

# 砾石级配参数对砾岩力学性质和裂缝扩展规律的影响

张婧茹<sup>1</sup>, 闫伟<sup>1\*</sup>, 王剑波<sup>1</sup>, 刘灵童<sup>2</sup>, 蒋庆平<sup>3</sup>, 冯永存<sup>1</sup>

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300450

3 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 克拉玛依 834099

\* 通信作者, yanwei@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-07-07; 修回日期: 2023-09-29

国家自然科学基金面上项目“页岩储层多级压裂诱导应力累积对套管变形的影响机制研究”(52274015)资助

**摘要** 砾岩储层结构特征差异显著, 其中砾石的存在不仅导致砾岩的强非均质性, 也对砾岩的力学性质和裂缝发育产生重要影响。目前, 针对砾石不同粒径的组成对砾岩力学性质和裂缝发育的影响规律尚不清楚。本文引用土力学中级配的概念来表征砾石不同粒径的组成, 并将曲率系数  $C_c$  和不均匀系数  $C_u$  作为级配参数对级配特征进行量化, 建立了基于颗粒流 PFC2D 数值模拟软件的砾岩数值模型, 根据应力—应变曲线、抗压强度、弹性模量和裂缝的发育状况, 分析了砾石级配参数对砾岩力学性质和裂缝扩展规律的影响。结果表明: 砾岩的抗压强度主要受不均匀系数  $C_u$  和砾石平均粒径的影响, 抗压强度与  $C_u$  呈负相关关系。砾岩的弹性模量与砾石平均粒径相关。裂缝数目受曲率系数  $C_c$  和砾石平均粒径的影响, 其中裂缝数目与  $C_c$  呈负相关关系。裂缝数目与裂缝的复杂程度呈正相关关系。研究结果为探究砾岩储层力学性质和裂缝扩展规律提供了新思路。

**关键词** 砾岩; 砾石级配; 力学性质; 裂缝扩展; 数值模拟

**中图分类号**: TE357.1; P642.3

## The influence of gravel grading parameters on the mechanical properties and crack propagation of conglomerate

ZHANG Jingru<sup>1</sup>, YAN Wei<sup>1</sup>, WANG Jianbo<sup>1</sup>, LIU Lingtong<sup>2</sup>, JIANG Qingping<sup>3</sup>, FENG Yongcun<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 CNOOC EnerTech-Drilling&Production Co, Tianjin 300450, China

3 Research Institute of Exploration and Development PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834099, China

Received: 2023-07-07; Revised: 2023-09-29

**Abstract** There are significant differences in the structural characteristics of conglomerate reservoirs, among which the presence of gravel not only leads to strong heterogeneity of conglomerate, but also has a significant impact on the mechanical properties and fracture development of conglomerate. At present, the influence of the composition of different particle sizes of gravel on the mechanical properties and crack development of conglomerate is still unclear. This article cites the concept of inter-

引用格式: 张婧茹, 闫伟, 王剑波, 刘灵童, 蒋庆平, 冯永存. 砾石级配参数对砾岩力学性质和裂缝扩展规律的影响. 石油科学通报, 2024, 09(05): 798-807

ZHANG Jingru, YAN Wei, WANG Jianbo, LIU Lingtong, JIANG Qingping, FENG Yongcun. The influence of gravel grading parameters on the mechanical properties and crack propagation of conglomerate. Petroleum Science Bulletin, 2024, 09(05): 798-807. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.061

mediate gradation in soil mechanics to characterize the composition of different particle sizes of gravel, and quantifies the grading characteristics using the curvature coefficient  $C_c$  and non-uniformity coefficient  $C_u$  as grading parameters. A numerical model of conglomerate based on particle flow PFC2D simulation software is established. The influence of gravel gradation parameters on the mechanical properties and crack propagation of conglomerate is investigated by analyzing the stress-strain curve, compressive strength, elastic modulus, and crack development status. The findings reveal that the compressive strength of conglomerates is primarily influenced by the non-uniformity coefficient  $C_u$  and the average particle size of gravel, exhibiting a negative correlation with  $C_u$ . Similarly, the elastic modulus of conglomerates correlates with the average particle size of gravel. The number of cracks is affected by both the curvature coefficient  $C_c$  and the average particle size of gravel, demonstrating a negative correlation with  $C_c$ . Conversely, the number of cracks positively correlates with the complexity of the fractures. These research findings offer novel insights into exploring the mechanical properties and fracture propagation patterns of conglomerate reservoirs.

**Keywords** conglomerates; gravel grading; mechanical properties; crack propagation; numerical simulation

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.061

## 0 引言

近年来,随着玛湖凹陷的油气勘探开发不断推进,发现砾岩油藏分布范围广、储量丰富<sup>[1]</sup>,其中玛131、玛18井区百口泉组油藏探明储量超过亿t<sup>[2]</sup>。玛湖凹陷百口泉组主要为冲积扇沉积,以砂砾岩储集层为主,砾岩颗粒分选差,粒径差异大,具有典型低孔低渗的特点<sup>[3-4]</sup>。针对砾岩的岩石相方面,前人已经取得了一些成果,根据沉积构造、颗粒和支撑方式等特点,不同学者提出了不同的岩石相分类方案<sup>[5-6]</sup>,并发现岩相与储层物性具有密切关系<sup>[7-8]</sup>。熊健等利用微CT技术,研究了岩石的二维孔隙结构和三维孔隙结构特征,发现孔隙形状不规则、孔喉大小不一<sup>[9]</sup>,单祥等针对储层敏感性进行研究,得出百口泉组储层具有中等偏强盐敏、弱速敏、弱碱敏等特点<sup>[10]</sup>。

针对砾岩的力学性质,学者们开展了大量的试验研究。张重阳等对KS地区砾岩开展了力学实验,结果表明砾石和基质强度差异较大,砾岩力学性质受到砾石颗粒和胶结物基质共同的影响<sup>[11]</sup>。有学者基于物理和数模实验,研究了砾石粒径和力学参数对砾岩整体力学特性的影响规律,发现砾石与砾石之间的力学性质差异可超过砾石与基质间的力学性质差异<sup>[12]</sup>。张文等提出砾石压入硬度与岩性有关,高强度、较大尺寸的砾石能有效抑制裂缝穿透砾石,从而强化砾岩整体的抗拉强度<sup>[13]</sup>。何小东等提出储集层动静态弹性模量具有较好的相关性,但动静态泊松比相关性较差<sup>[14]</sup>。同时,国内外学者针对砾岩裂缝扩展规律也做了大量的研究工作。Li等发现砾石颗粒具有阻碍作用,砾岩储集层压裂裂缝的扩展主要存在终止、穿过、偏转等特征行为<sup>[15]</sup>,而裂缝的扩展模式受到颗粒力学参数的影响<sup>[16-17]</sup>,砾石强度越大裂缝绕砾及偏移越明显<sup>[18]</sup>。Liu等通过砾岩露头及岩心物理模型实验发现,压裂裂

缝遇到粒径较小的砾石时,表现为双翼缝特征<sup>[19]</sup>。刘向君等提出砾石强度与基质强度差异越大,裂缝遇砾石受阻越强,扩展方式越易由穿砾变为绕砾,从而降低裂缝延伸距离<sup>[20]</sup>。有学者基于数值模型开展单轴抗压模拟实验发现由于砾石颗粒的阻碍,导致岩样的位移和破坏形式较为复杂,从而没有形成与均质岩心类似的剪切带<sup>[21]</sup>。也有学者提出当砾石含量大于65%时,砾岩强度随砾石含量的增加而增大,并以穿透砾石的裂缝为主<sup>[22]</sup>。但目前研究主要集中在针对砾石和基质的强度、含量以及胶结状况等方面,没有针对砾石不同粒径组合开展相关研究。

本文以玛湖地区百口泉组砂砾岩储集层岩石为研究对象,结合单轴压缩试验和PFC2D数值模拟,借鉴土力学中的级配参数量化砾石不同粒径组合,从而针对砾石级配参数对砾岩力学性质和裂缝扩展规律进行研究,为砾岩油藏开发提供新思路。

## 1 构建数值模型

砾岩由砾石、杂基与胶结物组成,其中砾石的大小和形状差异很大。在PFC(particle flow code)2D颗粒流数值模拟软件中,结合现场砾岩的几何和力学特性,采用PBM(parallel bond model)接触模型建立砾岩的离散元模型。采用单位厚度的圆盘表征离散颗粒,颗粒具有一定的刚度,颗粒之间采用平行键进行黏结(parallel bond),如图1所示。平行键可以视作一组具有恒定法向刚度和剪切刚度的弹性弹簧,颗粒间的相对运动会产生力和力矩。该力和力矩作用在两个接触颗粒上,与接触周围最大剪切应力和法向应力密切相关,当超过相应的粘结强度时,平行黏结就会断裂,颗粒之间产生裂缝,力、力矩和刚度失效,黏结继续断裂,相应裂缝总数逐渐增加。

选用的砾岩岩心样品来自准噶尔盆地玛湖凹陷131区块A井,深度3388~3445 m,砾岩样品高为100.25 mm,直径为48.88 mm,如图2所示。根据岩心的侧面展开图获得砾石的数字图像,砾岩的砾石含量通过面积含量进行表征,如公式1所示,该样品砾石含量47%。本文仅考虑砾石不同粒径的组合,暂不考虑砾石的形状,因此将形状不规则的砾石通过等面积法处理为圆形,如公式2所示,后文将砾石的粒径简称为砾径。

$$C_g = \frac{\sum A_g}{A_s} \times 100\% \quad (1)$$

其中,  $C_g$  为砾石的面积含量, %;  $A_g$  为样品表面单个砾石的面积,  $\text{mm}^2$ ;  $A_s$  为岩心样品的侧表面面积,  $\text{mm}^2$ 。

$$D_e = 2\sqrt{A_g / \pi} \quad (2)$$

其中,  $D_e$  为砾石的等效粒径, mm;  $A_g$  为样品表面单个砾石的面积,  $\text{mm}^2$ 。

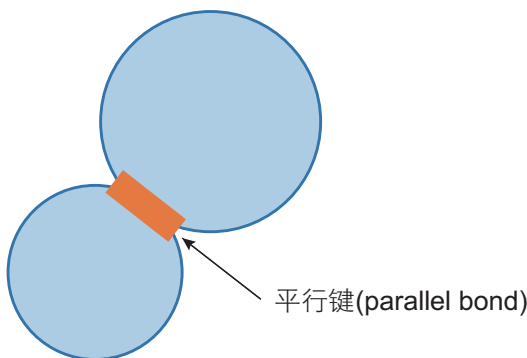


图1 平行黏结模型

Fig. 1 Parallel bond model

在PFC2D中,选用柔性簇cluster模拟砾石,根据扫描得到的砾石图像,将相应砾石轮廓内的颗粒组合成柔性簇,当外力足够大时,簇内的键发生断裂,从而表征砾岩中发生裂缝穿砾的情况。岩样二维模型基础数据如表1所示。其中,构建的数值模型(黑色球体代表砾石颗粒,灰色球体代表基质颗粒)如图4所示。

对岩心样品进行单轴压缩,由GCTS CATS Advanced软件监测其应力应变曲线。通过对模型顶部和底部缓慢施加位移的方式,从而施加准静态的载荷进行单轴压缩。本文数值模拟加载速率为  $0.001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,当轴向应力达到峰值强度的95%时,停止模拟。模型加载过程中,颗粒间受力产生力与力矩,无法模拟实际砾岩压缩过程中初始的压密阶段,因此,采用抗压强度和弹性模量作为调参指标。通过反复试错,对PFC中颗粒的细观力学参数进行调整,最终得到岩心样品与数值模型的力学参数对比见表2。其中,抗压强度和弹性模量的误差分别为5.1%和5.6%。并参考其

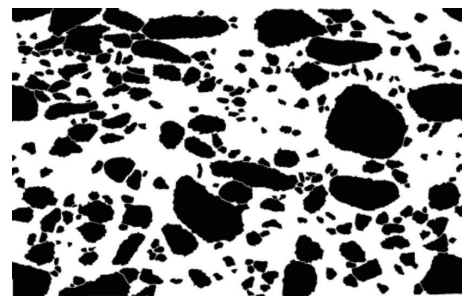


图2 MH131-3 岩心样品

Fig. 2 MH131-3 core samples



(a) 岩心侧面展开图



(b) 砾石的识别和提取

图3 MH131-3 岩心的砾石图像

Fig. 3 MH131-3 core gravel image

表1 数值模型的数据

Table 1 Rock sample data for numerical simulation

岩样宽度/mm	岩样高度/mm	颗粒直径/mm	颗粒数量	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	孔隙率/%	砾石比例/%
50	100	0.20~0.25	45 431	2500	12	50



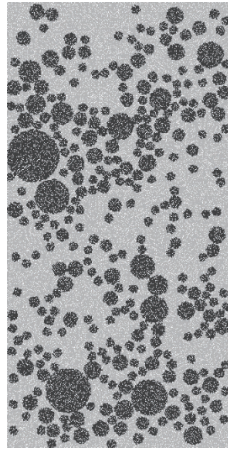


图4 MH131-3岩心的数值模型  
Fig. 4 Numerical model of MH131-3 core sample

他学者的砾岩数据<sup>[22]</sup>, 再次进行模拟和参数验证, 排除偶然性误差, 最终得到的模型微观力学参数见表3。

## 2 设计模型方案

本文借鉴土力学中的级配来表征砾岩中砾径的分布情况。级配分为连续级配, 间断级配和连续开级配。

表2 岩心与模型的力学参数比较

Table 2 Comparison of mechanical parameters between core samples and numerical models

参数	岩心样品	数值模型	误差/%
抗压强度/MPa	56.5	59.4	5.1
弹性模量/GPa	17.9	18.9	5.6

表3 数值模型的微观力学参数

Table 3 Micromechanical parameters for numerical simulation

类别	接触模型	变形模量/Pa	刚度比	摩擦系数	拉伸强度/Pa	抗剪强度/Pa	内摩擦角/°
基质	平行黏结	$10.0 \times 10^9$	5.0	0.5	$50.0 \times 10^6$	$50.0 \times 10^6$	35.0
砾石	平行黏结	$45.0 \times 10^9$	3.0	0.8	$80.0 \times 10^6$	$80.0 \times 10^6$	35.0
基质-砾石	平行黏结	$9.0 \times 10^9$	0.4	0.16	$16.0 \times 10^6$	$16.0 \times 10^6$	35.0

表4 数值模拟方案信息表

Table 4 Information table for numerical simulation grade distribution

方案	各粒径范围的颗粒百分含量/%												
	2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14
A1					11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1
A2	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7							
A3	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
B1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1					11.1	11.1	11.1	11.1
C1	33.3	33.3	33.3										
C2					33.3	33.3	33.3						
C3										33.3	33.3	33.3	

土力学中通过采用曲率系数 $C_c$ 与不均匀系数 $C_u$ 分别表示级配曲线的平滑程度(可视为砾径分布的差异)和砾径分布范围, 对应公式如下所示。

$$C_c = \frac{D_{30} \times D_{30}}{D_{60} \times D_{10}} \quad (3)$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4)$$

式中,  $D_{10}$  为累积颗粒含量 10% 的粒径,  $D_{30}$  为累积颗粒含量 30% 的粒径,  $D_{60}$  为累积颗粒含量 60% 的粒径。

本文所建立的砾岩模型中, 最大砾径不超过 14 mm, 模拟方案如表 4 所示。其中, 方案 A 为连续级配, 方案 B 为间断级配, 方案 C 为连续开级配。

在 PFC2D 中, 各方案的级配指标如表 5 所示, 级配曲线如图 5 所示, 数值模型如图 6 所示。对不同级配方案进行单轴压缩模拟, 当轴向应力达到峰值强度的 85% 时, 停止模拟。

## 3 分析结果与讨论

### 3.1 砾岩力学性质

在不同级配方案中, 应力应变曲线如图 7 所示,

表 5 数值模型方案的级配指标

Table 5 Grading indicators for value model schemes

指标	级配 A1	级配 A2	级配 A3	级配 B1	级配 C1	级配 C2	级配 C3
$D_{10}/\text{mm}$	5.68	2.00	2.00	2.78	2.00	6.01	12.01
$D_{30}/\text{mm}$	7.56	2.33	4.85	5.18	2.00	6.01	12.01
$D_{60}/\text{mm}$	10.63	3.70	9.50	11.54	2.87	7.03	12.71
$C_u$	1.87	1.85	4.75	4.15	1.44	1.17	1.06
$C_c$	0.95	0.73	1.24	0.84	0.70	0.85	0.94
平均粒径/mm	8.46	3.01	3.86	3.79	2.77	6.83	12.76

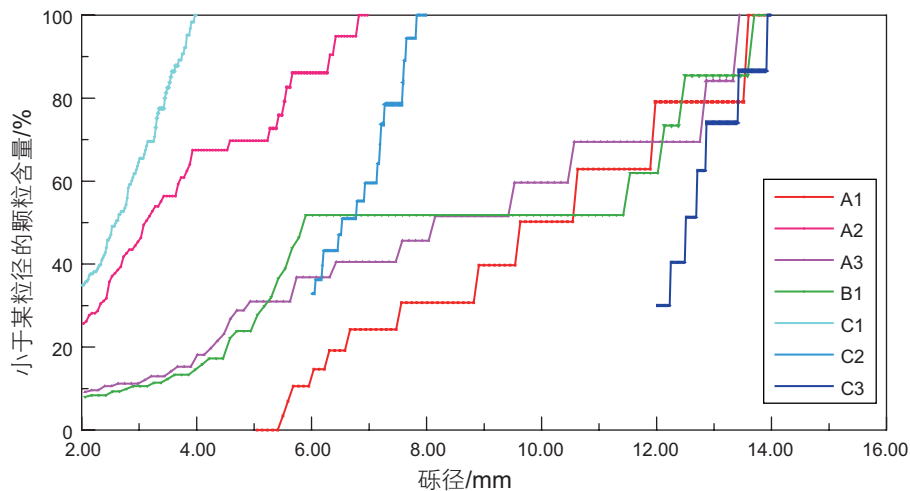


图 5 不同方案的级配曲线

Fig. 5 Gradation curves generated by numerical simulation

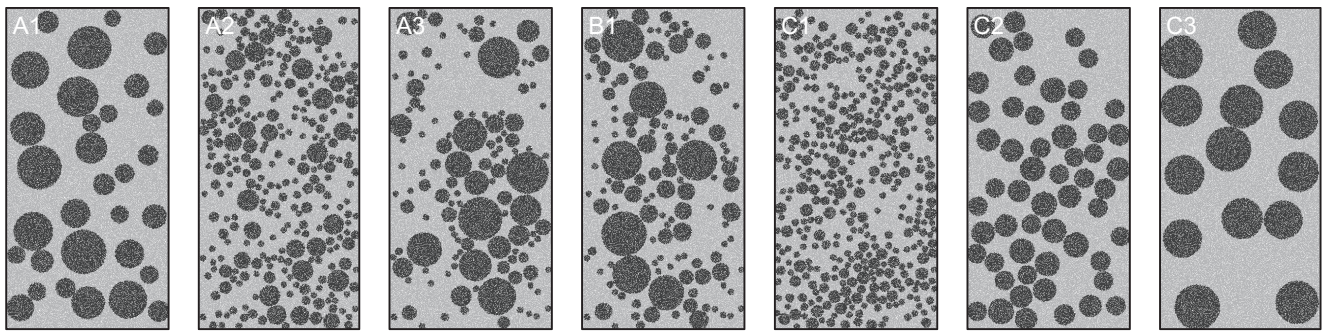


图 6 不同方案的数值模型

Fig. 6 Grading scheme generated by numerical simulation

对应力学性质如表 6 所示。

不同方案级配特征对应的抗压强度如图 8 所示。在连续级配 A 中, A3 的抗压强度最小; A1 和 A2 的  $C_u$  相近, 其中 A1 平均砾径较大, 抗压强度最大。在间断级配 B1 中, 将 A3 作为对照组, B1 的  $C_c$ 、 $C_u$  和平均砾径均小于 A3, 抗压强度大于 A3。在连续级配 C 中, 随  $C_c$  和平均砾径增加, 抗压强度逐渐增大; 随  $C_u$  增加, 抗压强度逐渐减小。

在所有方案中, A3 抗压强度最小, C3 抗压强度

最大。抗压强度主要受  $C_u$  和平均砾径的影响。整体上, 随  $C_u$  增加, 抗压强度逐渐降低; 当级配类型相同且  $C_u$  相近时(如 A1 和 A2; C1、C2 和 C3), 随平均砾径增大, 抗压强度逐渐增大。

在所有模拟方案中砾石含量均控制为 50%, 方案 A3 包含整个砾径模拟范围(2~14 mm), 对应的  $C_u$  最大, 而砾径组成越复杂砾石支撑方式越紊乱, 从而降低岩样整体抵抗破坏的能力。当  $C_u$  越小, 即砾径组成越简单, 相应砾石支撑方式也越均一, 岩样整体抵抗

破坏的能力越强，并随着平均砾径的增加，抗压强度进一步增大。

不同方案的级配特征对应的弹性模量如图 9 所示。在 A 组中，A1 平均砾径最大，弹性模量最小；A2 的  $C_c$ 、 $C_u$  和平均砾径最小，弹性模量最大。方案 B1 的  $C_c$ 、 $C_u$  和平均砾径小于 A3，弹性模量也小于 A3。在 C 组

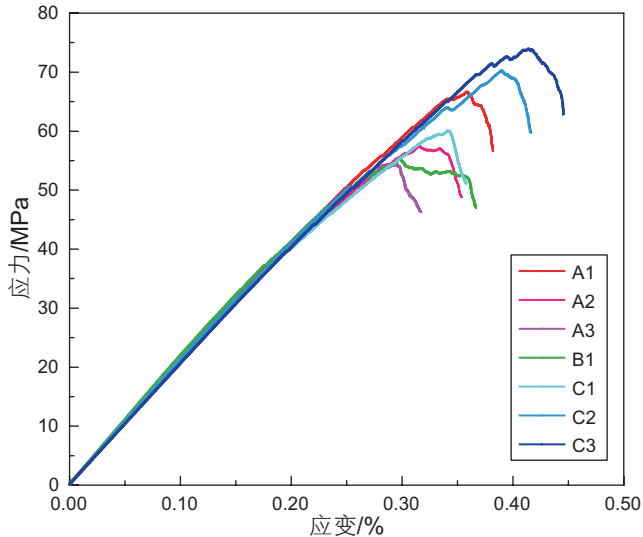


图 7 不同级配下的应力应变曲线  
Fig. 7 Stress-strain curves with different grading schemes

表 6 不同级配下的力学性质  
Table 6 Mechanical properties with different grading schemes

力学参数	级配 A1	级配 A2	级配 A3	级配 B1	级配 C1	级配 C2	级配 C3
抗压强度 /MPa	66.69	57.42	54.41	55.33	60.06	70.24	73.90
弹性模量 /GPa	21.17	21.58	21.43	22.15	21.44	21.34	20.61

中，随  $C_c$  和平均砾径增加，弹性模量逐渐减小；随  $C_u$  减小，弹性模量逐渐增大。

在所有方案中，C3 的弹性模量最小，B1 的弹性模量最大。整体上弹性模量规律性不强，当平均砾径较小时 (2~4 mm)，平均砾径与弹性模量呈正相关关系；当平均砾径较大时 (4~14 mm)，平均砾径与弹性模量呈负相关关系。

弹性模量反映了材料抵抗变形的难易程度，受到多重因素影响。总体上，砾径越小，在微观尺度上具有较大的表面积，颗粒表面效应的增强提高了颗粒之间的吸引力和表面张力，从而更容易发生聚集和形变，降低了抵抗变形的能力。然而，当考虑宏观尺度时，整体材料的弹性模量并不简单地与颗粒的抵抗变形能力直接相关。砾径较小的颗粒会填充材料的空隙，从而提高整体的密实性，表现出较高的弹性模量。因此平均砾径与弹性模量之间的相关性可能呈现出截然相反的情况。

### 3.2 裂缝扩展过程

以连续级配 A1 为例，监测裂缝扩展过程，选取 6 个应力应变曲线节点为代表，如图 10、11 所示。在 PFC 软件中，当颗粒间平行键黏结受外力作用，在达

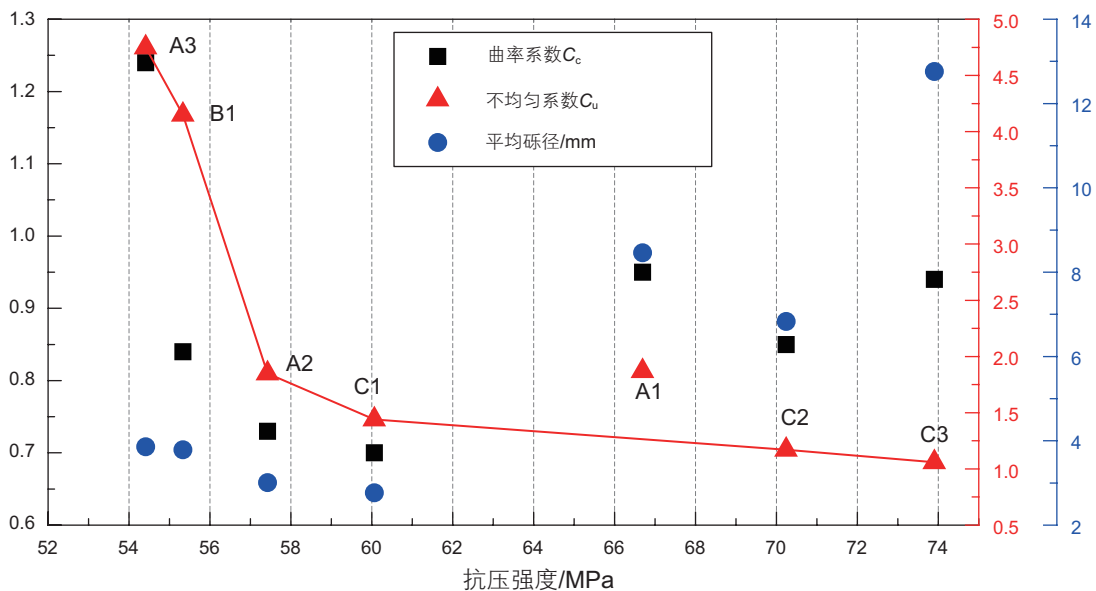


图 8 不同级配特征对应的抗压强度  
Fig. 8 Compressive strength corresponding to different grading characteristics

到相应黏结强度时(剪切强度或拉伸强度),黏结发生断裂从而产生不同的裂缝类型(绿色代表剪切裂缝,红色代表拉伸裂缝)。

将应力应变曲线主要划分为 3 个阶段,即线性递增、非线性递增与非线性递减阶段。当应力应变曲线位于 a 处,出现第一个裂缝。从 a 到 c 位于线性递增阶段,主要围绕砾石周围发育剪切裂缝和少量拉伸裂缝;砾石内部出现拉伸裂缝,发生破裂。从 c 到 e 位于非线性递增阶段,c 与 d 均出现不同程度的扰动,并在 e 处达到峰值;在该阶段主要发育拉伸裂缝,并向砾石四周延伸发育形成小缝网,剪切裂缝围绕小砾径砾石发育。从 e 到 f 位于非线性递减阶段,拉伸裂缝进一步发

育,缝网不断扩大。

### 3.3 裂缝数目及复杂程度

在不同级配方案中,拉伸裂缝构成复杂缝网,整体呈“x”或“/”状,如图 12 所示。缝网主要发育在砾石集中部位以及大砾径砾石周围,当缝网中夹杂小砾径的砾石,小砾石周围发育致密的拉伸裂缝,并伴随部分小砾石破裂。

统计不同级配方案下的裂缝数目,通过分形维数表征裂缝的复杂程度。本文采用 Matlab 中计盒维数的方法,分形维数  $d$  如下所示。统计结果如表 7 所示。

$$d = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} [\log N(\epsilon) / \log(1/\epsilon)] \quad (5)$$

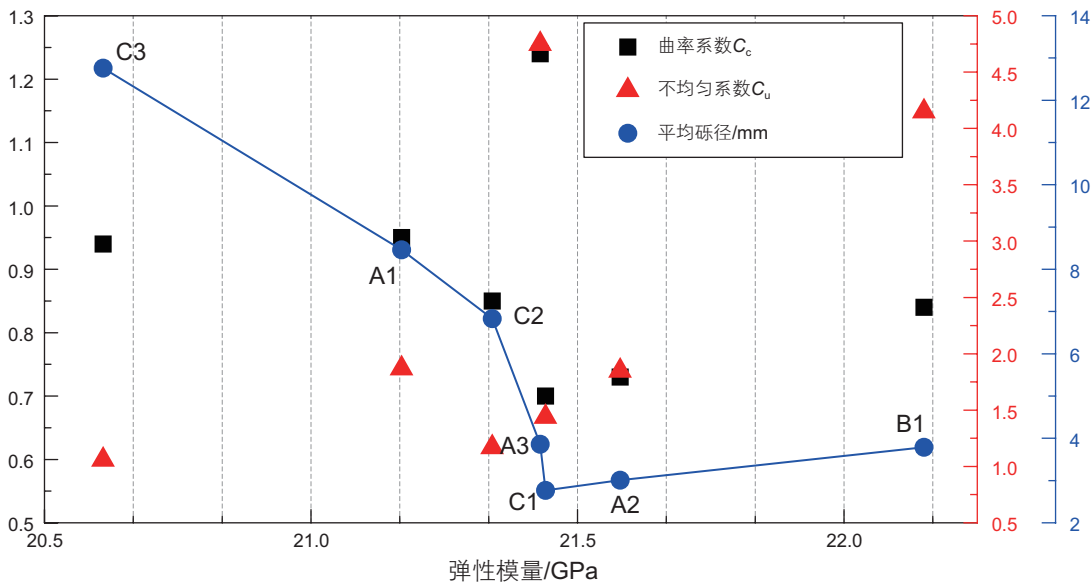


图 9 不同级配特征对应的弹性模量

Fig. 9 Elastic modulus corresponding to different grading characteristics

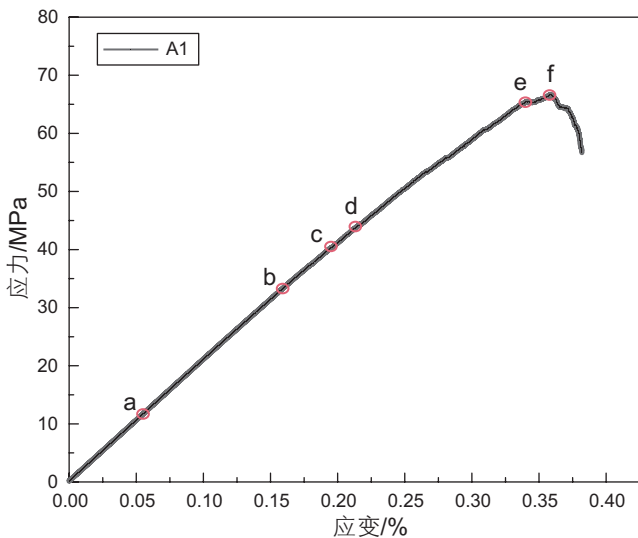


图 10 级配 A1 应力应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of continuous grading A1

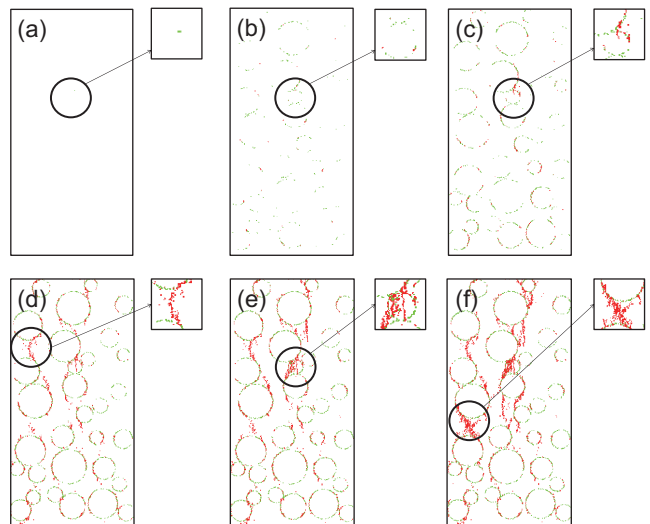


图 11 级配 A1 裂缝扩展过程

Fig. 11 Grading A1 crack propagation process



式中,  $\varepsilon$  为小立方体的边长;  $N(\varepsilon)$  为所需小立方体的最小数目。

不同方案的级配特征对应的裂缝数目如图 13 所示。在 A 组中, A3 的  $C_c$  最大, 裂缝数目最少; A2 的  $C_c$ 、 $C_u$  和平均砾径最小, 裂缝数目最多。B1 的  $C_c$ 、 $C_u$  和平均砾径小于 A3, 裂缝数目多于 A3。在 C 组中, 随  $C_c$  和平均砾径增加, 裂缝数目逐渐减小; 随  $C_u$  减小, 裂缝数目逐渐增多。

在所有方案中, A3 的裂缝数目最少; C1 的裂缝

数目最多。整体上, 随着  $C_c$  的增加, 裂缝数目逐渐减小; 当级配类型相同且  $C_u$  相近时(如 A1 和 A2; C1、C2 和 C3), 随平均砾径增大, 裂缝数目逐渐减小。

结合裂缝的发育过程, 裂缝主要围绕在砾石周围并向四周延伸。考虑到小砾径砾石具有更大的表面积, 颗粒之间相互作用更显著, 并且在外力作用下容易出现应力集中, 从而导致裂缝的产生, 在所有方案中, C1 整体砾径最小, 裂缝数目最多。并且, 由图 12 可知, 缝网的发育特征与砾径分布状况相关, 考虑分布

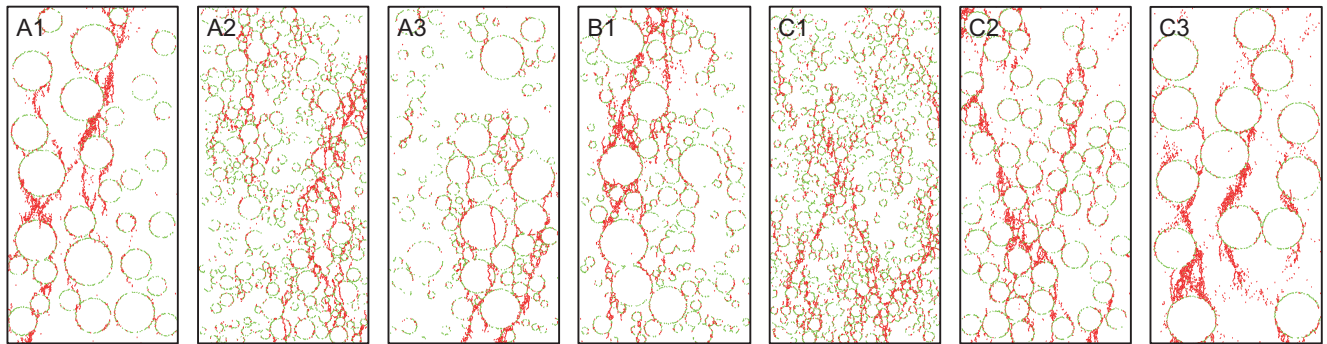


图 12 不同级配下的缝网发育

Fig. 12 Development of joint network under different gradations

表 7 不同级配下的裂缝数目及复杂程度

Table 7 Number and complexity of micro-cracks under different grading schemes

类别	级配 A1	级配 A2	级配 A3	级配 B1	级配 C1	级配 C2	级配 C3
剪切(绿色)	1763	4669	2429	2905	5525	2568	1326
拉伸(红色)	3069	4094	2360	3417	4468	4107	3663
裂缝数目	4832	8763	4789	6322	9993	6675	4989
分形维数	1.44	1.55	1.41	1.47	1.58	1.49	1.41

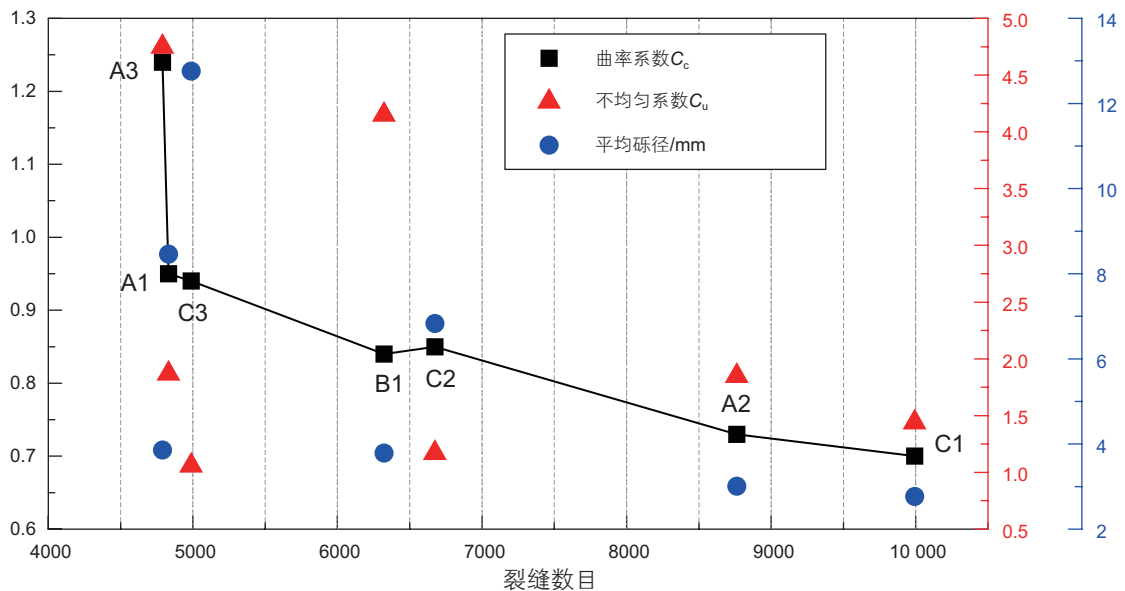


图 13 不同级配特征对应的裂缝数目

Fig. 13 Number of cracks corresponding to different grading characteristics



差异  $C_c$  越大, 可能导致局部应力集中, 从而增加裂缝形成的可能。

裂缝数目和裂缝的分形维数整体呈线性正相关关系, 如图 14 所示。裂缝数目越多, 裂缝发育越复杂,

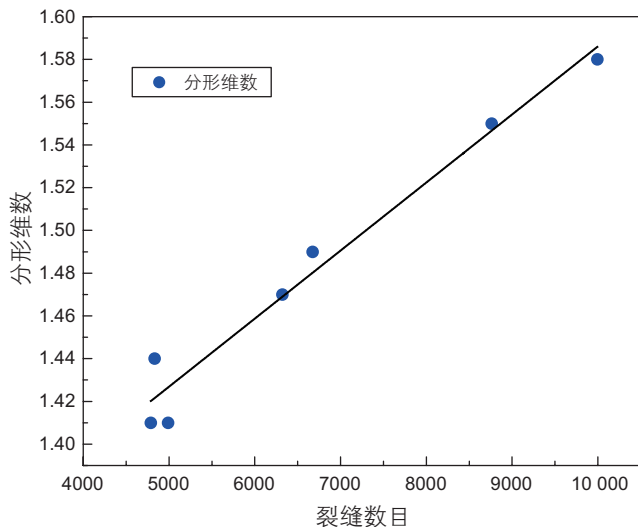


图 14 裂缝数目与分形维数

Fig. 14 Number of cracks and fractal dimension

分形维数越大。

## 4 结论

本文基于 PFC2D 建立了砾岩离散元模型, 研究了砾石级配特征对砾岩力学性质和裂缝扩展规律的影响, 主要结论如下:

(1) 砾岩的抗压强度主要受不均匀系数  $C_u$  和平均砾径的影响, 整体上抗压强度与  $C_u$  呈负相关关系, 在一定条件下平均砾径越大, 抗压强度越高。砾岩的弹性模量受多种因素共同影响, 当平均砾径小于 5 mm, 平均砾径与弹性模量呈负相关关系, 当平均砾径大于 5 mm, 平均砾径与弹性模量呈正相关关系。

(2) 在砾岩裂缝发育的过程中, 裂缝主要在砾石集中部位及大砾径砾石周围发育形成缝网, 部分砾石出现了破裂。整体上, 裂缝数目与曲率系数  $C_c$  呈负相关关系, 在一定条件下, 随平均砾径增大, 裂缝数目逐渐减少。裂缝数目与裂缝的分形维数呈正相关关系。

## 参考文献

- [1] 唐勇, 郭文建, 王霞田, 等. 玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 127-137. [TANG Y, GUO W J, WANG X T, et al. New breakthroughs and revelations in exploration of conglomerates in Mahu depression[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 127-137.]
- [2] 李洪, 邹灵战, 汪海阁, 等. 玛湖致密砂砾岩 2000 m 水平段水平井优快钻完井技术[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(1): 47-52. [LI H, ZOU L Z, WANG H G, et al. Optimal and fast drilling and completion technology for horizontal wells in the 2000m horizontal section of Mahu tight sandstone conglomerate rock[J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 2017, 39(1): 47-52.]
- [3] 李国欣, 覃建华, 鲜成钢, 等. 致密砾岩油田高效开发理论认识、关键技术与实践——以准噶尔盆地玛湖油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1185-1197. [LI G X, QIN J H, XIAN C G, et al. Theoretical understanding, key technology and practice of efficient development of tight conglomerate oil fields -- taking Mahu oil field in the Junggar Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1185-1197.]
- [4] 郭璇, 潘建国, 谭开俊, 等. 地震沉积学在准噶尔盆地玛湖西斜坡区三叠系百口泉组的应用[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 359-364. [GUO X, PAN J G, TAN K J, et al. The application of seismic sedimentology to the triassic Baikouquan formation in the western slope area of Mahu, the junggar basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2): 359-364.]
- [5] 于兴河, 瞿建华, 谭程鹏, 等. 玛湖凹陷百口泉组扇三角洲砾岩岩相及成因模式[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(6): 619-627. [YU X H, QU J H, TAN C P, et al. Facies and genetic model of fan delta conglomerate in Baikouquan Formation of Mahu depression[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(6): 619-627.]
- [6] 张昌民, 王绪龙, 朱锐, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组岩石相划分[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(5): 606-614. [ZHANG C M, WANG X L, ZHU R, et al. Lithofacies division of Baikouquan formation in Mahu sag, the junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(5): 606-614.]
- [7] 王秀平, 牟传龙. 苏里格气田东二区盒 8 段储层成岩作用与成岩相研究[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 678-689. [WANG X P, MOU C L. Study on diagenesis and diagenetic facies of he-8 reservoir in east block 2 of sulige gas field[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 678-689.]
- [8] 操应长, 燕苗苗, 葱克来, 等. 玛湖凹陷夏子街地区三叠系百口泉组砂砾岩储层特征及控制因素[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 945-956. [CAO Y C, YAN M M, YAN K L, et al. Characteristics and control factors of the triassic Baikouquan formation sandy conglomerate reservoir in the Xiazijie area of Mahu depression[J]. Journal of Sedimentation, 2019, 37(5): 945-956.]
- [9] 熊健, 唐勇, 刘向君, 等. 应用微 CT 技术研究砂砾岩孔隙结构特征——以玛湖凹陷百口泉组储集层为例[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 127-137. [XIONG J, TANG Y, LIU X J, et al. Application of micro-CT technology to study pore structure characteristics of sandstone conglomerate reservoirs -- taking the Baikouquan formation reservoir in Mahu depression as an example[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 127-137.]

- 2018, 39(2): 236–243. [XIONG J, TANG Y, LIU X J, et al. Applying micro CT technology to study the pore structure characteristics of sandstone conglomerates: taking the Baikouquan formation reservoir in Mahu depression as an example[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(2): 236–243.]
- [10] 单祥, 徐洋, 郭华军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷北斜坡玛 131 井区块三叠系百口泉组储层敏感性评价[J]. 地质科技情报, 2017, 36(1): 176–182. [SHAN X, XU Y, GUO H J, et al. Sensitivity evaluation of triassic Baikouquan formation reservoir in Ma 131 well block on the north slope of Mahu sag in the junggar basin[J]. Geological Science and Technology Intelligence, 2017, 36(1): 176–182.]
- [11] 张重阳, 熊健, 梁利喜, 等. KS 地区砾岩地层岩石力学特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(27): 11038–11044. [ZANG C Y, XIONG J, LIANG L X, et al. Experimental study on rock mechanics characteristics of conglomerate formation in KS area[J]. Science, Technology and Engineering, 2020, 20(27): 11038–11044.]
- [12] 高阳, 张文, 覃建华, 等. 砾石对砂砾岩力学特性影响的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(5): 1745–1751. [GAO Y, ZHANG W, QIN J H, et al. Numerical simulation of the influence of gravel on the mechanical properties of gravel rock[J]. Science, Technology and Engineering, 2021, 21(5): 1745–1751.]
- [13] 张文, 高阳, 梁利喜, 等. 砾岩油藏岩石力学特征及其对压裂改造的影响[J]. 断块油气田, 2021, 28(4): 541–545. [ZHANG W, GAO Y, LIANG L X, et al. Rock mechanics characteristics of conglomerate reservoir and its influence on fracturing modification[J]. Block oil and gas field, 2021, 28(4): 541–545.]
- [14] 何小东, 马俊修, 刘刚, 等. 玛湖油田砾岩储集层岩石力学分析及缝网评价[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(6): 701–707. [HE X D, MA J X, LIU G, et al. Rock mechanics analysis and fracture network evaluation of conglomerate reservoir in Mahu oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(6): 701–707.]
- [15] LI M Z, TANG S K, GUO T, et al. Numerical investigation of hydraulic fracture propagation in the glutenite reservoir[J]. Journal of geophysics and engineering, 2018, 15(5): 2124–2138.
- [16] TANG C A, YANG Y F. Crack branching mechanism of rock-like quasi-brittle materials under dynamic stress[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(11): 3273–3284.
- [17] 刘向君, 熊健, 梁利喜, 等. 玛湖凹陷百口泉组砂砾岩储集层岩石力学特征与裂缝扩展机理[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 83–91. [LIU X J, XIONG J, LIANG L X, et al. Rock mechanics characteristics and fracture propagation mechanism of Baikouquan formation glutenite reservoir in Mahu sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 83–91.]
- [18] LI L, MENG Q, WANG S, et al. A numerical investigation of the hydraulic fracturing behaviour of conglomerate in Glutenite formation[J]. Acta Geotechnica: An International journal for Geoengineering, 2013, 8(6): 597–618.
- [19] LIU P, JU Y, RANJITH P. G, et al. Experimental investigation of the effects of heterogeneity and geostress difference on the 3D growth and distribution of hydrofracturing cracks in unconventional reservoir rocks[J]. Journal of Natural gas Science and Engineering, 2016, 35(Pt. A): 541–554.
- [20] 刘向君, 王小军, 赵保伟, 等. 砂砾岩储集层水力压裂裂缝扩展规律与可压性评价[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(2): 169–177. [LIU X J, WANG X J, ZHAO B W, et al. Fracture propagation law and compressibility evaluation of Fracking in glutenite reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(2): 169–177.]
- [21] 李皋, 舒淋, 简旭, 等. 基于不规则颗粒的砾岩力学性能数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(20): 8660–8665. [LI G, SHU L, JIAN X, et al. Numerical simulation study on mechanical properties of conglomerate based on irregular particles[J]. Science, Technology and Engineering, 2022, 22(20): 8660–8665.]
- [22] LUO S L, GE H K, WANG J B, et al. Numerical simulation study on the crack propagation of conglomerate[J]. Royal Society Open Science, 2021, 8(7): 202178.