

深地含不同流体岩石破裂机制的离散元流固耦合模拟研究

周众^{1*}, 李凯^{1#}, 陈龙¹, 赵一阳¹, 张志镇^{1,2#}

¹中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州

²中国矿业大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州

收稿日期: 2025年5月26日; 录用日期: 2025年8月28日; 发布日期: 2025年9月17日

摘要

深地油气储层赋存于高地应力、高地温及高孔隙压力的复杂地质环境中, 揭示含流体岩石破裂机理对储层裂缝预测与甜点识别具有重要意义。本研究基于离散元流固耦合理论, 采用PFC2D数值模拟方法, 针对含水、油、甲烷三种流体赋存岩石开展三轴压缩对比研究。通过构建数字岩心模型, 标定岩石颗粒细观力学参数及流体(水、油、CH₄)物性参数, 设置不同围压与孔隙压力实验条件, 系统分析了含不同流体岩石的宏细观力学响应特征。研究结果表明: (1) 流体类型显著影响岩石抗压强度, 水相介质使应力峰值降幅最大, 油相介质次之, 气相介质(CH₄)影响最小; (2) 围压水平调控颗粒运移机制, 水的润滑作用、油的黏滞阻力及CH₄的可压缩性分别影响颗粒位移程度与速度; (3) 细观破裂模式呈现流体依赖性, 含油岩石剪裂纹较多, 含水与含CH₄岩石更接近脆性破裂, 力链分布也因流体特性呈现不同密集程度与拉力链数量差异。研究成果揭示了多种流体-岩石相互作用机制, 为深层油气储层压裂优化和甜点预测提供了理论依据。

关键词

含流体岩石, 离散元模拟, 应力-应变特征, 颗粒位移, 细观破裂机制

Discrete Element Fluid-Solid Coupling Simulation of Fracture Mechanisms in Deep Fluid-Bearing Rocks

Zhong Zhou^{1*}, Kai Li^{1#}, Long Chen¹, Yiyang Zhao¹, Zhizhen Zhang^{1,2#}

¹School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

²State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: May 26th, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 17th, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 周众, 李凯, 陈龙, 赵一阳, 张志镇. 深地含不同流体岩石破裂机制的离散元流固耦合模拟研究[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 426-440. DOI: 10.12677/jogt.2025.473047

Abstract

Deep hydrocarbon reservoirs are situated in complex geological environments characterized by high *in-situ* stress, elevated temperatures, and high pore pressures. Understanding the fracture mechanisms of fluid-bearing rocks is crucial for reservoir fracture prediction and sweet spot identification. This study utilizes a discrete element fluid-solid coupling approach with PFC2D numerical simulations to conduct a comparative investigation of rocks saturated with water, oil, and methane (CH₄) under triaxial compression. A digital core model was established, incorporating calibrated mesoscale mechanical parameters for rock particles and fluid-specific properties (water, oil, CH₄). Experiments were performed under varying confining and pore pressures to systematically analyze the macro- and meso-scale mechanical responses of fluid-bearing rocks. Key findings reveal that: (1) Fluid type significantly affects rock compressive strength, with water causing the greatest reduction in peak stress, followed by oil, while CH₄ exhibits the least influence; (2) Confining pressure governs particle displacement mechanisms, where the lubricating effect of water, viscous resistance of oil, and compressibility of CH₄ distinctly modulate displacement magnitude and velocity; (3) Mesoscale fracture patterns are fluid-dependent, with oil-saturated rocks developing more shear cracks, whereas water- and CH₄-bearing rocks predominantly undergo brittle tensile failure. Force chain distributions further demonstrate fluid-induced variations in network density and tensile chain proportions. These results elucidate the interaction mechanisms between multiphase fluids and rock matrices, offering theoretical foundations for optimizing hydraulic fracturing and enhancing sweet spot prediction in deep hydrocarbon reservoirs.

Keywords

Fluid-Bearing Rock, Discrete Element Simulation, Stress-Strain Characteristics, Particle Displacement, Mesoscopic Failure Mechanism

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源结构转型加速，深地油气资源开发已成为保障能源安全的核心战略。根据国际能源署 (IEA) 最新报告，全球超过 35% 的常规油气田已进入产量递减期，而埋深超过 4500 米的超深层油气资源占比达总探明储量的 42%，且占比持续攀升。深地油气储层普遍赋存于高地应力 (>100 MPa)、高温 (>150 °C)、高孔隙压力 (>80 MPa) 的“三高”地质环境，其岩石力学行为显著受赋存流体类型影响——水基流体 (地层水)、烃类液相 (原油) 及气相 (CH₄) 因其物理性质差异 (如黏度、压缩性) 可能诱发迥异的破裂与渗流模式。当前我国正在推进的页岩气立体开发、塔里木超深层油气田建设以及南海天然气水合物试采等重大工程，均面临着储层压裂效率受流体类型制约、裂缝网络扩展规律不清等瓶颈问题，其本质源于不同流体赋存条件下岩石宏观力学响应机制的系统认知缺失。

基于纯固体岩石三轴基础上，诸多学者对含流体岩石破裂特征均做过大量研究。Zeng LH 等人、Li P 等人、Liu X 等人均利用三轴压缩实验对纯固体岩石进行了破裂特征研究 [1]-[3]。吴青钱 [4] 等人借助三轴压缩试验对比总结了不同流体对砂岩各种力学特性的影响。李波 [5] 等人基于自主研发的三轴煤岩体压裂渗流实验系统，研究了一套可以根据实际工程数据设计实验室真三轴煤岩体水力压裂实验相关参数的方

法。孔祥伟[6]等人结合真三轴实验探究了岩石相关力学参数对岩石破裂裂缝的影响,为低渗透致密砂岩气藏暂堵压裂提供了理论基础。方正[7]等人研究了页岩储水层的压裂破坏和渗吸,通过CT扫描技术分析页岩储水层的裂隙扩展机理。张永利[8]等人探究了油页岩在微波辐射下的渗流特性演化规律,采用高分辨率X射线CT扫描技术对微波热解后的抚顺油页岩进行可视化分析,将油页岩的三维空隙结构进行三维图像重建,同时对相关渗流场和压力场力学参数进行量化分析,发现微波功率是油页岩孔裂隙结构和渗透性的重要影响参数。吴君达[9]人在岩心试样实验基础上,基于流动单元指数对不同岩性含砾砂岩的微观孔喉特征和渗流特征设计了适用数值模拟方法,改进了常规数值模拟难以表征复杂含砾岩储层的问题。周鹏[10]等人结合达西定律推导出考虑裂缝间相互影响的双裂缝滤失模型,并将其嵌入FrackOptima全三维水力压裂模拟软件,开展了数值模拟研究。袁启航[11]等人以门架式双排桩为研究对象,借助FLAC^{3D}和PFC^{3D}软件建立了离散耦合分析模型,研究了一种能有效获取门架式双排桩结构的受力和变形的数值模拟方法。

本文基于离散元流固耦合方法,开展三轴压缩下含水、油、气三种流体的对比模拟,研究不同流体对岩石力学性质和裂纹特征的影响,为深地含流体岩石破裂机制提供理论基础。

2. PFC^{2D} 模拟方法

在PFC中,一般通过接触的本构模型来模拟材料的本构关系,而接触的本构模型分为接触刚度模型、滑动模型与黏结模型[12]。接触刚度模型描述接触处弹性变形的力-位移关系,决定接触的线性或非线性弹性响应,为滑动模型与黏结模型提供弹性变形基础,不直接处理破坏与塑性行为;滑动模型定义接触面在剪切力作用下的滑移条件,模拟摩擦行为;黏结模型模拟颗粒间固结材料的力学行为(如胶结、岩石或混凝土),可以传递力和力矩。

黏结模型分为接触黏结模型与平行黏结模型。接触黏结尽在接触点传递力(无弯矩),适用于点对点黏结,当黏结应力超过强度时,黏结断裂并退化为纯摩擦接触(滑动模型主导);平行黏结在接触面形成有限尺寸的“黏结材料”,抵抗法向力、剪切力和弯矩,通过强度准则判断黏结断裂。本文砂岩模型采用平行黏结模型,元件示意如图1。

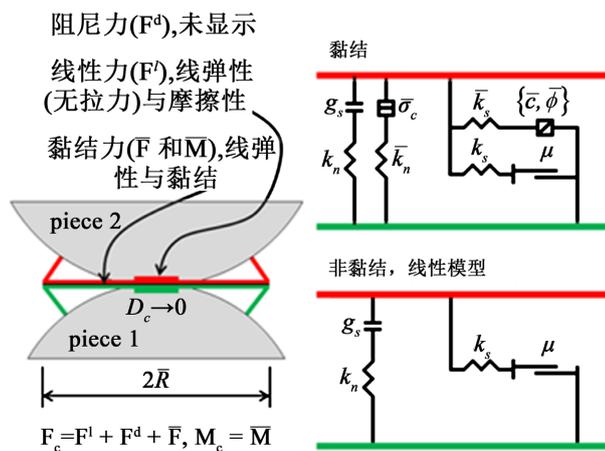


Figure 1. Schematic diagram of parallel bonding model elements
图1. 平行黏结模型元件示意图

离散元方法中,我们用颗粒之间的空隙来代表岩石的孔隙,两两颗粒之间存在连接相邻孔隙的喉道,流体通过喉道在孔隙之间流动,我们把相邻颗粒圆心两两连接起来构成流体域的边界,形成多个封闭的

多边形流体域, 相邻流体域形心相互连接形成流体管道(颗粒间的黏结接触), 这样就完成了流体域的划分(黏结接触少于两个的颗粒不能形成流体域), 如图 2 所示。流体管道内单位时间内的流动流量通过立方定律[13]获得:

$$q = \frac{1}{12\mu} a^3 \frac{(P_2 - P_1)}{L} t \quad (1)$$

式中: q 为单位时间内通过流体管道的流体流量; μ 为流体动力黏度; a 为流体管道张开度; P_1 和 P_2 为两相邻流体域内的孔隙压力; L 为流体管道长度 $L = r_1 + r_2$, r_1 和 r_2 为两相邻颗粒的半径; t 为试样厚度, $t = 1$ 。流体管道张开度 a 代表两相邻颗粒表面之间的间隙, a 的大小受两颗粒间法向接触力 F 的大小与类型影响, 假设 a_0 为在没有接触力下的初始张开度, 则:

当 F 为压应力时,

$$a = \frac{a_0 F_0}{F + F_0} \quad (2)$$

式中, F_0 为流体管道张开度减少为初始张开度 a_0 的一半时接触所受到的法向作用力。 F 为 0 时, 张开度 $a = a_0$; $F = F_0$ 时, 张开度 $a = a_0/2$; F 无限大, 则张开度 a 无限小。

当 F 为拉应力时,

$$a = a_0 + \lambda(d - r_1 - r_2) \quad (3)$$

式中, d 为两颗粒中心距离; r_1 和 r_2 分别为两颗粒的半径; λ 为无量纲系数, 通常小于 1。

流体域内流体压力的变化由域体积变化值 ΔV_d 与流体体积压缩模量 K_f 共同决定。在 Δt 时间步内, 若流过流体通道进入域内的流量为 Σq , 则该流体域内流体压力变化 Δp 为:

$$\Delta p = \frac{K_f}{V_d} (\Sigma q \Delta t - \Delta V_d) \quad (4)$$

式中, V_d 为流体域体积。

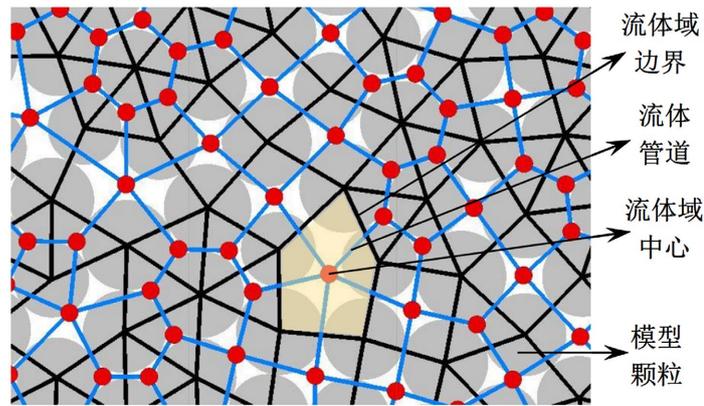


Figure 2. Schematic diagram of fluid domain
图 2. 流体域示意图

3. 数值模拟参数设置

以直径 50 mm、高度 100 mm 的实际岩心试样为原型, 在 PFC 数值模拟软件中开展数字岩心模型构建工作。为使数值模拟结果相对准确, 同时为了减少计算量, 加快模型运行速度, 结合相关成功模拟实

验, 本实验生成颗粒数为 6213 的数字岩心模型。设定模型参数, 取颗粒最小粒径 0.8 mm, 粒径比为 1.5, 局部阻尼系数为 0.7。岩石试样力学相关力学参数数值模拟实验中使用的颗粒细观参数如表 1 所示, 生成数字岩心模型效果如图 3 所示。

Table 1. Mesoscopic parameters of digital core model

表 1. 数字岩心模型细观参数

参数名称(单位)	取值	参数名称(单位)	取值
颗粒杨氏模量, E_c (Gpa)	120	平行黏结杨氏模量, \bar{E}_c (GPa)	120
平行黏结抗拉强度(MPa)	10	平行黏结抗剪强度(MPa)	60
平行粘结刚度比, k_n/k_s	2.5	摩擦系数	0.68
软化系数	0.8	孔隙度	0.03

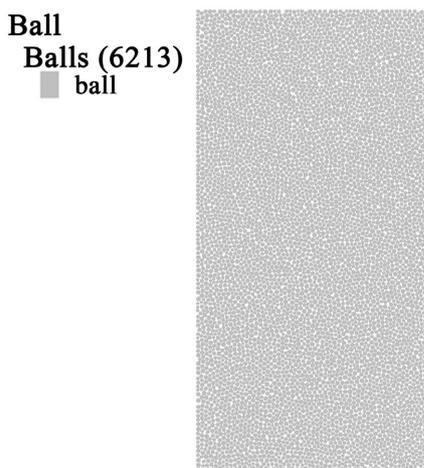


Figure 3. Digital core model

图 3. 数字岩心模型

选取三种富有代表意义的流体 CH₄、淡水、油, 根据其动力黏度, 流动系数, 体积模量进行流体参数修订。流体参数如表 2 所示。

Table 2. Parameters related to fluid simulation

表 2. 流体模拟相关参数

流体	体积模量(GPa)	流体质量(kg/m ³)	动力黏度(Pa·s)
水	2.2	1000	1e-3
油	1.2	850	5e-3
CH ₄	0.05	0.8	1e-5

黄彦华[14]等人在进行实验时发现, 当数值模拟过程中应变加载速率为 $0.051 \times 10^{-3}/s$ 时, 满足准静态加载条件, 与实际力学响应较为贴切, 当应变加载速率大于 $2 \times 10^{-3}/s$ 时力学响应出现显著差别。参照其研究过程, 本次数值模拟实验取 $0.5 \times 10^{-3}/s$ 为应变加载速率。设置 150 MPa 围压 98 MPa 孔隙压对同

围压同孔隙压力下含不同流体岩石, 应力-应变曲线变化, 颗粒位移及细观力学参数变化进行探究。同时经数值模拟发现不同围压和孔隙压情况下颗粒位移速度存在极大不同, 对颗粒位移特征变化加入低围压低孔隙压力 35 MPa 围压 28 MPa 孔隙压情况数值模拟探究。

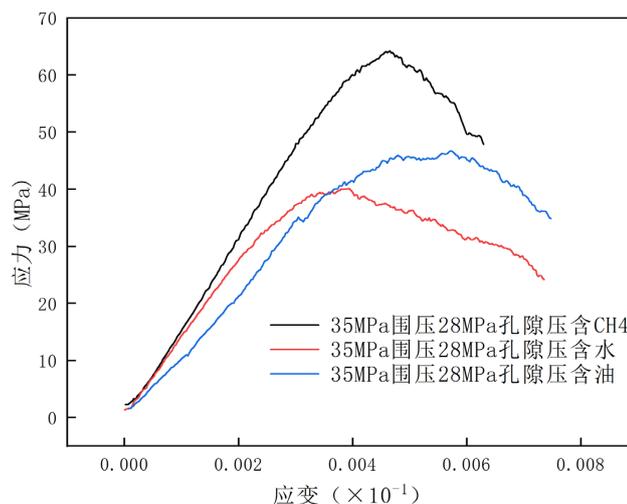
4. 含不同种流体岩石破裂机制

4.1. 含不同种流体岩石应力-应变曲线

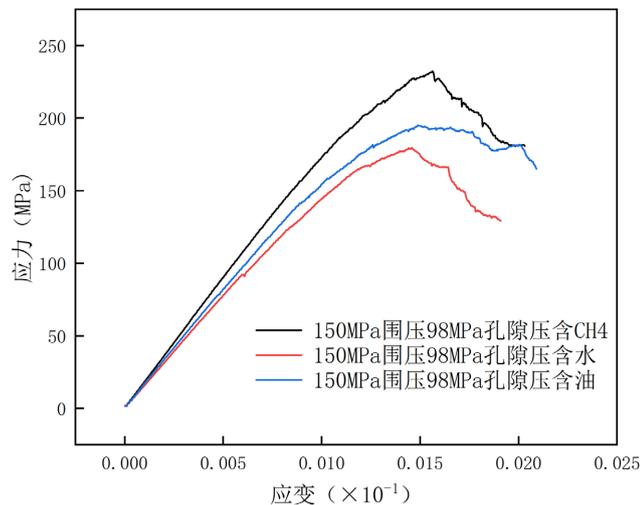
如图 4 所示为同围压同孔隙压下含不同流体岩石应力-应变曲线。从应力-应变曲线形态特征和参数变化可以看出, 不同流体对岩石整体抗压强度的影响不同。含水岩石应力峰值下降最多, 水分子对岩石矿物颗粒存在物理楔入作用及水化反应。水分子深入岩石颗粒之间, 极大程度上减小了岩石颗粒之间的胶结强度, 同时水的作用导致岩石内部部分颗粒发生膨胀作用, 岩石内部结构遭到一定程度的破坏, 岩石整体承受荷载能力降低。 CH_4 对岩石应力峰值的下降影响最小, 由于 CH_4 分子较小, 动力黏度较低, 在岩石孔隙中主要以游离态存在, 对颗粒间作用力的影响有限。轻质油对岩石应力峰值的影响则介于他们之间。轻质油的黏度比水大, 比 CH_4 更是大得多。当岩石受到外力作用时, 轻质油在岩石孔隙中流动或存在会产生较大的黏滞阻力, 这种阻力会使岩石内部应力分布不均匀, 出现局部的应力集中, 从而导致岩石提前发生破坏, 降低了应力峰值。轻质油的密度也介于水和 CH_4 之间。它在岩石孔隙中占据一定的空间, 对岩石颗粒有一定的浮力作用, 会在一定程度上减小颗粒间的有效应力, 使得颗粒间的摩擦力降低, 岩石的整体强度有所下降。水流动性好, 能更深入地渗透到岩石内部, 对岩石颗粒的润滑和分散作用更显著, 对岩石强度的降低作用更大。 CH_4 密度小为气态, 在岩石孔隙中对岩石颗粒的作用相对较弱, 对岩石强度影响较小。综合这些性质的影响, 轻质油引起的岩石应力峰值降幅处于水和 CH_4 引起的降幅之间。这些差异表明, 流体性质及其与岩石的相互作用机制是控制岩石力学行为的关键因素。

4.2. 含不同种流体岩石位移破坏机制

低围压低孔隙压和极高围压情况下岩石内部颗粒位移机制存在明显差异, 本节将分析低围压低孔隙压和极高围压情况下含不同流体岩石的颗粒位移破坏机制。如图 5 所示为低围压低孔隙压情况下含不同种流体颗粒位移情况。可以看出, 在低围压低孔隙压情况下含水岩石试样在三轴压缩过程中, 颗粒间水



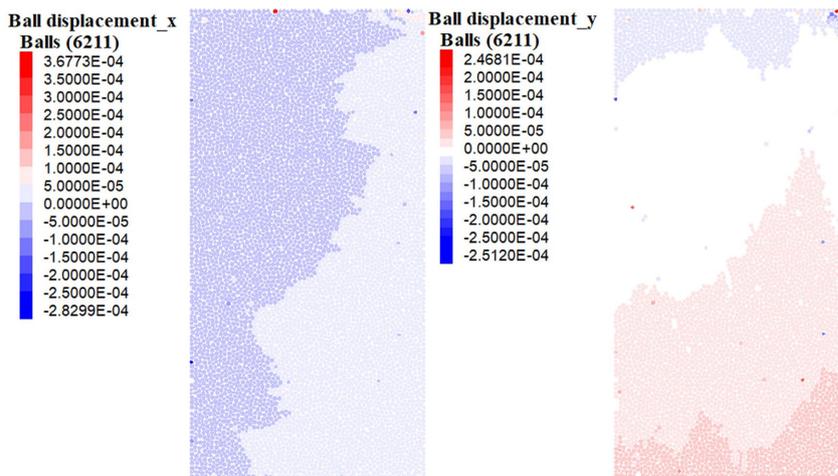
(a) 35 MPa 围压 28 MPa 孔隙压力下含不同种流体岩石应力-应变曲线



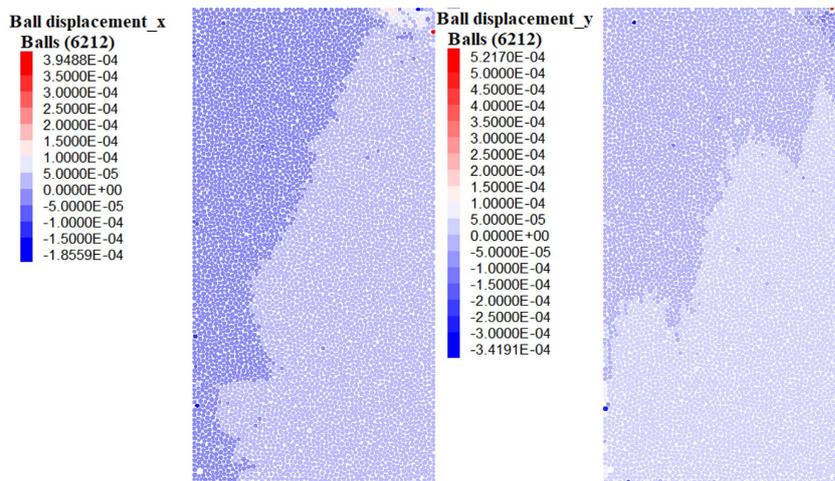
(b) 150 MPa 围压 98 MPa 孔隙压力下含不同种流体岩石应力 - 应变曲线

Figure 4. Stress-strain curves of rocks containing different fluids

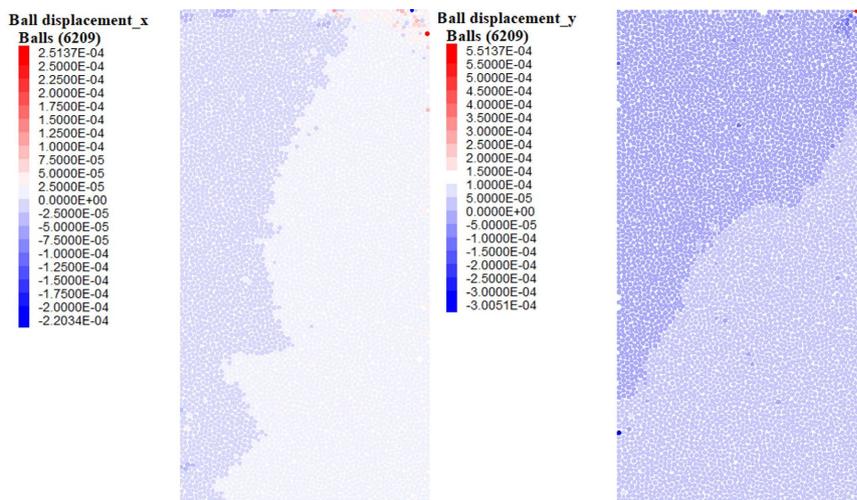
图 4. 含不同流体岩石应力 - 应变曲线



(a) 35 MPa 围压 28 MPa 孔隙压力下含 CH₄ 岩石破裂后 X、Y 方向上位移



(b) 35 MPa 围压 28 MPa 孔隙压力下含水岩石破裂后 X、Y 方向上位移

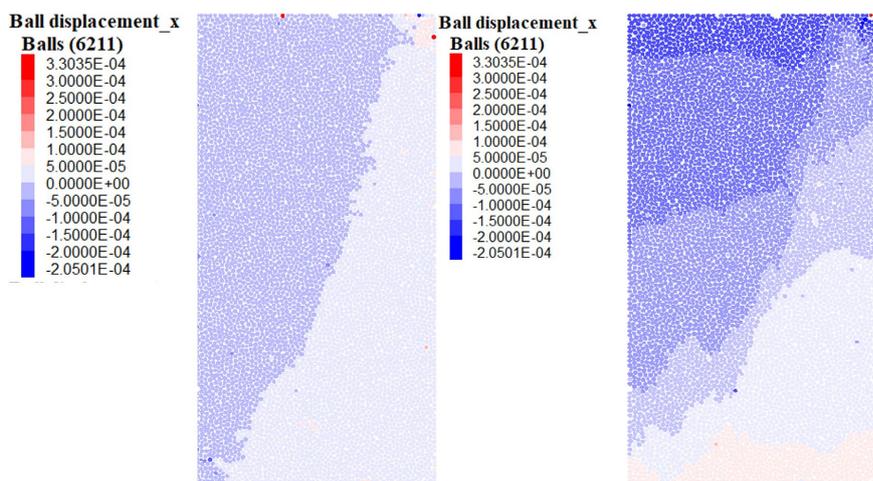


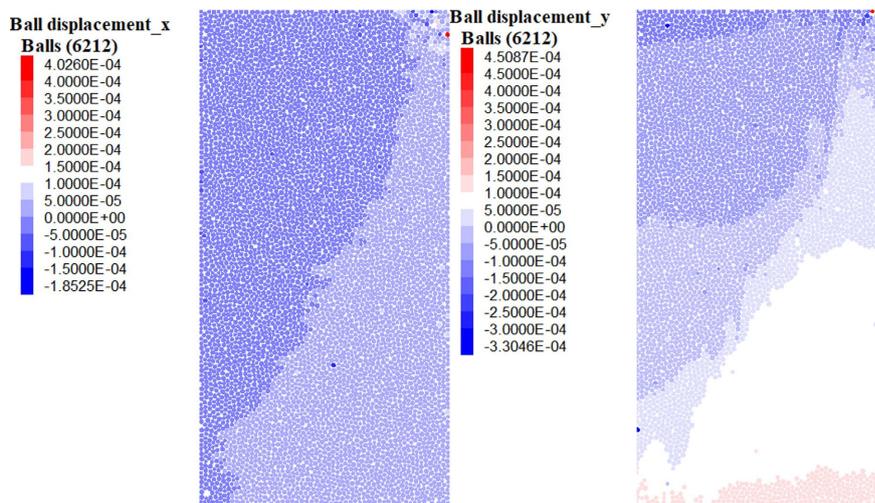
(c) 35 MPa 围压 28 MPa 孔隙压力下含油岩石破裂后 X、Y 方向上位移

Figure 5. Particle displacement under low confining pressure and low pore pressure
图 5. 低围压低孔隙压下颗粒位移

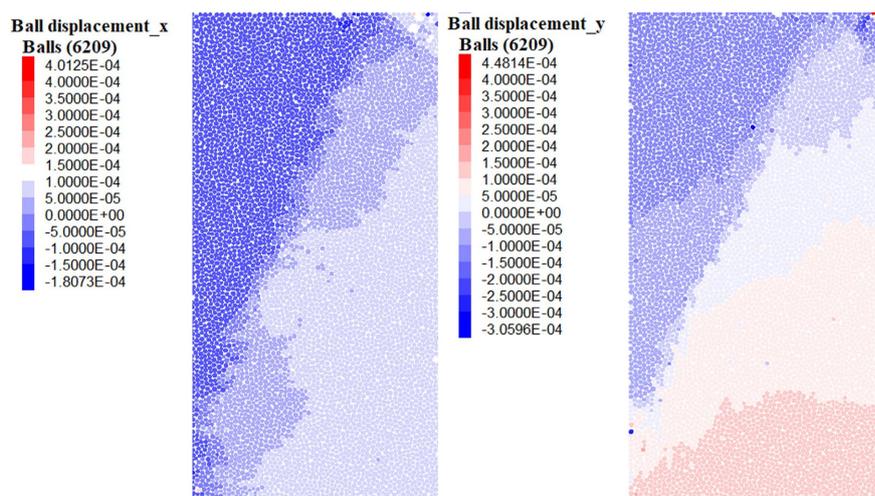
的润滑作用使得颗粒更易发生相对滑动，位移程度相对较高，颗粒位移分布区域更为分散，在岩石试样的大部分区域都存在不同程度的位移。含 CH_4 的岩石试样，气体对颗粒的支撑作用较弱，颗粒位移程度相对含水岩石较小，由于气体密度较低在岩样中分布均匀性较弱，不同区域的颗粒位移程度差异较大，存在部分颗粒位移程度明显高于其它颗粒。含轻质油的岩石试样中，轻质油具有一定的黏性，能够在颗粒间形成黏结力，有效限制颗粒的移动，其内部颗粒位移程度最小，同时含轻质油的岩石试样颗粒位移相对更加集中。

如图 6 所示为高围压情况下三种含不同流体颗粒位移程度情况。高围压情况下颗粒位移程度与低围压情况下颗粒位移变化存在更为明显的不同含 CH_4 岩石试样的颗粒位移较为分散， CH_4 分子与岩石颗粒间的相互作用较弱，在围压作用下，颗粒相对更容易发生移动。其颗粒位移分布相对较为均匀，没有明显集中区域，表明在高围压情况下 CH_4 在岩石孔隙中分布相对均匀，对颗粒的作用也较为均匀。水与岩石颗粒表面存在较强的吸附作用产生较强的相互作用力。在含水试样中，与含 CH_4 岩石试样比较整体上颗粒位移更为有序。位移在某些区域呈现出聚集现象，可能是由于水在岩石孔隙中作用，部分区域的颗

(a) 150 MPa 围压 98 MPa 孔隙压力下含 CH_4 岩石破裂后 X、Y 方向上位移



(b) 150 MPa 围压 98 MPa 孔隙压力下含水岩石破裂后 X、Y 方向上位移



(c) 150 MPa 围压 98 MPa 孔隙压力下含油岩石破裂后 X、Y 方向上位移

Figure 6. Particle displacement under high confining pressure and high pore pressure
图 6. 高围压高孔隙压下颗粒位移

粒受到更强的作用力，导致位移集中。含轻质油试样的颗粒位移大小处于含 CH_4 和含水岩石试样之间，轻质油与岩石颗粒间的相互作用更加复杂。其位移分布则显示出一定的方向性和局部集中性，这与轻质油的粘度、润湿性等性质有关，轻质油在岩石孔隙中的流动和分布影响了颗粒的位移方向和集中区域。

从最大位移角度来看，含 CH_4 模型的最大位移值在三种模型中并非最大，说明 CH_4 对颗粒的推动作用相对有限，即使在极高围压下，也未使颗粒产生极大的位移。含水模型和含轻质油模型的最大位移值较为接近且相对较大，这表明在极高围压下水和轻质油对岩石颗粒的力学影响更大，使颗粒产生更大幅度的位移。

如图 7 所示为低围压低孔隙压下含不同流体的岩石颗粒位移速度。通过对围压 35MPa 孔隙压 28MPa 条件下，含 CH_4 、含水以及含轻油的 PFC 数字岩心模型三轴压缩后的颗粒位移速度图进行对比，可以发现含水试样的颗粒最大位移速度在三者中相对较高，含轻油岩心的颗粒最大位移速度则相对较低。从流体与岩石颗粒间的相互作用性质来看，水与岩石颗粒表面存在较强的物理吸附作用。在三轴压缩过程中，这种作用使得水能够在一定程度上降低岩石颗粒间的摩擦阻力，促使颗粒更易发生相对运动，导致颗粒

位移速度相对较高。 CH_4 与岩石颗粒间的作用力相对较弱。在低围压和低孔隙压,这种作用力不强,但仍能对颗粒的位移产生一定影响,使含 CH_4 的岩样中的颗粒具备一定的位移速度。轻油的黏度较大,分子间的内聚力较强。在岩石孔隙中流动时,较高的黏度会对岩石颗粒产生较大的黏滞阻力,限制了颗粒的运动。同时,轻油与岩石颗粒间的相互作用较弱,难以像水那样有效降低颗粒间的摩擦,在三轴压缩后,含轻油岩心模型中的颗粒位移速度受到更大限制,颗粒最大位移速度最小。

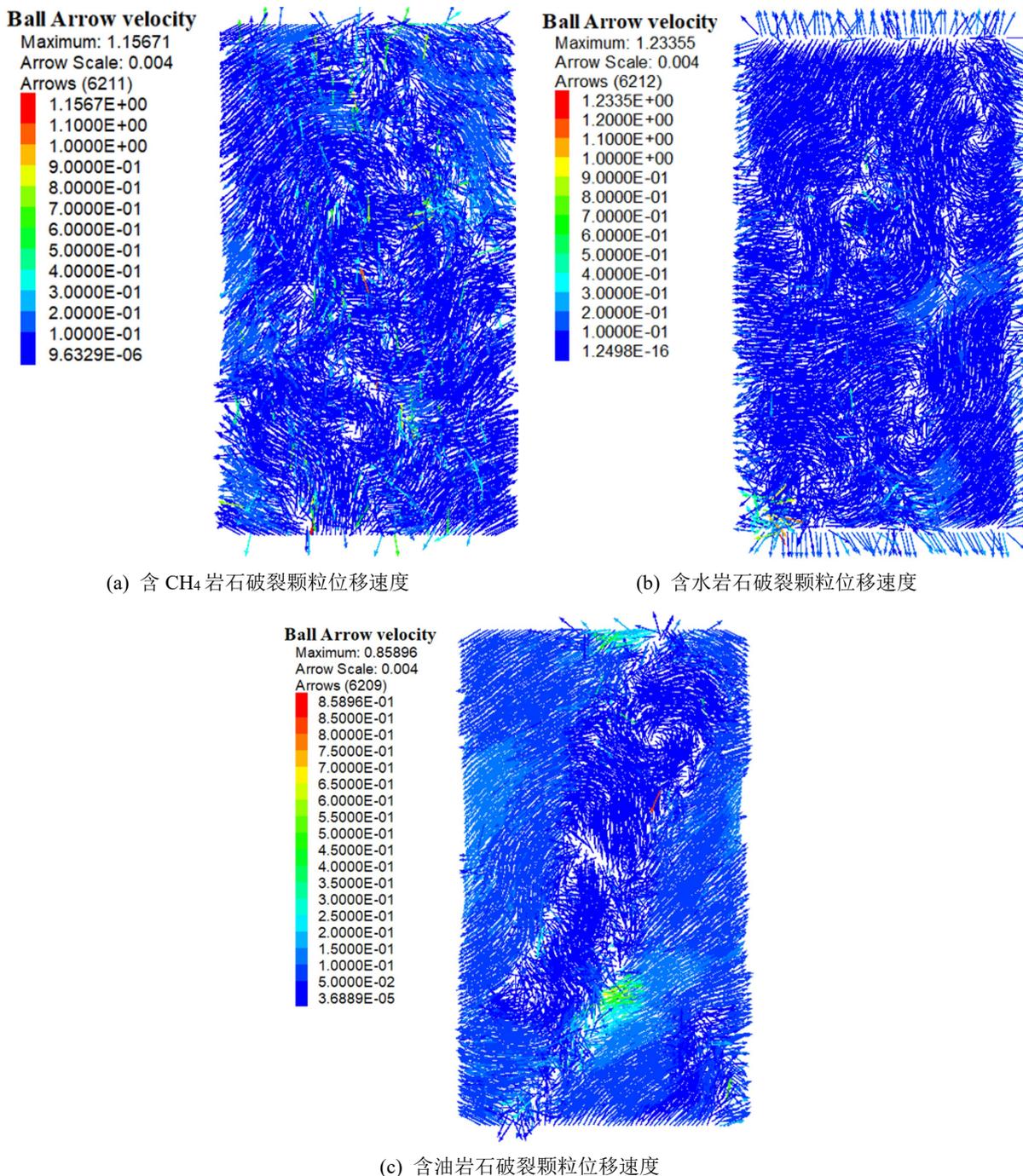


Figure 7. The displacement velocity of particles under low confining pressure and low pore pressure
图 7. 低围压低孔隙压下颗粒位移速度

如图 8 所示为高围压高孔隙压下含不同流体的岩石颗粒位移速度。在含 CH_4 的试样中，最大颗粒位移速度是三种试样中最大的。在速度矢量图上可以看出，颗粒位移速度的分布相对较为分散，高速区域的范围分布更广。极高围压下甲烷作为一种气体，分子间作用力较弱，具有较高的可压缩性和流动性。在压缩过程中，甲烷气体在岩心孔隙中迅速调整分布，为颗粒的相对运动提供了更为有利的条件，从而使得较多颗粒能够获得较高的位移速度，导致整体位移速度分布较为宽泛且最大值较高。

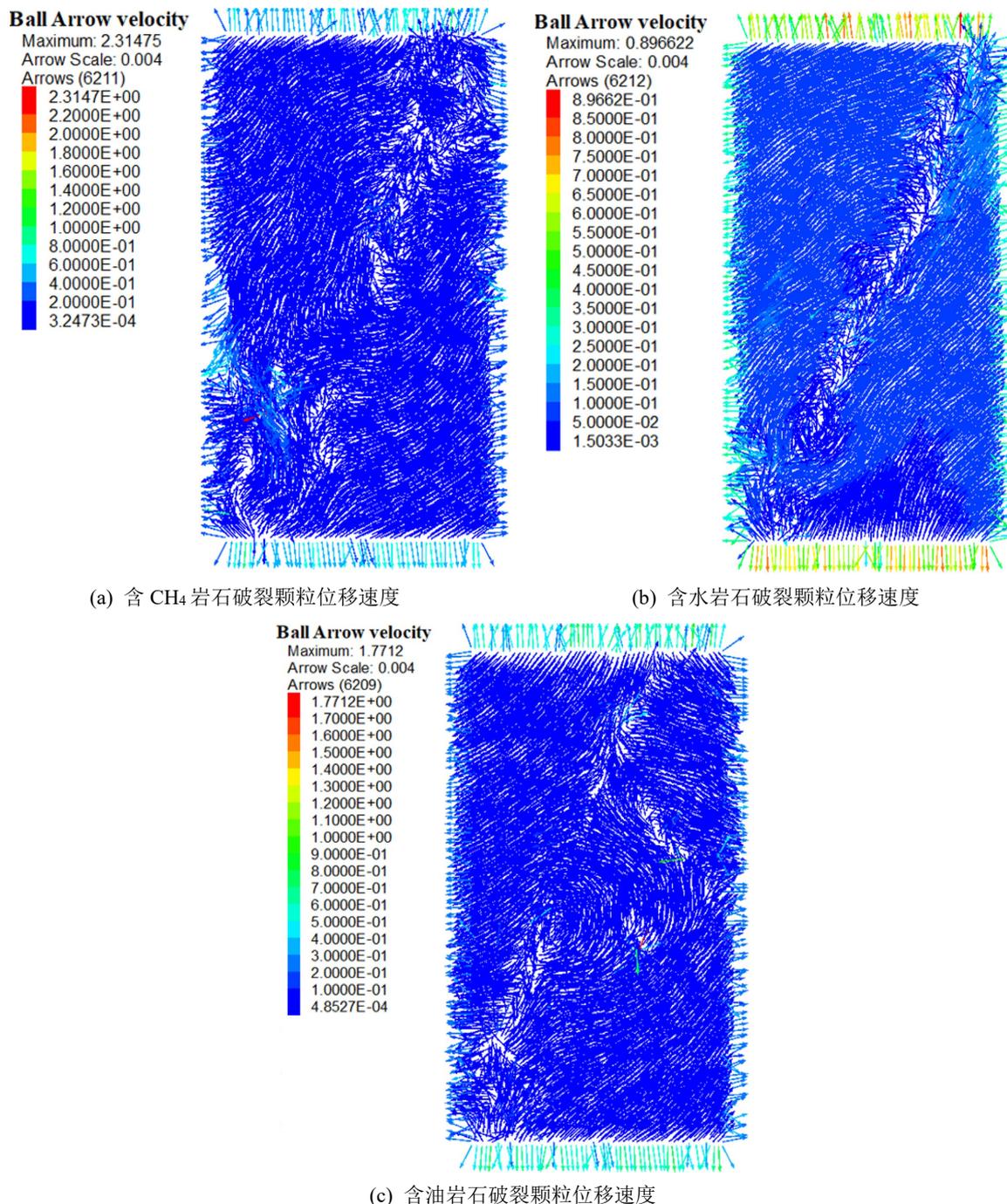


Figure 8. The particle displacement velocity under high confining pressure and high pore pressure
图 8. 高围压高孔隙压下颗粒位移速度

含水的试样最大颗粒位移速度是三种试样中最小的。从速度矢量图中可以看出,整体岩石试样中颗粒位移速度分布较为均匀,高速颗粒分布范围较小。水具有较高的粘性,在岩心孔隙中形成了相对稳定的流体环境。三轴压缩时,水的粘性对岩心颗粒的运动产生了较大的阻碍作用,限制了颗粒间的相对滑动和位移。

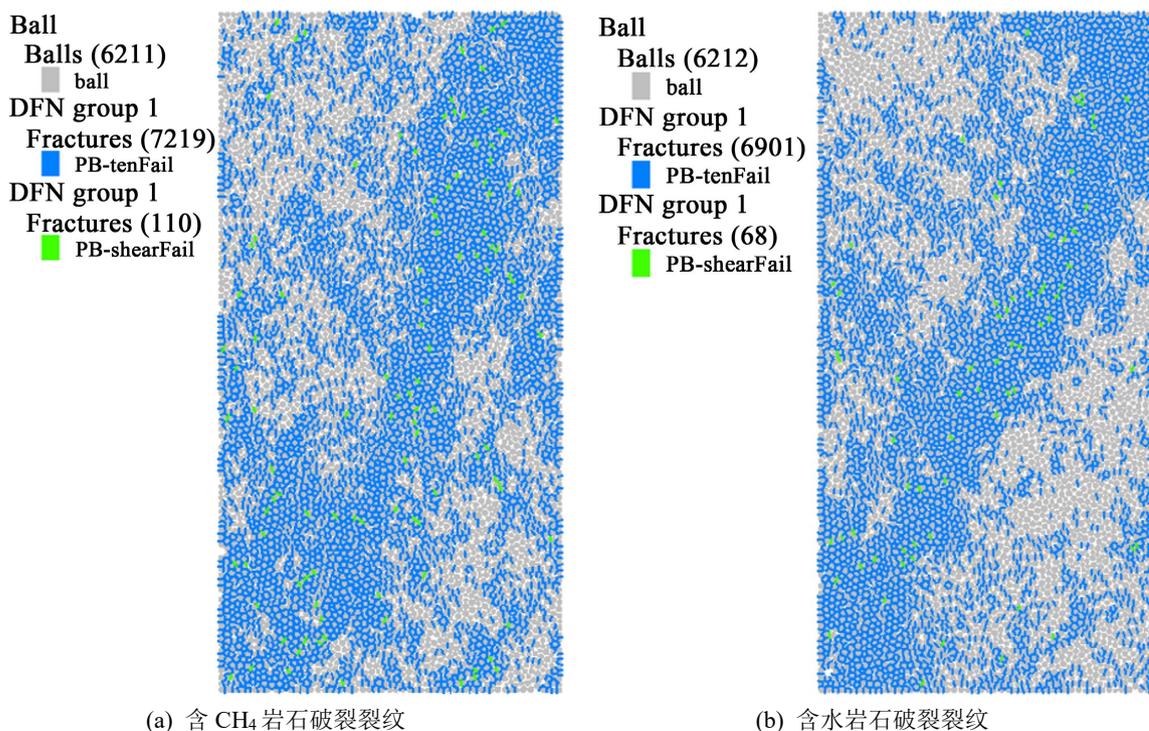
含油的试样,最大颗粒位移速度介于含 CH_4 和含水试样之间。部分区域呈现出相对较高的速度,一些区域速度相对较低。轻油具有较高的黏度和较低的可压缩性。在高围压三轴压缩实验中,轻油能够在一定程度上促进颗粒的位移,但由于其具有一定的粘性,对颗粒的位移速度产生着极大影响。

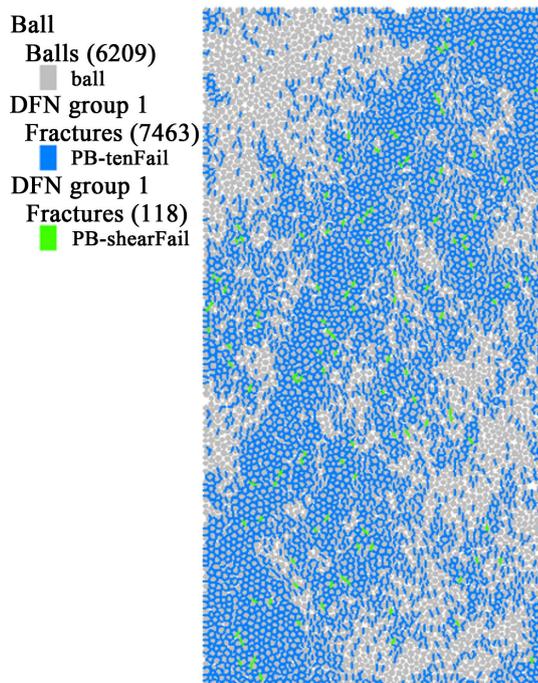
极高围压下不同流体对岩石的破坏机制整体规律不产生较大影响,但岩石内部颗粒的位移情况会发生较大变化。

4.3. 含不同种流体岩石细观破裂机制

不同种流体在不同工况下对岩石产生的影响规律是一致的,本小节选取 150 MPa 围压 98 MPa 孔隙压力下含不同种流体岩石细观破裂机制进行分析对比,如图 9 所示为含不同流体相同条件下岩石内部所产生细观裂隙。

从下图可以看出,含流体岩石试样中拉裂纹数量相对较多。流体与岩石内部颗粒发生相互作用使得颗粒间的黏结力在一定程度上降低,三轴压缩过程中,岩石内部应力分布发生改变,颗粒间的拉应力更容易超过其黏结强度,产生更多的拉裂纹。含 CH_4 岩石试样剪裂纹产生数目相对适中,甲烷的存在降低了颗粒间的有效应力,减小了颗粒间的摩擦力,有利于剪裂纹的产生;同时甲烷在孔隙中的分布相对均匀,在一定程度上又抑制了剪应力的过度集中,剪裂纹的产生数量处于相对平衡的状态。含水试样中产生剪裂纹数目相对较少。这是由于水的润滑作用,使得岩石颗粒在受到剪切力时,颗粒间的相对滑动更为顺畅,减少了因摩擦而产生的剪应力集中。含轻油试样中的剪裂纹数目相对较多。轻油的粘性使得岩石颗粒间的相对运动受到阻碍,在剪切力作用下,颗粒间的剪应力更容易集中。轻油在岩石孔隙中的不均匀分布,导致局部区域的剪应力分布更加复杂,更容易超过岩石的抗剪强度,促使更多的剪裂纹产生。





(c) 含油岩石破裂裂纹

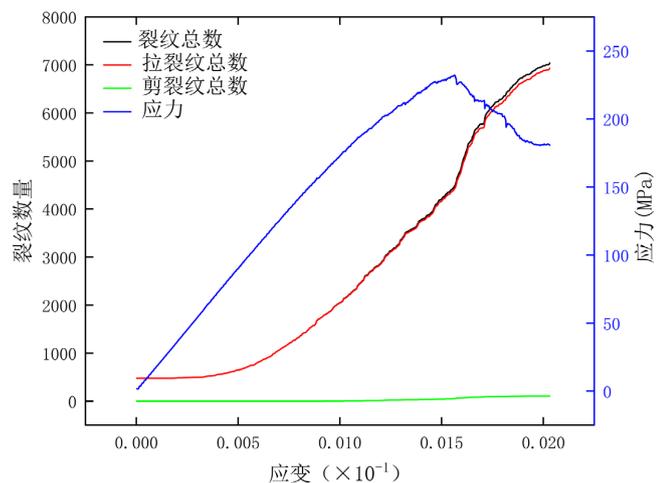
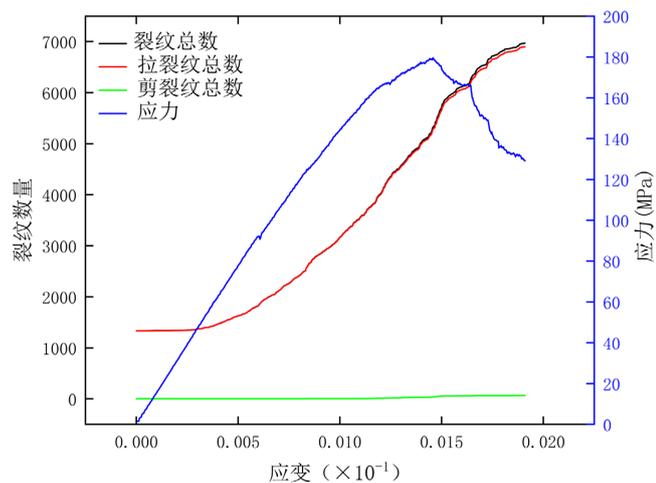
Figure 9. Internal microscopic cracks in rocks containing different fluids under the same conditions
图 9. 含不同流体岩石相同条件下内部微观裂纹

不同流体由于流体黏度、体积模量的不同与岩石试样之间发生的相互作用力不同，对岩石微观拉剪裂纹的发育、扩展产生不同影响。如图 10 所示为含不同种流体岩石裂纹数量与应力 - 应变变化图。可以看出，轻油流体动力黏度最大，含轻油岩石破裂特征与岩石延性破裂特征更为相似。应力 - 应变曲线达到应力峰值后应力下降缓慢几乎趋于不变，裂纹增长速度不断增大，到达应力峰值后出现小幅度转折，但裂纹数量仍然保持增长，剪裂纹数量极少，在峰后增长较快。甲烷与水的流体动力黏度较小，含水与含甲烷岩石破裂特征更接近脆性破裂。岩石弹性变形阶段裂纹数目增长缓慢，屈服阶段裂纹增长速度迅速增大，在应力峰值处裂纹增长速度达到最大，其后速度开始放缓，与最大裂纹数目接近后，基本保持裂纹数目不变，拉裂纹数量与总裂纹数量几乎重合。甲烷体积模量较小，水体积模量相对较大，在应力峰值处，含水岩石裂纹变化曲线出现上凸型减缓，含甲烷岩石裂纹变化曲线出现明显下凹处。

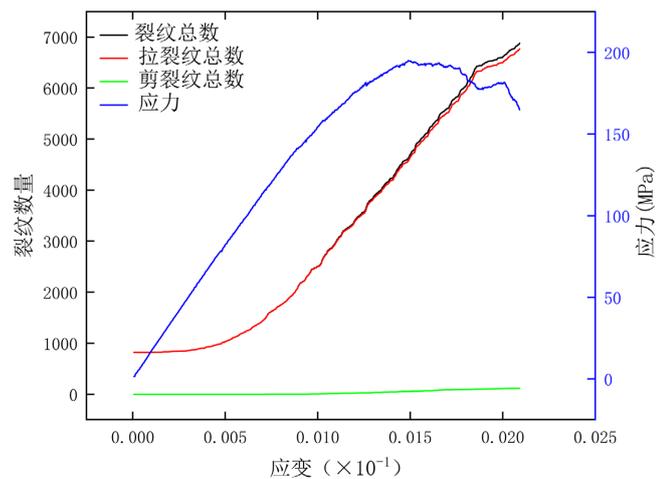
水的体积模量相对较大，在岩石孔隙中，受到外力作用时，不易被压缩，同时水的黏度低，对颗粒的摩擦力较小，对力链的干扰较弱，能够较为均匀地传递压力。因此含水岩石颗粒间的力链分布较为稳定。力链在岩石颗粒内部的分布变化较小，力链强度也相对较为一致，不易出现局部应力集中现象。

油的体积模量一般比水小，其可压缩性相对较大。当岩石受到外力时，油会发生一定程度的压缩使得压力传递不均匀，力链的分布出现一些局部的强化或弱化现象。同时轻质油的黏度比水大，在岩石孔隙中流动时，会对岩石颗粒产生较大的摩擦力，对力链产生较强的干扰。

天然气的体积模量非常小，具有很强的可压缩性。在含气岩石中，气体的存在会极大地影响岩石颗粒内部力链的分布。当岩石受到外力时，气体很容易被压缩，力链发生很大变化。但是天然气的黏度极小，在岩石孔隙中流动时，对岩石颗粒间力链的影响相对较小。

(a) 150 MPa 围压 98 MPa 孔隙压力下含 CH₄ 岩石破裂裂纹数量和应力 - 应变曲线变化

(b) 150 MPa 围压 98 MPa 孔隙压力下含水岩石破裂裂纹数量和应力 - 应变曲线变化



(c) 150 MPa 围压 98 MPa 孔隙压力下含油岩石破裂裂纹数量和应力 - 应变曲线变化

Figure 10. The number of fracture cracks and the variation of stress-strain curve of oil-bearing rocks under the confining pressure of 150 MPa and the pore pressure of 98 MPa

图 10. 150 MPa 围压 98 MPa 孔隙压力下含油岩石破裂裂纹数量和应力 - 应变曲线变化

5. 结论

本研究针对深地工程中含流体岩石的破裂机制问题, 基于离散元流固耦合方法在 PFC2D 中开展三轴压缩条件下含水、油、CH₄ 的对比模拟。结果表明: 不同流体因黏度、体积模量等特性差异, 对岩石宏观强度的影响呈现显著分化, 其中水通过物理楔入与水化反应使应力峰值降幅最大, CH₄ 因分子特性影响最小, 油的作用介于两者之间; 围压条件显著调控颗粒位移机制, 低围压下水的润滑效应导致位移分散, 油的黏滞阻力限制位移, 高围压下 CH₄ 的可压缩性促进颗粒均匀位移, 而水与油因吸附作用和黏度差异引发局部位移集中; 细观层面, 流体驱动拉裂纹主导破裂, 但油相因黏度导致剪裂纹占比较高, 力链分布密度与流体体积模量呈正相关。

研究成果量化了流体-岩石相互作用的宏细观机制, 为深地油气开采中的裂缝与甜点预测、压裂设计等地质与工程问题提供了理论依据, 后续可进一步结合高温多相流条件拓展多场耦合研究。

基金项目

国家自然科学基金项目资助(编号: 52174091, 52204113), 中国矿业大学大型仪器设备开放共享基金资助(编号: DYGX-2024-42)

参考文献

- [1] Zeng, L., Zhang, D., Zhang, J., Zhang, B. and Yin, H. (2024) Macro-Meso Fracture Evolution Mechanism of Hollow Cylindrical Granite with Different Hole Diameters under Conventional Triaxial Compression. *Journal of Central South University*, **31**, 3281-3294. <https://doi.org/10.1007/s11771-024-5750-0>
- [2] Li, P., Jiang, L., Wen, Z., Wu, C., Yang, Y., Peng, X., *et al.* (2024) Effect of Fractures on Mechanical Behavior of Sand Powder 3D Printing Rock Analogue under Triaxial Compression. *Journal of Central South University*, **31**, 2703-2716. <https://doi.org/10.1007/s11771-024-5721-5>
- [3] Liu, X., Hao, Q., Zheng, Y., Zhang, Z. and Xue, Y. (2024) Mechanical Response and Dilatancy Characteristics of Deep Marble under Different Stress Paths: A Sight from Energy Dissipation. *Journal of Central South University*, **31**, 2070-2086. <https://doi.org/10.1007/s11771-024-5663-y>
- [4] 吴青钱, 石露, 李小春, 等. 水/超临界 CO₂ 对低黏土含量砂岩力学性质影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2025, 25(4): 1-13.
- [5] 李波, 时振, 魏建平, 等. 真三轴煤岩体水压裂缝扩展行为教学实验设计[J]. *实验技术与管理*, 2024, 41(6): 213-218.
- [6] 孔祥伟, 许洪星, 时贤, 等. 致密砂岩气藏暂堵压裂裂缝起裂扩展实验模拟[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(3): 391-401.
- [7] 方正, 陈勉, 李集, 等. 自渗吸作用下深层页岩裂缝演化及力学特性[J]. *新疆石油地质*, 2025, 46(2): 208-216.
- [8] 张永利, 陆丹丹, 程瑶, 等. 微波辐射下油页岩的渗流特性可视化定量研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(12): 2919-2931.
- [9] 吴君达, 常涛, 汪跃, 等. 含砾砂岩油藏微观渗流差异化定量表征及其在数值模拟中的应用[J]. *中国海上油气*, 2025, 37(2): 177-188.
- [10] 周鹏, 周龙, 龙杨忠, 等. 基于双裂缝滤失模型的水力压裂数值模拟[J]. *湖北理工学院学报*, 2025, 41(2): 9-14.
- [11] 袁启航, 谭亿虹. 基于 FLAC-PFC 耦合的深基坑门架式双排桩受力分析[J]. *土工基础*, 2025, 39(2): 280-284+292.
- [12] 王刚, 张学朋, 蒋宇静, 等. 基于颗粒离散元法的岩石节理面剪切破坏微观机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(4): 1442-1453.
- [13] 刘先珊, 曾南豆, 李涛, 等. 基于改进 PFC 流固耦合算法的页岩水力压裂裂缝扩展研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(9): 3545-3560.
- [14] Huang, Y., Yang, S. and Zeng, W. (2016) Experimental and Numerical Study on Loading Rate Effects of Rock-Like Material Specimens Containing Two Unparallel Fissures. *Journal of Central South University*, **23**, 1474-1485. <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3200-3>