

# 玛湖凹陷砾岩裂缝扩展数值模拟

刘鹏宇<sup>1</sup>, 蒋庆平<sup>2</sup>, 申颖浩<sup>1</sup>, 赵廷峰<sup>2</sup>, 葛洪魁<sup>1</sup>, 周东<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249; 2. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:**玛湖凹陷砾岩裂缝扩展规律不清晰,其影响因素也不明确。构建多相混合介质砾岩数值模拟模型,对不同加载方式、不同特征砾岩的裂缝扩展规律进行研究。结果表明,砾石含量越高,胶结强度越低,砾石和基质的相对强度越大,则砾岩形成的裂缝越复杂;拉伸载荷和剪切载荷共同作用下砾岩裂缝最为复杂;砾石对砾岩裂缝的吸引作用和屏蔽作用促进砾岩形成复杂缝网。

**关键词:**玛湖凹陷;砾岩;裂缝;数值模拟;模型;扩展规律;多相混合介质;连续介质离散元方法

**中图分类号:**TE357 **文献标识码:**A

## Numerical Simulation on Fracture Propagation in Conglomerate in Mahu Sag

LIU Pengyu<sup>1</sup>, JIANG Qingping<sup>2</sup>, SHEN Yinghao<sup>1</sup>, ZHAO Tingfeng<sup>2</sup>, GE Hongkui<sup>1</sup>, ZHOU Dong<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Unconventional Oil and Gas, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China;

3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** For the conglomerate in the Mahu sag, the law and controlling factors of fracture propagation are unclear. A numerical simulation model for conglomerate was constructed to analyze the law of fracture propagation in conglomerate with different material properties under different loading modes. The results show that the higher the gravel content, the lower the cementation strength and the greater the relative strength of gravel to matrix, the more complex the fractures created in the conglomerate. Influenced by loading mode, the most complex fractures are created in the conglomerate under the combined action of tensile and shear loads. The attracting and shielding effects of gravel on conglomerate fractures promote the formation of complex fracture network in the conglomerate.

**Keywords:** Mahu sag; conglomerate; fracture; numerical simulation; model; propagation law; multiphase medium; continuum-based discrete element method

准噶尔盆地玛湖凹陷致密砾岩储集层非均质性较强,不同区域储集层、同一区域不同深度储集层均表现出不同的力学性质<sup>[1-2]</sup>,百口泉组砾岩弱胶结,而乌尔禾组砾岩胶结程度相对较高,2组砾岩裂缝特征差异明显<sup>[3]</sup>。总体上,该区砾岩储集层具有强度较低、非均质性较强、水敏性较强等特点<sup>[4-5]</sup>。砾岩储集层岩性变化大、砾石分布不均,在水力压裂改造过程中裂缝扩展易受砾石影响<sup>[6]</sup>,主要有遇砾终止、分叉、绕砾和穿砾4种形式<sup>[7]</sup>,砾石周围的弱胶结面对砾岩强度产生影响<sup>[8]</sup>。较小粒径的砾石周围易形成单一主裂缝;较大粒径的砾石,水力压裂裂缝绕砾扩展形成偏转和分叉,砾石粒径越大,裂缝遇到砾石发生转向的程度越大<sup>[9-12]</sup>。此外,砾岩裂缝扩展还受到主应力差和胶结面强度的影响<sup>[13-14]</sup>。因此,砾岩储集层压裂裂缝形态主要由应力状态和砾石特征共同决定,其中,应力

状态包含水平应力差、排量等,砾石特征包括砾石含量、粒径、砾石与基质的差异等。本文采用基于连续介质的离散元方法构建砾岩数值模型,从砾岩中的砾石含量、胶结强度以及砾石与基质的相对强度3个方面,研究玛湖凹陷百口泉组致密砾岩裂缝扩展的影响因素和扩展规律。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 基于连续介质的离散元方法

采用基于连续介质的离散元方法<sup>[15]</sup>对砾岩裂缝扩展规律进行研究,该方法在刚性块体离散元模型的基础上建立可变形块体离散元模型,通过虚拟弹簧模拟不同性质块体间的相互作用,模拟土石混合体中土体的变形以及模拟地质体从连续到非连续的破坏过程,从而在宏观上反映地质体实际的破坏规律。

©2018 Xinjiang Petroleum Geology. Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

收稿日期:2021-10-18

修订日期:2021-12-05

基金项目:中国石油战略合作科技专项(ZLZX2020-01)

第一作者:刘鹏宇(1995-),男,河南郑州人,硕士,油气地质力学,(Tel)18811731146(E-mail)lpy19950119@163.com

将计算模型分为块体单元和接触单元,并作出如下假设:单元视为弹性块体,接触单元存在厚度,通过法向和切向弹簧传递力;同种材料间破坏前按连续介质计算,破坏后按非连续介质计算;破坏和滑移都发生在接触单元上,块体单元只发生变形。

可变形块体离散元的控制方程为:

$$Ma(t) + Cv(t) + Ks(t) = Q(t) \quad (1)$$

由刚度矩阵和位移求出弹性力,通过循环每一个可变形单元,完成连续变形计算<sup>[16-17]</sup>:

$$\begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & \cdots & K_{1,n} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & \cdots & K_{2,n} \\ \cdots & \cdots & K_{ij} & \cdots \\ K_{n,1} & K_{n,2} & \cdots & K_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \cdots \\ s_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过阻尼矩阵和速度求出阻尼力:

$$\begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & \cdots & C_{1,n} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & \cdots & C_{2,n} \\ \cdots & \cdots & C_{ij} & \cdots \\ C_{n,1} & C_{n,2} & \cdots & C_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

当模型发生破坏,由连续介质转变为非连续介质时,虚拟弹簧断裂,破坏分为拉断和剪断2种形式。

拉断是弹簧的法向力小于块体单元的内聚力时,弹簧断裂,其对应的块体分离时块体受力情况为:

$$\begin{cases} F_n = 0, \\ F_s = 0. \end{cases} \quad (4)$$

剪断是模型满足摩尔-库伦准则,剪切破坏后块体之间发生滑动,受力情况为:

$$\begin{cases} F_n = -K_n s, \\ F_s = F_n \tan \theta. \end{cases} \quad (5)$$

### 1.2 砾岩裂缝扩展的数值模拟方法

通常将砾岩的组成为砾石、基质和胶结面<sup>[7,13]</sup>,采用基于连续介质的离散元方法,构建上述3相的数值模拟模型。

考虑到不同应力状态对裂缝扩展的影响,建立不同样品的面积均为200 mm×200 mm的单轴拉伸模型(图1a);建立总面积为200 mm×200 mm、侧方具有20 mm×5 mm开口的不同样品的直接剪切模型(图1b)。为研究多相混合介质裂缝的形成与扩展,有学者采用L型板对混凝土开展实验,并建立相应的L型板模型<sup>[18-20]</sup>。因此,为研究不同加载方式对砾岩裂缝扩展的影响,建立短边为250 mm、长边为500 mm的L型板模型(图1c),包括拉伸载荷作用下的拉伸载荷模型(图1d)、剪切载荷作用下的剪切载荷模型(图1e)以及拉伸载荷与剪切载荷共同作用下的混合载荷模型(图1f)。

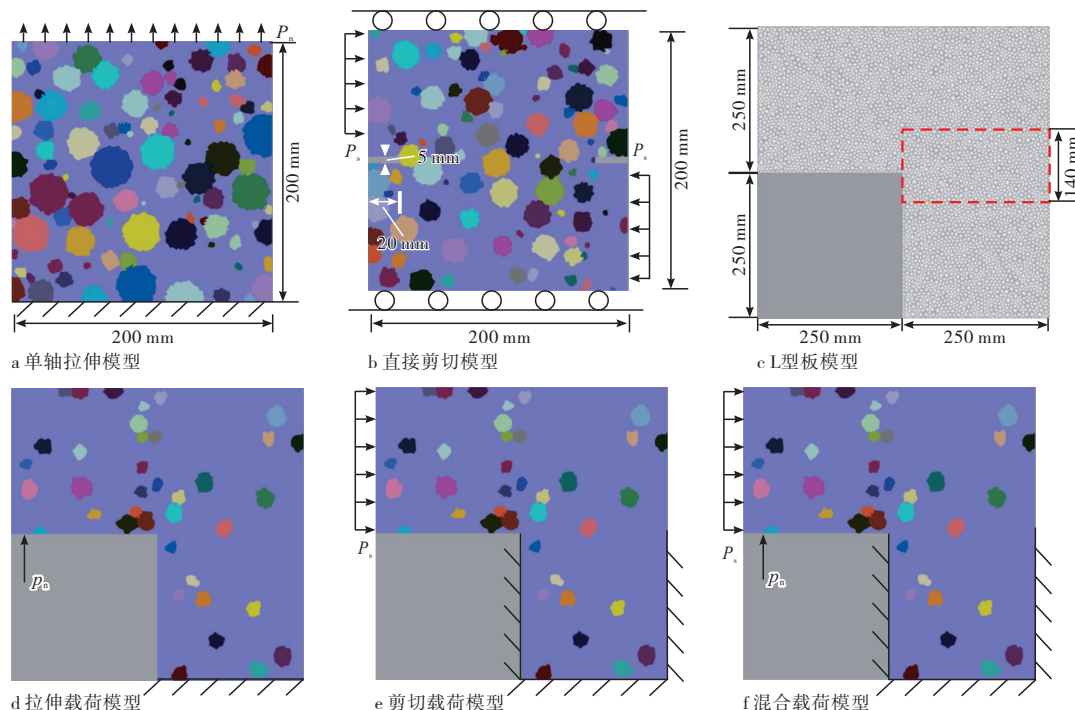


图1 玛湖凹陷砾岩数值模拟模型

Fig. 1. Numerical simulation models of the conglomerate in Mahu sag

采用随机生成的足够小的三角形网格构建模型,一方面考虑到网格的尺寸效应对砾石大小及破坏的影响,另一方面采用不规则网格构建出的砾石边界能反映裂缝实际扩展情况,同时将砾石随机分布于模型

中,模拟砾石对裂缝的影响,由于裂缝主要生成于模型中部,因此截取如图1c中面积为250 mm×140 mm的裂缝主要形成区(红色方框所示),对砾岩裂缝扩展规律进行研究。

## 2 数值模拟结果

### 2.1 裂缝特征

为对比砾岩与均质岩石在不同受力状态下的裂缝形态,对两者分别开展了单轴拉伸实验和直接剪切实验模拟。均质岩石的拉伸裂缝为平直的裂缝,由于在模拟过程中岩石的破裂为非线性,因此均质岩石的拉伸裂缝扩展过程中发生了分叉(图2a);相较于均质

岩石的拉伸裂缝,砾岩的拉伸裂缝更加复杂,形成多条相对独立的拉伸裂缝,并且拉伸裂缝绕砾扩展使裂缝不断转向,迂曲度增加(图2b)。均质岩石的剪切裂缝为2条平直的简单裂缝(图2c);砾岩的剪切裂缝则形成复杂的裂缝带,多条剪切裂缝沿砾石边缘发育并相互交叉(图2d),与均质岩石相比,砾岩剪切裂缝受砾石影响较大,砾石边缘形成多个裂缝条带,裂缝整体的复杂程度较高。

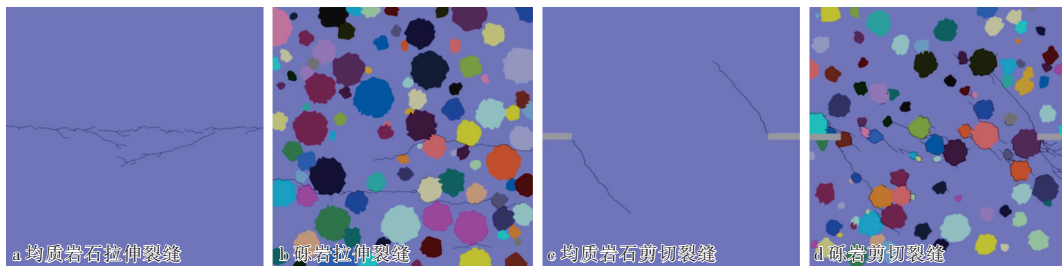


图2 不同岩石拉伸裂缝与剪切裂缝对比

Fig. 2. Tensile and shear fractures in different rocks

砾岩不但在裂缝形态上相较于均质岩石更加复杂,两者的破裂时长也并不相同。均质岩石拉伸裂缝的形成仅需1个时步,即在一瞬间完成,而砾岩的拉伸裂缝扩展则经历了35个时步,裂缝扩展时间更长。此外,砾岩的拉伸裂缝和剪切裂缝数量及形态差别明显,拉伸裂缝虽沿砾石边缘形成多条迂曲的独立裂缝,却并未形成裂缝带,相较而言,剪切裂缝数量更多,分布区域更为集中,形态更为复杂。

的拉伸裂缝;胶结强度为5 MPa时,裂缝更加平直,出现了穿砾和止砾现象(图3)。因此,胶结强度较低时,砾岩裂缝扩展以绕砾为主,裂缝形态曲折,复杂程度高;胶结强度较高时,砾岩裂缝扩展出现穿砾和止砾现象,裂缝形态平直,复杂程度较低。

### 2.2 胶结强度与相对强度对拉伸裂缝的影响

以拉伸裂缝为例,研究相同模型不同胶结强度对裂缝扩展的影响。胶结强度为1 MPa时,形成2条相对独立的拉伸裂缝,均以绕砾扩展为主;胶结强度为3 MPa时,裂缝扩展仍以绕砾为主,形成1条近于平直

以拉伸裂缝为例,通过改变砾石与基质的抗拉强度来控制砾石与基质的相对强度,研究在相同模型中不同相对强度对裂缝扩展的影响。砾石与基质的抗拉强度差为1 MPa时,相对强度较小,拉伸裂缝为1条近于平直的裂缝;抗拉强度差为3 MPa时,分支裂缝出现;抗拉强度差为5 MPa时,形成2条相互交织的拉伸裂缝,部分砾石被裂缝完全包裹(图3)。因此,砾石与基质的抗拉强度差越大,砾岩的非均质性越强,

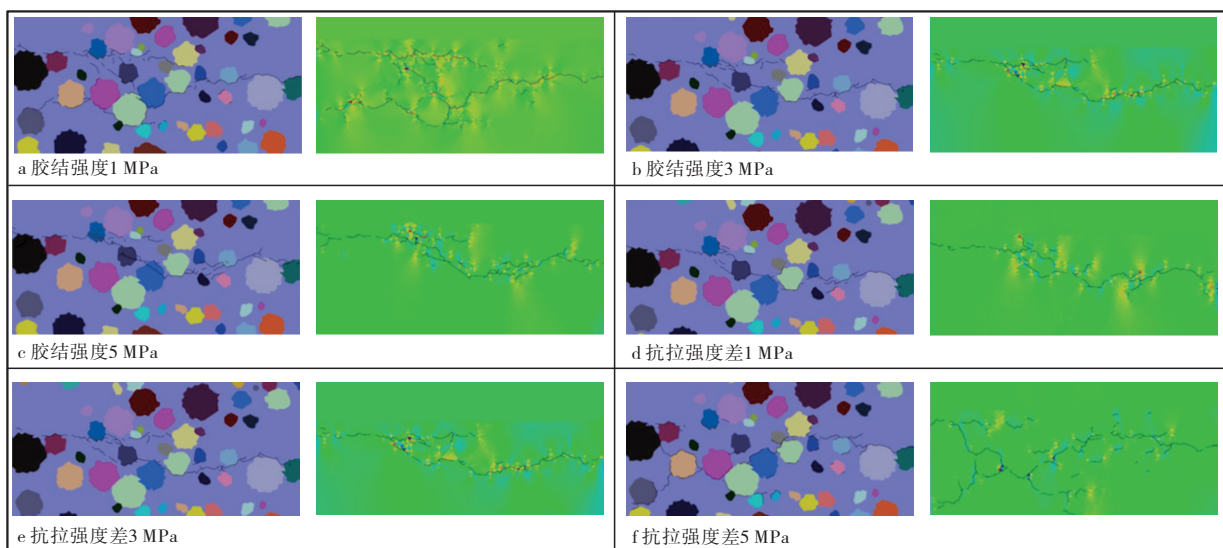


图3 不同强度的砾岩数值模拟模型和裂缝二维图像

Fig. 3. Numerical simulation models of conglomerate and 2D images of fractures under different strengths



形成的拉伸裂缝数量越多,裂缝形态越复杂。

### 2.3 不同加载方式对裂缝的影响

为研究不同加载方式对砾岩裂缝扩展的影响,采用L型板模型分别对拉伸载荷、剪切载荷以及混合载荷作用下的砾岩裂缝扩展进行数值模拟研究,通过ImageJ软件对模型二维图像进行分析,统计砾石的面积百分含量代表砾石含量,研究砾石含量对砾岩裂缝扩展的影响。

#### 2.3.1 拉伸载荷

研究区砾岩岩心样品的砾石含量为10.00%~60.00%,因此,构建砾石含量依次为11.54%、30.66%、38.24%、54.03%和64.48%的砾岩模型。在拉伸载荷作用下,裂缝以绕砾扩展为主,随着砾石含量的增加,裂缝由平滑的单裂缝逐渐转变为曲折的多裂缝。砾石含量为11.54%时,裂缝扩展过程中受到了砾石周围弱胶结面的吸引而发生偏转;砾石含量为30.66%时,裂缝发生多次偏转;砾石含量为38.24%时,裂缝因砾石的屏蔽而停止扩展;砾石含量为64.48%时,裂缝发生明显转向与分叉(图4)。

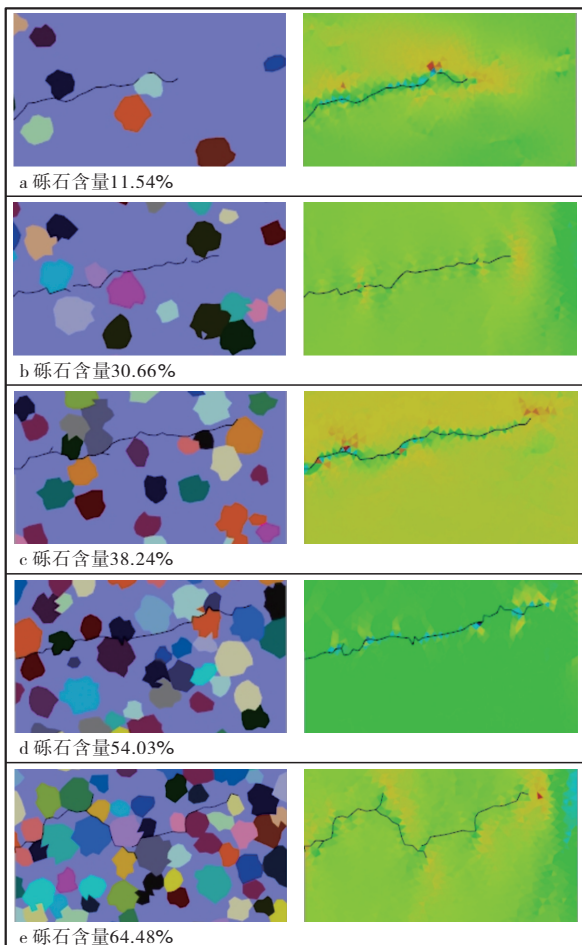


图4 拉伸载荷下砾岩数值模拟模型和裂缝二维图像

Fig. 4. Numerical simulation models of conglomerate and 2D images of fractures under tensile load

#### 2.3.2 剪切载荷

在剪切载荷作用下,砾岩裂缝仍以绕砾扩展为主,砾石含量较低时,既有完全在基质中发育的裂缝,也有受砾石吸引沿砾石边缘扩展的裂缝,多条裂缝独立发育;随着砾石含量增加,裂缝绕砾形成多条裂缝相互交织的复杂裂缝网络。相较于拉伸载荷作用,剪切载荷作用下形成的裂缝形态更加复杂,数量更多(图5)。

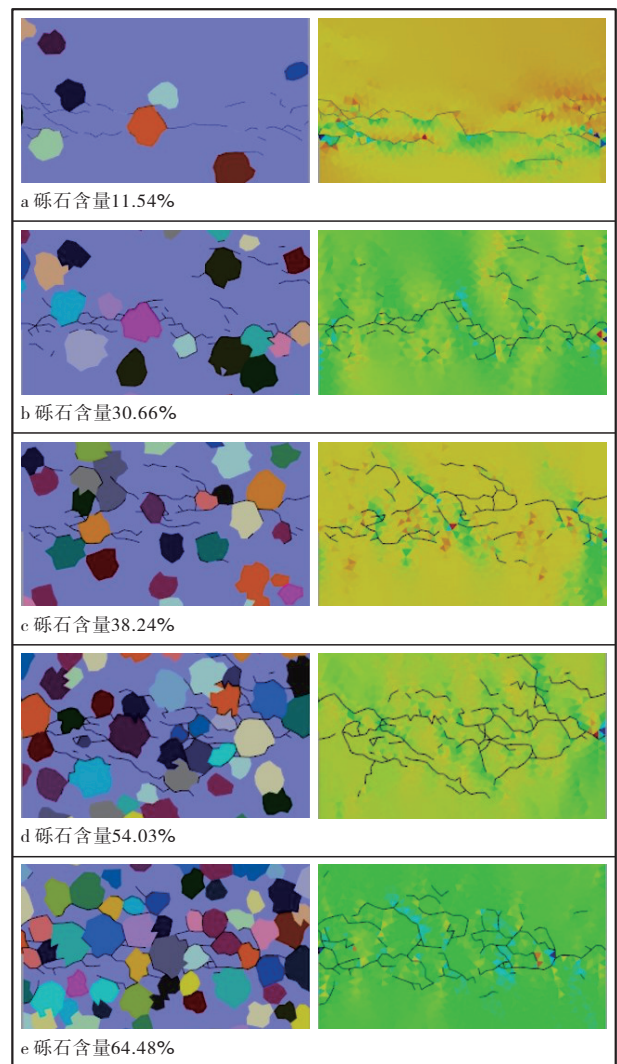


图5 剪切载荷下砾岩数值模拟模型和裂缝二维图像

Fig. 5. Numerical simulation models of conglomerate and 2D images of fractures under shear load

#### 2.3.3 混合载荷

由于实际地层中岩石的受力情况非常复杂,为更接近玛湖凹陷实际的砾岩裂缝扩展规律,采用拉伸载荷与剪切载荷共同作用的砾岩模型,对混合载荷作用下的砾岩裂缝进行分析。在混合载荷作用下,砾岩的裂缝扩展方式仍以绕砾为主,裂缝形态与剪切载荷作用下的裂缝形态相似,形成复杂裂缝条带,且多处出现裂缝包裹整个砾石的情况(图6)。

在上述3种载荷作用下,裂缝的初始破裂时步均

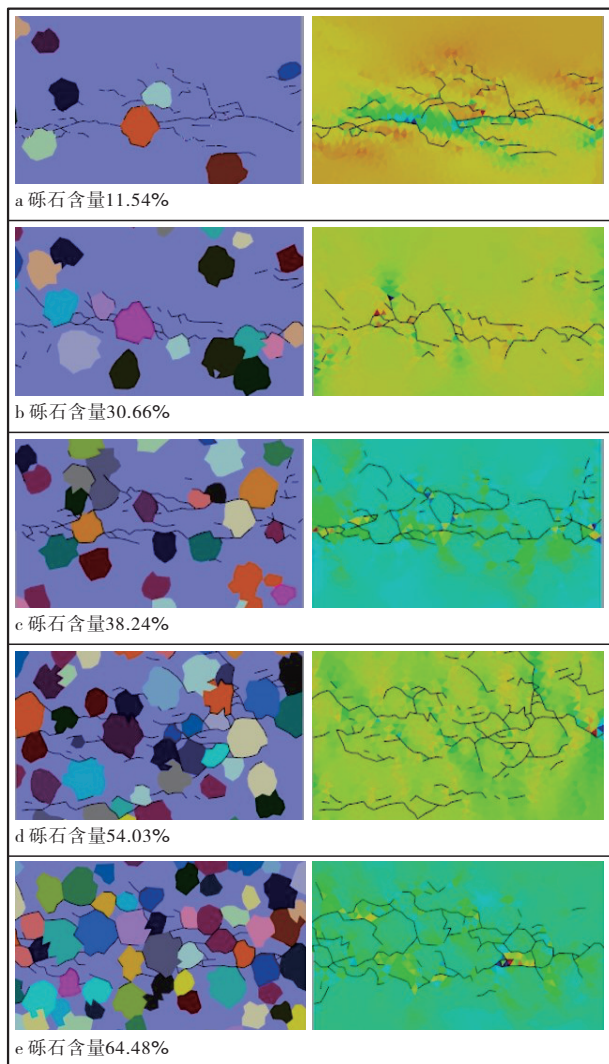


图6 混合载荷下砾岩数值模拟模型和裂缝二维图像

Fig. 6. Numerical simulation models of conglomerate and 2D images of fractures under mixed load

与砾石含量呈现出较好的负相关性,砾石含量越高,砾岩越容易破裂(图7a)。裂缝的分形维数与砾石含量均呈正相关,砾石含量越高,砾岩形成的裂缝越复杂。在拉伸载荷、剪切载荷和混合载荷作用下,裂缝分形维数分别为1.02~1.22、1.23~1.46和1.27~1.49,

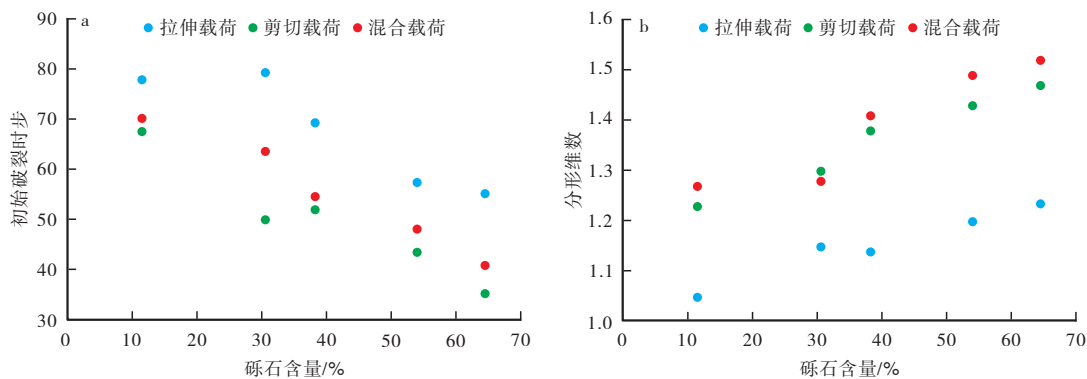


图7 不同加载方式下初始破裂时步(a)和分形维数(b)与砾石含量的关系

Fig. 7. (a) Initial fracture time step and (b) fractal dimension vs. gravel content under different loading modes

由此可见,混合载荷作用下裂缝的复杂程度较高,剪切载荷作用次之,拉伸载荷最低(图7b)。

### 3 讨论

#### 3.1 砾岩与均质岩石裂缝对比

使用离散元数值模拟软件PFC对不同砾石含量的砾岩进行单轴压缩实验模拟,通过应力—应变曲线与破裂模型分析其力学性质<sup>[21]</sup>。砾石含量为10.00%时,岩石的应力—应变曲线与均质岩石相似,具有明显的脆性特征;砾石含量为55.00%时,砾岩达到抗压强度前的裂纹稳定扩展阶段明显变长,砾岩具有一定的塑性特征,且砾石含量越高,砾岩的塑性特征越明显(图8)。

对比均质岩石和砾岩分别在拉伸载荷、剪切载荷以及混合载荷作用下的裂缝形态,可以看出,在相同载荷下,砾岩裂缝相较于均质岩石裂缝数量更多,迂曲度更高,绕砾扩展特征明显,形态更加复杂。均质岩石压裂裂缝较平直,形态简单,砾岩压裂裂缝绕砾扩展,形态曲折,复杂程度高(图9)。此外,通过开展真三轴水力压裂实验,验证了数值模拟结果可靠。

#### 3.2 砾岩裂缝扩展机理

玛湖凹陷百口泉组砾岩孔隙类型以残余粒间孔、溶蚀孔和微裂缝为主<sup>[22]</sup>,镜下观察砾岩破坏后的裂缝形态可知,研究区砾岩裂缝扩展形式以绕砾为主,在绕砾扩展裂缝周围存在大量微裂缝,使裂缝形成条带状,但可见的最长裂缝并没有覆盖整个裂缝带(图10)。

由线弹性断裂力学可知,金属材料在裂缝尖端的非线性区域(包括非线性塑性区域和非线性断裂过程区)可以简化为1条直线,沿着非线性塑性区域裂缝面上分布塑性应力,直到变形足够大时,裂缝开度达到临界值,塑性应力降为0。砾岩作为多相混合材料,虽然在裂缝尖端存在类似金属材料的非线性断裂过程区,但砾岩的力学行为主要受砾石的桥联应力作用<sup>[23]</sup>,适用于砾岩的裂缝模型主要有虚拟裂缝模型和裂缝带模型<sup>[24-25]</sup>。



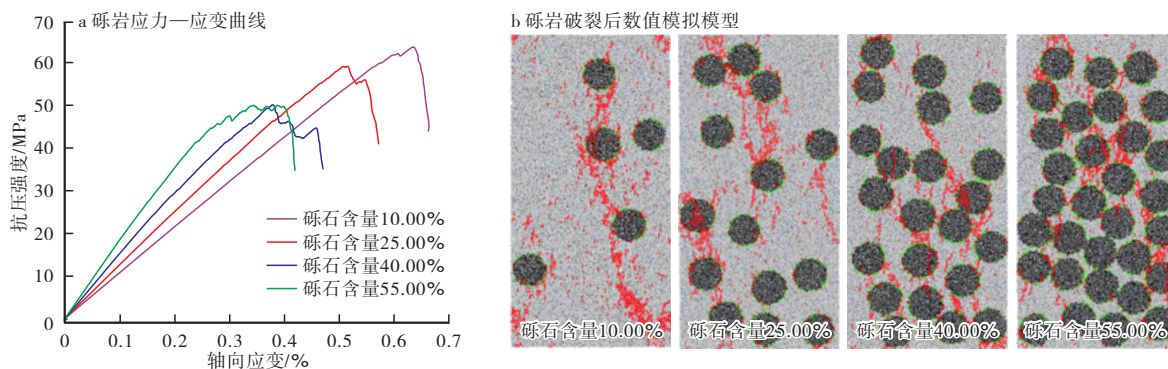


图8 不同砾石含量的单轴压缩试验结果

Fig. 8. Results of uniaxial compression tests under different gravel contents

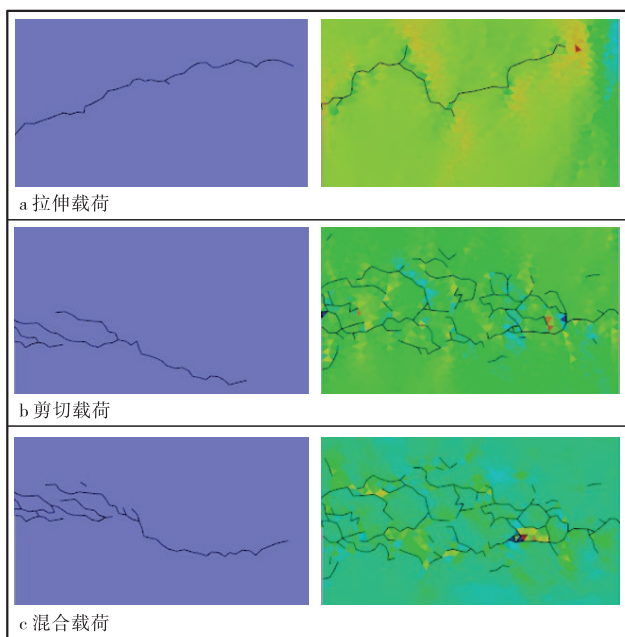


图9 不同加载方式下均质岩石(左)和砾岩(右)裂缝对比  
Fig. 9. Fractures in homogeneous rock (left) and conglomerate (right) under different loading modes

采用裂缝密集且平行的裂缝带研究砾岩裂缝扩展形态,完全开裂区的裂缝不传递任何应力,而张开的微裂缝区的裂缝面上可以传递应力,裂缝带外的砾岩仍然保持线弹性,裂缝带内的砾岩从发生损伤微裂到微裂缝汇集成宏观裂缝所消耗的能量为砾岩的断裂能。

在砾岩裂缝扩展过程中,根据能量最小原理,裂缝总是沿着消耗能量最小的路径发育。由于研究区砾岩的胶结面强度远低于砾石和基质的强度,砾岩裂缝扩展方向主要取决于裂缝带与砾石的距离以及胶结强度。胶结强度一定,裂缝沿应力方向扩展形成的裂缝带距离砾石足够近时,虽然在基质中改变原有扩展方向会增加能量消耗,但沿改变后路径消耗的能量加上绕砾扩展的能量,仍小于沿原有路径扩展消耗的能量,此时裂缝被砾石吸引;裂缝带距离砾石较远时,绕砾扩展消耗能量较大,裂缝沿应力方向扩展。裂缝

的绕砾扩展本就使裂缝迂曲度增加,对裂缝是一种屏蔽作用,而当砾石含量增至一定程度时,裂缝扩展过程中遇到大粒径砾石或砾石集聚,此时裂缝将会受到砾石的屏蔽作用发生转向(图10)。

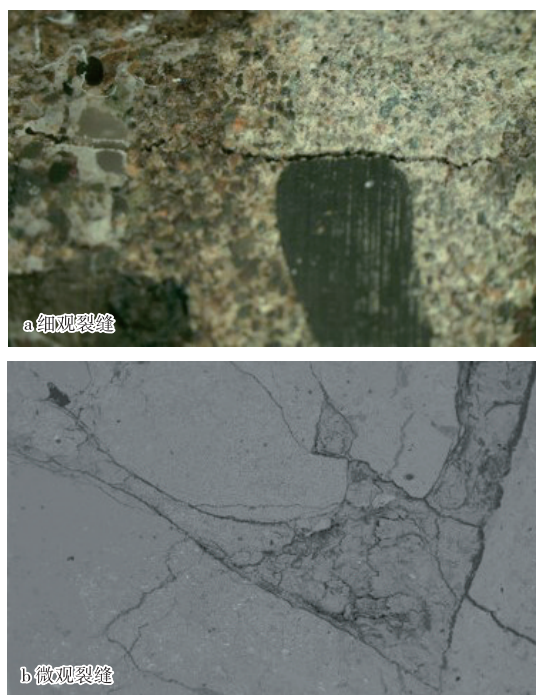


图10 砾岩细观及微观裂缝形态  
Fig. 10. Meso- and micro-fractures in conglomerate

在一定胶结强度下,裂缝刚好能够被砾石吸引的距离叫作临界距离,砾石含量的增加使得裂缝在扩展过程中遇见距离不超过临界距离的砾石增多,形成更加复杂的裂缝。砾石与基质的相对强度增大使砾岩整体的非均质性增强,胶结强度的降低和砾石与基质相对强度的增大可使临界距离增大,使裂缝在更大范围内被砾石吸引,因此,胶结强度的降低和相对强度的增大同样可使砾岩形成更加复杂的裂缝。

### 4 结论

(1)玛湖凹陷砾岩与其他岩性相比,裂缝形态更

加复杂,破裂时间更长,且裂缝扩展规律受砾石影响较大。

(2)加载方式是玛湖凹陷砾岩裂缝扩展的重要影响因素之一,混合载荷作用下裂缝的复杂程度较高,剪切载荷作用次之,拉伸载荷最低。

(3)玛湖凹陷砾岩裂缝的扩展规律为砾石含量越高,胶结强度越低,砾石与基质的相对强度越大,形成的裂缝越复杂。

(4)砾石周围存在的弱胶结面可使裂缝转向;粒径较大及数量较多的砾石对裂缝扩展起屏蔽作用,使裂缝形成时间更长,形态更复杂。

### 符号注释

- $a(t)$ —— $t$ 时刻的加速度向量,  $m/s^2$ ;  
 $C$ ——阻尼矩阵;  
 $C_{i,j}$ ——阻尼矩阵第  $i$  行第  $j$  列节点;  
 $C_{n,n}$ ——阻尼矩阵第  $n$  行第  $n$  列节点;  
 $f_n$ ——第  $n$  个节点的弹性力与阻尼力,  $N$ ;  
 $F_n$ ——法向力,  $N$ ;  
 $F_s$ ——切向力,  $N$ ;  
 $F_N$ ——压力,  $N$ ;  
 $i$ ——刚度矩阵第  $i$  行;  
 $j$ ——刚度矩阵第  $j$  行;  
 $K$ ——刚度矩阵;  
 $K_{i,j}$ ——刚度矩阵第  $i$  行第  $j$  列节点;  
 $K_{n,n}$ ——刚度矩阵第  $n$  行第  $n$  列节点;  
 $K_n$ ——弹簧的法向刚度,  $N/m$ ;  
 $M$ ——质量矩阵;  
 $n$ ——刚度矩阵行数和列数;  
 $P_n$ ——拉伸载荷,  $N$ ;  
 $P_s$ ——剪切载荷,  $N$ ;  
 $Q(t)$ —— $t$ 时刻的载荷列阵;  
 $s$ ——弹簧的位移向量,  $m$ ;  
 $s_n$ ——位移向量第  $n$  个节点,  $m$ ;  
 $s(t)$ —— $t$ 时刻的位移向量,  $m$ ;  
 $v_n$ ——速度向量第  $n$  个节点,  $m/s$ ;  
 $v(t)$ —— $t$ 时刻的速度向量,  $m/s$ ;  
 $\theta$ ——内摩擦角,  $(^\circ)$ 。

### 参考文献:

- [1] 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 Xinghe, QU Jianhua, TAN Chengpeng, et al. Conglomerate lithofacies and origin models of fan deltas of Baikouquan formation in Mahu sag, Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(6): 619-627.
- [2] 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 Changmin, WANG Xulong, ZHU Rui, et al. Litho-facies classification of Baikouquan formation in Mahu sag, Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(5): 606-614.
- [3] 陈超峰, 王佳, 俞天喜, 等. 玛湖凹陷乌尔禾组砾岩储集层裂缝支撑剂运移规律[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(5): 559-564.  
 CHEN Chaofeng, WANG Jia, YU Tianxi, et al. Proppant migration law in fractures of conglomerate reservoirs of Wuerhe formation in Mahu sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(5): 559-564.
- [4] 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 Xiangjun, XIONG Jian, LIANG Lixi, et al. Rock mechanical characteristics and fracture propagation mechanism of sandy conglomerate reservoirs in Baikouquan formation of Mahu sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 83-91.
- [5] 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 Xiaodong, MA Junxiu, LIU Gang, et al. Analysis of rock mechanics and assessments of hydraulic fracture network in conglomerate reservoirs of Mahu oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(6): 701-707.
- [6] 李升芳, 李太伟, 王进涛, 等. 砂砾岩储层裂缝摩阻测试及应用[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(19): 127-130.  
 LI Shengfang, LI Taiwei, WANG Jintao, et al. The performance test and application of the fracture friction in glutenite reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(19): 127-130.
- [7] 李连崇, 李根, 孟庆民, 等. 砂砾岩水力压裂裂缝扩展规律的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1 501-1 507.  
 LI Lianchong, LI Gen, MENG Qingmin, et al. Numerical simulation of propagation of hydraulic fractures in glutenite formation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1 501-1 507.
- [8] 鞠杨, 杨永明, 陈佳亮, 等. 低渗透非均质砂砾岩的三维重构与水压致裂模拟[J]. 科学通报, 2016, 61(1): 82-93.  
 JU Yang, YANG Yongming, CHEN Jialiang, et al. 3D reconstruction of low-permeability heterogeneous glutenites and numerical simulation of hydraulic fracturing behavior[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(1): 82-93.
- [9] 赵益忠, 曲连忠, 王幸尊, 等. 不同岩性地层水力压裂裂缝扩展规律的模拟实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(3): 63-66.  
 ZHAO Yizhong, QU Lianzhong, WANG Xingzun, et al. Simulation experiment on prolongation law of hydraulic fracture for different lithologic formations[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(3): 63-66.
- [10] 李宇, 张士诚, 马新仿, 等. 砂砾岩储层水力裂缝扩展规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2 383-2 392.  
 LI Ning, ZHANG Shicheng, MA Xinfang, et al. Experimental study on the propagation mechanism of hydraulic fracture in glutenite formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2 383-2 392.
- [11] 罗攀, 李勇明, 江有适, 等. 砂砾岩水力裂缝延伸路径模拟研究[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(5): 103-106.

- LUO Pan, LI Yongming, JIANG Youshi, et al. Research on micro-morphology characteristics of hydraulic fractures for conglomerate reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(5): 103-106.
- [12] 孟庆民, 张士诚, 郭先敏, 等. 砂砾岩水力裂缝扩展规律初探 [J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2010, 32(4): 119-123.
- MENG Qingmin, ZHANG Shicheng, GUO Xianmin, et al. A primary investigation on propagation mechanism for hydraulic fractures in glutenite formation [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(4): 119-123.
- [13] 余东合, 徐康泰, 车航, 等. 基于细观损伤多相耦合的砂砾岩水力压裂裂缝扩展数值模拟 [J]. *石油钻采工艺*, 2016, 38(3): 352-358.
- YU Donghe, XU Kangtai, CHE Hang, et al. Numerical simulation on hydraulic fracture propagation in glutenite reservoir based on microscopic damage multiphase coupling [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(3): 352-358.
- [14] 王硕, 覃建华, 杨新平, 等. 玛湖地区致密砾岩人工裂缝垂向延伸机理应力模拟 [J]. *新疆石油地质*, 2020, 41(2): 193-198.
- WANG Shuo, QIN Jianhua, YANG Xiping, et al. Stress simulation of vertical hydraulic fracture propagation mechanism in tight conglomerate reservoirs of Mahu area [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2020, 41(2): 193-198.
- [15] LI Shihai, ZHAO Manhong, WANG Yuannian, et al. A new numerical method for DEM-block and particle model [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41: 436.
- [16] 冯春, 李世海, 姚再兴. 基于连续介质力学的块体单元离散弹簧法研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增刊1): 2690-2704.
- FENG Chun, LI Shihai, YAO Zaixing. Study of block-discrete-spring method based on continuum mechanics [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Sup.1): 2690-2704.
- [17] 范永波, 李世海, 侯岳峰, 等. 不同边界条件下土石混合体破坏机制研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(3): 48-51.
- FAN Yongbo, LI Shihai, HOU Yuefeng, et al. A study of the failure mechanism of rock and soil associate under different boundary conditions [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(3): 48-51.
- [18] UNGER J F, ECKARDT S, KONKE C. Modelling of cohesive crack growth in concrete structures with the extended finite element method [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, 196: 4087-4100.
- [19] AMBATI M, GERASIMOV T, LORENZIS L D. A review on phase-field models of brittle fracture and a new fast hybrid formulation [J]. *Computational Mechanics*, 2015, 55: 383-405.
- [20] 杜修力, 金浏, 黄景琦. 基于扩展有限元法的混凝土细观断裂破坏过程模拟 [J]. *计算力学学报*, 2012, 29(6): 940-947.
- DU Xiuli, JIN Liu, HUANG Jingqi. Simulation of meso-fracture process of concrete using the extended finite element method [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, 29(6): 940-947.
- [21] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(6): 1114-1122.
- ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(6): 1114-1122.
- [22] 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*, 2018, 39(2): 236-243.
- XIONG Jian, TANG Yong, LIU Xiangjun, et al. Using micro-CT scanning technology to study characteristics of pore structures in sandy conglomerate: a case from Baikouquan formation in Mahu sag, Junggar basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2018, 39(2): 236-243.
- [23] 徐世烺. 混凝土断裂力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- XU Shilang. *Fracture mechanics of concrete* [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [24] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P-E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(1): 773-782.
- [25] BAZANT Z P, OH B H. Crack band theory for fracture of concrete [J]. *Materials and Structures*, 1983, 16: 155-177.

(编辑 李菁)