

谭治宇,付国强,白天宇,等.兴化碳酸盐岩热储水力裂缝起裂扩展规律研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6): 687-695.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250158

TAN Zhiyu,FU Guoqiang,BAI Tianyu,et al.Crack initiation and propagation law of thermal reservoir hydraulic fractures in Xinghua carbonate rock[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(6): 687-695. DOI: 10.11956/j. issn. 1008-0562.20250158

兴化碳酸盐岩热储水力裂缝起裂扩展规律研究

谭治宇¹, 付国强^{1*}, 白天宇², 肖凡¹, 吴晓格¹

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中油国际管道公司 中国石油天然气集团有限公司, 北京 102206)

摘 要: 为揭示在热-流-固-损 (THMD) 多场耦合作用下, 增强型地热系统 (EGS) 中碳酸盐岩型热储水力压裂机制与扩展规律, 选取江苏省兴化地区碳酸盐岩为研究对象, 通过室内岩石物理力学实验获取其关键参数。以此为基础, 构建多场耦合数值模型, 开展高温高压真三轴水力压裂实验, 验证模型的有效性, 并利用该模型进行参数的敏感性分析。研究结果表明: 高温显著降低岩石破裂压力, 并促进裂缝萌生与扩展; 增大围压可抑制裂缝延伸, 但引起破裂压力激增; 减小水平应力差有利于复杂缝网的形成; 高注入流速可使主裂缝长度增加, 但易引发破裂压力骤升。研究结论为兴化地区压裂参数优化及干热岩开发提供依据。

关键词: 干热岩; 碳酸盐岩; 水力压裂; 岩石损伤; 热-流-固-损耦合

中图分类号: P634.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)06-0687-09

Crack initiation and propagation law of thermal reservoir hydraulic fractures in Xinghua carbonate rock

TAN Zhiyu¹, FU Guoqiang^{1*}, BAI Tianyu², XIAO Fan¹, WU Xiaoge¹

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Sino-Pipeline International, China National Petroleum Corporation, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to reveal the hydraulic fracturing mechanism and expansion law of carbonate reservoir in enhanced geothermal system (EGS) under the multi-field coupling of thermo-hydro-mechanical-damage (THMD), the carbonate rock in Xinghua area of Jiangsu Province was selected as the research object, and its key parameters were obtained through indoor rock physical and mechanical experiments. Based on this, a multi-field coupling numerical model was constructed, and a high-temperature and high-pressure true triaxial hydraulic fracturing experiment was carried out to verify the validity of the model, and the sensitivity analysis of parameters was carried out by using the model. The results show that high temperature significantly reduces rock fracture pressure and promotes crack initiation and propagation. Increasing confining pressure can inhibit crack extension, but cause a sharp increase in fracture pressure. Reducing the horizontal stress difference is beneficial to the formation of complex fracture network. The high injection flow rate can increase the length of the main fracture, but it is easy to cause the burst pressure to rise sharply. The research conclusions provide a basis for the optimization of fracturing parameters and the development of hot dry rock in Xinghua area.

Keywords: hot dry rock; carbonate rock; hydraulic fracture; rock damage; THMD coupling

收稿日期: 2025-04-13 修回日期: 2025-06-21 接受日期: 2025-06-30 责任编辑: 焦丽

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目 (BE2022034); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2024-10951); 江苏省研究生科研实践创新专项计划 (KYCX24_2840); 中国矿业大学研究生科研创新计划 (2024WLKXJ006)

作者简介: 谭治宇 (2000-) 男, 辽宁 阜新人, 博士研究生, 主要从事干热岩开发、高温岩石力学方面的研究。E-mail: tzy20000721@126.com

通信作者: 付国强 (1968-) 男, 安徽 池州人, 博士, 教授, 主要从事地球探测与信息技术、地热学方面的研究。E-mail: fgq_6666@yeah.net

0 引言

随着传统化石能源储量日益减少及环境污染问题加剧,能源结构的转型优化迫在眉睫。干热岩(hot dry rock, HDR)作为一种新兴的清洁可再生能源,因其储量大、分布广泛、产能高效稳定等优势备受关注^[1-3]。干热岩埋藏在地下,距地面3~5 km,其基岩具有硬度大、孔隙度低、渗透条件差等特征,需要通过人工压裂构建高导流缝网以提升热储层的渗透性,形成稳定的流体循环通道,这种方法被称为增强型地热系统(enhanced geothermal system, EGS)。目前水力压裂作为主要的干热岩储层改造手段,在实际EGS工程中受高地温与复杂应力条件影响,存在裂缝起裂压力难以预测、裂缝形态不可控、连通性差及滤失严重等问题,上述问题显著制约了干热岩资源的高效开发^[4-6]。因此,揭示多场耦合作用下干热岩水力裂缝起裂与扩展机制十分必要。

近年来,学者通过室内实验与数值模拟相结合的方法研究了干热岩的水力压裂行为。在实验研究方面,主要通过三轴水力压裂实验,模拟地热储层原位条件,对岩石样品进行压裂。周舟等^[7]利用高温高压的真三轴水力压裂系统,对青海共和花岗岩样品开展高温压条件下水力压裂实验,建立了共和盆地花岗岩破裂压力预测模型。LI等^[8]对花岗岩样品开展高温高压真三轴水力压裂实验,揭示温度场对花岗岩裂缝形态及应力响应特征的影响规律。ZHANG等^[9]对湖北花岗岩样品开展常规三轴压裂实验,定量分析了围压与注入速率对岩石破裂压力的耦合作用。在数值模拟方面,采用离散元、有限元及相场法等算法,对不同尺度的裂缝演化与多场耦合响应特征开展研究。CHENG等^[10]使用PFC软件,建立高温高压水力压裂模型,并与实验结果比对,探究温度、围压对青海共和盆地干热岩水力压裂的影响。郭茂生等^[11]对ABAQUS软件进行二次开发,研究基质的弹性模量、抗拉强度及压裂液排量等主要因素对水力裂缝长度和宽度的影响规律。戴一凡等^[12]基于相场法建立热-流-固耦合的干热岩水力压裂模型,阐明了热应力对裂缝起裂模式的影响机理。

现有研究多聚焦花岗岩储层,然而,随着国内干热岩勘探工作的持续推进,在河北雄县、江苏兴化等地区相继发现碳酸盐岩型高温热储(如苏热1井探获超150℃碳酸盐岩体)^[13-14]。由于形成原因和赋存环境的不同,沉积岩与花岗岩存在显著差异,以往基于花岗岩的研究成果与经验难以

以直接应用。现有数值模型普遍存在热储物理力学参数经验化取值问题,影响模型的准确度。上述问题亟待通过系统性的实验与数值模拟研究予以解决。

因此,本研究选取江苏兴化地热远景区的白云岩为研究对象,通过开展岩石物理力学测试与矿物组分分析,获取热储关键参数。基于细观损伤力学、Biot渗流理论以及弹性热力学等,建立热-流-固-损(thermo-hydro-mechanical-damage, THMD)多场耦合水力压裂模型,结合高温真三轴水力压裂实验进行模型验证。以此为基础,研究温度、地应力及注入参数对碳酸盐岩型干热岩裂缝起裂压力、扩展路径及形态特征的影响机制,以期对碳酸盐型热储的高效开发提供理论支撑。

1 数值模型

1.1 模型假设

模型基本假设^[15-17]如下:碳酸盐岩材料是连续且各向异性的多孔介质;岩石的力学响应遵循连续介质损伤理论,受最大拉应力准则和莫尔-库仑准则控制;裂缝内的水渗流遵循达西定律,而水与岩石基质之间的热传递遵循局部热平衡假设,并服从傅里叶方程;岩石处于饱水状态;不考虑液态水的相变,且忽略水与岩石之间的化学反应。

1.2 模型控制方程

结合局部热平衡方程,同时考虑热对流以及应变能,则温度场控制方程^[15]为

$$\begin{aligned} & [\rho_s C_s (1-\phi) + \rho_l C_l \phi] \frac{\partial T}{\partial t} + (T+T_0) K' \alpha_T \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \\ & \rho_l C_l (T+T_0) \frac{k}{\mu} \nabla p = \lambda_M \nabla^2 T, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ρ_s 和 ρ_l 分别为岩石和水的密度; C_s 和 C_l 分别为岩石和水的比热容; ϕ 为岩石的孔隙度; T 为温度; T_0 为岩石初始状态下的温度; t 为时间; K' 为多孔介质的排水体积模量; α_T 为岩石的热膨胀系数; ε_T 为体积应变; k 为渗透率; μ 为水的动力黏度; ∇p 为压力梯度; λ_M 为导热系数。

渗流场的控制方程^[16]为

$$e_1 \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} - e_2 \frac{\partial T}{\partial t} + e_3 \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho_l g \nabla z) \right], \quad (2)$$

式中: $e_1 = \frac{K'}{K_s} - 1$, $e_2 = \phi \alpha_l + (1-\phi) \alpha_s - \frac{\alpha_T K'}{K_s}$, $e_3 = \frac{\phi}{\beta_l} + \frac{1-\phi}{K_s}$; K_s 为岩石固体部分的体积模量; α_l 、 α_s 和 α_T 分别为水、岩石固体部分和岩石的体积热

膨胀系数; ρ_L 为流体密度; β_L 为流体的体积模量; z 为垂直方向的坐标。

考虑有效应力和热应力的本构关系, 应力场的控制方程^[17]为

$$Gu_{i,jj} + (\lambda + G)u_{j,ji} - \alpha p_{,i} - K'\alpha_T T_{,i} + F_i = 0, \quad (3)$$

式中: G 为剪切模量; λ 为拉梅常数; $-\alpha p_{,i}$ 为水压作用项, 其中 $p_{,i}$ 表示孔隙流体压力 p 沿 i 方向的一阶偏导数; α 为 Biot 系数; $-K'\alpha_T T_{,i}$ 为热应力项, 其中 $T_{,i}$ 表示温度 T 沿 i 方向的一阶偏导数; F 为体积力; F_i 和 u_i 分别为体积力和位移在 i 方向 ($i=x,y,z$) 的分量; $u_{i,jj}$ 为 u_i 关于空间坐标的二次偏导数之和; $u_{j,ji}$ 整体为体积应变 (膨胀量) 在 i 方向上的空间梯度。

1.3 岩石参数赋值方法

岩石由多种矿物、水和孔隙等构成, 在外部载荷作用下, 岩石的不均匀性对其破坏过程产生重大影响。为表征岩石的非均质特性, 认为构成岩石的细粒单元的性质遵循 Weibull 分布^[18], 其概率密度函数表示为

$$f(\omega) = \frac{m}{\omega_0} \left(\omega/\omega_0 \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\omega/\omega_0 \right)^m \right], \quad (4)$$

式中: ω 为满足该分布的物理力学参数 (如抗压强度、弹性模量等); m 为反映岩石均质程度的均质性系数, 表征岩石内部非均质性的程度; ω_0 为与岩石参数的平均值相关的特征参数。

1.4 弹脆性损伤本构模型及损伤系数计算

当应力条件满足最大拉应力准则 ($F_1 \geq 0$) 或 Mollcullen 准则 ($F_2 \geq 0$) 时, 应优先判断拉伸破坏是否发生, 其中, F_1 、 F_2 表示应力状态的函数^[19]。

岩石在受力过程中表现出拉伸/剪切破坏特性, F_1 、 F_2 可分别表示为

$$F_1 = \sigma_H - f_{t0}, \quad (5)$$

$$F_2 = -\sigma_h + \sigma_H \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - f_{c0}, \quad (6)$$

式中: σ_H 、 σ_h 分别为最大、最小水平主应力; φ 为岩石的内摩擦角; f_{t0} 与 f_{c0} 分别为岩石的单轴抗拉强度和单轴抗压强度。

损伤变量 D ^[20] 可表示为

$$D = \begin{cases} 0 & F_1 < 0 \text{ 且 } F_2 < 0 \\ 1 - \left| \varepsilon_{t0}/\varepsilon_H \right|^n & F_1 = 0 \text{ 且 } dF_1 > 0, \\ 1 - \left| \varepsilon_{c0}/\varepsilon_h \right|^n & F_2 = 0 \text{ 且 } dF_2 > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: ε_{t0} 和 ε_{c0} 分别为拉伸和剪切损伤过程中的最大拉伸应变和最大压缩应变; ε_H 和 ε_h 分别为最大、最小主应变; n 为本构系数。

1.5 损伤对参数的影响

根据弹性损伤理论, 单元的弹性模量随着损伤的发展单调退化, 损伤材料的弹性模量^[21]为

$$E = (1 - D)E_0, \quad (8)$$

式中, E_0 为岩石未受损伤时的弹性模量。

损伤对渗透率的影响^[22]可表示为

$$k = k_0 \left(\phi/\phi_0 \right)^3 e^{\alpha_k D}, \quad (9)$$

式中: k_0 为岩石初始渗透率; α_k 为岩石损伤程度对渗透率的影响系数; ϕ_0 为岩石初始孔隙度。

损伤对岩石热导率的影响^[19]可表示为

$$\lambda_s(T, D) = \lambda_s(T) \exp(D/\alpha_{DT}), \quad (10)$$

式中: λ_s 为岩石固体部分的热导率; α_{DT} 为损伤对岩石导热系数的影响系数。

1.6 热-流-固-损伤场耦合关系

干热岩的水力压裂过程中, 在注入压力与热应力的作用下, 岩石发生损伤, 产生新裂缝。此过程将引起温度场、应力场和渗流场的动态变化, 且各物理场之间存在相互影响。

当低温压裂液注入高温岩石时, 产生的热应力导致热损伤, 产生的热损失会改变岩石的热物性参数。此外, 高温环境下, 水黏度的降低会直接影响裂缝内的流体流动特性。低温压裂液在渗流过程中与高温岩石基质发生热交换, 引起温度变化。持续的渗流作用导致裂缝特征、孔隙度及渗透率发生改变。新生裂缝的产生引起岩石物理力学参数变化, 包括渗透率、抗拉强度、断裂韧性、热导率等。各物理场之间的相互作用关系见图1。

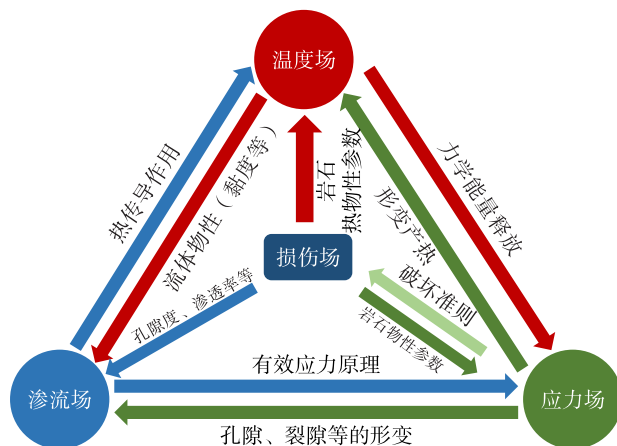


图1 多物理场耦合关系

Fig.1 multi-physics field coupling relationships

2 模型参数获取与模型验证

2.1 模型参数获取

实验样品为寒武系观音台组露头块体岩样, 采

集自江苏兴化地区,外观呈灰白色,肉眼很难区分其灰岩和白云岩组分。为确保实验数据的准确性与可重复性,所有岩样在实验前均经过预处理。

选取岩样时,避开风化层与显著原生裂缝发育区域,以保证岩样的代表性与均质性。将天然

露头样品切割、抛光,加工成标准尺寸的立方体(100 mm×100 mm×100 mm)和圆柱体($\Phi 50$ mm×100 mm 及 $\Phi 25$ mm×50 mm)。采用砂轮磨平两端面,控制端面平整度误差在±0.02 mm 以内。碳酸盐岩样品见图2。



图2 碳酸盐岩样品

Fig.2 carbonate specimens

在立方体试样的端面中心钻取直径为15 mm、深为60 mm的井眼,使用环氧树脂胶水进行固井处理。其中,立方体试样用于真三轴水力压裂实验,圆柱体标准岩心用于测试岩石物理力学参数。加工完成后,将圆柱体标准岩心放置在60℃的干燥箱中,烘干6 h,去除样品孔隙内残余水分。将经干燥处理的圆柱体标准岩心冷却至室温,测量

其尺寸和质量,计算其密度。

对圆柱体标准岩心进行单轴压缩实验、巴西劈裂实验,以及孔隙度、渗透率与X射线衍射测试,获得碳酸盐岩岩样的矿物组成和物理力学参数。每类实验均采用3组样品重复测试,取其平均值作为最终参数。特性测试设备见图3,实验结果见表1。

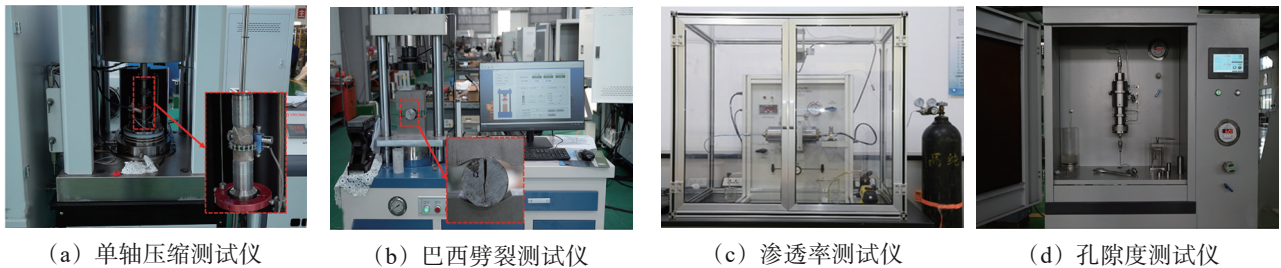


图3 物理力学特性测试仪器

Fig.3 physical and mechanical properties testing instrument

表 1 样品的物理力学参数测试结果

Tab.1 testing results of physics-mechanical parameters of rock specimen

岩芯编号	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻⁴ ·mD)	抗压强度/MPa	泊松比	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
1	2.788	4.5	4.479	195.261	0.231	32.24	
2	2.799	5.9	5.068	180.324	0.224	39.90	
3	2.791	4.7	6.618	187.032	0.247	41.86	
4	2.770						9.278
5	2.769						8.412
6	2.792						11.045

所选岩样的矿物组成比较单一,白云石、方解石和石英的质量分数分别为60.2%、39.3%和0.5%。白云石和方解石属脆性矿物,平均杨氏模量为40.69 GPa,表明岩石呈显著的高脆性特征。由表1可得,试样岩石的平均密度为2.785 g/cm³,表明基

质较为致密;平均孔隙度为5.03%,平均渗透率为5.39×10⁻⁴ mD,均处于较低水平,表明岩石内部孔隙少、排列紧密,不易被流体渗透;岩石的平均抗压强度与平均抗拉强度分别为187.539 MPa和9.578 MPa,表明岩石的强度较高。

2.2 模型建立

由于构建三维模型所需的计算单元数量过大, 为简化计算过程、提高运算效率, 选取三维模型的横截面, 构建二维数值模型, 见图 4 (a)。横截面为边长 0.1 m 的正方形, 外部载荷见图 4 (b)。模型采用自由三角形网格划分, 除圆形孔洞外, 方形域的最大单元尺寸为 0.003 m、最小单元格尺寸为 0.000 4 m。网格包含 47 656 个单元、488 个边界单元和 8 个顶点单元。基于所开展的物理力学实验及相关资料^[23-24]进行模型的参数设置, 具体见表 2。

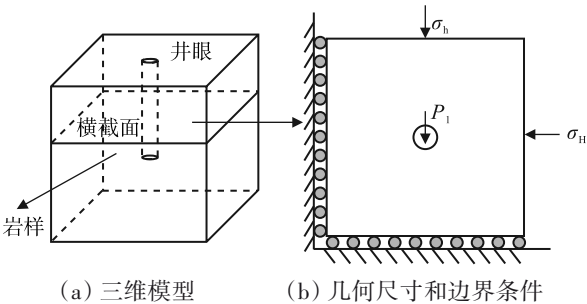


图 4 模型示意
Fig.4 schematic of the model

表 2 模型参数设置 Tab.2 model parameter settings			
参数	取值	参数	取值
密度/(kg·m ⁻³)	2 768	单轴抗压强度/MPa	187.539
杨氏模量/GPa	38	孔隙度	0.050 3
泊松比	0.23	初始渗透率/(10 ⁻³ ·mD)	0.539
单轴抗拉强度/MPa	9.578	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	820
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	4.62	热膨胀系数/K ⁻¹	2.4×10 ⁻⁶

2.3 模型验证

本研究使用中国矿业大学自主研制的高温高压水力压裂-渗流一体化系统, 见图 5。

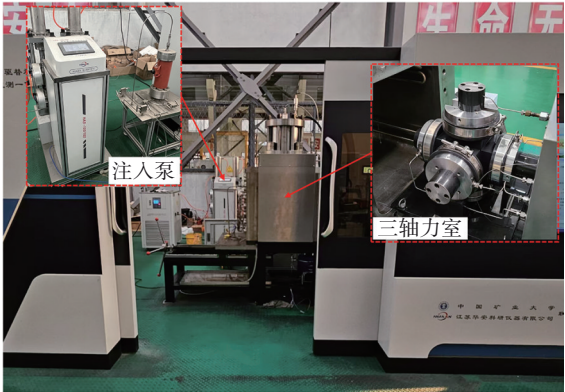


图 5 高温压水力压裂模拟设备
Fig.5 experiment equipment of high-temperature and high-pressure hydraulic fracturing

该系统具备温度、三轴应力与注入流量的自动控制与实时监测能力, 可实现恒流速或恒压条件下注入压裂液。设备配备独立控温系统, 温控范围为室温至 150 ℃, 控温精度为±1.0 ℃, 轴向与围压加载系统最大承压可达 100 MPa, 加载速率可调, 控压精度分别为±0.2 MPa和±0.1 MPa。注入系统采用高精度恒流泵, 注入流速为 1~100 mL/min, 控流精度为±1.5%。整个加载过程实时采集温度、压力、位移与流量数据, 其中注入压力每 0.5 s 采集一次, 确保实验过程中各参数稳定可控。

根据 ZHOU 等^[25]和 CHENG 等^[10]的研究方法, 实验中将三轴应力设置为 5 MPa-10 MPa-15 MPa。实验时, 以 0.5 MPa/s 的速率施加围压与轴压, 达到预设压力值后, 以 5 ℃/min 的速率将立方体岩心缓慢加热至 200 ℃, 保温 2 h, 继而开展水力压裂模拟实验。

模拟与实验设置相同参数, 模拟运算终止条件为损伤单元完全贯穿模型。由实验值和模拟值得到的注入压力曲线和压裂后的裂缝形态, 分别见图 6 和图 7。

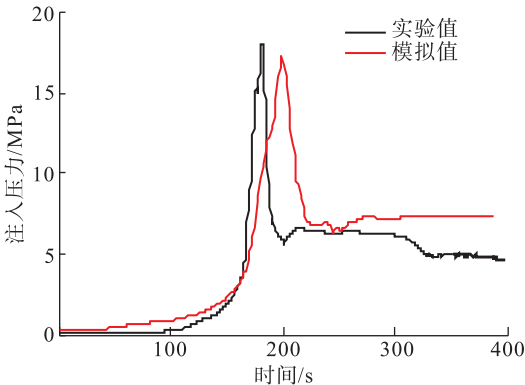


图 6 注入压力的实验值与模拟值
Fig.6 experimental and simulated values of injection pressure

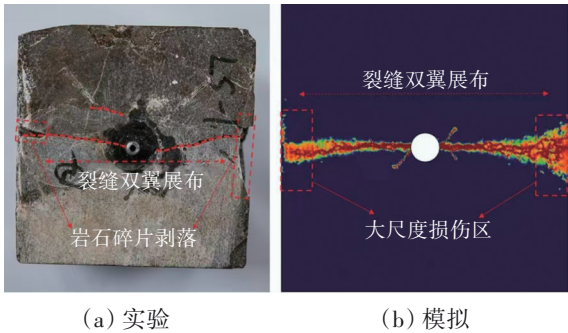


图 7 裂缝形态的实验结果与模拟结果
Fig.7 experimental results and simulation results of fracture morphology

由图 6 可见, 实验中岩石压裂过程包含流体注入阶段、压力保阶段、压裂阶段和稳定渗流阶段,

而数值模拟不存在实验中的“注入阶段”，因此压力变化不体现流体注入阶段。在恒定注入流速下，井筒压力迅速上升，岩石压裂后压力迅速降低。破裂压力实验值为 18.08 MPa，模拟值为 17.325 MPa，相对误差为 4.17%。

由图 7 (a) 可见，实验后样品的裂缝呈类似双翼型扩展至岩心边界，主裂缝有轻微偏转并伴有孤立分支裂缝，裂缝尖端局部损伤严重，有岩石碎片剥落现象。由图 7 (b) 可见，裂缝水平延伸至边界，井筒附近有少量次生裂缝，模型边缘出现大面积损伤区。破裂压力值和裂缝几何形态的实验结果与数值模拟结果基本一致，验证了数值模型的可靠性。

3 工程参数敏感性分析

为明确各种因素对碳酸盐岩水力压裂过程的影响，采用控制变量法对已验证的多物理场耦合

模型开展以下研究：①假设水注入高温岩石后相态保持液态，通过改变岩石温度调整水和岩石之间的温差，探究岩石基质与压裂液间温差对裂缝扩展和裂缝破裂压力的影响；②改变应力大小与水平方向应力差，分析不同地应力条件对裂缝起裂、扩展的影响；③分析恒温、恒围压条件下，不同流速的水力压裂对岩石裂缝起裂压力和裂缝长度的影响。

3.1 温度差的影响

为评估温度场对碳酸盐岩热储压裂行为的影响，基于兴化地区已有干热岩钻井实测数据，设置 25 °C 至 300 °C 多组温度工况进行数值模拟。模拟中通过改变注入液体的温度，改变岩石基质与压裂液之间的温度差，将岩石温度分别设置为 300 °C、200 °C、100 °C 及 25 °C (常温)。在不同温度下，岩石的主裂缝长度、最终裂缝形态 ($t=150$ s 时) 和对应的破裂压力见图 8。

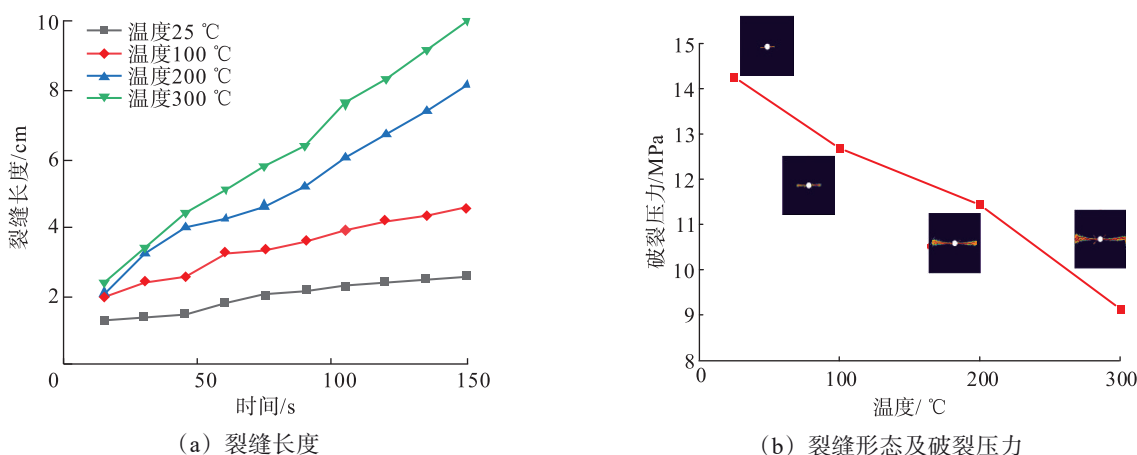


图8 不同温度下岩石的破裂压力与裂缝形态演化规律

Fig.8 breakdown pressure and fracture morphology evolution of rock under different temperatures

由图 8 可见，当低温压裂液注入时，在注入压力与热应力的协同作用下，岩石产生拉伸裂缝，并沿最大水平主应力方向起裂、扩展。随着压裂液与岩石基质间温差的增大，热应力逐渐增大，岩石矿物颗粒间不均匀膨胀程度显著增强，岩石的力学性质劣化，表现为裂缝扩展速率提升、主裂缝开度增大及分支裂缝发育。150 s 时，仅在 300 °C 条件下裂缝完全贯穿岩样，同时出现明显的二次分支裂缝。岩石破裂压力随温度升高呈显著降低趋势，由 25 °C 时的 14.25 MPa 降至 300 °C 时的 9.12 MPa，降幅达 36%。这是因为低温液体注入高温岩石时，温差引起热应力。温差越大，产生的热应力越大，热损伤更大。因此，在相同时间内，较高温差导致主裂缝长度和开度增加，且随着温

度升高，岩石破裂压力的降低，这可能与力学特性如抗拉强度等的劣化密切相关。

3.2 地应力条件的影响

地应力在 3 个主方向上的大小及差值均影响裂缝的起裂、扩展行为。随着埋藏深度的增加，HDR 储层的覆盖应力逐渐增大。为模拟不同埋深下碳酸盐岩热储在地应力场中的压裂响应行为，设置多组围压边界条件。目前，兴化地区尚无公开的地应力实测数据，因此参考 CHENG 等^[10]、ZHANG 等^[15]的研究成果，将围压分别设置为 6 MPa/9 MPa、10 MPa/15 MPa、14 MPa/21 MPa 和 18 MPa/27 MPa，模拟最大、最小水平主应力的变化，结果见图 9。

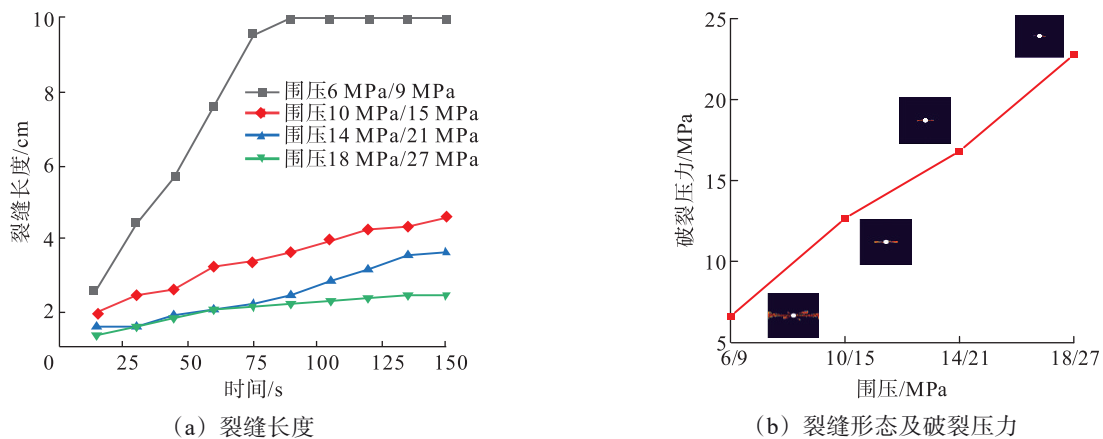


图9 不同围压下岩石的破裂压力与裂缝形态演化规律

Fig.9 breakdown pressure and fracture morphology evolution of rock under different confining pressures

由图9可见,在低围压工况下,裂缝快速扩展,90 s内,主裂缝完成岩石穿透,裂缝开度大,并伴生大量分支裂缝。围压升高至18 MPa/27 MPa,裂缝扩展速率显著降低,150 s时主裂缝仍未完全贯穿,但裂缝形态趋于简单化,呈线性扩展状态。破裂压力测试数据显示,围压水平与破裂压力呈显著正相关,由6 MPa/9 MPa下的6.63 MPa升至18 MPa/27 MPa时的22.79 MPa,增幅达243%,这是由于在高围压条件下,岩石被压实,预先存在的裂缝闭合,孔隙度和渗透率降低,力学特性如抗压强度、断裂韧性和抗拉强度等增强,流体渗流的阻力增大,流体在裂缝中的流动变得更加困难。

不同地质结构和埋藏深度影响原位地壳应力量级。ZHU等^[26]研究表明,中国不同区域的最大水平主应力与最小水平主应力之间存在显著差异,且随着埋藏深度的增加,差异逐渐减小。埋藏深度约4 km时,最大与最小主应力的比缩小至1.1~1.2,甚至接近1。而ZHOU等^[25]的研究则指出,浅层地壳中两者差异较小,随埋深增加,应力差反而呈增大趋势。可见,不同研究对应力差随深度变化的认识尚未统一。因此,设置3组最小、最大主应力的比值进行模拟,分别为1:1.0、1:1.2和1:1.5,模拟结果见图10。由图10可见,最小、最大主应力的比为1:1.0时,裂缝网络呈现多向扩展特征,发育多条长度相近的裂缝且无明显优势方向;最小、最大主应力的比为1:1.2时,形成双主裂缝系统并伴有少量微裂缝;最小、最大主应力的比为1:1.5时,裂缝系统简化为单一方向延伸的直线型主裂缝,微裂缝完全消失。此种裂缝形态的演化,与水平应力差引发的流体流动各向异性增强密切相关。较大应力差强化了最大

主应力方向的渗流优势,抑制了其他方向裂缝的发育。研究结果表明,在EGS工程中,较小的水平应力差更有利于形成复杂缝网结构。

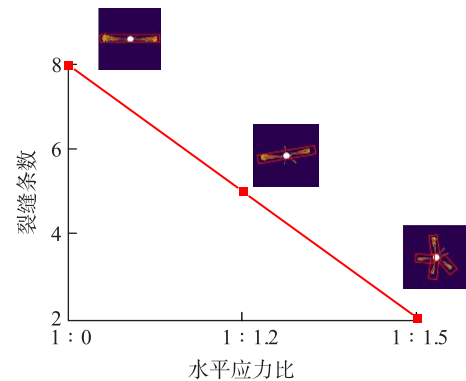


图10 不同水平应力比下岩石的裂缝形态

Fig.10 fracture morphology of rock under different horizontal stress ratios

3.3 注入流速的影响

在EGS工程的压裂工艺设计中,注入流速控制是关键因素,因此研究注入流速对干热岩裂缝扩展行为的影响尤为重要。本研究所用模型的几何尺寸远小于实际地层(模型边长仅为0.1 m,井筒直径为15 mm),模拟中注入参数按比例进行缩减。结合相关实验和模拟研究^[8,25],设置注入流速为15~30 mL/min。不同注入流速下岩石的破裂压力与裂缝形态演化规律见图11。由图11可见,裂缝扩展规模与注入流速显著正相关。主裂缝长度由15 mL/min时的4.58 cm增至30 mL/min时的9.52 cm,增幅为107.86%。高注入流速能有效提升储层改造效果,破裂压力由12.68 MPa上升至22.21 MPa,增幅为75.16%。这是因为高注入流速引起短时流体过载效应,在岩石渗流通道未充分扩展阶段即形成高压环境。高注入流速可使裂缝

长度和开度显著增加,较大的裂缝压力也表明,水力裂缝形成过程会释放更多能量,因此存在引

发诱发地震的风险。在实际工程的注入参数设计中,应注意在改造效果与工程安全间取得平衡。

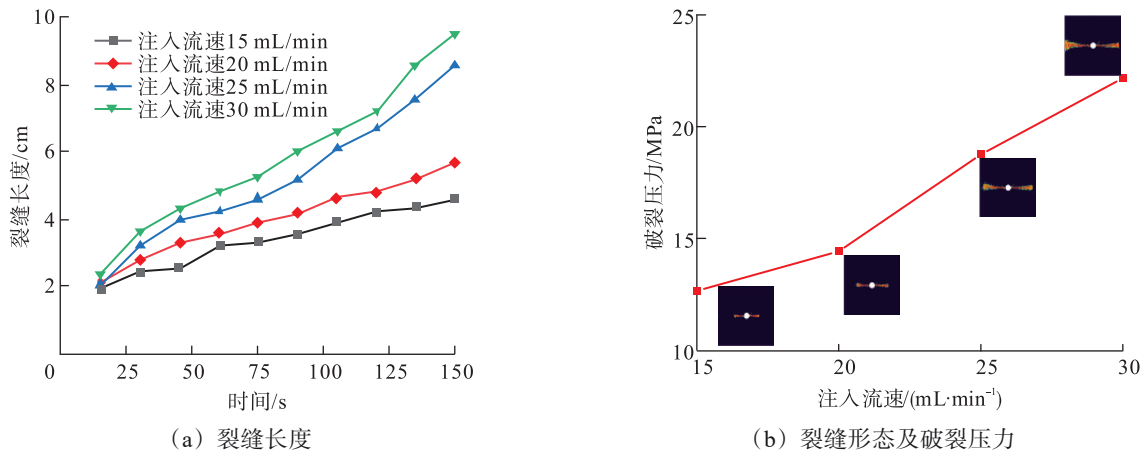


图 11 不同注入流速下岩石的破裂压力与裂缝形态演化规律

Fig.11 breakdown pressure and fracture morphology evolution of rock under different injection flow rates

4 结论

本研究探究了热-流-固-损 (THMD) 多场耦合作用下,兴化碳酸盐岩热储的水力压裂响应机制,明确了碳酸盐岩型干热岩的裂缝起裂特征,从机理层面为 EGS 工程实践提供多维度决策依据。

(1) 温度场与地应力场对破裂压力的影响存在显著的拮抗作用。高温通过热损伤效应显著劣化岩石力学性能,使破裂压力降低 36%,从而降低压裂难度;高围压的压实效应大幅提升岩石的强度和渗透阻力,使破裂压力激增。这表明,在深层 EGS 开发中,压裂方案设计须综合评估地温梯度与地应力场的协同或对抗效应,精准预测压裂的经济性与技术可行性。

(2) 地应力各向异性是控制水力裂缝网络形态的关键因素。水平应力差较小时,裂缝系统呈多向扩展,形成复杂高导流的缝网结构,有助于实现高效热交换。水平应力差增大时,裂缝趋于线性延伸,导致改造效果受限。因此,在 EGS 项目的前期勘探阶段,应将“低地应力、小水平应力差”作为优先考虑的地质指标,以平衡储层改造效果与施工难度。

(3) 高注入流速是提升储层改造规模的有效手段,但会导致破裂压力陡升。因此,在实际工程中,须选择最优的注入速率阈值,使改造效果最大化与地质稳定性相平衡。

未来研究可进一步探讨天然裂缝等因素和对裂缝路径的影响,以及长期热循环作用下裂缝导流能力的演化规律,以支撑干热岩资源的高效可持续开发。

参考文献(References):

- [1] 陆川,王贵玲.干热岩研究现状与展望[J].科技导报,2015,33(19): 13-21.
LU Chuan, WANG Guiling. Current status and prospect of hot dry rock research [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 13-21.
- [2] 李德威,王焰新.干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J].地球科学,2015,40(11):1858-1869.
LI Dewei, WANG Yanxin. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy [J]. Earth Science, 2015, 40(11): 1858-1869.
- [3] 邵保平,吴阳春,王帅,等.青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(1):69-83.
Xi Baoping, WU Yangchun, WANG Shuai, et al. Experimental study on mechanical properties of granite taken from Gonghe basin, Qinghai Province after high temperature thermal damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 69-83.
- [4] 王晓丽,宋韦剑,王鑫,等.全球干热岩勘探开发和综合利用专利技术发展趋势与启示[J].中国地质,2024,51(6):2111-2114.
WANG Xiaoli, SONG Weijian, WANG Xin, et al. The development trends and implications of global patent technologies for exploration, development and comprehensive utilization of hot dry rock [J]. Geology in China, 2024, 51(6): 2111-2114.
- [5] 许天福,胡子旭,李胜涛,等.增强型地热系统:国际研究进展与我国研究现状[J].地质学报,2018,92(9):1936-1947.
XU Tianfu, HU Zixu, LI Shengtao, et al. Enhanced geothermal system: international progresses and research status of China [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9): 1936-1947.
- [6] 李根生,武晓光,宋先知,等.干热岩地热能资源开采技术现状与挑战[J].石油科学通报,2022,7(3):343-364.
LI Gensheng, WU Xiaoguang, SONG Xianzhi, et al. Status and

- challenges of hot dry rock geothermal resource exploitation [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 7(3): 343-364.
- [7] 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.
- [8] LI N, ZHANG S C, WANG H B, et al. Effect of thermal shock on laboratory hydraulic fracturing in Laizhou granite: an experimental study[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 248: 107741.
- [9] ZHANG W C, XIE H P, LI M H. Influences of confining pressure and injection rate on breakdown pressure and permeability in granite hydraulic fracturing[J]. *Energy Science & Engineering*, 2023, 11(7): 2385-2394.
- [10] CHENG Y X, ZHANG Y J, YU Z W, et al. An investigation on hydraulic fracturing characteristics in granite geothermal reservoir [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 237: 107252.
- [11] 郭茂生,姬长发,刘宗鑫,等. 青海共和盆地干热岩热储层人工水力致裂裂缝扩展规律[J]. *西安科技大学学报*, 2023, 43(3): 514-522.
- GUO Maosheng, JI Changfa, LIU Zongxin, et al. Artificial hydraulic fracture propagation law of hot dry rock reservoir in Gonghe Basin, Qinghai Province [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2023, 43(3): 514-522.
- [12] 戴一凡,侯冰,廖志豪. 基于相场法的深层干热岩储层水力压裂模拟研究[J]. *石油钻探技术*, 2024, 52(2): 229-235.
- DAI Yifan, HOU Bing, LIAO Zhihao. Simulation of hydraulic fracturing in deep hot dry rock reservoir based on phase-field method [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(2): 229-235.
- [13] 庞忠和,孔彦龙,庞菊梅,等. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(11): 1224-1230.
- PANG Zhonghe, KONG Yanlong, PANG Jumei, et al. Geothermal resources and development in Xiongan New Area[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(11): 1224-1230.
- [14] 刘德民,张根袁,关俊朋,等. 苏北盆地干热岩地热资源前景分析[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1): 48-54.
- LIU Demin, ZHANG Genyuan, GUAN Junpeng, et al. Analysis of geothermal resources potential for hot dry rock in the Subei Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 48-54.
- [15] ZHANG W, GUO T K, QU Z Q, et al. Research of fracture initiation and propagation in HDR fracturing under thermal stress from meso-damage perspective[J]. *Energy*, 2019, 178: 508-521.
- [16] SUN Z X, ZHANG X, XU Y, et al. Numerical simulation of the heat extraction in EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model[J]. *Energy*, 2017, 120: 20-33.
- [17] GUO T K, TANG S J, LIU S, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing of hot dry rock under thermal stress[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 240: 107350.
- [18] 门晓溪,唐春安,马天辉. 水压致裂作用下岩体参数对裂纹扩展影响的数值模拟[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(5): 700-703.
- MEN Xiaoxi, TANG Chun'an, MA Tianhui. Numerical simulation on influence of rockmass parameters on fracture propagation during hydraulic fracturing [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(5): 700-703.
- [19] 周小夏,李根生,马正超,等. 干热岩柔性压裂裂缝起裂与扩展规律[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(6): 1384-1394.
- ZHOU Xiaoxia, LI Gensheng, MA Zhengchao, et al. Fracture initiation and propagation in soft hydraulic fracturing of hot dry rock [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(6): 1384-1394.
- [20] WEI C H, ZHU W C, YU Q L, et al. Numerical simulation of excavation damaged zone under coupled thermal-mechanical conditions with varying mechanical parameters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 75: 169-181.
- [21] ZHU W C, WEI C H, LIU J, et al. A model of coal-gas interaction under variable temperatures[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 86(2/3): 213-221.
- [22] 张旭,周小夏,黄中伟,等. 热流固-损伤多场耦合作用下干热岩水力压裂特征数值模拟[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(4): 86-94.
- ZHANG Xu, ZHOU Xiaoxia, HUANG Zhongwei, et al. Numerical simulation of hydraulic fracture characteristics in hot dry rock under thermal-hydraulic-mechanical-damage coupling effects[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2025, 49(4): 86-94.
- [23] MURRU A, FREIRE-LISTA D M, FORT R, et al. Evaluation of post-thermal shock effects in Carrara marble and Santa Caterina di Pittinuri limestone[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186: 1200-1211.
- [24] HOMUTH S, GÖTZ A E, SASS I. Lithofacies and depth dependency of thermo- and petrophysical rock parameters of the Upper Jurassic geothermal carbonate reservoirs of the Molasse Basin[J]. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft Für Geowissenschaften*, 2014, 165(3): 469-486.
- [25] ZHOU Z, JIN Y, ZENG Y J, et al. Investigation on fracture creation in hot dry rock geothermal formations of China during hydraulic fracturing[J]. *Renewable Energy*, 2020, 153: 301-313.
- [26] ZHU S B, SHI Y L. Origin of tectonic stresses in the Chinese continent and adjacent areas[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(1): 67-74.