



第十二届全国流体力学学术会议

2022年9月22~25日 陕西 西安

文章编号: CSTAM 2022-A26-B xxxx

**标题: 基于流固耦合的数字岩心
力学特性模拟研究**

作者: 马文杰, 杨永飞

单位: 中国石油大学 (华东)

考虑流固耦合的数字岩心力学特性模拟研究¹⁾

马文杰, 杨永飞^{* 2)}

^{*}(中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580)

摘要 岩石内部存在复杂的裂缝、孔隙结构, 岩石从被压缩到破裂涉及的过程复杂。岩石应力与流体流动共同作用下, 岩石中的裂缝、孔隙有汇合或者扩展并贯通的趋势, 易导致岩石力学性质劣化直至岩石破坏。因此, 从微观层面研究三轴应力状态下的岩石强度、应力应变状态等, 对深入了解岩石力学特性有极大帮助。本文基于数字岩心考虑流固耦合, 对真实孔隙结构进行真三轴数值实验, 在微观尺度上对岩石力学特性进行研究, 探究微观尺度上的岩石力学性质的变化规律。结果表明: 当体积应变在 0.014 ~ 0.024 之间时, 孔喉参数会发生突变; 颗粒粒径较小时, 抗剪强度高且更加敏感; 当孔隙中存在水时, 不排水情况下得到的抗剪强度大于排水状态下的抗剪强度。

关键词 数字岩心, 应力应变, 流固耦合, 排水条件, 数值模拟

引言

深埋于地下的岩石储存了大量的油气资源, 其物理性质多样, 岩石内部存在复杂的裂缝、孔隙结构, 岩石从被压缩到破裂涉及的过程复杂。岩石应力与流体流动共同作用下, 岩石中的裂缝、孔隙有汇合或者扩展并贯通的趋势, 易导致岩石力学性质劣化直至岩石破坏。因此, 从微观层面研究三轴应力状态下的岩石强度、应力应变状态等, 对深入了解岩石力学特性有极大帮助。

岩石物理实验是最基本的岩石物理研究方法, 单轴及常规三轴压缩试验由于操作简单, 能更准确地模拟真实应力状态, 可以根据工程设计的施工和运用条件控制排水, 测定孔隙压力及试样的体积变化, 是工程设计施工的重要参考依据。但是传统的岩石物理实验有实验周期长、花费成本高、实验可重复性差以及低孔渗下误差较大的缺点。数字岩心技术是一项借助于 CT 扫描、SEM 扫描、核磁共振成像的技术, 通过一定的算法重构岩心图片, 获得的模型可以用于岩石物理模拟试验研究。数值模拟相较于物理试验, 能够基于代表性岩心于微观尺度上定量考察各种因素对岩石物理属性的影响, 并且可以基于真实岩心孔隙结构的可重复试验模拟。

岩石力学性质 (mechanical properties of rocks) 是指岩石在应力作用下表现的弹性、塑性、弹塑性、流变性、脆性、韧性、发热等力学性质。由于各种岩石的组分和结构各异, 形成的年代不同, 其中还有许多裂隙, 致使其力学性质相差很大, 此种性质还受温度、湿度、围压、加力的方式和快慢、变形的历史, 以及岩石所处的周围介质等因素的影响。

岩石本身是由粒径不一的矿物颗粒按照一定的方式结合而成的, 因此岩石的物理力学性质必然受到矿物颗粒的影响, 而矿物颗粒的粒径大小便是其中一个不可忽略的因素。不同粒径结构岩石强度^[1]、物理力学性质^[2]、声发射信号特征^[3]、高温后冷却速率^[4]差异明显。

加卸载过程会损伤岩石结构, 不同地加卸载过程会产生不同的岩体变形和破坏形态, 由此产生的岩石力学特性的变化对实际工程应用与理论研究不可忽略。不同卸围压速度下灰岩^[5]、大理岩^[6]、花岗岩^[7]、泥质石英粉砂岩^[8]的变形特征和力学参数变化呈现不同特点。

在现有的岩石力学试验研究中, 人们已经开发了多种成熟的岩石电液伺服控制刚性试验机来研究岩石的变形破裂过程^[9]。这类岩石力学试验机通过对加载模式(如位移、应力和加速度等)的精确控制, 能够准确地获得岩石完整破裂过程中的全应力-应变关系曲线, 其对深入研究和揭示岩石破裂过程起到了极大推动作用。

1) 资金资助项目 (国家自然科学基金项目 52034010)

2) 通讯作者 Email: yangyongfei@upc.edu.cn

试验机能够深入研究垂直井水力压裂裂缝扩展^[10]、内部预制裂纹贯通^[11]、花岗岩的裂纹扩展^[12]等机制。

近年来具有能够无损探测物体内部任意断面结构的 X 射线 CT 扫描技术被引入到了岩石力学试验研究中^[13]，成为岩石力学研究领域的一个热点问题。CT 扫描监测技术能够实现对试样内部空间结构形貌特征的高效、无损透视，其为可视化地揭示岩石试样内部复杂的三维裂隙几何结构和分布形态提供了一种十分有效的手段^[14-16]。实时 X 射线 CT 扫描的岩石力学试验技术与方法也得到了广阔的提升^[17-19]。

近年来，伴随着计算机软硬件技术的飞速发展，计算机模拟手段在科研和工程领域的重要作用日益提升，数值模拟一定程度上丰富了探究岩石力学特性和损伤破裂机理的工具，已经被学者们广泛采用，并不断拓展。

岩石力学常用的数值方法可分为连续介质方法、离散介质方法以及连续与离散介质的混合方法。当模拟的区域足够大时，即使岩石内部存在节理、裂隙，应用连续性方法进行模拟也能够反映岩石的力学行为。代表性的连续性方法有有限元方法（FEM）^[20-22]、有限差分法（FDM）、边界元方法（BEM）等。然而，当模拟的区域比较小时，材料的不连续性就不能忽略，即需要考虑岩石颗粒、裂隙的存在。离散介质方法假设材料是由离散单元组成，每个单元之间存在力的相互作用。代表性的离散介质方法有颗粒离散元方法（PFC）^[23-25]、离散单元法（DEM）^[26]、非连续变形分析法（DDA）。连续性或离散介质方法都有自己优缺点，然而通过两种方法结合却能够克服各自的缺点。连续与离散介质的混合方法目前有边界元—有限元耦合（BEM/FEM），离散元—有限元耦合（DEM/FEM）及离散元—边界元耦合（DEM/BEM）。

本文基于数字岩心考虑流固耦合，对真实孔隙结构进行真三轴数值实验，在微观尺度上对岩石力学特性进行研究，模拟更加接近真实情况的环境状态，探究微观尺度上的岩石力学性质的变化规律。

1 试验方法

1.1 数学模型

数字岩心进行力学参数模拟运算时不需要进行网格离散，所以有限元方法是基础、成熟的数值模拟方法^[27]。首先数值模拟求得稳态应满足力学平衡，平衡方程如下：

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F}_v \quad (1-1)$$

式中 \mathbf{u} 为速度场， $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力， \mathbf{F}_v 为面积力。对三维数字岩心三个方向分别施加一个宏观应变，由于符合最小势能原理各个节点的弹性势能应为最小。采用变分原理，将像素点位移转变为求解弹性自由能极小值问题。弹性势能最小时，即满足：

$$\frac{\partial E_n}{\partial u_m} = 0 \quad (1-2)$$

式中 E_n 为系统的弹性势能， u_m 为节点位移。每个体素的弹性势能^[28]可表示为：

$$E_n = \frac{1}{2} \int d^3 r \boldsymbol{\varepsilon}_{pq} C_{pqkl} \boldsymbol{\varepsilon}_{kl} \quad (1-3)$$

式中 $\boldsymbol{\varepsilon}_{pq} = \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}$ 为应变张量， C_{pqkl} 为弹性张量。式 (1-1) 中的应力可由胡克定律求得：

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_i + \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}_{el} \quad (1-4)$$

式中 $\boldsymbol{\sigma}_i = \boldsymbol{\sigma}_0 + \boldsymbol{\sigma}_{ext} + \boldsymbol{\sigma}_q$ 为初始应力， $\mathbf{C} = \mathbf{C}(E, \nu)$ 为四阶弹性张量， $\boldsymbol{\varepsilon}_{el} = \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{inel}$ 为弹性应变。

拉格朗日应变张量^[29]可表示为：

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}] \quad (1-5)$$

塑性应变张量增量可表示为：

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{pl} = \lambda \frac{\partial Q}{\partial S} \quad (1-6)$$

$$\lambda \geq 0, F(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}_{ys}) \leq 0, \lambda F = 0$$

考虑到进行流固耦合，加入层流。由于孔隙体积小，流体变形不大，故而采用不可压缩流体。由基础的动量方程^[30]可推得：

$$\rho(\mathbf{u}_{fluid} \cdot \nabla) \mathbf{u}_{fluid} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} \quad (1-7)$$

式中 ρ 为流体密度， \mathbf{u}_{fluid} 为流体速度场， p 为压力， \mathbf{K} 为应力张量， \mathbf{F} 为体积力。镜像对称图形的边界条件是 Dirichlet 边界条件与 Neumann 边界条件的组合：

$$\mathbf{K} = \mu \left(\nabla \mathbf{u}_{\text{fluid}} + (\nabla \mathbf{u}_{\text{fluid}})^T \right) \quad (1-8)$$

岩石强度准则为 Drucker-Prager 准则^[31]:

$$F_{\text{cone}} = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k \quad (1-9)$$

式中 $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 为应力第一不变量,

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]$$

为应力偏量第二不变量, $\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$ 和

$$k = \frac{2\sqrt{3}c \cos \phi}{(3 - \sin \phi)}$$

为与岩石内摩擦角和粘结力有关的实验常数。

1.2 物理模型

利用有限元软件以固体力学为理论基础, 耦合渗流场, 可以获得应力应变曲线、岩石应力场分布情况、变性特征以及力学参数变化情况等信息。改变代表性岩心的微观影响因素、排水情况, 完成三轴试验模拟, 研究定性规律, 最后使用真实岩心, 检查规律实用性。

弹性模量之间的关系可表示为:

$$\nu = \frac{3K - 2\mu}{2(3K + \mu)}, \quad E = \frac{9K\mu}{3K + \mu} \quad (1-10)$$

式中 ν 为泊松比, K 为体积模量, μ 为弹性模量, E 为杨氏模量。

2 影响因素分析

2.1 模型验证

为了验证数字岩心力学特性模拟的准确性, 本次研究以理想模型和某火山岩为例, 进行模型试算。理想模型是以无孔隙、100mm³ 的纯砂岩, 火山岩具有强非均质性特征, 且部分储层发育微裂缝及气孔。火山岩是采用 CT 扫描, 结合数字岩心技术, 再现复杂的孔隙空间, 基于构建的数字岩心, 来研究模拟的准确性。

本节基于理想模型和某火山岩数字岩心, 分别计算不同压力状态下的体积模量、剪切模量、应力应变曲线以及孔隙度等参数, 并与相同温压条件下的实验参数进行对比, 检验及分析该有限元方法的可行性, 为进一步研究其力学特性微观影响因奠定了基础。数字岩心各力学相关参数如表 1 所示。

表 1 岩石力学相关参数

名称	数值	描述
D	100 mm	样品直径
E1	3×10^{10} Pa	杨氏模量
nu1	0.3	泊松比
rho1	2.5 g/cm ³	密度
c1	20 MPa	内聚力
int1	35 deg	内摩擦角

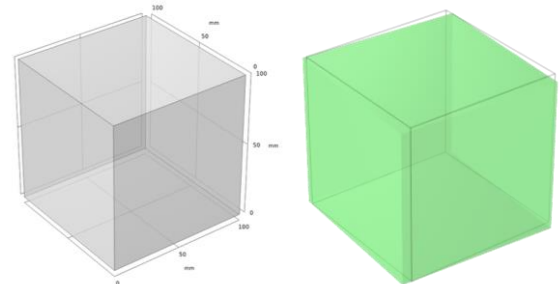
思想模型是为了对比验证后续模拟的准确性, 是最简单的基础验证方法。该模型矿物组分采用砂岩相关参数, 此次模拟所用岩心尺寸为 100mm×100mm×100mm, 其三维数字岩心

如 (a) 数字岩心 (b) 应力图
图 2-1 理想模型 (a) 数字岩心 (b) 应力图

图 2-1 (a) 所示。在 x、y、z 三个方向上分别施加系列位移, 随后计算各个方向上的应力、应变, 最后得到整个几何的应力图, 如

(a) 数字岩心 (b) 应力图
图 2-1 理想模型 (a) 数字岩心 (b) 应力图

图 2-1 (b) 所示。由于理想模型结构简单, 具有极强的均质性, 所以整个几何承受相同的应力, 与事实具有良好的一致性。



(a) 数字岩心 (b) 应力图

图 2-1 理想模型数字岩心

计算得出的应力应变图如图 2-2 所示。由于胡克定律可知, 在应力应变图中弹性区域的斜率即为试样的弹性模量。该图中弹性区域的斜率为 30GPa 与表 1 中数据具有良好的一致性, 变化趋势与实际结果吻合较好, 从而验证了该模型的准确性与可行性。

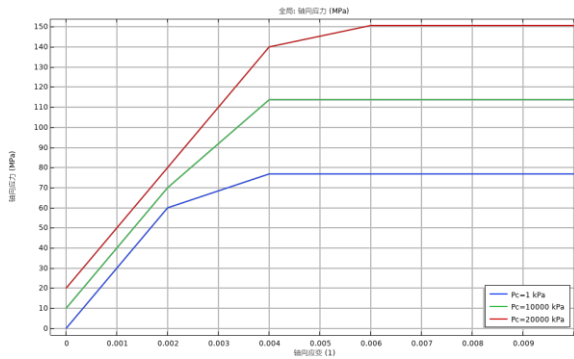
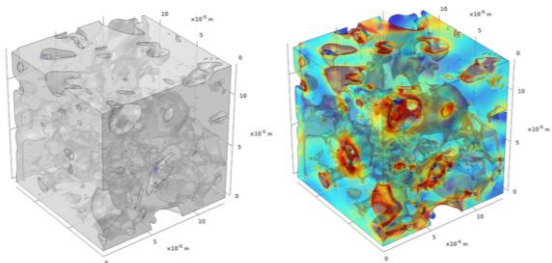


图 2-2 理想模型应力应变图

火山岩是一类天然岩石，具有强非均质性特征，能够与理想模型的强均质性进行对比。同时火山岩部分储层发育微裂缝及气孔，在压力场与渗流场同时作用的情况下，能够积极反应岩石骨架的变形以及岩石内流体的流动，较好地完成渗流工作。此次模拟采用的火山岩尺寸为 $50 \times 50 \times 50$ 像素，分辨率为 2.64169，真实尺寸为 1.32×10^{-4} m。其三维数字岩心如图 2-3 (a) 所示。使用相同的施加系列位移并计算应力应变的方法，得到整个几何的应力图，如图 2-3 (b) 所示。可以观察到，靠近壁面的岩石骨架承受的应力更大，易发生力学断裂行为。



(a) 数字岩心 (b) 应力图

图 2-3 火山岩数字岩心

计算得到应力应变曲线如图 2-4 所示，每条曲线为在相同 x、y 轴位移下不断增加 z 轴位移时的应力变化情况。由于计算能力的原因，未能获得全部弹性区域的结果，但是部分弹性区域亦能获得斜率进行验证。经计算模拟得到的弹模量为 31.267 GPa，与实验测得其体积模量为 $\frac{3K-2\mu}{2(3K+\mu)} = 20.9$ GPa，泊松比为 $\frac{9K\mu}{3K+\mu} = 0.228$ ，经式 (1-10) 计算得弹性模量 34.109 GPa，误差较小。模拟得到的结果偏低，其误差可能是在图像处理时，图像粗化，一些骨架中较小的结构缺失导致的。此外实验测量位置与实际模拟位置存在偏差，并且尺度不同，也是造成误差的原因。

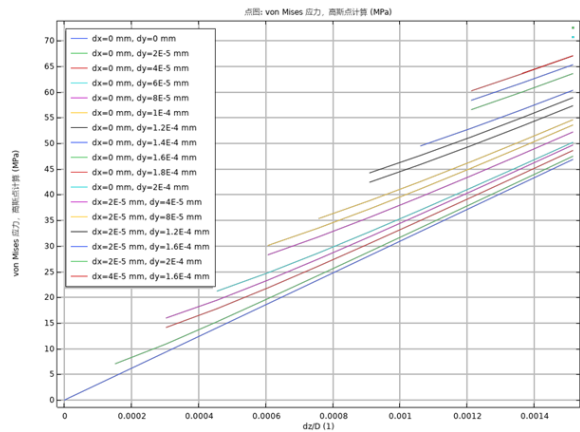


图 2-4 理想模型应力应变图

2.2 颗粒形态

作为油气资源在地层中的主要储集场所，岩石的性质复杂，由矿物不同、形状不一的颗粒通过挤压、胶结组成，因此岩石的力学特性在很大程度上受矿物颗粒的影响。而矿物颗粒的大小是影响岩石强度的首要因素。根据球体紧密堆积原理，应遵循内能最小，使球体处于最稳定状态的状态，采用六方最紧密堆积方法，如图 2-5 所示。设置不同大小的球体进行模拟计算，获得应力应变图、弹性模量，研究在六方最紧密堆积方法下应变随应力变化情况。求解剪切模量，并对不同的粒径进行横向比较，研究弹性参数随颗粒形态变化情况，粒径参数如表 2 所示。

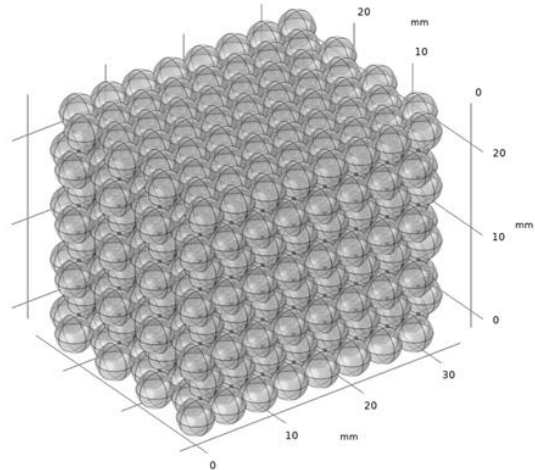


图 2-5 六方最紧密堆积方法

表 2 颗粒粒径

案例	case1	case2	case3	case4	case5	case6
粒径(mm)	2	1	0.5	0.25	0.125	0.625

由于具有较强的相似性，所以选取 case1 进行演示。对 x、y、z 三个方向上最边缘的球

体施加位移，计算内部的应力应变，并制作应力图，如

图 2-6 所示。由图可知接触面处应力较大，成为易发生破坏的力学薄弱环节。

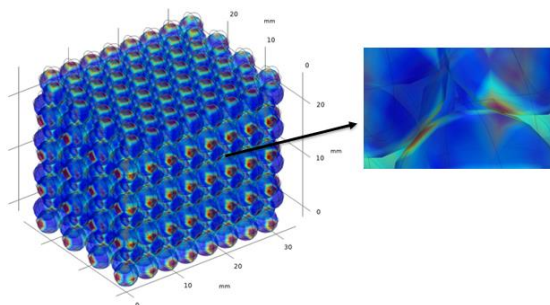


图 2-6 颗粒形态 case1 应力图

进一步处理发生应变的数据岩心，研究应力对其孔隙度的影响。孔隙度随应力的变化如图 2-7 所示。由图可知以强制位移致使应力增加，从而改变整个几何结构的应变，随着应力的增大，颗粒模型的孔隙度逐渐减小。前期阶段 x、y、z 三个方向施加位移，在应力增大的同时，孔隙度线性减小。到达中后期，孔隙度减小趋势逐渐放缓，这是由于 x、y 轴方向逐渐不再加压，而 z 轴方向仍继续加压。这表明应力与孔隙度具有良好的线性关系。

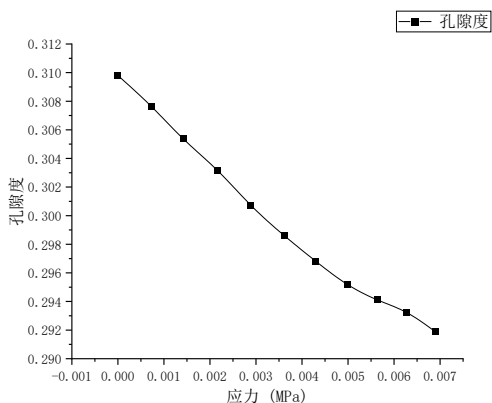


图 2-7 孔隙度-应力曲线图

为了定量表征三轴压力作用下的三维孔隙结构，基于不同粒径模拟结果建立了拓扑等效的三维孔隙网络模型。测量并记录了孔隙总体积、平均孔隙等效半径、平均喉道等效半径、平均孔喉比和平均配位数，以表征孔隙结构，研究应力对孔喉参数的影响。孔隙等效半径-应力曲线图如图 2-8 所示，当体积应变在 0.014 ~ 0.024 之间时，孔喉参数会发生突变。实际上，孔隙配位数、喉道等效半径、喉道长度等孔喉

参数均会相应体积应变时发生突变，这里由于篇幅问题未能给出。推断可能存在一个与应力和孔隙结构相关的临界值，控制着三维应变的突然变化。鞠杨教授同样观察到了这种突变现象^[32]。

改变颗粒粒径重复上述模拟，研究颗粒粒径对抗剪强度的影响，其应力-粒径曲线图如图 2-9 所示。由图可知颗粒粒径较小时，抗剪强度高且更加敏感，颗粒粒径大时抗剪强度低，并且不易受到颗粒粒径的影响。这是由于颗粒粒径小时，整个几何可变形范围小，孔隙结构应变不明显。

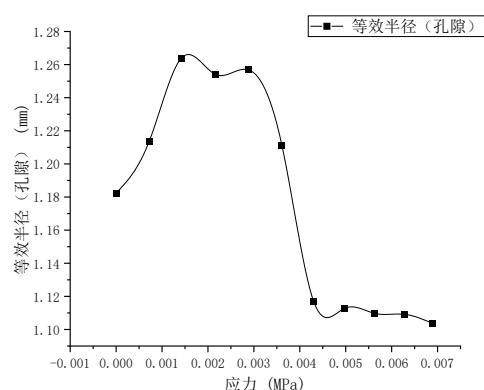


图 2-8 孔隙等效半径-应力曲线图

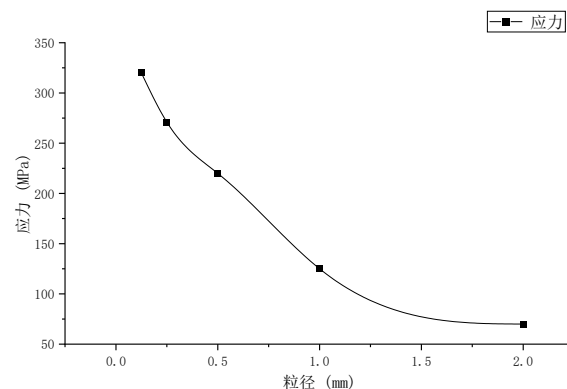


图 2-9 应力-粒径曲线图

2.3 孔隙流体

岩石力学特性的微观影响因素复杂，除了由于颗粒粒径带来的岩石骨架结构的影响外，岩石孔隙内流体的存在也会显著影响岩石物理性。传统的三轴压缩试验能严格地控制排水条件并且测量试件中孔隙水压力的变化。本节根据三轴试验原理，考虑流固耦合基于数字岩心进行数值模拟，设计固结排水与固结不排水两

组模拟，来对比研究孔隙中流体存在对试件的力学特性影响。

在相同几何结构上，采用相同参数，并使孔隙水进行层流，仅控制是否排水，模拟结果如图 2-10、图 2-11 所示。其应力分布大体一致，但是部分区域仍有较大区别。这是由于当孔隙水压力的存在对整个几何的应力影响较小，但是与水接触的壁面承受了更多的压力。当孔隙中存在水时，固结不排水情况下得到的抗剪强度大于固结排水状态下的抗剪强度

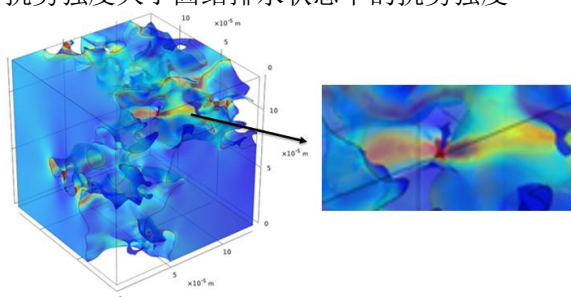


图 2-10 排水应力应变图

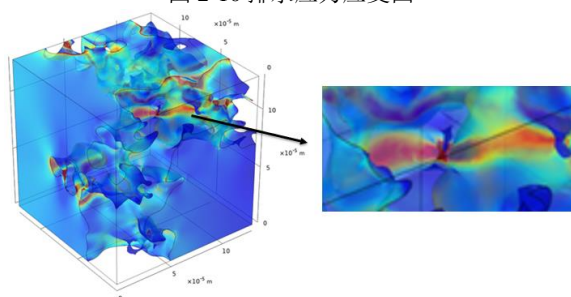


图 2-11 不排水应力应变图

在实际的原油开采中，应力作用面更广，应变更剧烈。但由于大部分油田存在边水、注水开发等原因，水域宽广，对于变形部分来说，孔隙水压力较小。

3 结 论

(1) 该模拟方法能够较好地完成三轴压缩实验模拟，能够较好与实验结果吻合。

(2) 孔隙度随应力的增大而减小，并且具有良好的线性关系。但是，当体积应变在 0.014 ~ 0.024 之间时，孔喉参数会发生突变。

(3) 颗粒粒径较小时，抗剪强度高且更加敏感，这是由于颗粒粒径小时，整个几何可变形范围小，孔隙结构应变不明显。

(4) 当孔隙中存在水时，固结不排水情况下得到的抗剪强度大于固结排水状态下的抗剪强度。

参考文献

- [1] 王朋姣. 花岗岩的岩石学特征与物理力学性质之间的关系[D]: 华北水利水电大学, 2017.
- [2] 赵铭久, 赵奎, 曾鹏, et al. 单轴压缩条件下不同粒径类岩石材料次声信号特性研究 %J 采矿技术[J]. 2018, 18(04): 87-90.
- [3] Shao S., Wasantha P. L. P., Ranjith P. G., et al. Effect of cooling rate on the mechanical behavior of heated Strathbogie granite with different grain sizes %J International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences[J]. 2014, 70.
- [4] 董晋鹏. 高温后不同粒径花岗岩三轴力学特性及颗粒流模拟研究[D]: 中国矿业大学, 2020.
- [5] 王在泉, 张黎明, 孙辉, et al. 不同卸荷速度条件下灰岩力学特性的试验研究 %J 岩土力学[J]. 2011, 32(04): 1045-1050+1277.
- [6] 汪斌, 朱杰兵, 鄂爱清, et al. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究 %J 岩石力学与工程学报[J]. 2008, (10): 2138-2145.
- [7] 刘婕, 张黎明, 丛宇, et al. 真三轴应力路径花岗岩卸荷破坏力学特性研究 %J 岩土力学[J]. 2021, 42(08): 2069-2077.
- [8] 苗胜军, 王辉, 黄正均, et al. 不同循环上限荷载下泥质石英粉砂岩力学特性试验研究 %J 工程力学[J]. 2021, 38(07): 75-85.
- [9] W. R. W., C. F. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments %J International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts[J]. 1970, 7(5).
- [10] 杨为民, 耿阳, 周宗青, et al. 灰岩真三轴水力压裂试验和数值模拟 (英文) %J Journal of Central South University[J]. 2020, 27(10): 3025-3039.
- [11] Bobet A., Einstein H. H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression %J International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences[J]. 1998, 35(7).
- [12] Morgan S. P., Johnson C. A., Einstein H. H. Cracking processes in Barre granite: fracture process zones and crack coalescence %J International Journal of Fracture[J]. 2013, 180(2).
- [13] Bieniawski Z. T., Denkhaus H. G., Vogler U. W. J. I. J. o. R. M., et al. Failure of fractured rock[J]. 1969, 6(3): 323, IN329, 331-330, IN332, 341.
- [14] Zabler S., Rack A., Manke I., et al. High-resolution tomography of cracks, voids and micro-structure in greywacke

- and limestone %J Journal of Structural Geology[J]. 2008, 30(7).
- [15] Yang S.-Q., Ju Y., Gao F., et al. Strength, Deformability and X-ray Micro-CT Observations of Deeply Buried Marble Under Different Confining Pressures %J Rock Mechanics and Rock Engineering[J]. 2016, 49(11).
- [16] 杨斌, 张浩, 刘其明, et al. 超深层裂缝性碳酸盐岩力学特性及其主控机制 %J 天然气工业[J]. 2021, 41(07): 107-114.
- [17] Viggiani G., Lenoir N., Bésuelle P., et al. X-ray microtomography for studying localized deformation in fine-grained geomaterials under triaxial compression %J Comptes rendus - Mécanique[J]. 2004, 332(10).
- [18] 李廷春, 吕海波. 三轴压缩载荷作用下单裂隙扩展的 CT 实时扫描试验 %J 岩石力学与工程学报[J]. 2010, 29(02): 289-296.
- [19] 任建喜, 冯晓光, 刘慧. 三轴压缩单一裂隙砂岩细观损伤破坏特性 CT 分析 %J 西安科技大学学报[J]. 2009, 29(03): 300-304+338.
- [20] J.W. T., M.L. H., C.A. R. Numerical simulation of high strain rate concrete compression tests %J Pergamon[J]. 1994, 51(1).
- [21] Dong S., Wang Y., Xia Y. A finite element analysis for using Brazilian disk in split Hopkinson pressure bar to investigate dynamic fracture behavior of brittle polymer materials %J Polymer Testing[J]. 2006, 25(7).
- [22] Liu H. Y., Kou S. Q., Lindqvist P.-A., et al. Numerical Modelling of the Heterogeneous Rock Fracture Process Using Various Test Techniques %J Rock Mechanics and Rock Engineering[J]. 2007, 40(2).
- [23] Zhang, X. P., Wong, et al. Cracking Processes in Rock-Like Material Containing a Single Flaw Under Uniaxial Compression: A Numerical Study Based on Parallel Bonded-Particle Model Approach[J]. 2012.
- [24] 尹婕. 细粒含量及颗粒形状对砂土剪切性能的影响研究[D]: 扬州大学, 2021.
- [25] 郭要辉, 彭珍, 田亚坤, et al. 某金属矿尾砂三轴压缩的颗粒流数值模拟 %J 矿业研究与开发[J]. 2021, 41(05): 118-123.
- [26] Brara A., Camborde F., Klepaczko J. R., et al. Experimental and numerical study of concrete at high strain rates in tension %J Mechanics of Materials[J]. 2001, 33(1).
- [27] Mattiussi C. The finite volume, finite element, and finite difference methods as numerical methods for physical field problems[M]//Hawkes P. W. Advances in Imaging and Electron Physics; Elsevier. 2000: 1-146.
- [28] 郑颖. 基于数字岩心有限元模拟的弹性参数计算方法及应用研究[D]: 中国石油大学(华东), 2018.
- [29] Rougée P. An intrinsic Lagrangian statement of constitutive laws in large strain[J]. Computers and Structures, 2006, 84(17-18).
- [30] Poirier D. R., Geiger G. H. Laminar Flow and the Momentum Equation[M]//Poirier D. R., G. H. Geiger. Transport Phenomena in Materials Processing. Cham; Springer International Publishing. 2016: 39-74.
- [31] Anandarajah A. The Drucker - Prager Model and Its Integration[M]//Anandarajah A. Computational Methods in Elasticity and Plasticity: Solids and Porous Media. New York, NY; Springer New York. 2010: 513-560.
- [32] Ju Y., Xi C., Zheng J., et al. Study on three-dimensional immiscible water-Oil two-phase displacement and trapping in deformed pore structures subjected to varying geostress via in situ computed tomography scanning and additively printed models[J]. International Journal of Engineering Science, 2022, 171: 103615-.

NUMERICAL SIMULATION STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF DIGITAL CORE CONSIDERING FLUID SOLID COUPLING

Wenjie Ma Yongfei Yang¹

(1 School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, 266580, PR China)

Abstract The cracks and pore structures inside the rock are complex, and the process of rock from compression to fracture is complicated. Under the joint action of rock stress and fluid flow, cracks and pores in

rock tend to converge or expand and penetrate, which can easily lead to the deterioration of rock mechanical properties until rock failure. Therefore, the study of rock strength and stress-strain state under triaxial stress at the microscopic level is of great help to the in-depth understanding of rock mechanical properties. In this paper, based on the digital core and considering the fluid-structure interaction, the true triaxial numerical experiment is carried out on the real pore structure, and the mechanical properties of rock are studied at the micro scale, so as to explore the change law of the mechanical properties of rock at the micro scale. The results show that when the volume strain is between 0.014 and 0.024, the pore-throat parameters will change abruptly. When the particle size is smaller, the shear strength is higher and more sensitive. When there is water in the pore, the shear strength obtained in the case of undrained condition is greater than that in the case of drained condition.

Key words digital core, stress-strain, fluid solid coupling, drained condition, numerical simulation