

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.05.012

## 单轴压缩砂岩水力压裂力学特性试验研究

杨红伟<sup>1,2</sup>, 许江<sup>1</sup>, 聂闻<sup>1</sup>, 林骏<sup>1</sup>, 龚涛<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 宜宾学院 矿业与安全工程学院, 四川 宜宾 644007)

**摘要:**采用 RLW-2 000 M 微机控制煤岩流变仪, 以砂岩为研究对象, 重点分析单轴压缩条件下水压-应变-水压体积曲线演化规律, 从水压、应变和水压体积三者关系反映水力压裂过程的力学特征; 结合断裂力学观点分析了砂岩的水力压裂裂缝形态及破坏类型。实验结果表明: 岩石在水力压裂过程的变形演化规律可分为 4 个阶段, 揭示了孔隙裂隙的注水阶段、弹性变形阶段、体积膨胀阶段和贯通破裂阶段的特征; 利用乘幂负指数拟合方程, 能较好地模拟  $\epsilon_1-t$  与  $P-V_p$  曲线演化规律且精度较高; 裂缝起裂和裂缝扩展延伸过程存在拉伸变形和剪切变形的相互作用。

**关键词:** 岩石力学; 砂岩; 水力压裂; 水压; 变形

**中图分类号:** TU45

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2016)05-090-07

## Mechanical characteristics of sandstone under hydraulic fracturing by uniaxial compression

YANG Hongwei<sup>1,2</sup>, XU Jiang<sup>1</sup>, NIE Wen<sup>1</sup>, LIN Jun<sup>1</sup>, GONG Tao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. College of Mining and Safety Engineering, Yibin University, Yibin 644007, Sichuan, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, mechanical characteristics of sandstone under hydraulic fracturing were investigated by uniaxial compression tests (using RLW-2000M Coal and Rock Computer Controlled Rheological Testing Machine). Transformation laws of strain-pore water pressure curves are the research highlights. The mechanical characters of sandstone under hydraulic fracturing were discussed based on pore water pressure, rock strain and water volume. In addition, we assessed the hydraulic fracture morphology and failure type of sandstone. The results show that the typical deformation evolution involves four stages in hydraulic fracturing process, and well the characteristics of the pore fissure water injection stage, the

**收稿日期:** 2016-08-22

**基金项目:** 国家自然科学基金面上资助项目(51474040); 四川省教育厅重点科研资助项目(15ZA0304); 宜宾学院博士科研启动金资助项目(2012B18); 宜宾市科学技术局重点科研资助项目(2014SF032); 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室访问学者基金资助项目(2011DA105287-FW201406)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51474040), the Commission of Sichuan Province of China(15ZA0304), Scientific Research Foundation for PhD of Yibin University(2012B18), Key Scientific research projects of Science and Technology Bureau of Yibin, Sichuan(2014SF032) and the Opening Fund of the State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (Chongqing University 2011DA105287-FW201406).

**作者简介:** 杨红伟(1977-)男, 博士, 主要从事页岩气储层力学特性、煤层气渗透机理分析、煤与瓦斯突出机理等方向研究, (E-mail) yhw982313@163.com。

elastic deformation stage, the volume expansion stage, and the gloable rupture stage are revealed. The power of negative exponential can fit the  $\epsilon_1-t$  and the  $P-V_p$  curves. Tensile deformation and shear deformation interact with each other during the crack initiation and propagation process.

**Keywords:** rock mechanics; sandstone; hydraulic fracturing; pore water pressure; deformation

1947年在美国堪萨斯州水力压裂技术实验成功后,经过了半个多世纪的发展,目前已广泛应用于低渗油气田、页岩气的开发。国内外针对单轴、三轴压缩试验方面的试验成果丰富,涉及水力压裂试验以及裂缝扩展规律也开展了相关的研究:Hudson等<sup>[1]</sup>于1971发表的大理岩试样单轴压缩的应力—应变全程曲线。根据峰后曲线的形态,Wawersik等<sup>[2]</sup>将岩石应力—应变全过程曲线分为即“I型”的“II”型。中国学者葛修润等<sup>[3]</sup>于1992年自行研制的RMT150型电液伺服自适应岩石力学试验机进行了花岗岩等6种岩石试验后,提出了岩石峰值后特性的新观点。Wong等<sup>[4]</sup>对Athabasca地区含油疏松砂岩进行了三轴实验,总结出颗粒间可能存在4种相互作用方式。Alsayed等<sup>[5]</sup>研究了不同轴压、围压、内腔水压应力状态下砂岩的破坏情况。Daneshy<sup>[6]</sup>分析了水力压裂作用下在最小阻力的方向会发生一系列的变化,剪切作用可能会诱发剪切失效,形成不连续的粗糙缝面。Haimson等<sup>[7]</sup>对应力和天然裂缝对水力压裂裂缝形态的影响进行了理论和试验研究。在大尺寸真三轴模拟试验系统和试验研究方面,杨春和等<sup>[8-10]</sup>在不同地应力、不同排量条件下对页岩进行了水力压裂试验,还利用声发射和CT技术对裂缝扩展规律和最终形态进行研究。还自主研发了水力加砂压裂试验装置,利用红色砂岩研究非常规天然气开采过程中支撑剂的运移规律。赵益忠等<sup>[11]</sup>对岩心进行了水力压裂裂缝起裂及裂缝扩展模拟试验,得到了压后裂缝几何形态和压裂过程中压力随时间的变化规律。连志龙等<sup>[12-13]</sup>研究了水力压裂扩展的流固耦合数值模拟和扩展特性的数值模拟。张卫东等<sup>[14]</sup>从疏松砂岩水力压裂裂缝形成的物理机制、扩展时的力学行为、扩展机理、偏转机理等多方面研究综述。袁志刚等<sup>[15]</sup>研究了穿层钻孔煤巷条带水力压裂增透技术应用于南桐矿务局东林煤矿的试验和瓦斯抽采情况的对比分析。夏彬伟等<sup>[16]</sup>研究了压裂孔及导向钻孔采用水射流割缝技术在煤孔中形成定向缝隙,并成功应用于典型低透气性煤层,提高了瓦斯抽放浓度。

水力压裂的研究多集中在理论分析、数值模拟、模型材料压裂等方面,有关力学机理性研究文献相对较少,尤其在岩石弹塑性力学特征对裂缝起裂扩展的影响研究方面,缺少微观破裂机理与宏观水力压裂工艺有效结合的研究。该文将从单轴压缩水力压裂强度试验的应力—应变曲线分析力学特征,并通过破坏特征分析裂缝扩展的机理及形态。

## 1 实验方法

### 1.1 岩样制备及试验装置

试验选用的砂岩取自三峡库区的三叠系上统须家河组,主要成分为石英、长石、燧石和白云母等,属陆源细粒碎屑沉积岩,粒径 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$ <sup>[17]</sup>。岩样尺寸符合岩石力学实验标准,加工成圆柱体 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。试件高度及端面平整度满足要求,筛选后进行钻孔加工,钻孔直径为 $\phi 6\text{ mm}$ ,孔深 $15\text{ mm}$ (见图1(a))。

试验装置为RLW-2000M微机控制煤岩流变仪(具体参数见文献[17]),为了进行水力压裂试验,设计加工了一套水压封孔压板(见图1(b))。

### 1.2 实验方案

#### 1.2.1 实验计划

实验主要进行单轴压缩条件下砂岩水力压裂试验,将砂岩的常规单轴、水力压裂试验作为对比(见图2),具体计划见表1。其中强度百分比为水力压裂实验的单轴与常规单轴破坏强度的百分比,对比分析了常规单轴相同轴向应力的强度百分比的弹性模量和泊松比。水力压裂实验中先加载一定轴向应力保持恒定,后进行水力压裂并得到水压峰值破坏强度。

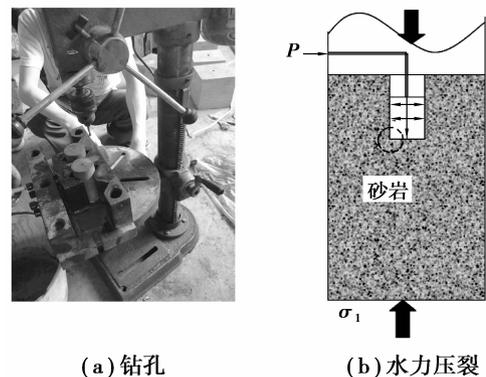


图1 水力压裂示意图

Fig.1 Schematic section of hydraulic fractures

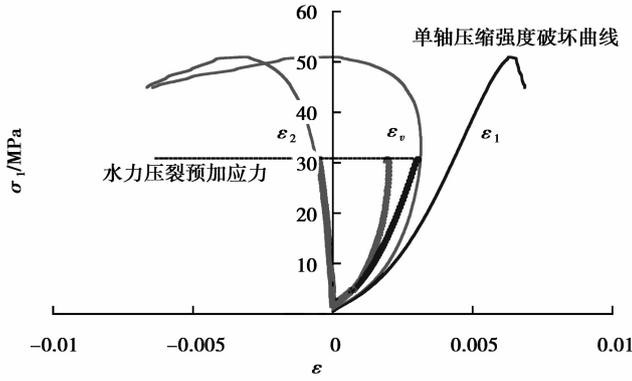


图 2 应力-应变曲线

Fig.2 Comparison of stress-strain curves of sandstone

表 1 实验方案及参数

Table 1 Experimental program and parameters

实验分类	$\sigma_1$ /MPa	$P$ /MPa	强度百分比/%	$E$ /GPa	$\mu$
单轴强度	50.98	0.00	60.0	7.08	0.14
单轴水压	30.58	12.20	60.0	10.13	0.17

1.2.2 水力压裂实验步骤

单轴压缩条件下水力压裂破坏实验：

- 1) 安装试件；
- 2) 轴向应力加载：施加轴向应力，其位移加载速率 0.10 mm/min，达到应力设定值保持恒定；
- 3) 水压力加载：根据实验要求设定施加水压力，其加载速率 3.0 MPa/min，破坏即停止实验；
- 4) 卸载：先卸载水压力到“0”，后卸载轴向应力到“0”更换试件。

2 实验结果及分析

2.1 水力压裂力学特性分析

2.1.1  $P-\epsilon_1-V_p$  (水压-应变-水压体积) 曲线

根据全应力-应变曲线分析方法<sup>[18]</sup>，分析岩石试件在单轴压缩条件下，水压力作用下产生变形的全过程，即分析水力压裂过程中水压力与应变的对应关系曲线，水压-应变曲线与岩石单轴压缩强度破坏的变形规律相似(见图 3(a))，也可分为 4 个阶段。为了更深入的分析水力压裂过程水压-应变-水压体积变化，将水压、轴向应变和水压体积三者对应关系进行分析(见图 3(b))，从孔隙裂隙的角度分析水压-应变-水压体积曲线各阶段变形特征。各阶段具体力学参数见表 2。

表 2 力学参数表

Table 2 The mechanics parameters under hydraulic fracturing

实验分类	力学参数	水压-应变曲线点(阶段)			绝对值百分比/%		
		A(OA)	B(AB)	C(BC)	A/C	B/C	C/C
单轴压缩	$\epsilon_1/10^{-3}$	0.004	0.039	0.111	3.95	35.32	100
	$\epsilon_2/10^{-3}$	0.006	-0.177	-0.822	0.73	21.57	100
	$\epsilon_v/10^{-3}$	0.016	-0.315	-1.533	1.07	20.57	100
水力压裂	$P$ /MPa	1.102	8.283	12.203	9.03	67.88	100
	$V_p/cm^3$	39.1	52.764	70.5	55.54	74.85	100
	$\mu$	0.36	4.51	7.38	4.93	61.08	100

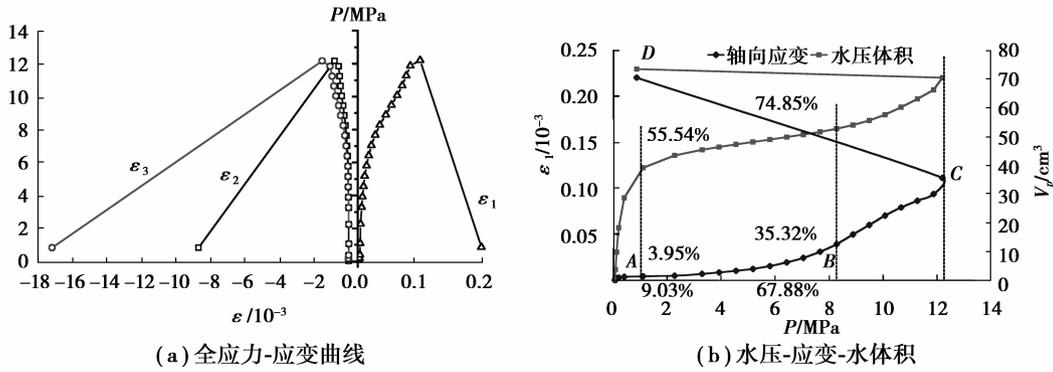


图 3 P-ε 曲线对比

Fig.3 Comparison of the pore water pressure and strain curves of hydraulic fracturing

1) 孔隙裂隙注水阶段(OA 段)。岩石试件中原有的孔隙或微裂隙在低水压作用下被充填,形成早期的非线性变形,水压-应变与水压-水压体积曲线呈上凹型。在此阶段试件横向膨胀和体积变形较小,泊松比为 0.36。该阶段低压( $P=1.0$  MPa)注水体积量较大,占到整个水压体积的 50% 以上。

2) 孔隙裂隙弹性变形阶段(AB 段)。该阶段的水压-应变曲线呈近似直线型,反映岩石试件孔隙或裂隙呈弹性变形。水压作用下横向应变和体应变变化也较大,泊松比达到 4.51。水压-水压体积曲线近似线性变化,水压百分比约为 68%,水压体积百分比略为 75%。

3) 孔隙裂隙体积膨胀阶段(BC 段)。该阶段受水压的影响,岩石试件由弹性变形向塑性变形发展,孔隙或裂隙横向变形增大呈体积膨胀变化,横向应变和体变速率迅速增大(横向应变和体积应变量大约占到 85%),泊松比达到 7.38。从断裂力学的角度分析,颗粒间或裂隙由摩擦剪切向拉伸劈裂破坏扩展。

4) 孔隙裂隙贯通破裂阶段(CD 段)。该阶段水压力由峰值快速降低,岩石内部结构发生质的变化,孔隙裂隙贯通破裂,横向变形和体积变形急速增大,岩石承载力迅速降低。该阶段岩石表现为沿宏观断裂面的劈裂与剪切的联合破坏。从断裂力学的角度分析,水力压裂中水压主要作用是润滑和克服颗粒间的摩擦力,对孔隙裂隙尖端起到拉伸力的作用。对于岩石复杂性和非均质性,破坏过程包含剪切和拉伸变形等综合作用。

2.1.2  $\epsilon_1-t, P-V_p$  曲线模拟

为了分析水力压裂作用下应变曲线的演化特征, $\epsilon_1-t$  曲线 OA、AB 阶段应变变量小,BC 阶段应变变量增大,曲线呈上凹型。从应变-时间演化特征分析,采用经验公式方法运用乘幂负指数方程拟合,将拟合方程、参数和拟合曲线对比试验曲线(见图 4(a))。

水力压裂过程中  $P-V_p$  曲线演化特征比较复杂,OA 阶段为低压充水过程,水压小、充水体积量较大,呈下凹型;AB 阶段为弹性变形过程,水压和水压体积呈线性;BC 阶段为体积膨胀过程,水压和水压体积为非线性,呈上凸型。根据曲线特征,分析后采用经验公式的方法运用乘幂负指数方程拟合,幂指数中含有二次方可将拟合方程、参数和拟合曲线对比试验曲线(见图 4(b))。

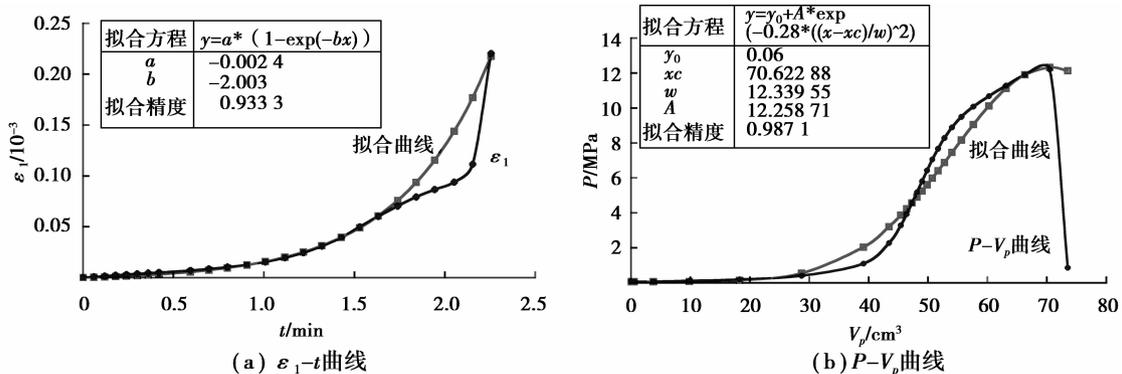


图 4 拟合曲线对比

Fig.4 Fitting curves comparison

### 2.2 水力压裂破坏特征分析

水力压裂的压裂机理包括裂缝起裂和裂缝扩展延伸 2 个方面<sup>[19]</sup>,通过研究水压力与位移场的对应关系,分析岩石水力压裂破坏的条件,其中岩石水力压裂强度远低于峰值强度,参照岩石断裂力学中的裂纹效应,可说明水力压裂属于“低应力断裂”。通过应力集中基本理论可以解释裂纹如何引起应力集中,又如何导致材料强度降低。

#### 2.2.1 单轴压缩水力压裂裂缝机理

根据图 1(b)中选取钻孔底部与内壁间的交界点为应力集中点(见图 5(a)),该点为在单轴压缩过程轴向受到应力为  $\sigma_1$ ,未施加水压前横向不受力。当施加水压时,水压不仅在横向施加剪切应力,还在轴向上施加压力。因此,合力作用下裂缝起裂方向垂直于合力,随着水压的增大且合力及起裂角度( $\theta$ )也增大(图 5(b))。其中,起裂角度沿水压  $P$  方向呈顺时针变化。合力与在局部应力集中区的孔隙在水压横向剪切作用和合力的拉伸作用下出现裂缝的开裂,裂缝扩展方向垂直于合力为对称反方向。当裂缝扩展方向由应力集中区向岩石内部扩展时,会受到轴向应力与水压作用呈闭合状态;裂缝由应力集中区向外部扩展时,受到合力与水压作用钻孔交界点的裂缝呈拉剪综合作用的劈裂破坏(见图 6),当失稳破坏瞬间开裂裂缝与闭合裂缝会在水压作用下形成贯通或半贯通的破裂面。

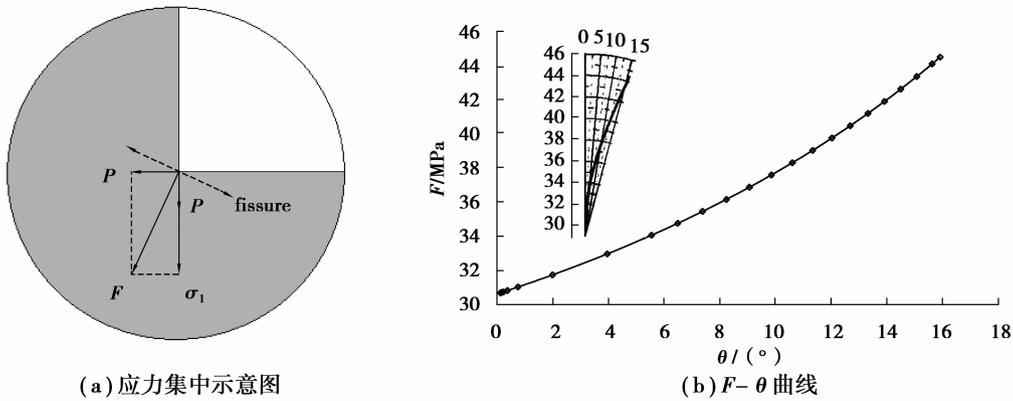


图 5 裂缝起裂原理

Fig.5 Fissure initiation principle

#### 2.2.2 单轴压缩水力压裂裂缝形态

单轴压缩强度破坏的压裂形态呈单斜面剪切破坏,沿着主裂缝表面有呈斜向拉伸开裂裂纹(见图 6(a))。

岩石在水力压裂前的单轴压缩状态时,轴向应力为峰值强度的 60%,低于屈服应力,属于弹性变形阶段。当施加水压力时,横向受到水压力作用,由剪切变形向拉伸变形转变。破坏形态的端面沿钻孔向外呈对称平

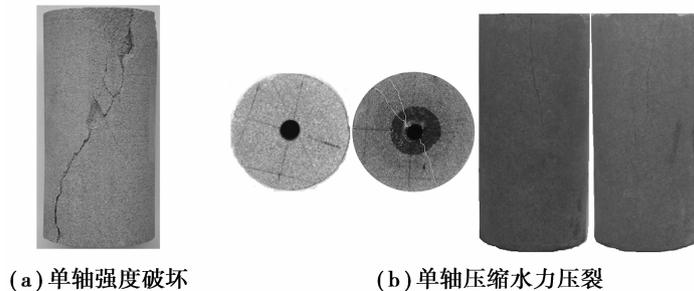


图 6 岩石水力压裂裂缝形态

Fig.6 Hydraulic fracture morphology of sandstone

行开裂,且有分支开裂缝,裂缝开裂有错动的现象;试件外表面有半贯通的竖直裂缝,由端面开裂至试件中下部,裂缝开裂有转动现象(见图6(b))。说明砂岩水力压裂中裂缝起裂和裂缝扩展延伸过程存在拉伸变形和剪切变形的相互作用。

### 3 结 论

1)根据全应力-应变曲线分析方法,岩石在水力压裂过程的孔隙变形演化规律可分为4个阶段(孔隙裂隙注水阶段(OA段);孔隙裂隙弹性变形阶段(AB段);孔隙裂隙体积膨胀阶段(BC段);孔隙裂隙贯通破裂阶段(CD段)。

2)根据经验公式拟合方法,分析水力压裂过程 $\epsilon_1-t$ 与 $P-V_p$ 曲线演化特征,利用乘幂负指数拟合方程,能较好的模拟 $\epsilon_1-t$ 与 $P-V_p$ 曲线演化规律且精度较高。

3)根据应力集中基本理论,分析岩石水力压裂裂缝机理及形态,说明砂岩水力压裂的裂缝起裂和裂缝扩展延伸过程存在拉伸变形和剪切变形的相互作用。

#### 参考文献:

- [1] Hudson J A, Crouch S L, Fairhurst C. Soft, stiff and servo-controlled testing machines; a review with reference to rock failure[J]. *Engineering Geology*, 1972, 6(3): 155-189.
- [2] Wawersik W R, Fairhurst C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1970, 7(4): 561-575.
- [3] 葛修润, 周百海, 刘明贵. 对岩石峰值后区特性的新见解[J]. *中国矿业*, 1992, 1(2): 57-60.  
GE Xiurun, ZHOU Baihai, LIU Minggui. A new understanding of post-failure behavior of rock[J]. *China Mining Magazine*, 1992, 1(2): 57-60. (in Chinese)
- [4] Wong R C K, Barr W E, Kry P R. Stress-strain response of cold Lake oil sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30(2): 220-235
- [5] Alsayed M I. Utilising the Hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(3): 355-366.
- [6] Daneshy A A. Off-balance growth: A new concept in hydraulic fracturing[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2003, 55(4): 78-85.
- [7] HAIMSON B, Fairhurst C. Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1967, 7(3): 310-318.
- [8] 郭印同, 杨春和, 贾长贵, 等. 页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(1): 52-59.  
GUO Yintong, YANG Chunhe, JIA Changgui, et al. Research on hydraulic fracturing physical simulation of shale and fracture characterization methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 52-59. (in Chinese)
- [9] 衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 页岩水力压裂裂缝形态的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(7): 1243-1251.  
HENG Shuai, YANG Chunhe, ZENG Yijin, et al. Experimental study on hydraulic fracture geometry of shale[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(7): 1243-1251. (in Chinese)
- [10] 徐峰, 杨春和, 郭印同, 等. 水力加砂压裂试验装置的研制及应用[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(1): 187-192.  
XU Feng, YANG Chunhe, GUO Yintong, et al. Development and application of experimental apparatus of hydraulic sand fracturing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(1): 187-192. (in Chinese)
- [11] 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试验[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*, 2007, 31(3): 63-66. (in Chinese)
- [12] 连志龙, 张劲, 吴恒安, 等. 水力压裂扩展的流固耦合数值模拟[J]. *岩土力学*, 2008, 29(11): 3021-3027.

- LIAN Zhilong, ZHANG Jin, WU Hengan, et al. A simulation study on hydraulic fracturing propagation with a solid-fluid coupling model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(11): 3021-3027. (in Chinese)
- [13] 连志龙, 张劲, 王秀喜, 等. 水力压裂扩展特性的数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 169-174.
- LIAN Zhilong, ZHANG Jin, WANG Xiuxi, et al. Simulation study of characteristics of hydraulic fracturing propagation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 169-174. (in Chinese)
- [14] 张卫东, 杨志成, 魏亚蒙. 疏松砂岩水力压裂裂缝形态研究综述[J]. *力学与实践*, 2014, 36(4): 396-402.
- ZHANG Weidong, YANG Zhicheng, WEI Yameng. Advances in research of hydraulic fractures in unconsolidated sands[J]. *Mechanics in Engineering*, 2014, 36(4): 396-402. (in Chinese)
- [15] 袁志刚, 任梅清, 沈永红, 等. 穿层钻孔煤巷条带水力压裂防突技术及应用[J]. *重庆大学学报*, 2016, 39(1): 72-78.
- YUAN Zhigang, REN Meiqing, SHENG Yonghong, et al. Hydraulic fracturing technology by drilling through strata for outburst prevention in coal roadway strips and its application[J]. *Journal of Chongqing University*, 2016, 39(1): 72-78. (in Chinese)
- [16] 夏彬伟, 胡科, 卢义玉, 等. 井下煤层水力压裂裂缝导向机理及方法[J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(9): 8-13.
- XIA Binwei, HU Ke, LU Yiyu, et al. Mechanism of crack-oriented of hydraulic fracture and its technique in mine[J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(9): 8-13. (in Chinese)
- [17] 杨红伟. 循环载荷作用下岩石与孔隙水耦合作用机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- YANG Hongwei. Study on coupling mechanism of rock and Pore water under cyclic loading[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [18] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- CAI Meifeng, HE Mancao, LIU Dongyan. *Rock mechanics and engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [19] 李贺, 尹光志, 许江, 等. 岩石断裂力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1988.
- LI He, YIN Guangzhi, XU Jiang, et al. *Rock fracture mechanics*[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1988. (in Chinese)

(编辑 侯 湘)