文章编号：1006-6616（2017）04-0531-09

裂隙特征对岩石渗流特性的影响规律研究

周汉国[1,2]，郭建春[1]，李　静[3]，范作松[4]，高　帅[3]，王　昌[3]，刘　振[3]

（1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室，四川 成都 610500；
2. 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心，山东 东营 257000；
3. 中国石油大学（华东）地质力学与工程研究所，山东 青岛 266580；
4. 青岛市地铁八号线有限公司，山东 青岛 266109）

摘　要：裂隙是油气储层主要的储集空间及流体渗流通道，影响油气的运移规律，是油气勘探开发的重要指标。以冀中坳陷任丘油田任 10 井为例，运用数值模拟方法研究了裂隙开展宽度和裂隙面粗糙度对岩石渗流特性的影响规律。研究结果表明，（1）裂隙开展宽度较小时，孔隙内流体压力仅在入口处小范围内呈扇形分布，裂隙中压力分布曲线呈正切函数型，流体流速在裂隙和孔隙中都较小；随着裂缝开展宽度的增加，孔隙内流体压力逐渐增大，裂隙中压力分布曲线逐渐向直线型转变，流体流速在入口处先减小后稳定，在裂隙中先增加后稳定；（2）裂隙面粗糙度对裂隙岩石渗流特性的影响与裂隙开展宽度有关，在裂隙开展宽度较大时，裂隙面粗糙度对流体压力的分布影响较大；随着裂隙面粗糙度增大，孔隙内流速逐渐增大，而裂隙中流速逐渐减小；（3）随着裂隙开展宽度的增大，影响裂隙流体流动的主控因素逐渐由裂隙开展宽度转变为裂隙面粗糙度。

关键词：裂隙岩石；渗流特性；裂隙开展宽度；裂隙面粗糙度；数值模拟

中图分类号：TU451　　**文献标识码：**A

油气储层岩石裂隙率远小于孔隙率，但是裂隙的渗透率却比孔隙的渗透率大几个数量级。因此，研究油气在裂隙中的渗流特性，对于研究储层岩石中油气运移特性具有十分重要的意义[1]。鉴于裂隙形成过程中所处物理、力学、化学环境极为复杂，专家学者在应力状态和复合场作用等外界环境角度对裂隙岩石渗流特性进行描述，但是裂隙内部结构，如裂隙开展宽度、粗糙度等，对裂隙岩石渗流特性的影响研究还不是很成熟[2~4]。同时，对裂隙内部结构特征的定量描述又比较困难，进一步加大了裂隙内部结构对裂隙岩石渗流特性影响的研究难度[5~7]。水力压裂、酸化等是提高油气开采效果的重要技术手段，其主要作用是通过改善裂隙特征来提高储层裂隙的导流能力，从而加快油气运移，提高油气开采量[8]。因此裂隙特征在一定程度上可以表征水力压裂和酸化的效果[9]。水力压裂旨在增加裂隙密度和裂隙宽度，酸化目的在于解堵，即降低裂缝对油气运移的阻碍作用[10]。故本文基于 COMSOL Multiphysics 软件的 Darcy 定律接口和裂隙流接口，研究裂隙开展宽度和裂隙面粗糙度对油气运移规律的影响。

1　COMSOL 中的裂隙流动

相对于其他软件，COMSOL Multiphysics 软件研究岩石的裂隙流动具有很大的优势，其拥有单独的裂隙流接口，用以分析研究流体沿介质内部或外部裂隙边界的流动；其次在模型建立过程中，不需要单独建立代表裂隙的模型，只需要建立线或者面来表征裂隙边界，仅需在计算时以常数定义裂隙开展宽度不变的裂隙或以函数定义裂缝开

收稿日期：2017-02-20

基金项目：国家自然科学基金项目（41272141）；国家科技重大专项（2016ZX05002-002）

作者简介：周汉国（1969-），男，在读博士，高级工程师，主要从事油气勘探开发技术研究及管理工作。E-mail：zhouhanguoupc@163.com

展宽度变化的裂隙。

1.1 Darcy 定律接口

COMSOL 中的 Darcy 定律接口主要用来模拟多孔介质中的流体流动，它可以用来模拟低速流动，或者在低孔低渗且压力梯度是主要驱动力时，流体受孔隙中的摩擦阻力的影响。该接口可以进行稳态和瞬态分析，同时也可以设定多个 Darcy 定律接口来模拟多相流，其主要特点是拥有一种“流体和基体属性节点（Fluid and Matrix Properties node）”，可以在这种节点上同时定义流体和多孔介质的属性[11,12]。

Darcy 定律描述了由多孔介质属性、流体粘度和压力梯度共同控制的速度场，其数学表达式如式（1）所示[13]。

$$u = -\frac{\kappa}{\mu}\nabla p \tag{1}$$

式中，κ 为多孔介质的渗透率，m^2；μ 为流体的动力粘度，kg/（m·s）；p 为压力，Pa；u 为 Darcy 流速，m/s。

在 COMSOL 中，Darcy 定律接口结合了 Darcy 定律和连续性方程，控制方程变为式（2）所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla\cdot(\rho u) = Q_m \tag{2}$$

式中，ρ 为流体密度，kg/m^3；ε 为多孔介质的孔隙率,%；Q_m 为质量源，kg/（m^3·s）；其余变量符号及单位同上。

1.2 裂隙流接口

COMSOL 中的裂隙流接口使用了切向导数定义流体在多孔介质中沿代表裂隙的内部边界的流动，是 Darcy 定律的变体。其中，裂隙单位长度上的体积流量数学表达式如式（3）所示。

$$q_f = -\frac{\kappa_f}{\mu}d_f(\nabla_T p + \rho g\nabla_T D) \tag{3}$$

式中，q_f 为裂隙单位长度上的流体体积流量，m^2/s；κ_f 为裂缝渗透率，m^2；d_f 为裂隙开展宽度，m；∇_T 为对裂隙切平面的梯度算子；p 为压力，Pa；ρ 为流体密度，kg/m^3；g 为重力加速度，m/s^2；D 为垂直坐标，m；如果关闭重力效应则 D 为 0。

由式（3）裂隙中单位长度上的体积流量 q_f，得到裂隙中的流速 u 如式（4）所示。

$$u = \frac{q_f}{d_f} \tag{4}$$

结合材料属性，方程（3）以及整个裂隙横截面上的连续性方程，得到压力方程为式（5）所示。

$$d_f\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f\rho) + \nabla_T\cdot(\rho q_f) = d_f Q_m \tag{5}$$

式中，ε_f 为裂隙孔隙率，m^2；Q_m 为质量源，kg/（m^3·s）；d_f 为裂隙开展宽度，m；其余变量符号及单位同上。由于裂隙开展宽度可以沿裂隙变化，故出现在方程两边。

COMSOL Multiphysics 提供了两种材料模型，包括流体基体属性模型和储水模型。其中，流体基体属性模型是裂隙流接口的默认材料模型，裂隙流体流动是按照式（5）所示的方程进行控制。该模型中，流体属性（如密度和动力粘度）和裂隙属性（如孔隙度和渗透率）可以从材料节点直接获得，也可以由用户通过相应的表达式定义，但是裂隙开展宽度需要用户根据实际情况在相应的区域输入[14]。

储水模型的控制方程和流体基体属性模型的控制方程有些许差别，具体表达式如式（6）。

$$\rho S_f d_f\frac{\partial p}{\partial t} - \nabla_T\cdot(\rho q_f) = d_f Q_m \tag{6}$$

式中，S_f 为裂隙的储存系数，1/Pa；其余变量符号及单位同上。

2 单裂隙岩石渗流特性数值模拟

本文以冀中坳陷任丘油田任 10 井岩储层为例进行研究，由于形成时期所具有的特殊地质条件，本区内部油气储集层大部分属于裂缝性储层。假设裂隙流体为不可压缩、粘性及水流为层流，可以得立方体定理如式（7）所示。

$$q = \frac{ge^3}{12\nu}J \tag{7}$$

经过后人的改进将裂隙粗糙度考虑在内，如式（8）所示。

$$q = \frac{ge^{-3}}{12\nu}J\frac{1}{C} \tag{8}$$

式中为 q 单宽流量，m^3/s；e 为裂隙宽度，m；g 为重力加速度，m/s^2；ν 为水流运动粘滞系数；J 为水力比降，$1/C$ 为修正系数。以上公式在 Darcy 流基础上得到，Sharp 和 Maini 在进行宽裂隙试验研究后提出了非 Darcy 流的存在，Lomize 和 Louis 等一些学者提出了紊流范围的计算公式，但目前仍广泛采用的是 Darcy 线性流公式。本文也基于 Darcy 流开展数值模拟，选取任 10 井岩心并建立相对应模型，研究裂隙开展宽度和裂隙面粗糙度对油气运移规律的影响。

2.1　模型建立

选取任 10 井岩心，建立含有裂隙的三维岩石模型，如图 1 所示。

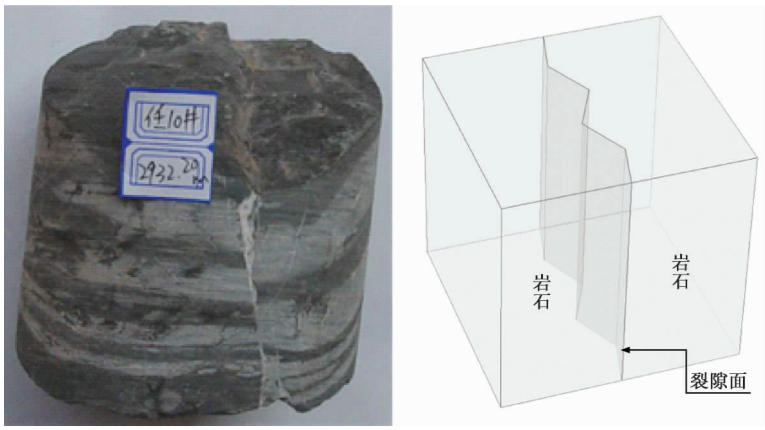


图 1　含裂隙岩石模型

Fig. 1　The model of fractured rock mass

为研究裂隙特征对裂隙岩石渗流特性的影响，通过相关文献统计，碳酸盐岩喉道半径多在 0.5 ~ 75 μm 之间[15]，故选取 0.005 mm、0.01 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.5 mm、1 mm、2 mm 和3 mm 共 8 种裂隙开展宽度以及如图 2 所示的 5 种裂缝形态分别进行研究。为定量描述裂隙面粗糙度，本文定义 C 为裂隙的粗糙度，其计算方法如式（9）所示。

$$C = \frac{L - l}{l} \tag{9}$$

式中，C 为裂隙面粗糙度，无量纲；L 为裂隙的实际长度，m；l 为裂隙在水平面上的投影长度，m。

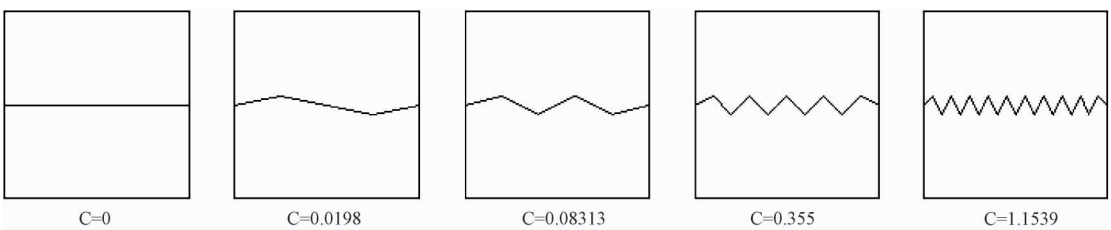


图 2　5 种裂隙形态及其粗糙度大小

Fig. 2　Five kinds of fractures and their roughness values

2.2　模型材料参数及边界条件设定

模拟选用的材料模型为流体基体属性模型，流体为水，基体为多孔岩石。流体和基体的材料参数均使用表达式定义，具体参数取值如表 1 所示。

表 1　碳酸盐岩模型材料参数值

Table 1　The material parameters of model

流体		基体		裂隙	
密度/（kg/m³）	动力粘度/（kg/（m·s））	孔隙率/%	渗透率/m²	孔隙率/%	渗透率/m²
2450	1×10^{-3}	0.25	1×10^{-11}	0.80	1×10^{-7}

在裂隙左边界和右边界分别施加 100 Pa 定压边界和 0 Pa 定压边界，故整个裂隙岩体的压力差为 100 Pa。

3　岩石渗流特性分析

3.1　裂缝开展宽度对裂隙岩石渗流特性的影响

基于上述理论及模型开展研究，选择裂隙面粗糙度为 0.08313 的岩体结构模型进行数值模拟，分别得到裂隙开展宽度分别为 0.005 mm、0.01 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.5 mm、1 mm、2 mm 和 3 mm 八种情况下的孔隙及裂隙中流体压力和流体流速分布，如图 3 所示。

由图 3a 可知，流体压力变化遍布整个裂隙岩石，说明流体在沿裂隙流动过程中渗入孔隙内部。流体压力在入口处最大，沿着裂隙开展方向逐渐减小，出口处达到最小。当裂隙开展宽度为 0.005 mm

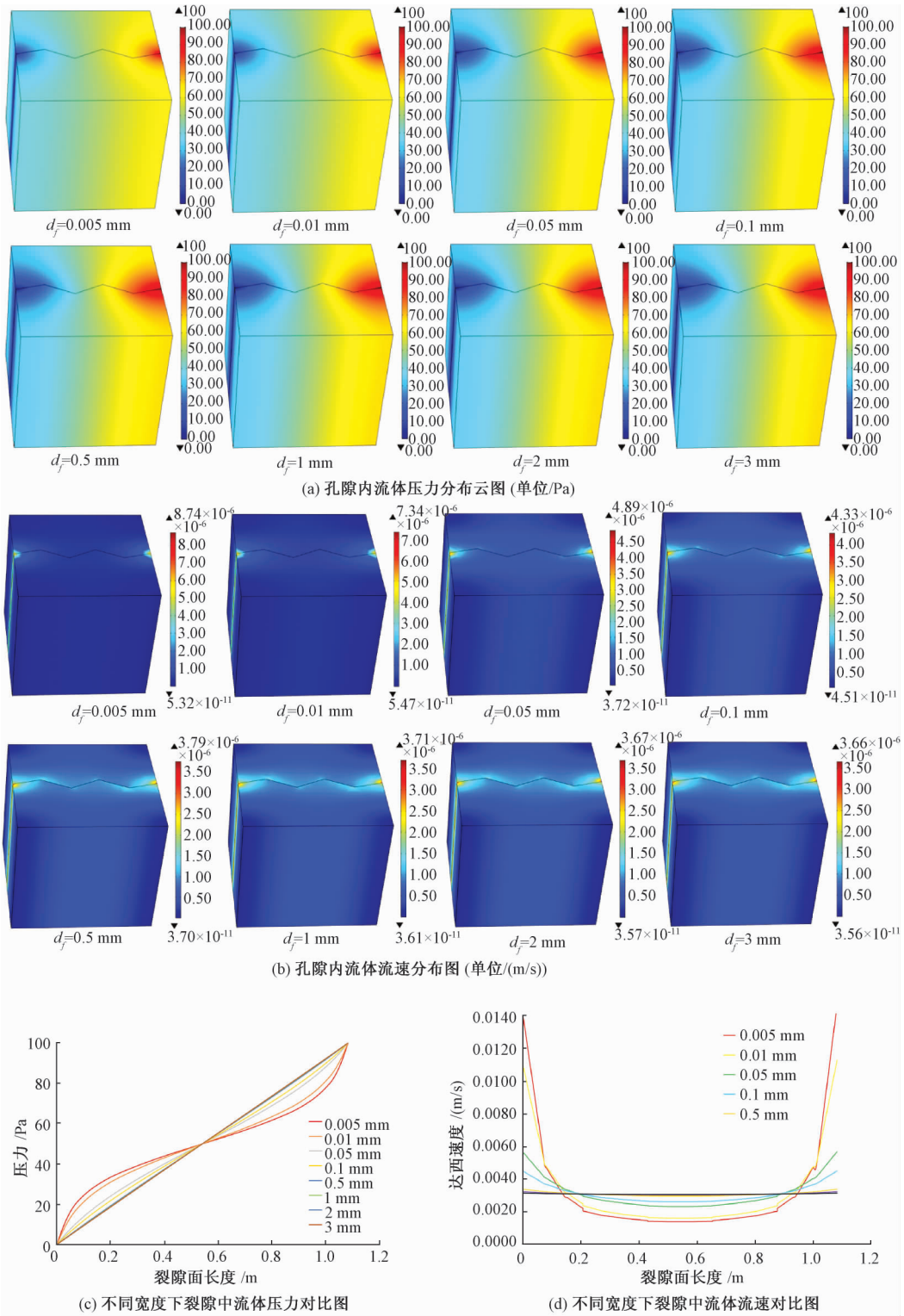


图 3 不同裂隙开展宽度下孔隙及裂隙中流体压力和流速分布图

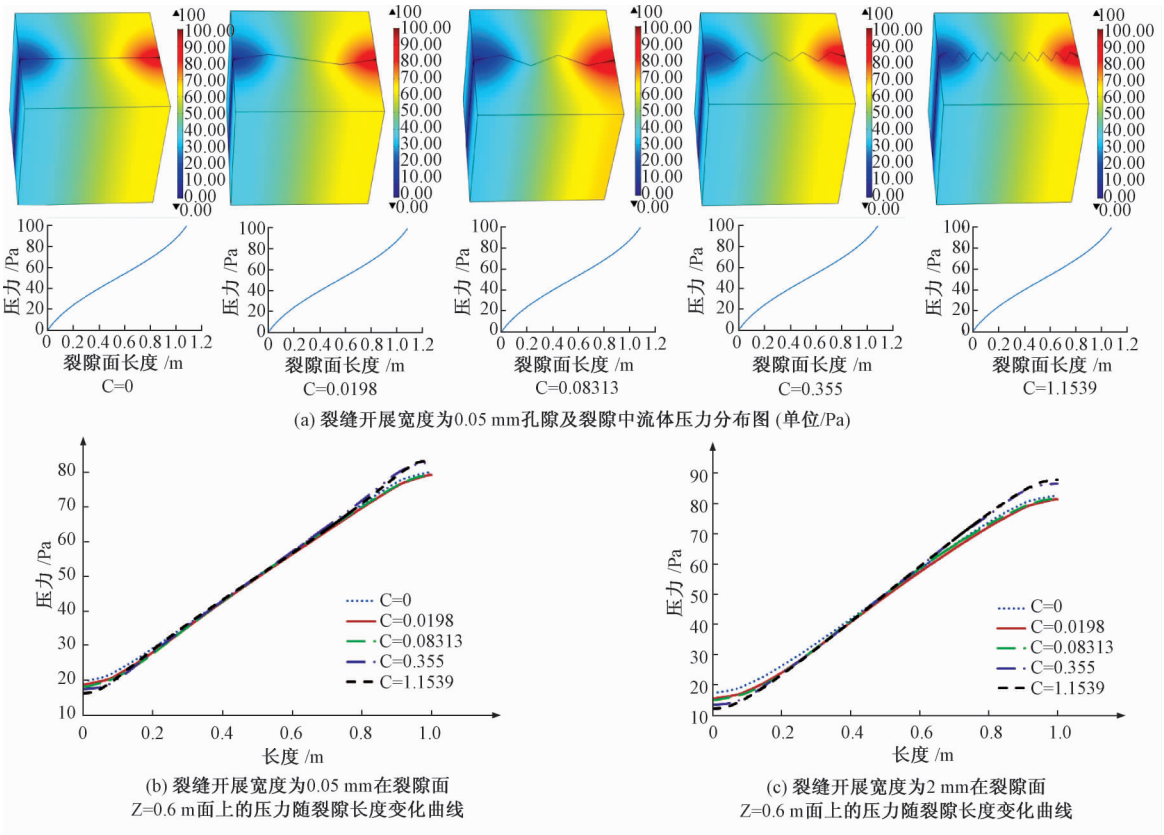
Fig. 3 Distribution maps of fluid pressure and flow velocity in pores and fractures at different fracture widths

时，岩石中流体压力仅在入口处小范围内成扇形分布，而裂隙开展宽度为 0.05 mm 和 0.5 mm 时，岩石中流体压力较大的范围明显变大，说明随着裂缝开展宽度的增加，孔隙内部流体压力逐渐增大，远离裂隙的岩石流体压力也逐渐上升。图 3b 显示，裂隙中的流体流速远大于孔隙，说明裂隙在流体渗流过程中起到了优势通道的作用，且随着裂隙开展宽度的增大，其优势通道的作用愈加

显著。此外，当裂隙开展宽度为 0.005 mm 时，裂隙中的流体流速在入口和出口处较大，随着流体进入裂隙，流体流速急剧减小，并在裂隙中间区域趋于稳定。随着裂隙开展宽度的增大，流体从入口到裂隙中间区域的流速变化趋于缓和，裂隙中间区域流速稳定的范围逐渐减小。由图 3c、3d 所示可以看出，在裂隙中，当开展宽度为 0.005 mm 时压力分布曲线呈正切函数型，随着裂隙开展宽度的增加，裂隙流体压力分布逐渐由曲线变化向线性变化转变，入口处流速先减小后趋于稳定，裂隙内部流速先增加后趋于稳定，表明裂隙开展宽度对流速的影响随开展宽度的增大逐渐减小，因此在水力压裂过程中对于支撑剂的选取须考虑其孔隙性与导流能力之间的相关关系。当开展宽度增加到 1 mm 时，孔隙中流体压力、流速分布趋于稳定，说明在一定压力驱动下，裂隙开展达到毫米量级时，裂隙宽度不再成为流体流动的主控因素。

3.2　裂隙面粗糙度对裂隙岩石渗流特性的影响

通过研究，选取裂缝开展宽度为 0.05 mm 的岩体结构建立模型，分别得到裂隙面粗糙度为 0、0.0198、0.08313、0.355 和 1.1539 五种情况下的孔隙及裂隙中流体压力分布图如图 4a 所示，以及裂隙开展宽度分别为 0.05 mm 和 2mm 时，在 Z = 0.6 m（距离裂隙中心 0.1 m 处）面上孔隙内的压力随裂隙长度的变化曲线如图 4b、图 4c 所示。



(a) 裂缝开展宽度为0.05 mm孔隙及裂隙中流体压力分布图 (单位/Pa)

(b) 裂缝开展宽度为0.05 mm在裂隙面 Z=0.6 m面上的压力随裂隙长度变化曲线

(c) 裂缝开展宽度为2 mm在裂隙面 Z=0.6 m面上的压力随裂隙长度变化曲线

图 4　孔隙内流体压力分布图

Fig. 4　Distribution maps of fluid pressure in pores

从图 4a 裂隙开展宽度为 0.05 mm 时不同裂隙面粗糙度的孔隙及裂隙中压力分布图可以看出，5 种粗糙度下岩石中及裂隙中压力分布几乎相同。从图 4b 裂隙开展宽度为 0.05 mm 时，在 Z = 0.6 m 面上孔隙的压力随裂隙长度变化图中可以看出，5 条压力变化曲线除在入口和出口边界附近区域略有差别外，其余部分压力变化曲线几乎重合，说明此时裂隙面粗糙度对孔隙内流体压力分布影响较小。但是如图 4c 所示的裂隙开展宽度为 2 mm 时，在 Z = 0.6 m 面上孔隙的压力随裂隙长度变化曲线，此时裂隙面粗糙度大的孔隙内压力分布明显不同于裂隙面粗糙度小的孔隙内压力分布。说明裂隙面粗糙度对孔隙内压力分布有影响，且在裂隙开展宽度较大时，裂隙面粗糙度对孔隙内压力分布影响才明显。

图 5 为裂隙开展宽度分别为 0.05 mm 和 2 mm

时，整个孔隙内流体流速分布云图以及不同裂隙粗糙度下，以裂隙在水平向上的投影长度作为横坐标值，绘制不同粗糙度下裂隙中流速对照图。

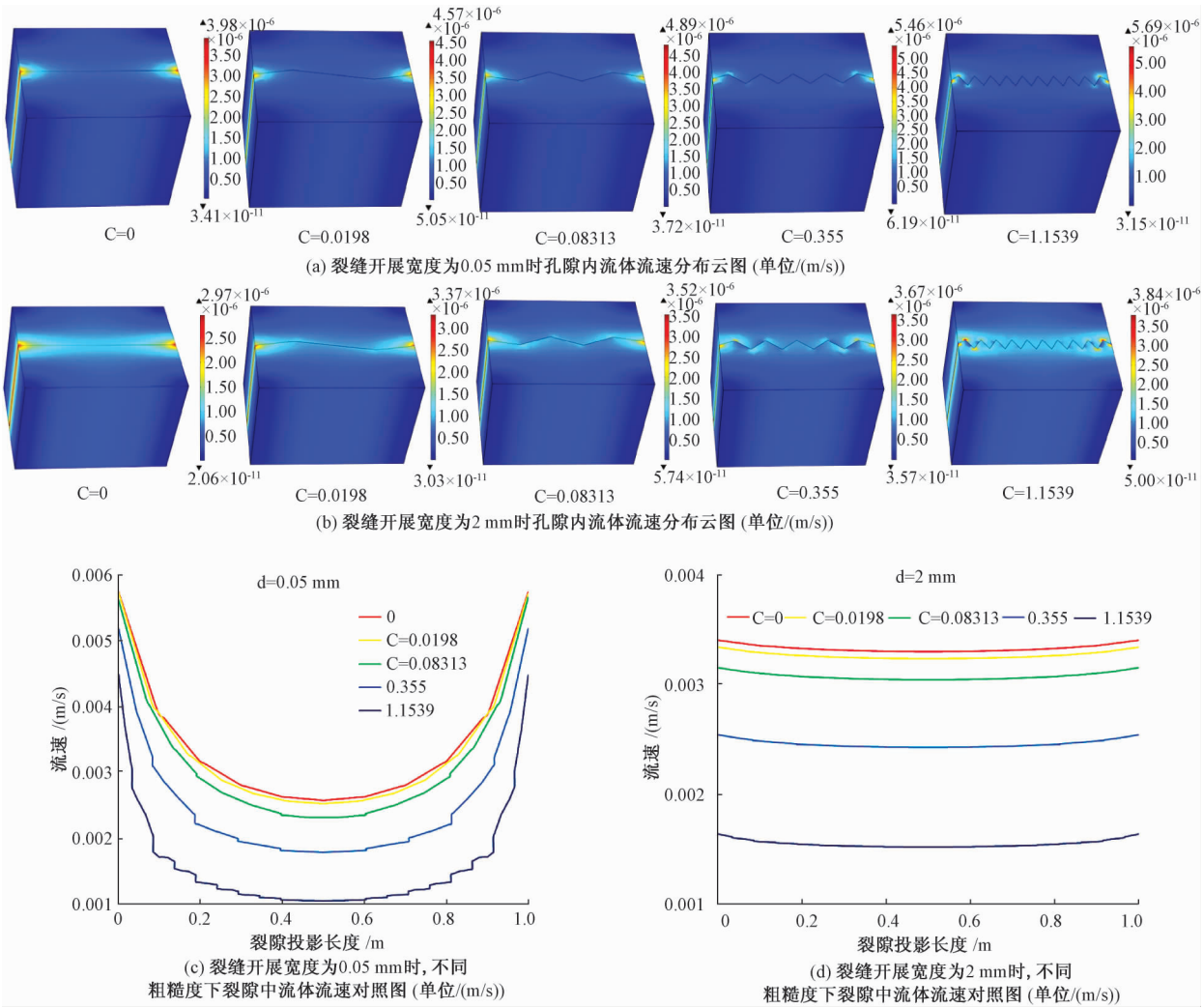


图 5 不同裂隙面粗糙度下孔隙及裂隙中流速分布图

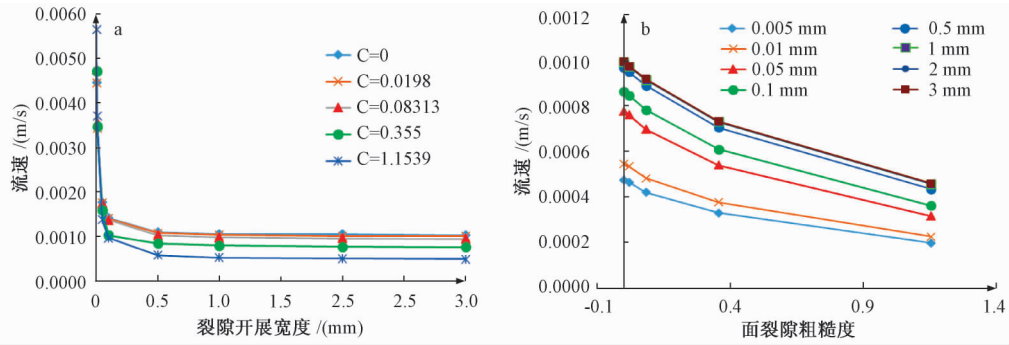
Fig. 5 Distribution maps of flow velocity in pores and fractures at different fracture roughness

结合图 5a—5d 发现，当裂隙开展宽度一定时，随着裂隙面粗糙度增大，孔隙内流速逐渐增大，裂隙中流速逐渐减小。分析其原因为，裂隙面粗糙度增大导致裂隙面对流体的阻力增大，并且裂隙越粗糙，摩阻力越大，更多的流体渗入岩石孔隙，从而导致岩体内流体流速增加，裂隙中流体流速减小。从图 5b 可以看出，随着裂隙开展宽度的增大，岩石中会形成以裂隙为主的渗流通道，但是随着裂隙面粗糙度变大，裂隙的优势渗流通道作用逐渐变弱[15]。

3.3 裂隙开展宽度与裂隙面粗糙度共同变化对裂隙岩石渗流特性的影响

通过对研究结果的分析，得到裂隙开展宽度和裂隙面粗糙度发生变化时，在裂隙入口处及裂隙中部流体流速变化曲线，如图 6 所示。

图 6a 表明，流速随裂隙开展宽度的增加呈现先减小后不变的趋势，具体表现为：在裂隙开展宽度较小时，裂隙中流速随裂隙开展宽度的增大急剧变小，当开展宽度达到 0.5 mm 后，流速随裂隙开展宽度的增加而趋于稳定。图 6b 表明，裂隙中的流体流速随着裂隙面粗糙度的增大呈减小趋势，且这种减小趋势随着裂隙面粗糙度的增加逐渐变缓。当裂隙开展宽度为 0.005 mm、0.01 mm 时，这 2 条曲线的下降趋势明显缓于其他裂隙开展宽度下的流速变化曲线，说明当裂隙开展宽度较小时，影响流体流速的主要因素是裂缝开展宽度而不是裂隙的粗糙度；当裂隙开展宽度为 1 mm、2 mm、3 mm 时，这 3 条变化曲线几乎重合在一起，



a—流体入口处流速随裂隙开展宽度变化曲线；b—裂隙中部流速随裂隙面粗糙度的变化曲线

图 6　裂隙中流速随裂隙特征的变化曲线

Fig. 6　Curves of flow velocity varing with fracture characteristics in fractures

并且流速随粗糙度的增大下降速度明显加快，说明裂隙开展宽度逐渐变大时，影响流体流速的主要因素不再是裂缝开展宽度而是裂隙的粗糙度[16]。因此，在水力压裂过程中，适当使用酸化技术，降低裂隙的粗糙度，对于采油过程中提高油气运移速度，提高油气开采产量具有重要意义。

4　结论

本文通过数值模拟方法研究了裂隙开展宽度和裂隙面粗糙度对裂隙岩石渗流特性的影响，得出以下结论：

（1）岩石中的最大流体压力分布在裂隙水流入口处，最小流体压力分布在裂隙水流出口处；裂隙中最大流速发生在裂隙入口处，最小流速发生在中部。岩体中距离裂隙面较近的区域流体流速较大，随着与裂隙面距离的增加，流速逐渐降低。

（2）当裂隙面粗糙度不变时，裂隙开展宽度对孔隙及裂隙中流体压力和流体流速的影响具体表现为：在裂隙开展较小时，孔隙内流体压力仅在入口处小范围内成扇形分布，在裂隙中，压力分布曲线成正切函数型，流体流速在岩石和裂隙处都较小；随着裂缝开展宽度的增加，孔隙内流体压力逐渐增大，在裂隙中压力分布曲线逐渐向直线型转变，并且流体流速在入口处先减小后趋于稳定，在裂隙内部先增加后趋于稳定；当开展宽度增加为 1 mm 以后时，孔隙内部流体压力、流速分布趋于稳定，说明裂隙开展达到毫米量级时，裂隙宽度不再成为流体流动的主控因素。

（3）裂隙面粗糙度对裂隙岩石渗流特性的影响随裂隙开展宽度的变化而改变，且仅在裂隙开展宽度较大时，裂隙面粗糙度才会对孔隙内部的流体压力分布有较大的影响；随着裂隙面粗糙度增大，孔隙内流速逐渐增大，而裂隙中流速逐渐减小，裂隙的优势渗流通道作用逐渐变弱。

（4）裂隙开展宽度较小时，影响裂隙中流速的主要因素为裂隙开展宽度，随着裂隙开展宽度的增大，影响裂隙流速的主要因素逐渐由裂隙开展宽度变为裂隙面粗糙度。

综上所述，在油气开采过程中，可以根据裂隙开展宽度和裂隙面粗糙度对油气渗流特性的影响规律，优化设计水力压裂和酸化改造方案，实现对储层裂缝网络系统的有效控制。因此，掌握裂隙特征对岩石渗流特性的影响规律对油气开采过程中提高产能、降低成本具有重要的指导意义。

参考文献/References

[1] 周宏伟，谢和平. 岩石节理张开度的分形描述 [J]. 水文地质工程地质，1999，26（1）：1～4.
ZHOU Hongwei，XIE Heping. Fractal description of the average opening of a rock joint [J]. Hydrogeology and Engineering Geology，1999，26（1）：1～4.

[2] 宋良. 裂隙含沙渗流模型与应用研究 [D]. 徐州：中国矿业大学，2013.
SONG Liang. Research on the model of flow in rock fractures with injected sand and its application [D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2013.

[3] 刘才华，陈从新，付少兰. 二维应力作用下岩石单裂隙渗流规律的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2002，21（8）：1194～1198.
LIU Caihua，CHEN Congxin，FU Shaolan. Testing study on seepage characteristic of a single rock fracture under two-dimensional stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2002，21（8）：1194～1198.

[4] 于洪丹, 陈飞飞, 陈卫忠, 等. 含裂隙岩石渗流力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (S1): 2788~2795.
YU Hongdan, CHEN Feifei, CHEN Weizhong, et al. Research on permeability of fractured rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (S1): 2788~2795.

[5] 许孝臣, 盛金昌. 渗流-应力-化学耦合作用下单裂隙渗透特性 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2009, 28 (S): 270~272.
XU Xiaochen, SHENG Jinchang. Permeability of single fracture under coupled hydrological-mechanical-chemical action [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009, 28 (S): 270~272.

[6] 曾亿山, 卢德唐, 曾清红, 等. 单裂隙流-固耦合渗流的试验研究 [J]. 实验力学, 2005, 20 (1): 10~16.
ZENG Yishan, LU Detang, ZENG Qinghong, et al. Experimental study on coupling of flow-stress within a single fracture [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20 (1): 10~16.

[7] 刘泉声, 刘学伟. 多场耦合作用下岩体裂隙扩展演化关键问题研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (2): 305~320.
LIU Quansheng, LIU Xuewei. Research on critical problem for fracture network propagation and evolution with multifield coupling of fractured rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (2): 305~320.

[8] 王玉芳, 杜建军, 牛新年. 碳酸盐岩酸压裂缝导流能力随缝长变化规律研究 [J]. 地质力学学报, 2015, 21 (4): 546~554.
WANG Yufang, DU Jianjun, NIU Xinnian. Study on acid fracture conductivity with length variation in carbonate reservoir [J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21 (4): 546~554.

[9] 王永辉, 李永平, 程兴生, 等. 高温深层碳酸盐岩储层酸化压裂改造技术 [J]. 石油学报, 2012, 33 (S2): 166~173.
WANG Yonghui, LI Yongping, CHENG Xingsheng, et al. A new acid fracturing technique for carbonate reservoirs with high-temperature and deep layer [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (S2): 166~173.

[10] 王卫星, 杨记明. 一种基于图像处理的岩石裂隙粗糙度几何信息算法 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2010, 22 (4): 454~457.
WANG Weixing, YANG Jiming. A geometric information on roughness of rock fractures based on image processing [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2010, 22 (4): 454~457.

[11] 郑少河, 赵阳升, 段康廉. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (2): 133~136.
ZHENG Shaohe, ZHAO Yangsheng, DUAN Kanglian. An experimental study on the permeability law of natural fracture under 3-D stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18 (2): 133~136.

[12] 叶源新, 刘光廷. 三维应力作用下砂砾岩孔隙型渗流 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2007, 47 (3): 335~339.
YE Yuanxin, LIU Guangting. Porous seepage in calcirudite rock with 3-D stresses [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2007, 47 (3): 335~339.

[13] 董平川. 变形介质流固耦合渗流的数值模型及其应用 [J]. 地质力学学报, 2005, 11 (3): 273~277.
DONG Pingchuan. Numerical model of fully coupled fluid-solid seepage in a deformable porous medium and its applications [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11 (3): 273~277.

[14] 熊祥斌, 张楚汉, 王恩志. 岩石单裂隙稳态渗流研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (9): 1839~1847.
XIONG Xiangbin, ZHANG Chuhan, WANG Enzhi. A review of steady state seepage in a single fracture of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (9): 1839~1847.

[15] 颜其彬, 陈明江, 汪娟, 等. 碳酸盐岩储层渗透率与孔隙度、喉道半径的关系 [J]. 天然气工业, 2015, 35 (6): 30~36.
YAN Qibin, CHEN Mingjiang, WANG Juan, et al. Correlation among permeability, porosity and pore throat radius of carbonate reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35 (6): 30~36.

[16] Baghbanan A, Jing L R. Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45 (8): 1320~1334.

A STUDY ON THE INFLUENCE RULE OF THE FRACTURE CHARACTERISTICS ON ROCK SEEPAGE CHARACTERISTICS

ZHOU Hanguo[1,2], GUO Jianchun[1], LI Jing[3], FAN Zuosong[4], GAO Shuai[3], WANG Chang[3], LIU Zhen[3]

(1. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu* 610500, *Sichuan, China*;
2. *Manage Center of Oil and Gas Exploration of SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying* 257000, *Shandong, China*;
3. *Research Institute of Geological Mechanics and Engineering, China University of Petroleum, Qingdao* 266580, *Shandong, China*;
4. *Qingdao Metro Line Eight Co., Ltd., Qingdao* 266109, *Shandong, China*)

Abstract: Fracture is the main reservoir space and fluid seepage channel in oil and gas reservoirs, which affects hydrocarbon migration directly as an important indicator of oil and gas exploration and development. In this study, the Ren 10 well in Renqiu Oilfield of the Jizhong depression was taken as an example, the influence rule of fracture width and fracture surface roughness on rock seepage characteristics was studied in this work by numerical simulation. The results show as follows: 1) When fracture width is small, fluid pressure in pore distributes as a fan and only in a small range of the entrance; pressure distribution curve in fracture is tangent function type, and fluid and flow velocity are both relatively small in fracture and pore. With the increase of fracture width, fluid pressure in pore increases gradually; pressure distribution curve in fracture gradually changes to linear type. Moreover, the fluid and flow velocity decrease first and then tend to be stable at the entrance while increase first and then tend to be stable in fracture. 2) The influence of fracture surface roughness on rock seepage characteristics varies with fracture width. When fracture width gets bigger, the influence of fracture surface roughness gets greater on the distribution of fluid pressure. With the increase of fracture surface roughness, flow velocity in pore gradually increases while that in fracture decreases. 3) With the increase of fracture width, the main controlling factor affecting fluid flow in fracture changes from fracture width to fracture surface roughness.

Key words: fractured rocks; seepage characteristics; fracture width; fracture surface roughness; numerical simulation