

华北地区碳酸盐岩热储层酸化压裂模拟方法与应用

徐浩然,程镜如,赵志宏

清华大学土木工程系,北京,100084

内容提要:碳酸盐岩地层是我国华北地区最重要的热储岩层之一,不同次级构造单元的碳酸盐岩地热井产量和回灌量存在较大差异,严重制约了碳酸盐岩热储的规模化开发。酸化压裂是碳酸盐岩热储增产稳产的有效手段,其涉及溶质运移、酸岩反应、渗流传热、反应放热等一系列复杂过程。本文提出了一种模拟工程尺度碳酸盐岩热储酸化压裂过程的数值方法,可考虑碳酸盐岩热储酸化压裂过程中热、水、力、化四场之间的耦合作用。通过与前人试验和模拟结果的对比,验证了该方法的正确性,并建立了碳酸盐岩热储非均质裂隙模型,对其酸化压裂效果进行了模拟。

关键词:碳酸盐岩;热储;酸化压裂;多场耦合;数值模拟

华北平原地区是华北(中朝)克拉通的重要组成部分。以太行山东缘断裂、宁河-宝坻断裂为界,华北平原地区分为三大构造单元:西部为太行山隆起,北部为燕山褶皱带,其余部分为华北断坳(Gao Baozhu, 2005)。这一地区属于传导性控制的大地热流作用机制下形成的以中、低温热水型为主的地热资源区(Yao Zujin, 1995; Wang Guiling et al., 2017)。这一地区多年的勘探和开发经验显示,当地地热资源主要赋存于:明化镇组、馆陶组、奥陶系、寒武系、雾迷山组和高于庄组中的几个重点层位(Gao Zhijuan et al., 2014),其中碳酸盐岩裂隙型热储是主要的热储类型之一。碳酸盐岩裂隙型热储作为水热型地热开发利用的主要热储层,其资源量约占我国水热型地热资源总量的70%~80%,碳酸盐岩热储的规模化利用已成为包括华北地区在内,未来我国地热资源探测开发的重点方向(Wang et al., 2017; Wu et al., 2018)。在华北地区,由于不同次级构造单元的水文地质条件存在较大差异,不同地区裂隙型热储的单井产量和回灌量有明显差别,这一现象给产能预测和规模化开发带来了困难,严重制约了碳酸盐岩热储的开发进程。此外,对于更具开发潜力的深部地热系统,由于其渗透条件一般较

差,地热资源开发利用的关键在于储层激发技术的应用(Wang Guiling et al., 2015; Ma Feng et al., 2015)。工程经验表明,酸化压裂技术是碳酸盐岩热储储层激发的有效手段(Ma et al., 2007; Wang et al., 2010; Lu, 2013; Lin et al., 2018; He et al., 2019)。然而,目前对酸化压裂过程中碳酸盐岩热储响应机理与压裂效果的主要影响因素仍未认识清楚,尚无法对酸化压裂设计与施工进行科学有效的指导。

热储状态受控于渗透系数、释水系数、影响半径和弥散系数等多种水文地质参数,酸化压裂过程涉及应力场、温度场、渗流场、化学场复杂的多场耦合效应(Zhao Zhihong et al., 2019)。20世纪80年代初,国内外学者已开始采用数值模拟方法研究深部岩体热、水、力、化多场耦合效应,常用的数值模拟方法有限元、边界元、有限差分、有限体积等,代表性的多场耦合模拟程序有COMSOL、OpenGeoSys、TOUGH等,其中多数程序都可进行热、水、力、化四场的耦合模拟,并已应用于地热资源评价与开采方案优化设计(Taron et al., 2009; Lu, 2018)。但是,考虑碳酸盐岩热储酸化压裂过程中热、水、力、化多场耦合效应的研究并不多见。

注:本文为国家重点研发计划课题(编号 2019YFB1504103)资助的成果。

收稿日期:2020-05-11;改回日期:2020-05-27;网络发表日期:2020-06-08;责任编辑:邱楠生;责任编辑:周健。

作者简介:徐浩然,男,1994年生。博士研究生,岩石力学与地下工程专业。Email: xhr19@mails. tsinghua. edu. cn。通讯作者:赵志宏,男,1983年生。博士,副教授,岩石力学与地下工程专业。Email: zhzhao@tsinghua. edu. cn。

引用本文:徐浩然,程镜如,赵志宏. 2020. 华北地区碳酸盐岩热储层酸化压裂模拟方法与应用. 地质学报, 94(7): 2157~2165, doi: 10. 19762/j. cnki. dizhixuebao. 2020228.

Xu Haoran, Cheng Jinru, Zhao Zhihong. 2020. Numerical study and application of acid-fracturing in the carbonate geothermal reservoirs from North China. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2157~2165.

基于华北地区的水文地质和地热地质条件,从生产实际出发,本文提出了一种模拟碳酸盐岩热储酸化压裂过程的数值方法,可考虑碳酸盐岩热储酸化压裂过程中热、水、力、化四场之间的耦合作用。首先给出描述碳酸盐岩热储酸化压裂过程的控制方程与耦合关系,之后通过算例证明了本文建立的方法可以用于评价非均质碳酸盐岩热储酸化压裂效果。

1 数学模型

1.1 渗流模型

(1)裂隙渗流模型:修正的立方定律可以近似描述裂隙中的渗流过程(Brush et al., 2003),即将裂隙面简化为光滑平板,并用引入修正参数 $F_T = 0.00838N_{Re}$, 其中 N_{Re} 为雷诺数(Hanna et al., 1998; Pandey et al., 2017),则裂隙中质量守恒方程和达西定律为:

$$b\rho S_f \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (b\rho \mathbf{u}_f) = q_m \tag{1a}$$

$$\mathbf{u}_f = -\frac{b^2}{12\mu F_T} (\nabla p + \rho \mathbf{g}) \tag{1b}$$

式中: b 为裂隙开度, ρ 为流体密度, S_f 为裂隙储水系数, p 为流体压力, $\mathbf{u}_f$ 为裂隙中流体流速矢量, q_m 为裂隙与多孔介质之间的交换项。

(2)多孔介质渗流模型:多孔介质中质量守恒方程和达西定律表示为:

$$\rho S_r \frac{\partial p_r}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_r) = q_m - \rho \alpha_B \frac{\partial \epsilon_{sol}}{\partial t} \tag{2a}$$

$$\mathbf{u}_r = -\frac{k}{\mu} (\nabla p_r + \rho \mathbf{g}) \tag{2b}$$

式中: $\mathbf{u}_r$ 为多孔介质中由达西定律确定的流体流速矢量, k 为多孔渗透率, $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量, ϵ_{sol} 为多孔介质平均体积应变, S_r 为由 Biot 理论确定的多孔介质储水系数, α_B 为 Biot-Willis 系数。

$$S_r = \frac{\varphi}{K_f} + (\alpha_B - \varphi) \frac{1 - \alpha_B}{K_d} \tag{3}$$

式中: φ 为体孔隙率, K_f 为流体体积模量, K_d 为排水状态下多孔介质体积模量。

假设接触面上压力连续时 $p_r|_{z=-b/2} = p_r|_{z=b/2} = p_f$, 裂隙与多孔介质之间的质量交换表示为:

$$q_m = \rho(u_{rz}|_{z=-b/2} - u_{rz}|_{z=b/2}) \tag{4}$$

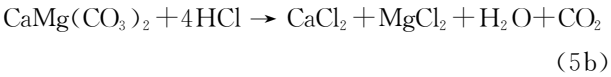
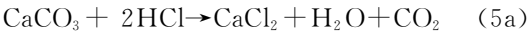
式中, $z = -b/2$ 和 $z = b/2$ 表示裂隙与多孔介质的接触面。

1.2 化学反应及传质模型

裂隙中酸液与岩石的反应分为三步: H^+ 从流

体内部运动到裂隙面上(传质过程); H^+ 与岩石发生化学反应(化学反应过程); 反应产物从固体界面运动到裂隙流体或孔隙流体中(传质过程)。

(1)酸岩反应化学计算。盐酸与碳酸盐岩的化学反应式为:



不考虑反应的可逆性,由式(5a)(5b)可知 1 mol 的盐酸可以溶解 0.5 mol 的石灰石或 0.25 mol 的白云石,因此可以计算给定摩尔浓度的酸液完全反应时可以溶解的岩石体积(此处以方解石含量几乎为 100 % 的石灰岩为例)。同理,在一定的化学反应速率下,可以计算单位时间内盐酸可以溶解的岩石体积。固体反应物充足时,酸岩化学反应速率一般表示为:

$$R_i^r = k_f C_i^{n_a} \tag{6a}$$

$$k_f = A_f e^{-\frac{E_a}{RT}} \tag{6b}$$

式中: R_i^r 为溶质 i 的反应速率, k_f 为反应速率常数,其单位与反应级数有关, C_i 为溶质 i 在孔隙中的浓度, n_a 为反应级数; k_f 由 Arrhenius 方程(6b)给出,其中 A_f 为 Arrhenius 常数可由实验测得,单位与 k_f 相同, E_a 为反应活化能, R 为摩尔气体常数, T 为绝对温度。化学反应速率随温度呈指数型增长,一般认为高温热储中酸岩化学反应过程远快于传质过程,因此裂隙中化学反应速率实际上是由传质速率决定的(Barron, 1962; Mumallah, 1991; Economides, et al., 2000)。本研究中,滤失到多孔介质中的酸岩反应速率可采用式(6a)近似计算,反应体积为孔隙体积。

(2)传质控制的酸岩反应速率。裂隙中传质控制的酸岩反应速率可以表示为:

$$R_f^{HCL} = k_g (\bar{C}_{HCL}^f - C_{HCL}^{wall}) + \eta \bar{C}_{HCL} q_m \tag{7}$$

式中: R_f^{HCL} 为裂隙中酸岩反应速率, $\bar{C}_{HCL}^f$ 为裂隙中盐酸的平均浓度, C_{HCL}^{wall} 为裂隙面上酸液浓度, η 为滤失的酸液参与裂隙面反应的比例,一般对于石灰岩 $\eta \ll 1$ (Dong et al., 2002) 且 $C_{HCL}^{wall} = 0$ (Mumallah, 1991; Economides et al., 2000; Dong et al., 2002), k_g 为传质系数。

稠化压裂液由于黏度相对较高,在裂隙中流动基本处于层流状态, k_g 可由下式计算(Navarrete et al., 2000)。

$$k_g = 0.33 \frac{D_{ef}^i}{b} N_{Re}^{0.5} N_{Sc}^{1/3} \quad (8a)$$

$$N_{Re} = \frac{\rho b u_f}{\mu} \quad N_{Sc} = \frac{\mu}{\rho D_{ef}^i} \quad (8b)$$

式中: D_{ef}^i 为溶质 i 在裂隙中的有效扩散系数, 裂隙中可以近似认为有效扩散系数等于扩散系数 $D_{ef}^i = D_F^i$, N_{Sc} 为 Schmidt 数。可以看出, 传质系数与流体的流动状态及裂隙的开度密切相关。

(3) 裂隙传质模型。压裂过程中流体流速较快, 裂隙中传质过程主要受流体流动和溶质扩散控制。

$$b \cdot \left[\frac{\partial (C_f^i)}{\partial t} + \mathbf{u}_f \cdot \nabla C_f^i \right] - \nabla \cdot (b D_{ef}^i \nabla C_f^i) = b \cdot R_f^i + (1 - \eta) S_i \quad (9)$$

式中: C_f^i 为溶质 i 在裂隙中的浓度, R_f^i 为溶质 i 在裂隙中的反应速率, S_i 为溶质 i 在裂隙与多孔介质之间的对流和扩散交换项。

(4) 多孔介质传质模型。多孔介质中考虑化学反应的传质过程质量守恒方程 (Rosner, 1986) 为:

$$C_i S_r \frac{\partial p_r}{\partial t} + \mathbf{u}_r \cdot \nabla C_i^r - \nabla \cdot (D_{\sigma}^i \nabla C_i^r) = R_i^r + (1 - \eta) S_i \quad (10a)$$

$$D_{\sigma}^i = \frac{\phi}{\phi^{-1/3}} D_F^i \quad (10b)$$

式中: C_i^r 为溶质 i 在多孔介质中的浓度, R_i^r 为溶质 i 在多孔介质中的反应速率, 反应体积为孔隙体积。 D_{σ}^i 为溶质 i 在多孔介质中的有效扩散系数, 由 Millington Quirk 模型 (10b) 近似确定, D_F^i 为溶质 i 的扩散系数。

溶质 i 在裂隙与多孔介质之间的对流和扩散交换项受流动和扩散过程控制。

$$S_i = \left(\mathbf{u}_{rz} \cdot \mathbf{C}_i^r - D_{\sigma}^i \frac{\partial C_i^r}{\partial z} \right)_{z=-b/2} - \left(\mathbf{u}_{rz} \cdot \mathbf{C}_i^r - D_{\sigma}^i \frac{\partial C_i^r}{\partial z} \right)_{z=b/2} \quad (11)$$

(5) 反应控制的裂隙开度变化模型。考虑通过扩散作用到达裂隙表面的盐酸均与岩石发生了化学反应, 而滤失到多孔介质中的酸液几乎不与裂隙面发生反应时, 化学反应导致的裂隙开度变化可以表示为 (Dong et al., 2002):

$$\frac{\partial b_c}{\partial t} = \frac{\beta}{\rho_r (1 - \phi)} (\eta q_m \bar{C}_{HCL}^- + 2k_g \bar{C}_{HCL}^-) \quad (12)$$

式中: b_c 为化学反应导致的裂隙开度变化, β 为每摩尔盐酸反应可溶解的岩石摩尔质量的倒数, ρ_r 为岩石密度。

1.3 传热模型

(1) 裂隙传热模型。裂隙中考虑反应热效应、对

流和热传导的能量守恒方程为:

$$b[\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}_f \rho C \cdot \nabla T] - \nabla \cdot (b \lambda \nabla T) = b Q_{chem}^f + \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} \quad (13a)$$

$$Q_{chem}^f = -R_f^i \cdot H \quad (13b)$$

式中: C 为流体热容, λ 为流体导热系数, Q_{chem}^f 为裂隙中化学反应导致的热量变化, H 为反应焓变, $\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}$ 为裂隙面与多孔介质的热交换。

(2) 多孔介质传热模型。多孔介质中考虑反应热效应、对流和热传导的能量守恒方程为:

$$(\rho_i C_i)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}_r \rho C \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) = Q_{chem}^r \quad (14a)$$

$$Q_{chem}^r = -R_i^r \cdot H \quad (14b)$$

$$(\rho_i C_i)_{eff} = \phi \rho C + (1 - \phi) \rho_r C_r \quad (14c)$$

$$\lambda_{eff} = \phi \lambda_f + (1 - \phi) \lambda_r \quad (14d)$$

式中: $(\rho_i C_i)_{eff}$ 为饱和多孔介质平均密度和平均热容的积, Q_{chem}^r 为岩石中化学反应导致的热量变化, λ_{eff} 为多孔介质平均导热系数, λ_r 为岩石导热系数。

裂隙与岩石间考虑渗流和传热的热交换为:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \left(\mathbf{u}_{rz} \rho C T - \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=-b/2} - \left(\mathbf{u}_{rz} \rho C T - \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=b/2} \quad (15)$$

1.4 力学模型

(1) 裂隙力学模型。裂隙力学模型考虑了裂隙在有效应力作用下的弹性形变。用线弹性模型描述裂隙面的弹性形变:

$$\sigma_n' = \sigma_n - p_f = k_n u_n \quad (16a)$$

$$\sigma_s = k_s u_s \quad (16b)$$

式中: σ_n' 为有效应力, σ 为应力, k 为刚度, u 为位移, 下标 s 和 n 分别表示切向和法向。此时, 考虑多场耦合的裂隙开度可以表示为:

$$b = b_0 + b_c + u_n \quad (17)$$

(2) 多孔介质力学模型。多孔介质中, 考虑热膨胀和有效应力的应力 (σ) 应变 (ϵ) 关系为:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_{kr} (\boldsymbol{\epsilon} - \epsilon_T \mathbf{I}) - \alpha_B p \mathbf{I} \quad (18a)$$

$$\epsilon_T = \alpha_T (T - T_{ref}) \quad (18b)$$

$$p = M (\epsilon_{vol} - \alpha_B \phi) \quad (18c)$$

式中: $\mathbf{C}_{kr}$ 为排水条件下的岩石弹性张量, $\mathbf{I}$ 为单位张量, ϵ_T 为热应变, α_T 为热膨胀系数, T_{ref} 为温度变化参考温度 (初始温度), M 为 Biot 模量 (是储水系数 S_r 的倒数), ϵ_{vol} 为多孔介质平均体积应变。由于岩石变形过程远快于渗流过程, 力学计算在准静态模式下进行 (不考虑惯性项)。

1.5 多场耦合关系

(1)TH 耦合:考虑对流并基于局部平衡方程建立了传热模型,考虑了酸液黏度随温度和酸液浓度的变化(Crowe et al. , 1981)

$$\log \mu = \log [a_1 + a_2(T)] + \exp \{ [a_3 + a_4(T) + a_5(C_{HCL})] \cdot t \} \quad (19)$$

式中: $a_1 = 59.567$, $a_2 = -0.700$, $a_3 = -2.080$, $a_4 = 0.026$, $a_5 = -0.021$ 为了简化计算,取 $t = 60min$ 时的黏度为全过程压裂液黏度。

(2)热力耦合:温度变化产生热应变,裂隙开度变化影响流速进而影响传热。

(3)热化耦合:裂隙和孔隙中酸岩反应速率均受温度影响。反应热参与热传导计算。

(4)水力耦合:流体流动与裂隙开度全耦合,流体流动与多孔介质应变全耦合。

(5)水化耦合:流体流动性质(流速、黏度等)的改变影响裂隙面化学反应速率,裂隙面化学反应导致开度和温度变化,进而影响流体流动。

(6)力化耦合:裂隙中传质控制的酸岩反应速率受开度影响,酸岩反应导致开度变化。

求解多物理场之间的相互作用,本质上就是对多物理场对应的偏微分方程组进行求解。本文基于有限元分析软件 COMSOL Multiphysics,用欧拉向后差分法对多场耦合条件下的偏微分方程进行求解。由于涉及的物理场较多,在三维空间内求解大型方程组存在难度,为了节约内存占用,在瞬态求解过程中采用“分离步”方法对每个物理场顺序进行单独求解,以实现多场耦合计算。

1.6 模型验证

采用 Dong et al. (1999, 2002)的实验与模拟结果验证本文提出的方法。模型为长×宽为 6.5 cm ×6.5 cm,厚度为 2.5 cm。酸液从下侧裂隙注入,注入端保持流量(10 ml/min)和酸液浓度(13.5 %)不变,连续注入 20 min。考虑如下三种工况:

(1)裂隙初始平均开度为 6.4×10^{-3} cm、标准差为 1×10^{-3} cm 时。Dong et al. (1999, 2002)的实验与模拟结果(图 1 a、b)显示,酸化后近入口处形成了一个宽而深的酸蚀裂隙,在靠近出口的地方形成了一个窄而浅的酸蚀裂隙,周边区域变化不明显。本文的模拟结果(图 1 c)与前人的实验和模拟结果一致性较好。

(2)裂隙初始平均开度为 1.7×10^{-3} cm、标准差为 1×10^{-3} cm 时。Dong et al. (1999, 2002)的实验与模拟结果(图 1 d、e)显示,虽然酸化前初始开度

相对较小,但酸化后开度变化仍然很明显,较深的酸蚀裂隙主要集中在裂隙面的左上部和中下部,右上部形成了一个相对较小的次级酸化裂隙。本文的模拟结果(图 1 f)与前人模拟和实验的规律基本一致,但右上部酸化裂隙的开度略有差异。

(3)裂隙初始平均开度为 6.4×10^{-3} cm、标准差为 3×10^{-3} cm 时。Dong et al. (1999, 2002)的实验与模拟结果(图 1 g、h)显示,随着标准差的增大,酸蚀裂隙的分布更加不均匀,为更明显的 Y 字形分布。本文的模拟结果(图 1 f)也呈现出这一规律。

可见,本文的模拟结果与前人模拟和实验结果有少量差异,但总体规律一致。此外与本文采用的有限元数值模拟方法以及相关的理论公式,均经过了前人的不同程度的验证和讨论(Guo Jianchun et al. , 2014; Pandey et al. , 2017; Fan et al. 2019),故该方法具有较高的可信性。

2 碳酸盐岩热储非均质裂隙酸化压裂模拟

酸化压裂技术是最为有效的地热资源开发增产措施之一,但由于不同地区储层的压力、温度、物性、地应力等条件各不相同,地热系统增产改造技术和机理需要在多场耦合条件下进行系统分析和科学评价。得益于计算机强大的数值计算能力,我们可以对压裂现场进行模拟分析,为施工技术的评价改善提供必要的技术手段,为理论和实验的补充验证提供必要的方法。

2.1 几何模型及网格划分

模型长(x)宽(y)均为 300 m,高(z)50 m;初始裂隙位于 $z=25$ m 处,平行于 xy 平面;压裂井段直径 20 cm 长度 15 m,为竖直井(图 2 a)。模型对井附近的裂隙区域进行了加密,共计 149714 个四面体单元,13888 个三角形单元(图 2 b)。

2.2 初始及边界条件

(1)热力、水力、力学和化学过程的初始条件和边界条件:模型初始温度为 80 ℃,未考虑储层内的温度差异。在酸化过程中,井底注入压裂液的温度保持恒定,进入储层后参与热交换。模型顶部和底部热绝缘,模型四周为温度开边界。模型初始孔隙压力为 29 MPa,模型四周为压力边界,压裂过程中压力保持为 29 MPa,顶部和底部边界无流动。井底为流量边界,流量为注水排量,压裂液沿裂隙与井的交线进入裂隙。模型底部为固定边界,在模型顶部施加竖直荷载 90 MPa,在 x、y 方向分别施加水平荷

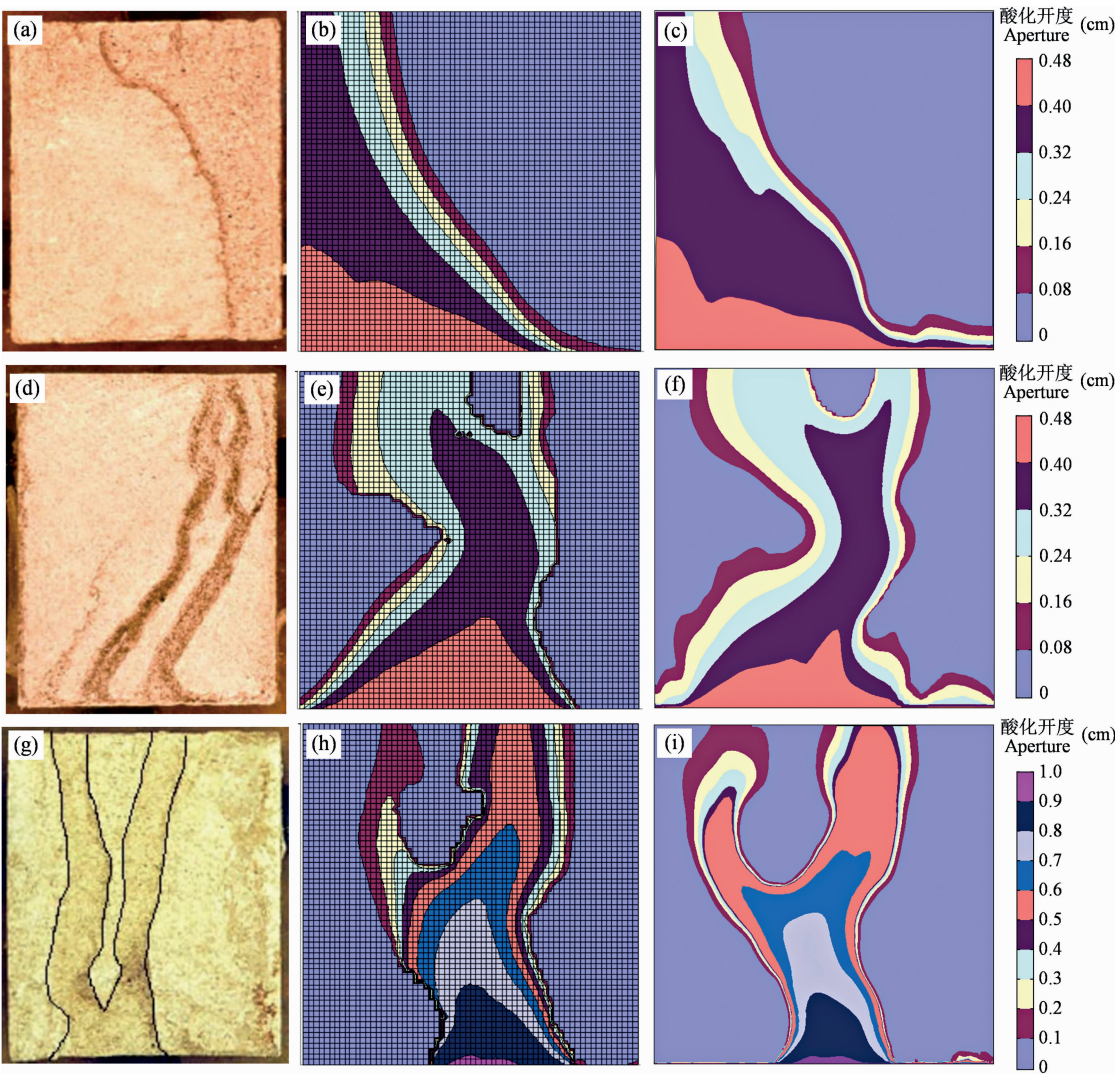


图 1 模拟结果与前人实验及模拟结果对比图(据 Dong et al. , 1999, 2002)
Fig. 1 Comparison of our simulation results with previous experiments and simulation results
(after Dong et al. , 1999, 2002)

(a)、(d)、(g)—Dong 等的实验结果;(b)、(e)、(h)—Dong 等模拟的不同初始开度分布情况下酸化开度的分布规律;
(c)、(f)、(i)—本文模拟的不同初始开度分布情况下酸化开度的分布规律

(a), (d), (g)—Experimental results of Dong et al. ; (b), (e), (h)—acid induced fracture aperture distribution with different initial aperture simulated by Dong et al. ; (c), (f), (i)—acid induced fracture aperture distribution with different initial aperture simulated by our model

载 40 MPa、50 MPa,用于表征深度 3000 m 左右的应力状态。假设压裂过程中井径不变。热储内初始酸浓度为 0,压裂过程中模型顶部和底部为溶质无通量边界,模型四周为溶质流出边界。

(2)裂隙初始开度:裂隙初始开度服从对数正态分布,均值为 1 mm,标准差为 0.25 mm。初始开度场的相关函数(Pandey et al. , 2017)为:

$$\rho(\xi,\zeta)=exp\left(-\left(\frac{\xi}{\lambda_x}\right)^2-\left(\frac{\zeta}{\lambda_y}\right)^2\right) \quad (20)$$

式中: ξ 和 ζ 分别为 x 和 y 方向上的间距, λ_x 和 λ_y 为 x 和 y 方向上的相关长度,模型两个方向上的相关

长度均为 15 m。

2.3 数值模拟结果

模型用 2.0 m²/min 的排量压裂 40 min 后将排量提高到 3.0 m²/min 和 4.0 m²/min 继续分别压裂 40 min,共计压裂 120 min。图 3 展示了排量和井底压力随时间的变化曲线。压裂过程中注入地层的压裂液初始温度为 20 ℃,浓度为 28 %,黏度由方程(19)给出。模型其他参数见表 1。

随着压裂的进行,裂隙开度不断增加,靠近井口的位置裂隙开度增加最为明显(图 4a~c),导致井底压力快速下降。受控于初始裂隙开度的空间分

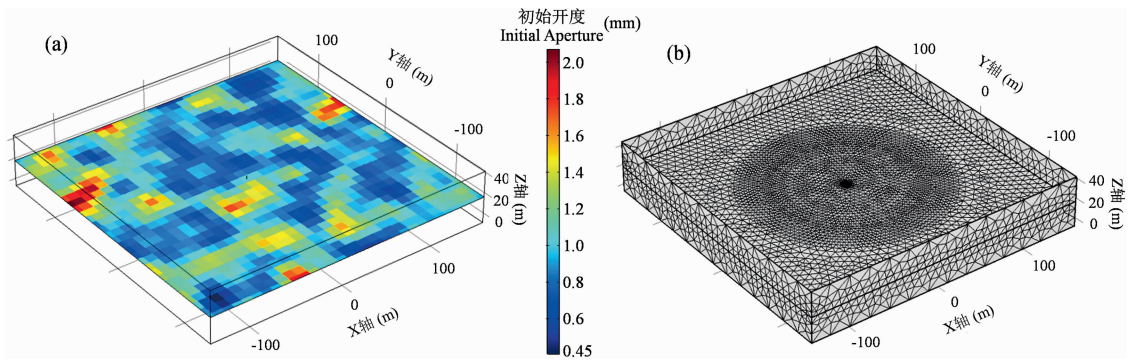


图 2 几何模型及网格划分

Fig. 2 Model geometric and meshing

(a)—几何模型及裂隙初始开度分布;(b) —模型网格划分示意图

(a)—Model geometric and initial fracture aperture distribution; (b)—sketch of model meshing

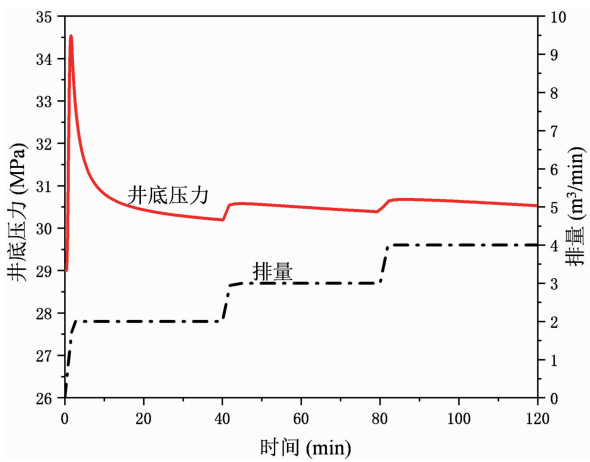


图 3 模型排量及井底压力曲线

Fig. 3 Pump rate and bottom-hole pressure curve

压裂作业共持续 120 min,分为三个阶段,每个阶段持续 40 min,排量分别为 2.0 m³/min、3.0 m³/min 和 4.0 m³/min

The acid fracturing lasted 120 min and was divided into three stages, each of which lasted 40 min and the pump rates were 2.0 m³/min, 3.0 m³/min and 4.0 m³/min respectively

布特征,酸化压裂液的作用范围呈不规则分布(图 4c)。压裂结束时,酸化压裂的最大作用半径约 86 m,最小作用半径约 37 m,酸化压裂对储层改造作用明显。稠化酸液注入裂隙后与裂隙发生化学反应和热交换,导致酸液浓度和温度变化(图 5a、b),进而其黏度等流动性质发生了改变(图 5c),多场耦合的数值模型可以较好刻画这一过程。压裂结束时,裂隙内仍残存一定量的酸液(图 5b),在反排或后置液注入过程中可以继续与岩层发生反应,可能对降低反排难度和进一步提高储层产能有所帮助。

本研究实现了对初始开度不均匀分布的单裂

隙储层的酸化压裂 THMC 多场耦合数值模拟,为现场施工提供了有效的模拟和评价方法。然而对裂隙型储层进行压裂改造时,天然裂隙网络的连通性、压裂过程中的缝面滑动及酸蚀蚓孔的发展过程均对酸化压裂效果也有明显影响(Economides et al., 2000),这些问题有待更精细化的模型进一步研究。

表 1 模型基础参数

Table 1 Model basic parameters

类别	参数	取值
几何模型	压裂井段直径(m)	0.02
	热储体积(m ³)	300 × 300 × 50
多孔介质	密度 ρ _r (kg/m ³)	2600
	杨氏模量 C _{kr} (GPa)	50
	泊松比 μ _{po}	0.25
	孔隙率 φ	0.05
	Biot 系数 α _B	0.1
	渗透率 k (m ²)	2.96e-14
	热膨胀系数 α _T (1/K)	2e-6
	热容 C _r (J/(kg · K))	880
裂隙	热导率 λ _r (W/(m · K))	1.57
	法向刚度 k _n (GPa/m)	17
	剪切刚度 k _s (GPa/m)	9
	酸液溶解比 β (mol/kg)	1.37
	滤失液壁面反应比例 η	0.01
	初始平均开度 b ₀ (mm)	1
酸液	排量 Q _{mj} (m ³ /min)	2.0; 3.0; 4.0
	注入温度 T _{mj} (K)	293.15
	密度 ρ (kg/m ³)	1192
	热容 C (J/kg)	4182
化学反应	压缩系数 1/K _f (1/Pa)	3.0303e-10
	扩散系数 D ^{l+} (cm ² /s)	1.15e-6
	注入摩尔浓度 C _{HCL} (mol/m ³)	8750
	反应级数 n _a	0.6
	反应活化能 E _a (J/mol)	53208.77
	Arrhenius 常数 A _f (mol/L) ⁻ⁿ · mol/(s · m ³)	27529.13

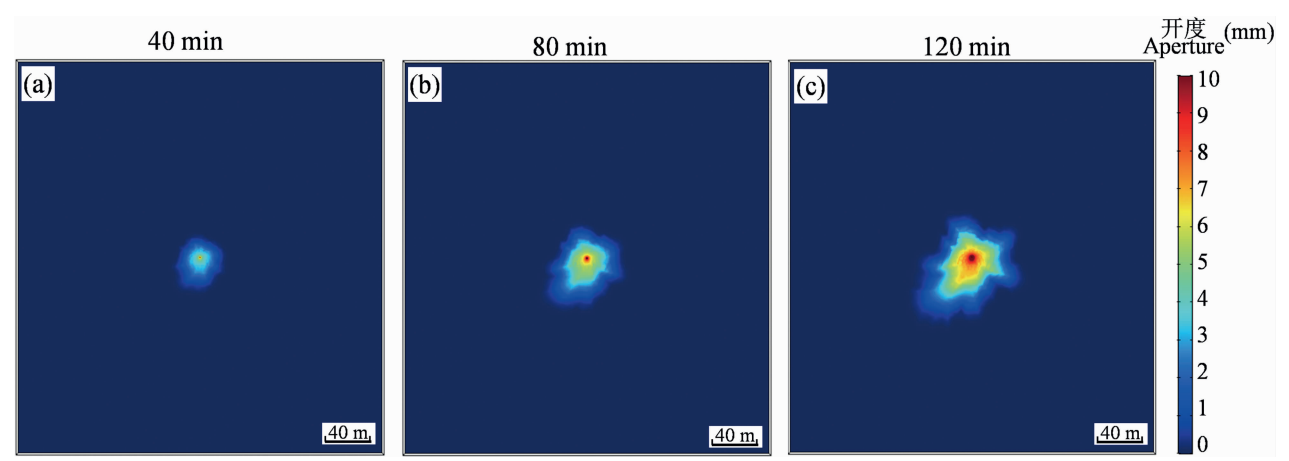


图 4 压裂不同时段酸蚀裂隙开度分布

Fig. 4 The distribution of acid induced fracture aperture at different fracturing times

(a)、(b)、(c)分别为压裂持续 40 min、80 min 和 120 min 时酸蚀裂隙的开度分布，随着酸化作业的持续进行，酸化压裂影响的范围不断增大，同时表现出明显的各向异性

(a), (b) and (c) are the distribution of acid induced fracture aperture when the fracturing lasts for 40 min, 80 min and 120 min, respectively. With the time went on, the influence range of acid fracturing increases, and the anisotropy is obvious

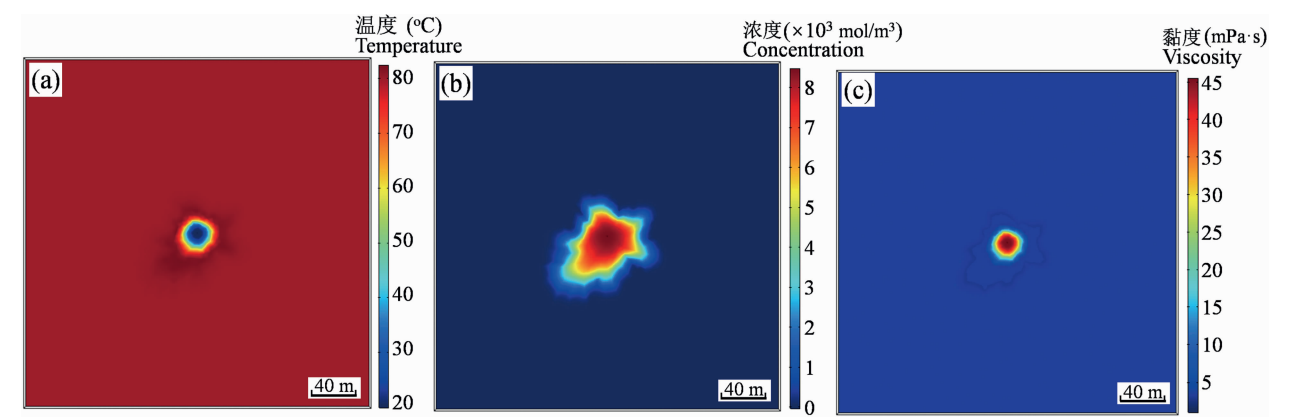


图 5 压裂结束时裂隙内流体黏度、温度和酸液浓度分布

Fig. 5 Fluid temperature, acid concentration and viscosity distribution in the fracture at the end of acid fracturing

(a)—化学反应放热导致部分裂隙温度高于储层初始温度；(b)—井底附近酸液浓度最高，受控于酸液流动的各向异性，浓度分布呈现出明显的各向异性；(c)—井底附近由于温度较低，压裂液黏度较高

(a)—Due to the exothermic reaction, the temperature of some area has exceeded the initial temperature; (b)—the concentration is highest near the bottom of the well, and the concentration distribution is controlled by the anisotropy of the flow; (c)—the fluid viscosity is high near the bottom of the well because of the low temperature

3 结论

(1)在前人实验和模拟研究的基础上,本文建立了工程尺度的碳酸盐岩热储酸化压裂数值模拟方法。这一方法考虑了应力场、化学场、温度场、渗流场之间的相互作用,为压裂施工的精细化模拟和评价提供了必要手段。

(2)考虑热-水-力-化四场耦合的数值模型与前人(Dong et al. , 1999, 2002)的实验和模拟结果取得了较好的对应关系,验证了模型的合理性。

(3)应用工程尺度的酸化压裂数值模型,考虑了多场耦合条件下稠化压裂在裂隙中黏度、温度、浓度的变化特征,得到了多场耦合条件下酸化压裂改造后酸蚀裂隙的开度分布规律,评价了酸化压裂的效果。

References

Barron A N, Hendrickson A R, Wieland D R. 1962. The effect of flow on acid reactivity in a carbonate fracture. Journal of Petroleum Technology, 14(04): 409~415.

Brush D J, Thomson N R. 2003. Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes, and local cubic law

- simulations. *Water Resources Research*, 39(4): 5.1~5.12.
- Crowe C W, Martin R C, Michaelis A M. 1981. Evaluation of acid-gelling agents for use in well stimulation. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 21(04): 415~424.
- Dong C, Hill A D, Zhu D. 1999. Acid etching patterns in naturally fractured formations. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 56: 531.
- Dong C, Zhu D, Hill A D. 2002. Modeling of the acidizing process in naturally fractured carbonates. *SPE Journal*, 7(04): 400~408.
- Economides M J, Nolte K G. 2000. *Reservoir Stimulation* (third edition). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1~825.
- Fan C, Luo M, Li S, Zhang H, Yang Z, Liu Z. 2019. A thermo-hydro-mechanical-chemical coupling model and its application in acid fracturing enhanced coalbed methane recovery simulation. *Energies*, 12: 626.
- Gao Baozhu. 2005. Hydrogeological conditions and hydrochemical characteristics of main thermal reservoirs in North China Plain. 20(4): 166~174.
- Gao Zhijuan, Li Shuheng. 2014. The renewal capability in geothermal water in North China. *Science & Technology Vision*, 34:75~76.
- Guo Jianchun, Liu Huifeng, Zhu Yuanqiang, Liu Yuxuan. 2014. Effects of acid-rock reaction heat on fluid temperature profile in fracture during acid fracturing in carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 122: 31~37.
- Hanna R B, Rajaram H. 1998. Influence of aperture variability on dissolutional growth of fissures in karst formations. *Water Resources Research*, 34(11): 2843~2853.
- He Tiezhu, Sun Zhentian. 2019. Application of acid fracturing technology for increasing the production of geothermal wells in Tongxiang area, Zhejiang Province. *Urban Geology*, 14(04): 49~54 (in Chinese with English abstract).
- Lin Tianyi, Ke Bolin, Yang Miao, Liu Qing, Xiong Xin, Niu Shengxu, Huang Lu. 2018. The acid-fracturing stimulation mechanism and application in hydrothermal-carbonate geothermal reservoir. *Urban Geology*, 13(03): 21~26 (in Chinese with English abstract).
- Lü Dianchen. 2013. Application of acid-fracturing technology in geothermal well stimulation. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 33(22): 156 (in Chinese without English abstract).
- Lu S M. 2018. A global review of enhanced geothermal system (EGS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81: 2902~2921.
- Ma Feng, Wang Xiaoyuan, Wang Guiling, Lin Wenjing, Li Honglei. 2015. Analysis of the potential and development prospects of shallow geothermal energy and hot dry rock resources. *Science & Technology Review*, 33(19): 51~55.
- Ma Zhongping, Du Bin, Bao Weihe, Li Huijuan, Wang Yanhong. 2007. Application of acid-fracture technology in geothermal well construction. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 34(2): 45~47 (in Chinese with English abstract).
- Mumallah N A. 1991. Factors influencing the reaction rate of hydrochloric acid and carbonate rock. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/21036-MS.
- Navarrete R C, Holms B A, McConnell S B, Linton D E. 2000. Laboratory, theoretical, and field studies of emulsified acid treatments in high-temperature carbonate formations. *SPE Production & Facilities*, 15(02): 96~106.
- Pandey S N, Chaudhuri A. 2017. The effect of heterogeneity on heat extraction and transmissivity evolution in a carbonate reservoir: A thermo-hydro-chemical study. *Geothermics*, 69: 45~54.
- Rosner D E. 1986. Transport processes in chemically reacting flow systems. *Transport Processes in Chemically Reacting Flow Systems*, 33(5): iii.
- Taron J, Elsworth D. 2009. Thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(5): 855~864.
- Wang Guiling, Ma Feng, Lin Wenjing, Zhang Wei. 2015. Reservoir stimulation in hot dry rock resource development. *Science & Technology Review*, 33(11): 103~107.
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Chinese Geology*, 44(6): 1074~1085 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liancheng, Li Minglang, Cheng Wanqing, Jiang Guosheng. 2010. Application of acidifying & fracturing technology to carbonate rock reservoir. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 37(5): 128~132 (in Chinese with English abstract).
- Wu Aimin, Ma Feng, Wang Guiling, Liu Jinxia, Hu Qiuyun, Miao Qingzhuang. 2018. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiong'an New Area. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(5): 523~532 (in Chinese with English abstract).
- Yao Zujin. 1995. Paleoclimate record of geothermal water for last 0.03 Ma in North China. *Earth Science*, 04: 383~388.
- Zhao Z, Jing L, Neretnieks I, Moreno L. 2011. Numerical modeling of stress effects on solute transport in fractured rocks. *Computers and Geotechnics*, 38(2): 113~126.
- Zhao Zhihong, Liu Guihong, Xu Haoran. 2019. Efficient simulation method of T-H-M coupling in deep energy resource engineering. *Proceedings of the 28th National Conference on Structural Engineering* (in Chinese).

参 考 文 献

- 高宝珠. 2005. 华北平原地区主要热储层的水文地质条件及水化学特征. *全国地热产业可持续发展学术研讨会论文集*, 20(4): 166~174.
- 高志娟, 李书恒. 2014. 华北地区地热资源更新能力研究. *科技视界*, 34:75~76.
- 何铁柱, 孙振添. 2019. 酸化压裂工艺在浙江桐乡地热井增产中的应用. *城市地质*, 14(04): 49~54.
- 林天懿, 柯柏林, 杨森, 刘庆, 熊馨, 牛升晟, 黄璐. 2018. 碳酸盐岩热储酸化压裂增产机理研究及应用. *城市地质*, 13(03): 21~26.
- 吕殿臣. 2013. 酸化压裂技术在地热井增产中的应用. *中国石油和化工标准与质量*, 33(22): 156.
- 马峰, 王潇媛, 王贵玲, 蒯文静, 李洪磊. 2015. 浅层地热能于干热岩资源潜力及其开发前景对比分析. *科技导报*, 33(19): 51~55.
- 马忠平, 杜槟, 鲍卫和, 李会娟, 王艳宏. 2007. 酸化压裂工艺在地热井中的应用. *探矿工程: 岩土钻掘工程*, 34(2): 45~47.
- 王贵玲, 张薇, 蒯文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究. *中国地质*, 44(6): 1074~1085.
- 王贵玲, 马峰, 蒯文静, 张薇. 2015. 干热岩资源开发工程储层激发研究进展. *科技导报*, 33(11): 103~107.
- 王连成, 李明朗, 程万庆, 江国胜. 2010. 酸化压裂方法在碳酸盐岩热储层中的应用. *水文地质工程地质*, 37(5): 128~132.
- 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 刘金侠, 胡秋韵, 苗青壮. 2018. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究. *地球学报*, 39(5): 523~532.
- 姚足金. 1995. 华北地热热水 3 万年以来的古气候记录. *地球科学*, 04:383~388.
- 赵志宏, 刘桂宏, 徐浩然. 2019. 深地能源工程热水力多场耦合效应高效模拟方法. 第 28 届全国结构工程学术会议论文集.

**Numerical study and application of acid-fracturing in the carbonate
geothermal reservoirs from North China**

XU Haoran, CHENG Jinru, ZHAO Zhihong*

Department of Civil Engineering of Tsinghua University, Beijing, 100084

** Corresponding author: zhzhao@tsinghua.edu.cn*

Abstract

Carbonate layer is one of the most important geothermal reservoirs in North China Region. The production and injection of carbonate geothermal wells in different secondary structural units is highly variable, seriously restricting regional development of the carbonate geothermal field. Acid-fracturing technology is efficient in increasing the yield and in maintenance of the carbonate reservoirs, which involves mass transport, acid-rock reaction, seepage and heat transfer, chemical heat release, and other complex processes. In this paper, a numerical method is proposed to simulate the acid-fracturing processes in the carbonate reservoirs taking the coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical interactions into consideration. The numerical method is verified by comparing with the previous experimental and numerical results. A model with heterogeneous fracture apertures in the carbonate reservoir is established to simulate the acid fracturing process and to evaluate the stimulation effect.

Key words: carbonatite; geothermal reservoir; acid-fracturing; multifield coupling; numerical simulation