:2024-07-11 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.05.010

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:42102353);中国科协青年托举人才工程项目(编号:2023QNR001);中国矿业大学基本科研业务费项目——青年科技基金(编号:2023-00030)

第一作者:曹志成,男,汉族,2000年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为干热岩水力压裂和岩石热损伤,江苏省徐州市金山东路1号,caozhicheng@cumt.edu.cn。

通信作者:解经宇,男,汉族,1991年生,准聘副教授,硕士生导师,主要研究方向为水力压裂岩石力学、干热岩型地热开发、CO₂地质封存等,江苏省徐州市金山东路1号,xiejingyu@cumt.edu.cn。

引用格式:曹志成,陈秋,崔俊艳,等.基于扩展有限元的现场尺度水力裂缝扩展机制模拟研究[J].钻探工程,2024,51(5):85-92.

CAO Zhicheng, CHEN Qiu, CUI Junyan, et al. Simulation research of field-scale hydraulic fracture extension mechanism based on XFEM[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5):85-92.

along the horizontal direction with a slight tendency to turn toward the Z -axis, and in the thrust-type stress state, the crack expands along the horizontal direction. (2) With the increase of elastic modulus crack initiation pressure decreases, the injection pressure of crack extension also decreases; the larger the elastic modulus the earlier the crack initiation time; the larger the Poisson ratio the greater the rupture pressure of hydraulic cracks; the rupture pressure as a whole shows a normal fracture-type > strike-slip-type > thrust-type. (3) The hydraulic fracture rupture pressure decreases with the increasing temperature, by about 2~3MPa or so, showing the same trend for all three stress states. This paper enriches the numerical simulation methods of hydraulic fracturing extension for HDR, the relevant research results can also provide technical supports for the prediction of the hydraulic fracturing extension and the influences affected by different parameters for HDR reservoirs.

Key words: hydraulic fracturing; reservoir fracture; hot dry rock; extended finite element method; field scale; thermo-hydro-mechanical coupling

0 引言

我国地热资源分布广泛,作为清洁能源如何利用是目前亟待解决的难题^[1],对于地热资源的获取主要依赖于水力压裂技术,与石油开采的水力压裂方法不同的是,石油一般埋深较浅,而地热资源获取主要是深部的高温干热岩^[2]进行水力压裂,形成复杂缝网后建立增强型地热系统(EGS)^[3],从而获取地热资源。而深部的干热岩主要以花岗岩为主,不仅岩石的力学性质较强,且由于埋深一般在4000 m左右,导致在干热岩储层分布着很大的地应力,这些都对水力压裂工程造成了很大的困难。因此研究工程参数与地质参数对裂缝扩展的影响至关重要,对于建设EGS有着很大的参考价值。

目前对于水力压裂相关的研究主要集中在室内压裂试验^[4]和数值模拟方法,而室内试验由于试验条件的限制,无法达到实际情况下储层的各种条件,因此数值模拟研究是一个很好的研究方法,可以模拟高应力、大尺寸下的水力压裂裂缝扩展。目前利用有限元仿真软件模拟水力压裂裂缝扩展已经相当成熟,不少学者通过ABAQUS软件模拟研究水力裂缝的扩展^[5-6],以及三维的储层压裂和裂缝的相互作用规律,目前ABAQUS软件模拟裂缝扩展常见的方法主要是内聚力单元法(Cohesive单元法)^[7-9]、扩展有限元法(XFEM)^[10-11],其中Cohesive单元法在模拟裂缝的扩展时需要预制裂缝扩展路径,即定义Cohesive单元区域,这就导致水力裂缝只会沿着预制的裂缝扩展^[12],如此一来便无法分析各个参数对裂缝扩展形态的影响^[13],此方法局限性较大。扩展有限元法(XFEM)在内聚力单元法(Cohesive单元法)的基础上更新改进,引入不连续的位移函数表征裂缝的存在,独立于单元网格外有

不连续场的计算,在处理断裂问题有较好的计算能力,可以模拟裂缝在各种条件下的沿任意方向的扩展,收敛性较好,计算结果准确。除此之外,曹涵等^[14]研究非对称应力下干热岩双井筒的水力压裂裂缝扩展机理,解决了热流固耦合问题,在渗流-应力场耦合的情况下引入了温度场,模拟效果较好,但是无法直观的看出裂缝形态。冯国瑞等^[15]基于离散元数值模拟软件MatDEM开展不同注水速率对裂缝扩展的影响。解经宇等^[16]从细观尺度上揭示水力裂缝的扩展机理。Salehi等^[17]基于有限元建立全流固耦合模块,模拟了近井筒水力压裂裂缝的产生与扩展。通过上述分析发现目前在数值模拟方法上对于流固耦合的研究较多,对于热固耦合的研究较少,但是温度对水力裂缝的影响不容忽视。Kumari等^[18]通过室内试验的方法模拟深部储层高应力高温度的水力压裂试验,从微观角度分析花岗岩的损伤机理,研究发现随着温度的升高裂缝起裂压力线性降低,且围压对于起裂压力的影响大于温度。Zhou等^[19]通过室内试验和数值模拟相结合的方法研究100~400 °C下的裂缝扩展,验证了温度对裂缝产生的控制作用,温度越高裂缝起裂越容易,且发现温度对岩石裂缝起裂的影响机理不是岩石力学参数的变化,而是温差引起的热应力导致的。翟梁皓等^[20]、蒋亚峰等^[21]利用粘结单元法(Cohesive单元法)研究压裂液与压裂排量对裂缝形态的影响,发现排量对裂缝的长度有显著影响,压裂液粘度对裂缝宽度有显著影响。颜谢材等^[22]利用RFPA软件对干热岩开采过程中冷热冲击下的裂纹扩展展开研究,发现岩石表面的拉应力随着冷热冲击进行呈现出先升高至峰值后缓慢下降的规律,温度和围压分别对冷冲击裂纹扩展起到促进和抑制作用。温继伟等^[23]主要针对含

层理页岩中的层次倾角、构造方向以及岩性对裂缝扩展的影响展开研究,发现对于含层理的页岩,不同的内部倾角下水力裂缝会出现不同程度偏转,且偏转程度随着层理倾角的增大而减小。

通过上述分析可见,利用ABAQUS扩展有限元模拟储层水力压裂较为成熟,但是对于温度场的引入较少,对此本文基于青海共和干热岩储层进行压裂模拟分析,通过间接耦合的方式实现热流固耦合,建立现场尺度的大尺寸压裂模型,分析真实地应力下地质参数和工程参数对裂缝扩展的影响。

1 模型建立

1.1 岩石的本构模型

岩石的本构模型是指岩石在受力的情况下,其变形状态与力的关系。岩石形成的过程十分复杂,受到各种环境因素的影响,以至于其本构方程也十分复杂。水力压裂实质上是对储层施加力学手段,肯定会引起岩石骨架变形,而这种微观结构的改变会引起岩石宏观力学性质发生变化。在实际地层中,岩石的孔隙结构受到地应力等影响,渗透率也随之变化,而实际的渗透率与孔隙度的变化很难用数学模型表征,因此为简化模型,提高计算效率,在研究低渗储层水力裂缝扩展时,认为渗透率为常数,不受其他参数变化所造成的影响。假设储层岩石为各向同性的线弹性材料,其本构模型如下:

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: ϵ ——弹性应变; γ ——剪切应变; σ ——弹性应力; E ——弹性模量; ν ——泊松比; G ——剪切模量, $G = E/[2(1 + \nu)]$ 。

1.2 扩展有限元XFEM的粘性行为

1.2.1 线弹性牵引分离准则

ABAQUS 中牵引-分离行为假设起裂或失效前符合线弹性行为,载荷加载至一定程度时发生起裂和损伤演化,如图1所示。线弹性行为用弹性本构矩阵来表示,该矩阵名义牵引应力矢量 t 包括 t_n 、 t_s 和 t_t (三维问题),分别为法向牵引应力和剪切牵引

应力。相应的变形行为可由 δ_n 、 δ_s 和 δ_t 来表示,弹性行为如下:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = E\delta \quad (2)$$

式中: K ——刚度; E ——弹性模量; δ ——应变。

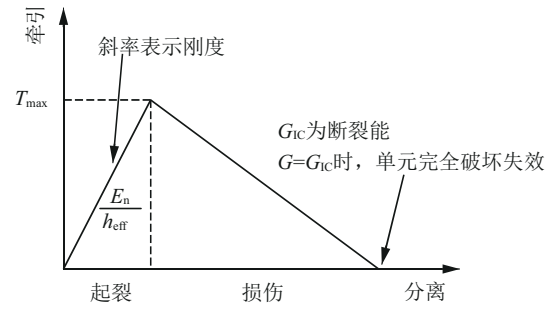


图1 典型牵引-分离曲线

Fig.1 Typical traction-separation curve

1.2.2 初始损伤准则

本次研究使用最大名义应力损伤准则,即假设某一单元任意一个方向应力达到设置的临界应力时,单元开始损伤,相应的表达式为:

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (3)$$

式中: t^0 ——最高名义应力; n 、 t 、 s ——方向。

1.2.3 损伤演化

损伤变量 D 表示裂缝表面与裂缝单元边界的交点处的平均总损伤,该值初始值为0。如果定义了损伤演化模型,则在损坏开始后进一步加载时,损伤变量 D 从0变为1。法向应力和剪应力分量变化如下所示:

$$\begin{aligned} t_n &= \begin{cases} (1-D)T_n, & T_n \geq 0 \\ T_n, & \text{其他情况(压缩刚度系数无损伤)} \end{cases} \\ t_s &= (1-D)T_s \\ t_t &= (1-D)T_t \end{aligned} \quad (4)$$

式中: T ——当前无损伤时法向和切向应力; t ——实际承受的应力。

2 现场尺度三维水力压裂模型

通过现场调研与参考文献^[24-26]获取青海共和盆地花岗岩型地热资源储层参数,如表1所示。模型尺寸大小400 m×400 m×400 m,模拟干热岩储层3600~4000 m层位,压裂段位于3800~3900 m处,

在压裂段中心位置添加初始裂缝,即注水点在此,如图2所示。整个模型设置为扩展有限元(XFEM),由于ABAQUS软件无法实现直接的热流固耦合,因此本研究采取间接的耦合方式,即计算出岩石在高温下产生热应力,然后以应力的方式输入预定义场中,进而实现温度对压裂的影响,此方法不考虑温度对岩石性质的改变,仅考虑热应力的影响,网格划分如图3所示,在压裂段采取网格加密,提高计算精度。模拟分析现场尺度下水力压裂过程中地质参数和工程参数对压裂过程的影响。表2为储层热物性参数在不同温度下的取值。

表1 水力压裂模拟基本参数

Table 1 Basic parameters for hydraulic fracturing simulation

参数	数值	参数	数值
弹性模量/GPa	30	孔隙度	0.1
抗拉强度/MPa	3	滤失系数/(m·s ⁻¹)	1.00×10 ⁻¹⁴
泊松比	0.25	压裂液粘度/(Pa·s)	0.001
注水速率/(m ³ ·s ⁻¹)	0.5	断裂能/J	50
渗透系数/(m·s ⁻¹)	1×10 ⁻⁷	温度/°C	150

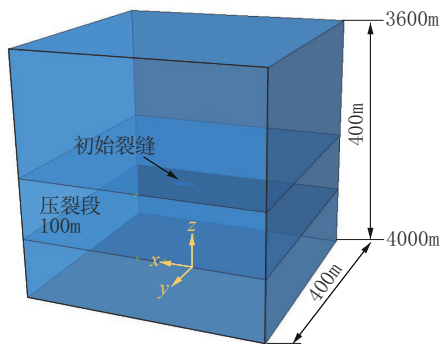


图2 模型建立

Fig.2 Model building

3 计算结果分析

3.1 地应力对裂缝扩展形态的影响

地层在形成过程中都经历了复杂的地质构造运动演化,具有极其复杂的地应力,而地应力不仅控制着断层的稳定性,还影响着水力压裂过程中裂缝的扩展,研究表明^[27],在青海共和盆地随着地层深度的增加,地应力大小关系发生变化,依次出现3种地应力状态:如图4所示, $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 为正断型应力状态, $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 为走滑型应力状态, $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 为

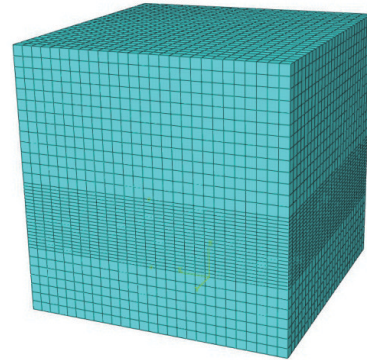


图3 网格划分

Fig.3 Mesh division

表2 储层不同温度下热物性基本参数

Table 2 Basic parameters of thermophysical properties of reservoirs at different temperatures

温度/°C	比热/[J·(kg·°C) ⁻¹]	热导率/[W·(m·°C) ⁻¹]	热膨胀系数/°C ⁻¹
150	900	1.3	8×10 ⁻⁶
200	850	1.2	9×10 ⁻⁶
250	800	1.1	1×10 ⁻⁵
300	750	1	1.1×10 ⁻⁵

逆冲型应力状态。因此本文分别研究正断型应力状态($\sigma_v=80$ MPa, $\sigma_H=50$ MPa, $\sigma_h=45$ MPa)、走滑型应力状态($\sigma_v=70$ MPa, $\sigma_H=90$ MPa, $\sigma_h=60$ MPa)、逆冲型应力状态($\sigma_v=70$ MPa, $\sigma_H=100$ MPa, $\sigma_h=90$ MPa)对水力压裂的影响。在本次研究中,软件中加载地应力均为 x 方向加载 σ_H , Y 方向加载 σ_h , Z 方向加载 σ_v 。

经典岩石断裂力学表明^[28]:水力裂缝总是沿着最大主应力方向,或是垂直于最小主应力方向扩展。模拟结果如图5所示,正断型应力状态下, σ_v 沿

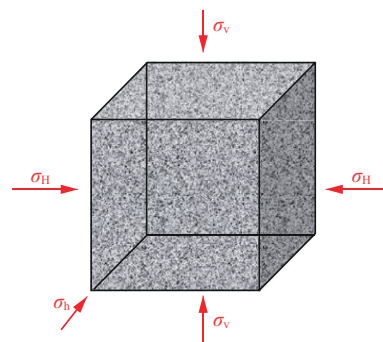


图4 地应力示意

Fig.4 Schematic diagram of ground stress

Z轴方向且最大,因此裂缝发生了很明显的转向,延伸趋势为朝向Z轴方向;走滑型应力状态下,最大主应力为 σ_H 沿水平方向,垂向应力大小 σ_v 介于中间,因

此裂缝扩展主要沿水平方向,但是有轻微倾向于Z轴转向的趋势;逆冲型应力状态下, $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$,因此裂缝沿水平方向扩展,不发生任何转向。

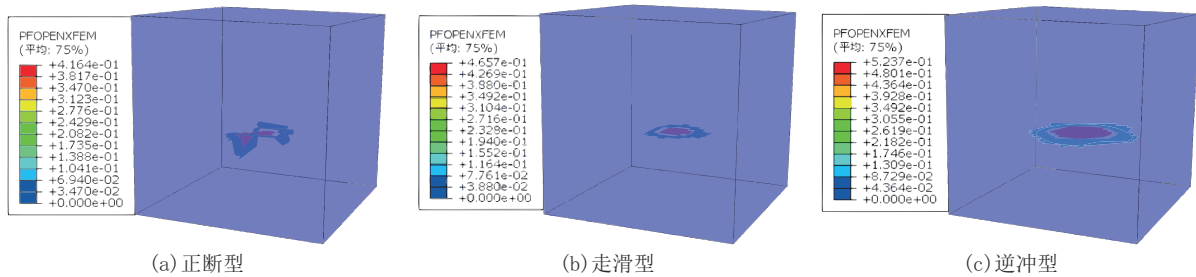


图 5 不同应力状态下裂缝宽度

Fig.5 Crack width at different stress states

3.2 弹性模量和泊松比对裂缝扩展的影响

弹性模量是岩体重要的力学性质参数之一,对水力裂缝的扩展有一定的影响。对此,本文选取 15、30、45 GPa 分别为储层的弹性模量,研究不同弹性模量对水力裂缝扩展的影响,模拟结果如图 6(a)所示,分别为 3 种地应力状态下不同弹性模量的注水压力曲线。显然在不同地应力状态下弹性模量对裂缝起裂压力的影响趋势是相同的,即随着弹性模量的增大裂缝的起裂压力减小,裂缝延伸的注水压力也减小,且正断型地应力状态下裂缝的起裂压力整体高于其他两种地应力状态。除此之外,弹性

模量越大裂缝起裂的时间越早。

选取泊松比 0.25、0.2、0.15 研究泊松比对裂缝扩展的影响,由图 6(b)可以看出,泊松比越大水力裂缝的破裂压力越大,这是由于泊松比是代表岩石抵抗变形能力的重要参数之一,泊松比越大岩石越容易变形,因此越容易起裂,且 3 种应力状态下都呈现出相同的规律,说明此规律不受应力状态的影响。但是破裂压力整体呈现出正断型 > 走滑型 > 逆冲型,这是由于裂缝转向所导致的,裂缝在偏转扩展时需要更大的压力。

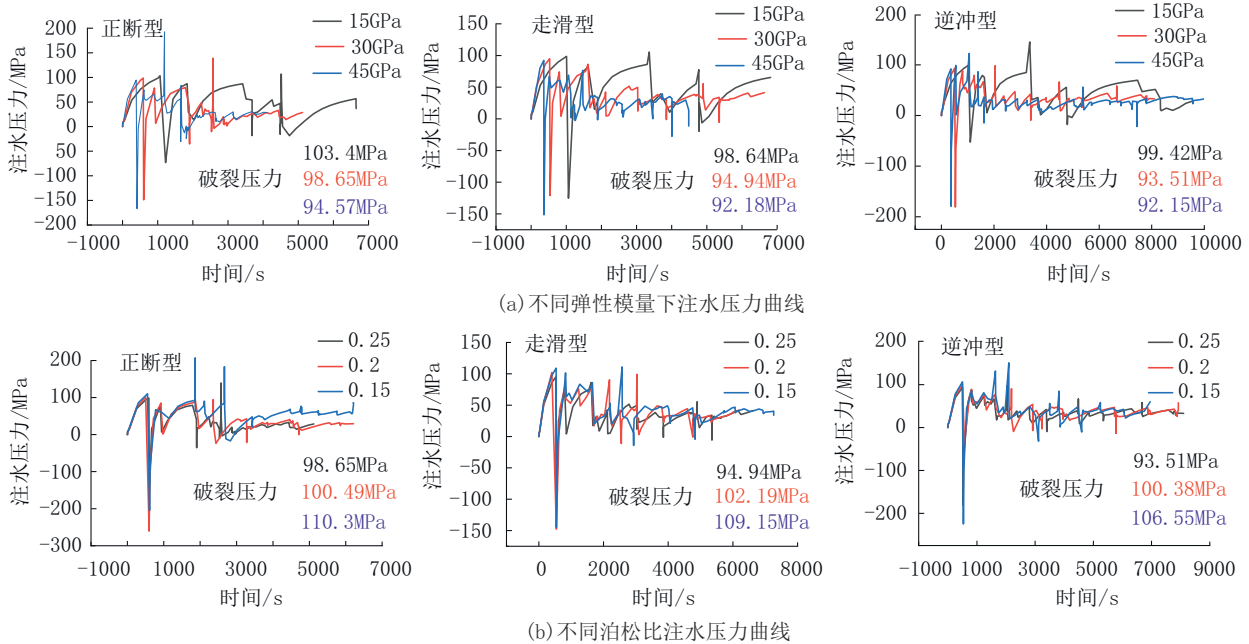


图 6 不同弹性模量和泊松比下注水压力曲线

Fig.6 Water injection pressure curves for different elastic modulus and Poisson ratio

3.3 注水速率对裂缝扩展的影响

注水速率是影响水力压裂工程的重要工程参数之一,研究注水速率对压裂的影响有至关重要的意义,分别改变注水速率为0.5、0.3、0.1 m³/s,得到注水压力随时间的变化曲线,如图7所示,可以明显地看出随着注水速率的减小,注水压力的变化特别明显,也发生减小,且减小的幅度较大。正断型应

力状态下注水压力普遍高于其他2种应力状态,在正断型状态下,随着注水速率逐渐减小0.2 m³/s,破裂压力分别减小了32.52、36.7 MPa。破裂压力随着注水速率的降低而降低的主要原因是注水速率越大,注水口处压力积累越快,再加上岩石渗流因素的影响,产生了上述规律。

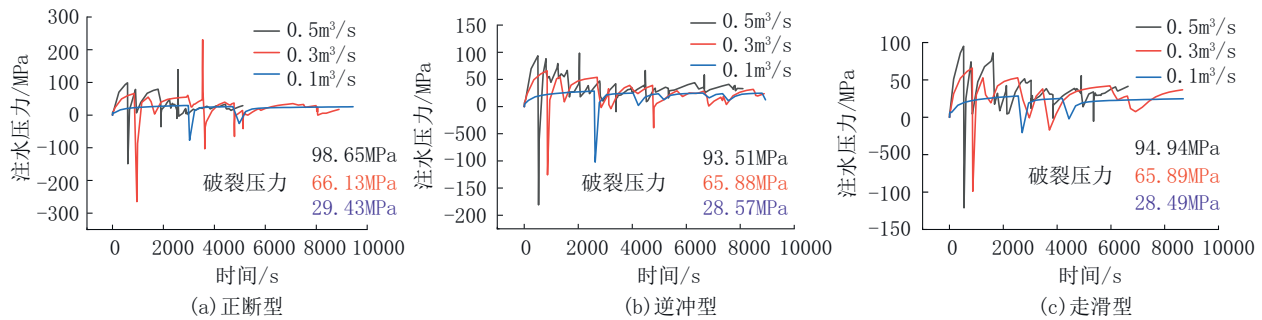


图7 不同注水速率下注水压力曲线

Fig.7 Injection pressure curves at different injection rates

3.4 温度对裂缝扩展的影响

ABAQUS软件是无法实现直接的热流固耦合的,但是可以采取间接的耦合方式,即计算出岩石在高温下产生热应力,然后以应力的方式输入预定义场中,进而实现温度对压裂的影响,此方法不考虑温度对岩石性质的改变,仅考虑热应力的影响。热应力的产生一般是由于岩石内外产生温差,进而导致其膨胀变形程度不同,由于挤压或拉伸产生的应力,而对于干热岩储层,在地下4000 m处其温度是在形成时就有,排除一些岩浆活动的影响,除了地温梯度基本上不会产生温差,这是与室内试验进行加热不同的,因此可以通过数值模拟的研究方法去计算出干热岩储层的热应力。张卫强^[29]研究表明在300℃以下温度对花岗岩物理力学性质产生的影响较小,在400℃后才会引起花岗岩物理力学性质的显著变化。因此本文的储层物理力学参数均设置为常数,不随温度的变化而变化,只考虑热物性参数随温度的变化。

根据前人研究^[24,30-31]可以发现干热岩储层温度范围一般在150~300℃,因此本文改变储层温度150、200、250、300℃,讨论温度对水力裂缝扩展的影响。以走滑型应力状态200℃为例,图8为200℃下X、Y、Z方向产生的热应力,值得注意的是在软件中应力符号“+”代表拉应力,“-”代表压应力,可

以看出200℃下产生的热应力基本上以拉应力为主,且热应力较小,这是由于没有大的温差导致的,符合实际情况。图9为不同温度下的水力裂缝破裂压力,可以看出随着温度的升高破裂压力都在减小,大约降低2~3 MPa,3个应力状态下都呈现出相同的趋势,这是由于热应力主要为拉应力,地应力为压应力,致使总的应力降低且重新分布。因此,温度对于压裂有着促进作用,温度越高产生的热应力越大,裂缝扩展的难度越低。除此之外,本文研究没有考虑压裂的清水注入高温花岗岩对岩体造成的冷热冲击,进而引起的微裂纹扩展,此处还需要进行大量研究补充。

4 结论

本文选取青海共和盆地3600~4000 m处的干热岩储层为研究对象,通过扩展有限元法ABAQUS软件进行数值模拟研究,间接实现热流固耦合,分析工程参数和地质参数对水力裂缝的起裂和扩展的影响,以及不同地应力状态对裂缝形态的变化,储层不同温度下产生的热应力对裂缝破裂压力的影响,主要得出以下结论:

(1)正断型应力状态下,裂缝发生了很明显的转向,延伸趋势为朝向Z轴方向;走滑型应力状态下,裂缝扩展主要沿水平方向,但是有轻微倾向于Z轴转向的趋势;逆冲型应力状态下,裂缝沿水平方

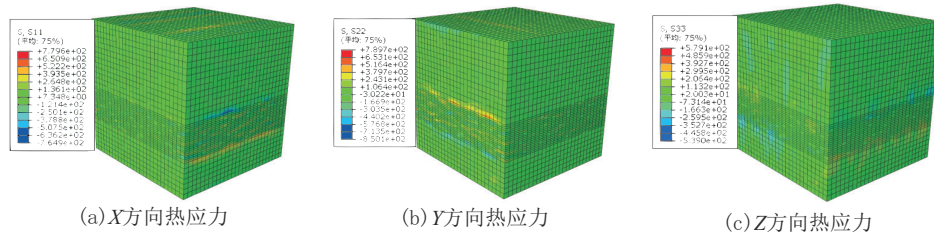


图8 X、Y、Z方向产生的热应力

Fig.8 Thermal stresses generated in the X, Y, and Z directions

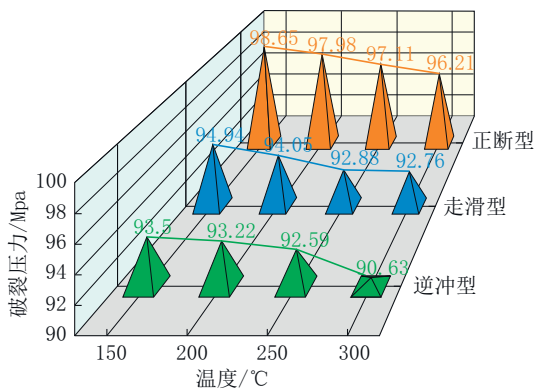


图9 不同温度下的破裂压力

Fig.9 Rupture pressure at different temperatures

向扩展,不发生任何转向。

(2)在不同地应力状态下弹性模量、泊松比对裂缝起裂压力的影响趋势是相同的,随着弹性模量的增大裂缝的起裂压力减小,裂缝延伸的注水压力也减小,弹性模量越大裂缝起裂的时间越早,泊松比越大水力裂缝的破裂压力越大,破裂压力整体呈现出正断型>走滑型>逆冲型。

(3)根据热应力云图可以看出,储层热应力基本上以拉应力为主,且热应力较小,抵消部分地应力并引起总应力的重分布,使得随着温度的升高水力裂缝破裂压力减小,大约降低2~3 MPa,3个应力状态下都呈现出相同的趋势。

本文丰富了干热岩水力裂缝扩展的数值模拟手段,相关研究成果可为干热岩储层中水力压裂扩展预测与不同参数对其的影响分析提供技术支撑。

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].地球学报,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] 周韬,范永林,陈家嵘,等.热损伤花岗岩力学劣化特性及损伤

演化规律研究[J].矿业科学学报,2024,9(3):351-360.
ZHOU Tao, FAN Yonglin, CHEN Jiarong, et al. Study on the mechanical degradation characteristics and damage evolution of thermally damaged granite [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024,9(3):351-360.
[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] Xie J Y, Li L, Wen D G, et al. Experiments and analysis of the hydraulic fracture propagation behaviors of the granite with structural planes in the Gonghe basin[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2021, 95(6): 1816-1827.
[5] 孔鹏,任广聪,薄海江,等.ABAQUS中不同断层带的煤层地应力场反演[J].西安石油大学学报(自然科学版),2022,37(3):1-8.
KONG Peng, REN Guangcong, BO Haijiang, et al. Influence of different fault treatment modes on simulation result of In-situ stress distribution in coalbed using ABAQUS[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science), 2022,37(3):1-8.
[6] 方淑君,王涛,聂念从,等.基于ABAQUS标准扩展有限元法的不良裂缝构型影响分析[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(11):1646-1652,1666.
FANG Shujun, WANG Tao, NIE Niancong, et al. Analysis of poor crack configuration influence based on ABAQUS standard extended finite element method[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2020,41(11):1646-1652,1666.
[7] 雷浩然.基于ABAQUS的三维水力压裂裂缝扩展模拟研究[J].云南化工,2021,48(1):34-37.
LEI Haoran. Simulation of 3D hydraulic fracturing fracture propagation based on ABAQUS[J]. Yunnan Chemical Technology, 2021,48(1):34-37.
[8] 张汝生,王强,张祖国,等.水力压裂裂缝三维扩展ABAQUS数值模拟研究[J].石油钻采工艺,2012,34(6):69-72.
ZHANG Rusheng, WANG Qiang, ZHANG Zuguo, et al. Research of ABAQUS numerical simulation of 3D fracture propagation in hydraulic fracturing process[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012,34(6):69-72.
[9] 寇园园,孙晨,魏奔驰.基于ABAQUS裂缝相互作用规律研究[J].石油化工应用,2022,41(4):20-25.
KOU Yuanyuan, SUN Chen, WEI Benchi. Study on interaction law of fractures based on ABAQUS[J]. Petrochemical Industry Application, 2022,41(4):20-25.
[10] 龚迪光,曲占庆,李建雄,等.基于ABAQUS平台的水力裂缝扩展有限元模拟研究[J].岩土力学,2016,37(5):1512-1520.
GONG Diguang, QU Zhanqing, LI Jianxiong, et al. Extended

- finite element simulation of hydraulic fracture based on ABAQUS platform[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(5):1512-1520.
- [11] 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.
- [12] 周鑫,刘向君,丁乙,等.考虑隔层效应的水力裂缝与天然裂缝相交模拟[J].*油气藏评价与开发*,2022,12(3):515-525. ZHOU Xin, LIU Xiangjun, DING Yi, et al. Simulation of intersecting hydraulic fractures with natural fractures considering layer barrier effect[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(3):515-525.
- [13] 宋进鑫,郁航,王雅亭,等.多级水力压裂应力阴影效应的数值分析[J].*矿业科学学报*,2024,9(3):475-482. SONG Jinxin, YU Hang, WANG Yating, et al. Numerical analysis of the stress shadowing effects in multistage hydrofracturing[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(3):475-482.
- [14] 曹涵,朱珍德,周露明.非对称应力作用下干热岩水力压裂裂缝扩展机理研究[J].*河南科学*,2022,40(8):1244-1249. CAO Han, ZHU Zhende, ZHOU Luming. Crack propagation mechanism of hydraulic fracturing in hot dry rock under the influence of asymmetric stress[J]. *Henan Science*, 2022, 40(8):1244-1249.
- [15] 冯国瑞,樊一江,王朋飞,等.基于离散元法的类岩石材料水力压裂裂缝扩展规律[J].*煤炭学报*,2024,49(5):2231-2246. FENG Guorui, FAN Yijiang, WANG Pengfei, et al. Fracture propagation law of hydraulic fracturing of rock-like materials based on discrete element method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(5):2231-2246.
- [16] 解经宇,陆洪智,陈磊,等.龙马溪组层状页岩微观非均质性及其力学各向异性特征[J].*地质科技通报*,2021,40(3):67-77. XIE Jingyu, LU Hongzhi, CHEN Lei, et al. Microscopic heterogeneity and mechanical anisotropy of the laminated shale in Longmaxi Formation[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(3):67-77.
- [17] Salehi S, Nygaard R. Full fluid-solid cohesive finite-element model to simulate near wellbore fractures[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2015, 137(1):012903.
- [18] Kumari W G P, Ranjith P G, Perera M S A, et al. Hydraulic fracturing under high temperature and pressure conditions with micro CT applications: Geothermal energy from hot dry rocks[J]. *Fuel*, 2018, 230:138-154.
- [19] Zhou C B, Wan Z J, Zhang Y, et al. Experimental study on hydraulic fracturing of granite under thermal shock[J]. *Geothermics*, 2018, 71:146-155.
- [20] 翟梁皓,荀杨,苏博,等.基于粘结单元法的干热岩储层水力压裂数值模拟与参数优化[J].*钻探工程*,2024,51(2):23-31. ZHAI Lianghao, XUN Yang, SU Bo, et al. Numerical simulation and parameter optimization of hydraulic fracturing for hot dry rock reservoirs based on cohesive zone method[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(2):23-31.
- [21] 蒋亚峰,田英英,李小洋,等.基于cohesive单元海域天然气水合物储层水力压裂模拟[J].*钻探工程*,2023,50(1):18-25. JIANG Yafeng, TIAN Yingying, LI Xiaoyang, et al. Numerical simulation of hydrate reservoir hydraulic fracturing based on cohesive units[J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(1):18-25.
- [22] 颜谢材,郑君,罗浩瀚,等.冷冲击作用下干热岩井筒裂纹扩展数值模拟研究[J].*钻探工程*,2024,51(3):94-103. YAN Xiecai, ZHENG Jun, LUO Haohan, et al. Numerical simulation of wellbore fracture extension in hot dry rock wells under cold shock effect[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(3):94-103.
- [23] 温继伟,项天,朱茂,等.基于扩展有限元分析的页岩水力压裂裂缝扩展规律探究[J].*钻探工程*,2022,49(5):177-188. WEN Jiwei, XIANG Tian, ZHU Mao, et al. Investigation of shale hydraulic fracturing propagation laws based on extended finite element analysis[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(5):177-188.
- [24] 雷治红.青海共和盆地干热岩储层特征及压裂试验模型研究[D].长春:吉林大学,2020. LEI Zhihong. Study on the characteristics of hot dry rock reservoir and fracturing test model in the Gonghe Basin, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [25] 周舟,金衍,曾义金,等.青海共和盆地干热岩地热储层水力压裂物理模拟和裂缝起裂与扩展形态研究[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2019,49(5):1425-1430. ZHOU Zhou, JIN Yan, ZENG Yijin, et al. Experimental study on hydraulic fracturing physics simulation, crack initiation and propagation in hot dry rock geothermal reservoir in Gonghe basin, Qinghai[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(5):1425-1430.
- [26] 王洪,王成虎,高桂云,等.青海共和盆地地应力状态与断层稳定性分析[J].*震灾防御技术*,2021,16(1):123-133. WANG Hong, WANG Chenghu, GAO Guiyun, et al. The state of the in-situ stress and fault slide evaluation of Gonghe basin, Qinghai province[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2021, 16(1):123-133.
- [27] 陈东方,杨跃辉,牛兆轩,等.共和盆地干热岩GR2井现今地应力特征及断层稳定性分析[J].*中国地质*.(2023-11-21)[2024-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20231120.1237.006.html>. CHEN Dongfang, YANG Yuehui, NIU Zhaoxuan, et al. In-situ stress characteristics and fault stability analysis of hot dry rock GR2 well in Gonghe Basin[J]. *Geology in China*. (2023-11-21) [2024-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20231120.1237.006.html>.
- [28] Hubbert M K, Willis D G. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. *Transactions of the AIME*, 1957, 210(1):153-168.
- [29] 张卫强.岩石热损伤微观机制与宏观物理力学性质演变特征研究——以典型岩石为例[D].徐州:中国矿业大学,2017. ZHANG Weiqiang. Study on the microscopic mechanism of rock thermal damage and the evolution characteristics of macroscopic physical and mechanical properties—Taking typical rock as an example[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [30] 周总瑛,刘世良,刘金侠.中国地热资源特点与发展对策[J].*自然资源学报*,2015,30(7):1210-1221. ZHOU Zongying, LIU Shiliang, LIU Jinxia. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(7):1210-1221.
- [31] 蔺文静,刘志明,王婉丽,等.中国地热资源及其潜力评估[J].*中国地质*,2013,40(1):312-321. LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1):312-321.