

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.008

渗透水压作用下完整砂岩剪切-渗流耦合试验研究

彭守建^{1,2,3}, 谭 虎^{1,2}, 许 江^{1,2}, 刘义鑫^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044; 3. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘 要: 利用自主研发的煤岩剪切-渗流耦合试验装置, 开展了渗透水压作用下完整砂岩试件剪切-渗流耦合特征试验研究。结果表明: (1) 在恒定渗透水压情况下, 法向应力越大, 砂岩的抗剪强度越高, 法向变形则越小, 砂岩的剪切变形过程可分为 3 个阶段: 剪切变形的线性增长阶段、非稳定破裂发展阶段和剪断后的摩擦滑移阶段; (2) 在恒定渗透水压情况下, 法向应力越小, 法向和剪切变形量越大, 剪切断面的起伏程度越大, 表面次生裂纹发育越明显、发育范围越宽, 砂岩的破坏程度越严重; (3) 在整个剪切过程中, 剪应力出现几次明显的应力降, 首次应力降出现在弹性变化末期, 同时伴有水流流出, 说明首次应力降是第一宏观贯通的裂纹所致, 且法向应力越大, 裂隙越窄, 导水能力越差。

关 键 词: 砂岩; 渗透水压; 剪切-渗流; 耦合特征; 法向应力

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)08-2213-08

Experimental study on shear-seepage of coupled properties for complete sandstone under the action of seepage water pressure

PENG Shou-jian^{1,2,3}, TAN Hu^{1,2}, XU Jiang^{1,2}, LIU Yi-xin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Chongqing Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group Corp., Chongqing 400037, China)

Abstract: By using a self-developed shear-seepage coupling experimental device for coal rock, experiments were carried out on sandstone samples to obtain shear-seepage coupled properties under the action of seepage water. The results show that with constant seepage water pressure, the larger normal stress was, the higher shear strength was, but the smaller normal deformation was. Moreover, the shear deformation process of sandstone can be divided into three stages: the linear growth stage, the unstable fracture stage and the friction sliding stage, respectively. In the case of the constant seepage water pressure, as the normal stress decreased, the peak values of normal and shear deformation of specimen increased, and meanwhile the fluctuation of shear section grew. Besides, the surface crack growth became more obvious and widely distributed, and the damage of sandstone was more serious. In the total shear process, there were several apparent value reductions of shear stress. Usually, the first stress reduction occurred at the end of the stage of elastic deformation, and water flowed out at the same time, which means the first stress reduction caused by the first macrocrack is spatial connected. Furthermore, the larger normal stress is, the narrower fracture is and the worse water transmitting ability is. During the whole experimental process, the lower mean flow rate is, the smaller total flow is.

Keywords: sandstone; seepage water pressure; shear-seepage; coupling characteristic; normal stress

1 引 言

由于地应力的存在^[1-2], 岩石的受压剪切破坏是

岩体工程中常遇到的破坏形式, 如在边坡治理、隧道施工、矿山开采等工程中, 岩体因受剪切荷载作用发生节理贯通破坏是其主要破坏形式之一。

收稿日期: 2015-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51304255, No. 51474040); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2014M552323); 重庆市项目博士后资助 (No. Xm2014037)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51304255, 51474040), the China Postdoctoral Science Foundation (2014M552323) and the Postdoctoral Project Foundation of Chongqing (Xm2014037).

第一作者简介: 彭守建, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事砂岩岩石力学、煤与瓦斯突出灾害动力学与控制等方面的研究工作。

E-mail: sjpeng@cqu.edu.cn

迄今为止,已有不少学者对岩石的剪切破坏过程和岩石节理的剪切-渗流耦合过程进行了试验研究。国外 Barton 等^[3-4]进行了大量的剪切试验研究,分析了 650 组剪切试验数据,给出剪切强度峰值所对应的剪切变形值的经验公式;Olsson 等^[5]开展了岩石裂隙的渗流与应力-应变耦合试验研究,提出了剪切过程中岩石裂隙的渗流与应力-应变耦合的新模型;Esaki 等^[6]采用一种新的试验技术对花岗岩人工裂隙试样进行了渗流与剪应力耦合研究,结果表明:在剪切位移作用下,裂隙渗透系数的变化与剪胀特性是一致的,初始时渗透系数增长很快,通过残余剪切应力后逐渐达到一个定值。国内周秋景等^[7]进行了循环荷载作用下脆性材料的剪切性能试验研究,研究表明:频率相同时,随着垂直压力的增大,峰值剪切强度、残余抗剪强度随之增大;李海波等^[8]进行了不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究,试验结果发现:岩石节理面的峰值剪切强度和减小幅度随着剪切速率的增大而减小;许江等^[9-11]自主研发了含瓦斯煤岩细观剪切试验装置,并结合高清摄像和声发射定位技术研究了砂岩等材料在剪切破坏过程中的裂纹细观特性,发现试件的最终宏观断裂破坏多发生在剪应力峰值之后,且砂岩的开裂、扩展基本上是沿预定的剪切面方向;李克刚等^[12]对比分析了饱和状态和天然状态岩体抗剪特性,发现与天然状态相比,在饱和状态下岩体抗剪强度、凝聚力和内摩擦角都明显降低;蒋宇静等^[13]应用自主研发的岩石节理单一剪切-渗流试验机对不同接触状态下的岩石断裂节理试件分别进行了一系列节理的剪切-渗流耦合试验,发现水力开度和透过率在剪切过程中呈现出两阶段的变化性质;刘才华等^[14]通过室内模拟试验,探讨了低应力、低水头条件下裂隙岩体受剪应力作用的渗流特性,建立了剪应力作用下岩石裂隙的渗流模型;赵延林等^[15-16]通过构造随机形貌岩石节理剖面并运用随机形貌岩石节理剪切-渗流计算模型和数值分析方法,开展了随机形貌岩石节理剪切-渗流数值模拟,结果表明:法向应力越大,节理的剪胀效应越弱,剪切过程中的节理渗透系数呈现 3 个阶段的变化;薛雯等^[17]开展了剪切过程中岩石裂隙的渗流与应力-应变耦合分析,结果表明:法向应力越小,裂隙的剪胀效应越大,且岩石裂隙的剪切变形对通过裂隙的单宽流量的影响也越大;尹立明^[18]和赵瑜^[19]等研究了渗透水压对节理应力-渗流耦合特性的影响,结果表明:节理试件的剪切应力和位移、水力

开度以及透过率都与渗透水压密切相关。肖维民等^[20]总结了国内外节理应力-渗流耦合试验系统的研究进展。

综上所述,现有研究成果主要集中在岩石的剪切破坏过程及岩石节理的剪切-渗流耦合特性研究,而对于在渗透水压作用下完整岩石的剪切破坏过程研究较少。为此,本文利用自主研发的煤岩剪切-渗流耦合试验装置,开展了渗透水压作用下完整砂岩剪切-渗流耦合试验研究,为三峡库区地下水作用下的岩体稳定性分析提供理论基础。

2 试验方法

2.1 试件制作

试验用岩样为三峡库区三叠系上统须家河组(T3xj)砂岩,属陆源细粒碎屑沉积岩,粒径为 0.1~0.5 mm,主要成分为石英、长石、燧石和白云母等。

采用湿式加工法将所取的砂岩加工成为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,试件加工精度控制在 0.02 mm 以内,并使用钻机在试件中心钻孔,为保证剪切面通过中心孔,钻孔深度为 60 mm,孔径为 16 mm,如图 1 所示。

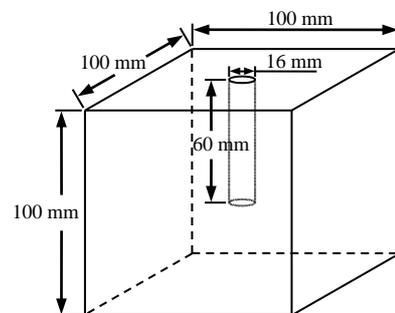


图 1 砂岩试件

Fig.1 Design of experimental specimen

为保证试验过程中的密封性,使水流沿着剪切裂隙流出,将供水接头插入中心钻孔内,并在供水接头外壁和中心钻孔内壁均匀涂抹密封胶,静放 12 h,待密封胶完全凝固后,将试件装入剪切盒进行试验。在试验过程中,随着剪切荷载增加,试件剪切面逐渐产生微裂隙,当剪切荷载增加到一定程度时,剪切面将形成宏观的贯通裂纹,最终导致试件的剪断破坏。在剪切荷载施加过程中,通过供水接头在试件中心钻孔处施加 1.0 MPa 渗透水压,即对中心孔底部的内壁产生 1.0 MPa 的静水压力,当剪切荷载增至形成导水裂隙时,水则沿着剪切面裂纹的演化路径而渗流,同时静水压力会给裂隙扩展

提供一定的张力，从而形成剪切-渗流耦合过程。值得说明的是，由于试件为完整砂岩，且中心孔进行了密封，因此，整个试验过程中渗透水压对法向应力施加不存在反力作用。

本次试验所用完整砂岩试件的基本物理力学参数如表 1 所示。

表 1 试件的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical properties of specimens

密度 /(g/cm ³)	天然 含水率 / %	抗压 强度 / MPa	弹性 模量 / GPa	泊松比 μ	凝聚力 c / MPa	内摩 擦角 /(°)
2.33	4.80	55.97	11.89	0.37	12.82	61.42

2.2 试验装置

试验所用装置为自主研发的煤岩剪切-渗流耦合试验装置^[21]，该装置主要由伺服控制加载系统、流体源加载系统、剪切盒及其密封系统、控制与数据采集系统等部分组成，如图 2 所示。

该装置主要技术参数如下：

- ①法向静态最大试验力为 300 kN；
- ②切向静态最大试验力为 300 kN；
- ③力控制加载速度为 0.01~10 kN/s，可调；
- ④位移控制加载速率为 0.005~100 mm/min，可调；
- ⑤变形测量范围为 0~40 mm；
- ⑥位移精度为 ±1%FS；
- ⑦变形测量分辨率为 0.01 mm；
- ⑧试样尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm；
- ⑨渗透水最大试验压力为 5.0 MPa；
- ⑩流量计最大量程为 5.0 L/min。

为了保证在剪切-渗流耦合试验过程中的密封性，在上、下剪切盒体的接触端面设计有 O 型密封圈进行密封，如图 2(b)中 12 所示。在试验过程中，通过法向压头施加法向荷载，通过左侧的剪切压头作用在下剪切盒施加剪切荷载，右侧的反力杆支撑上剪切盒使上剪切盒静止不动，如图 2(c)受力示意图所示。

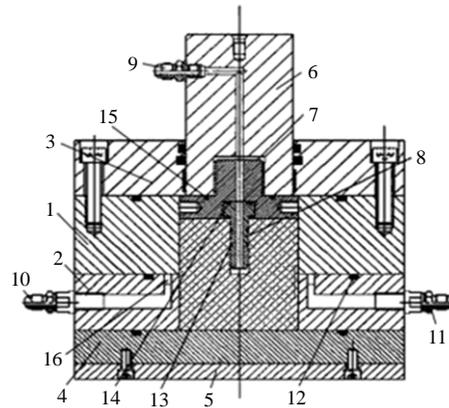
为消除加载系统带来的位移监测误差，在法向压头及下剪切盒上共安设 6 个 LVDT 位移计测试件的法向及切向位移。其中法向压头处均匀布置有 4 个 LVDT 位移计，取其平均值作为试件法向位移量，另在下剪切盒前、后两侧中部刚性连接一挡板，分别与 LVDT 位移计触针接触，取两个位移计的平均值作为试件的剪切位移量，如图 3 所示。

2.3 试验方案及步骤

本文开展了恒定水压及剪切加载速率条件下，不同法向应力情况下的完整砂岩剪切-渗流耦合试验，具体试验方案见表 2。

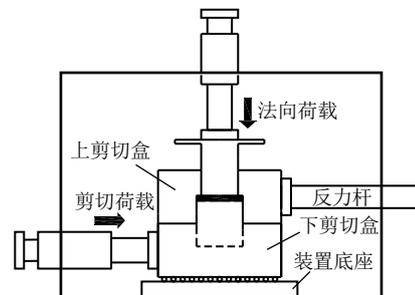


(a) 实物图



1—上盒体 2—下盒体 3—上盖 4—下盖 5—绞板 6—压杆
7—试件压头 8—试件接头 9—进水口 10—第一出水口
11—第二出水口 12、13、14、15—密封圈 16—流体环道

(b) 剪切盒



(c) 受力示意图

图 2 煤岩剪切-渗流耦合试验装置
Fig.2 The coal rock shear-flow coupling testing device

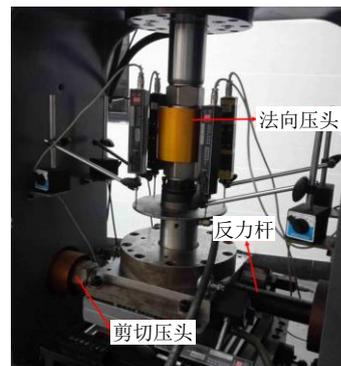


图 3 试件变形测量装置
Fig.3 Measurement of shear deformation

表 2 试验方案
Table 2 Experimental scheme

试验编号	法向应力 / MPa	水压 / MPa	剪切荷载 控制方式	剪切加载速率 / (mm/min)
1 [#]	0.2			
2 [#]	1.0	1.0	位移加载	0.1
3 [#]	2.0			

具体试验步骤如下:

(1) 前期准备: 测量试件的长、宽、高、质量等基本参数, 检查 LVDT 传感器、流量计、水压传感器等是否正常。

(2) 安装试件: 将试件安装进剪切盒, 并将载有剪切盒体的移动底座推入至法向加载作动器正下方, 然后通过计算机控制剪切加载作动器将剪切盒推至试验台中间, 并将上剪切盒进行切向限位; 安装 LVDT 位移计, 连接进水管。

(3) 进行试验: 调节流体源加载系统, 使其向试件中心孔内提供 1.0 MPa 的稳定水压, 并给试件施加预定的法向荷载后, 进行剪切试验。

(4) 试件断面扫描: 试件剪断后停止试验, 存储数据, 用煤岩三维扫描系统对试件剪切断面进行三维扫描分析。

3 试验结果与分析

3.1 恒定渗透水压情况下法向应力对完整砂岩剪切变形的影响

砂岩试件的剪应力-剪切变形曲线如图 4 所示。从图可以看出: 在不同法向应力条件下, 砂岩的剪应力-剪切变形曲线在加载初期增长相对缓慢, 呈上凹型, 此时砂岩处于孔隙、裂隙压密阶段, 试件中原生微裂隙逐渐闭合, 试件被压实; 随着剪应力增加, 剪切变形呈线性增加, 砂岩试件力学性质表现为弹性; 当剪应力超过砂岩的屈服强度, 剪切变形速率明显加快, 岩石剪切变形从弹性变为塑性, 其

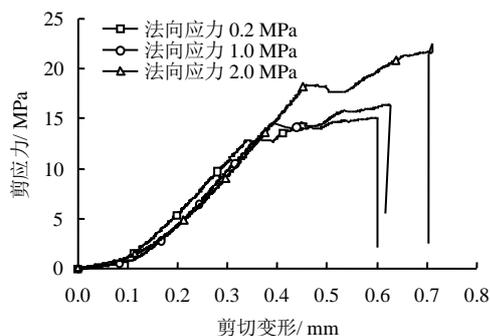


图 4 砂岩剪应力-剪切变形曲线 (渗透水压 1.0 MPa)
Fig.4 Relationship curves between shear stress and shear deformation (seepage water pressure 1.0 MPa)

内部受剪应力作用生成的微破裂出现贯通并形成局部裂隙带而出现应力降, 此时试件内部结构遭到破坏, 但仍具有一定的承载能力。

随着裂隙不断发育扩展, 当剪应力达到峰值, 变形量也达到最大值, 此时裂纹在整个剪切面贯通, 即完整砂岩被完全剪断而失去承载能力, 剪应力开始急剧下降, 这说明在达到峰值应力后, 微裂纹迅速汇集、贯通而导致失稳破坏。

表 3 给出了不同法向应力条件下砂岩的抗剪强度与峰值剪切变形。对比可知, 在恒定渗透水压作用下, 法向应力越大, 砂岩的抗剪强度及峰值剪切变形均越大。

表 3 不同法向应力下砂岩试件的抗剪强度与峰值剪切位移
Table 3 Shear strengths and peak shear displacements of sandstone specimens under different normal stresses

渗透水压 / MPa	法向应力 / MPa	抗剪强度 / MPa	峰值剪切变形 / mm
1.0	0.2	15.03	0.601
1.0	1.0	16.34	0.628
1.0	2.0	22.55	0.711

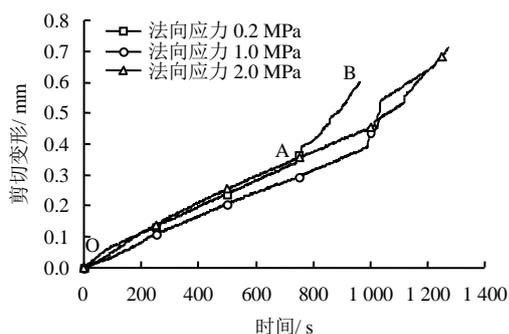
图 5 为在恒定渗透水压作用下, 在不同法向应力下砂岩的剪切变形与法向变形随时间的变化曲线。从图 5(a)中可以看出, 砂岩的剪切变形经历了两个阶段, 以法向应力为 0.2 MPa 为例, 说明如下:

第 1 阶段 (OA 段) 为剪切变形的线性增长阶段, 由于本阶段内是砂岩的孔隙、裂隙压实和弹性变形, 所以剪切变形基本呈线性增长, 增长曲线近乎为直线。

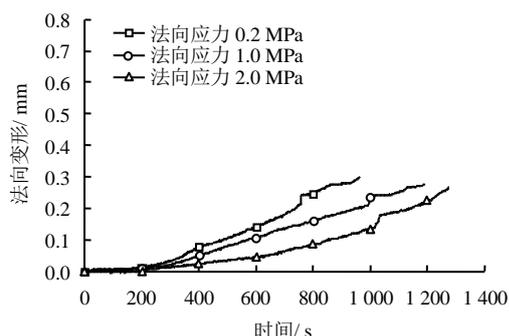
第 2 阶段 (AB 段) 为砂岩的非稳定破裂发展阶段, 当剪应力增大至超过砂岩的屈服点, 本阶段的微破裂发展出现了质的变化, 由于存在裂隙的局部贯通和破裂的不断发展, 所以增长过程具有波动性, 增长速率较第 1 个阶段快, 而经历的时间更短, 且刚进入第 2 阶段时剪切变形会有一个明显的跳跃。当剪应力超过砂岩的承载极限, 内部的裂隙在整个剪切面内全部贯通, 形成剪切断面, 即试件被剪断。

比较在不同法向应力条件下的剪切变形可知: 剪切变形随法向应力的增大呈现先减小后增大的趋势, 但砂岩的最大剪切变形量在法向应力为 2.0 MPa 时最大, 为 0.711 mm, 1.0 MPa 时次之, 为 0.628 mm, 0.2 MPa 时最小, 为 0.601 mm。

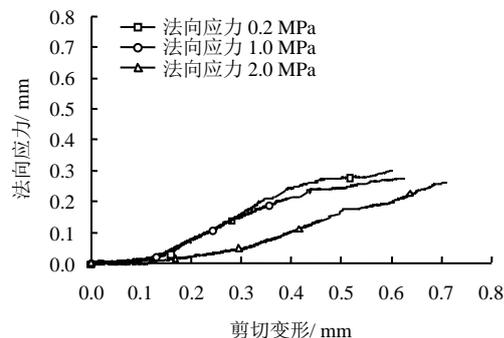
从图 5(b)中法向变形-时间曲线可以看出, 法向



(a) 剪切变形-时间曲线



(b) 法向变形-时间曲线



(c) 剪切变形-法向变形曲线

图 5 砂岩变形曲线 (渗透水压 1.0MPa)

Fig.5 Deformation curves of sandstone (seepage water pressure is 1.0MPa)

应力越大,法向变形的增长相对更缓慢,达到的变形峰值越小。法向变形在剪切过程的中、后期也存在突然增大的现象,经过分析发现,其在时间点上与剪切变形的突变和瞬时流量的骤增变化相对应,说明这也是由于试件内部形成宏观贯通的裂纹引起。

从图 5(c)中砂岩的剪切变形-法向变形曲线可以看出,在加载初期,随着剪切变形增加,法向变形几乎没有变化,而随着剪切变形的进一步增加,法向变形呈现出缓慢增长的态势,在剪切变形达到 0.1 mm 后表现出剪胀效应。由于本文试验采用的是完整致密砂岩试件,相较于松散土体或节理剪切,其加载初期的剪缩现象并不明显。

3.2 恒定渗透水压情况下法向应力对完整砂岩破坏程度的影响

图 6 为恒定渗透水压及剪切加载速率时,不同法向应力条件下完整砂岩被剪断后的表面裂纹形态图、断面形态图和断面 3D 扫描形貌图。其中,表面裂纹形态图中水平方向为剪应力的作用方向,3D 扫描形貌图中 X 轴方向为剪切方向。

从图可以看出,砂岩在受压剪切过程中,不仅存在沿剪切面方向扩展并贯通的主裂纹,也存在与剪切面方向成一定夹角的次级裂纹,且次级裂纹大都成对出现,同时主裂纹贯通路径附近会有小岩块脱落,分析其原因,这是由于裂纹扩展与上、下断面的摩擦引起,断面附近区域会形成一定范围的破碎带,在剪切断面上存在因颗粒间摩擦而产生的细小粉末和从剪切断面上脱落下来的岩石颗粒。

当法向应力为 0.2 MPa 时,断面的起伏度较大,产生的次级裂纹与主裂纹相交于试件的中部,在剪切面区域附近产生破碎带,破碎程度较为明显,有大块的砂岩颗粒脱落;当法向应力为 1.0 MPa 时,断面的起伏度减小,破碎程度减弱,脱落的砂岩颗粒也更小;当法向应力为 2.0 MPa 时,断面的起伏度最小,形成近乎平面的剪切面,断面附近没有破碎带出现,仅有几条窄而短的次级裂纹扩展和细小的砂岩颗粒脱落。对比图 6(a)~6(c)可知,法向应力越小,主裂纹的扩展范围越广,次级裂纹的发育范围及主裂纹和次级裂纹的隙宽越大,由于裂纹贯通和摩擦错动被挤压而脱落的小岩块也更大。

综上分析可知:法向应力直接影响砂岩的抗剪强度及其裂纹扩展。在恒定渗透水压作用下,法向应力越大,颗粒间的摩擦力越大,砂岩的抗剪强度则越大,砂岩越容易发生剪切破坏,且次级裂纹发育越不明显。

3.3 不同法向应力条件下完整砂岩剪切-渗流耦合特征

在整个剪切试验过程中,通过质量流量计进行了渗流瞬时流量监测。图 7 为砂岩试件在剪切过程中剪应力与瞬时流量随剪切变形演化的关系曲线。从图 7(a)~7(c)可以看出,在剪切试验过程中,不同法向应力条件下砂岩瞬时速度的变化规律大体一致,即砂岩在孔隙、裂隙压密和弹性变形阶段,均没有瞬时流量,因为在这两个阶段内几乎没有裂纹的萌生或扩展^[17],即不会形成贯通的导水裂隙,此时的渗透系数极小,故水流不能从中心流出;随着剪应力的逐渐增大,砂岩进入非线性变形阶段,砂岩内部裂纹开始逐渐扩展,当产生的微裂隙逐渐积

累直至形成与试件表面贯通的宏观初始导水裂隙时,水便能够顺利通过该导水裂隙流至试件表面并排出,故可开始监测到瞬时流量;随着剪应力的继续增加,更多的裂纹贯通形成裂隙,并沿整个剪切面扩展,当裂纹在整个剪切面完全贯通时,即试件被剪断,导水通道宽度达到了最大水平,渗透系数也逐渐增至最大,故监测的瞬时流量也达到最大。

此外,从图 7(a)~7(c)可以看出,砂岩在剪切过程中会出现 1~3 次左右的剪应力降。法向应力越小,首次剪应力降出现的时间越早,法向应力为 0.2、1.0、2.0 MPa 条件下,首次剪应力降出现的时间分别为第 756、993、1 032 s,对应其各自峰值强度的 86.0%、88.7% 和 84.3%,剪应力降的幅度分别为 0.10、0.22、0.44 MPa。

试验过程中的瞬时流量紧随剪应力降 1~2 s 后发生变化,瞬时流量会在首次应力降时剧增,之后的应力降会导致瞬时流量减小,但瞬时流量整体上呈现上升的趋势。直到试件被完全剪断,此时剪应力急剧下降,在整个剪切面上形成贯通裂隙,致使瞬时流量出现第 2 次剧增。

从图 7(d)可以看出,法向应力越小,初始瞬时流量出现得越早。当法向应力为 0.2 MPa 时,初始瞬时流量出现在第 757 s,累积流量为 1.44 L;当法向应力为 1.0 MPa 时,初始瞬时流量出现在第 994 s,累积流量为 0.78 L;当法向应力为 2.0 MPa 时,初始瞬时流量出现在第 1 034 s,累积流量为 0.33 L。表明在恒定渗透水压条件下,法向应力越小,砂岩的剪切裂隙开度越大,其导水能力越强。

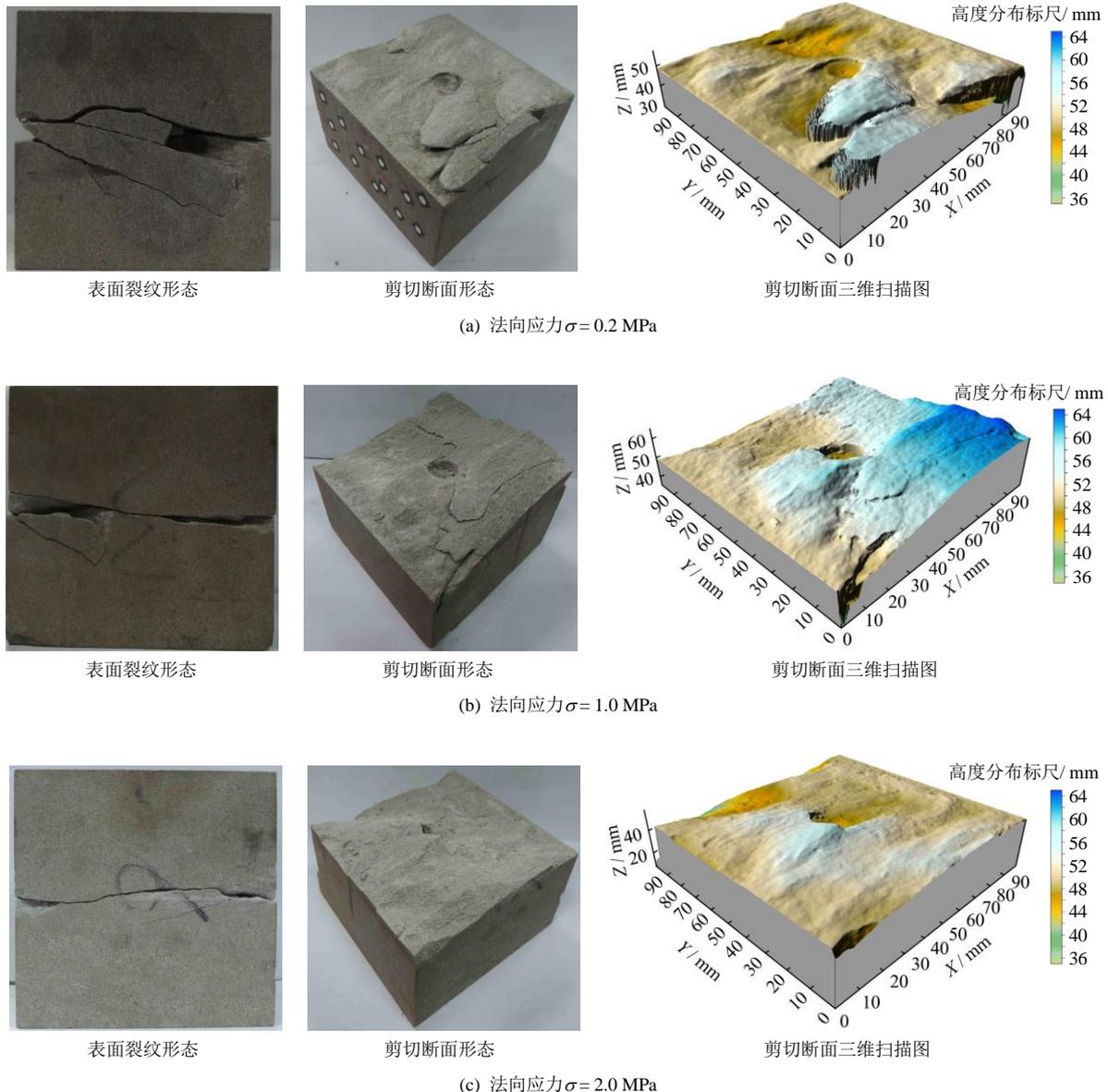


图 6 水头压作用下砂岩的剪切破坏情况

Fig.6 Damage of sandstone under seepage water pressure

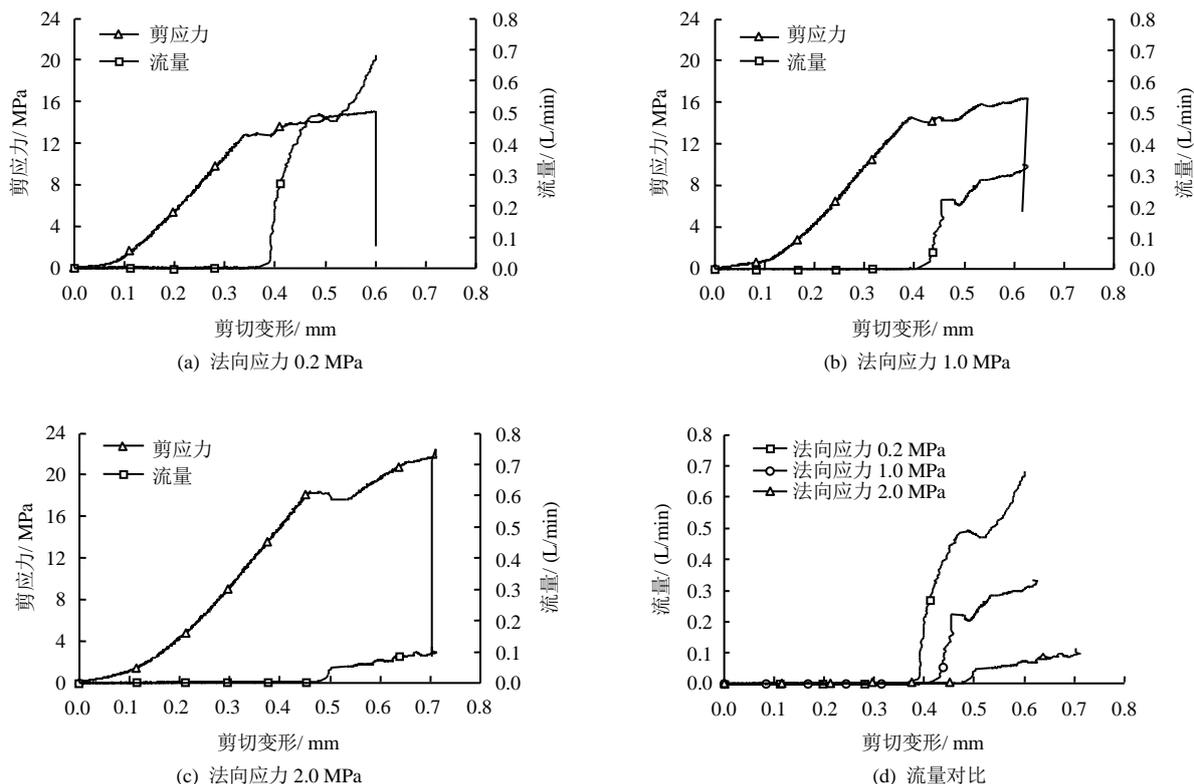


图 7 不同法向应力条件下砂岩剪应力和流量随剪切变形的变化曲线

Fig.7 Curves of shear stress and flow rate changing with shear deformation under different normal stresses

4 结 论

(1) 在恒定渗透水压情况下，通过设置切向方向的 LVDT 来监测试件的剪切变形，较直接使用压头的剪切位移作为试件的剪切变形更准确，结果表明：法向应力越大，砂岩的抗剪强度越高，剪切变形则越小。砂岩的剪切变形按其变形特点可以分为两个阶段：剪切变形的线性增长阶段和非稳定破裂发展阶段。

(2) 在恒定渗透水压情况下，法向应力越小，最大法向变形量和最大剪切变形量越大，剪切断面的起伏程度越大，表面次生裂纹发育越明显、砂岩的破坏程度越严重。

(3) 在剪切过程中，剪应力会出现几次明显的应力降，首次应力降往往出现在线弹性变化末期，同时伴有水流出，说明首次应力降是第 1 条贯通的裂隙所致，这也表明完整砂岩的剪切破断是一个裂纹萌生、扩展和贯通的过程，且法向应力越大，剪切裂隙开度越小，导水能力越弱。

参 考 文 献

[1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525—1544.
HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability

control of high rock slope development[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1525—1544.

[2] 唐书恒, 朱宝存, 颜志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂隙发育的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 65—69.
TANG Shu-heng, ZHU Bao-cun, YAN Zhi-feng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coal bed methane wells[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(1): 65—69.

[3] BARTON N, BANDIS S. Effects of block size on the shear behavior of jointed rock[C]//Proceedings of the 23rd US Symposium on Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema A A, 1982: 739—760.

[4] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1985, 22(3): 121—140.

[5] OLSSON R, BARTON N. An improved model for hydro-mechanical coupling during shearing of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(3): 317—329.

[6] ESAKI T, DU S, MITANI Y, et al. Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36: 641—650.

[7] 周秋景, 李同春, 宫必宁. 循环荷载作用下脆性材料剪

- 切性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 573—579.
- ZHOU Qiu-jing, LI Tong-chun, GONG Bi-ning. Experimental study on shear behaviors of brittle materials under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 573—579.
- [8] 李海波, 冯海鹏, 刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2435—2440.
- LI Hai-bo, FENG Hai-peng, LIU Bo. Study on strength behaviors of rock joints under different shearing deformation velocities[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2435—2440.
- [9] 许江, 彭守建, 尹光志, 等. 含瓦斯煤岩细观剪切试验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 677—685.
- XU Jiang, PENG Shou-jian, YIN Guang-zhi, et al. Development of meso-shear test equipment for coal rock containing gas and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 677—685.
- [10] 许江, 陆丽丰, 杨红伟, 等. 剪切荷载作用下砂岩细观开裂扩张演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 944—950.
- XU Jiang, LU Li-feng, YANG Hong-wei, et al. Study of evolution law of micro-fracturing process of sandstone under shear load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(5): 944—950.
- [11] 程立朝, 许江, 冯丹, 等. 岩石剪切破坏裂纹演化特征量化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 31—39.
- CHENG Li-chao, XU Jiang, FENG Dan, et al. Quantitative analysis on development of surface cracks of rocks upon shear failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(1): 31—39.
- [12] 李克刚, 侯克鹏, 张成良. 饱和状态下岩体抗剪切特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(2): 538—542.
- LI Ke-gang, HOU Ke-peng, ZHANG Cheng-liang. Experiment study on shear characteristics of saturated rock mass[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2009, 40(2): 538—542.
- [13] 蒋宇静, 王刚, 李博, 等. 岩石节理剪切渗流耦合试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2253—2259.
- JIANG Yu-jing, WANG Gang, LI Bo, et al. Experimental study and analysis of shear-flow coupling behaviors of rock joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(11): 2253—2259.
- [14] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 剪应力作用下岩体裂隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1651—1655.
- LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin, FU Shao-lan. Study on seepage characteristics of a single rock fracture under shear stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1651—1655.
- [15] 赵延林, 万文, 王卫军, 等. 随机形貌岩石节理剪切-渗流数值模拟和剪胀-渗流模型[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2133—2139.
- ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Shear-seepage numerical simulation and shear dilatancy-seepage model of rock joint with random morphology[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(12): 2133—2139.
- [16] 赵延林, 万文, 王卫军, 等. 随机形貌岩石节理剪切数值模拟和非线性剪胀模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1666—1675.
- ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Shear numerical simulation of random morphology rock joint and nonlinear shear dilatancy model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1666—1675.
- [17] 薛雯, 陈胜宏. 岩石裂隙渗流与法向应力耦合的复合单元模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2613—2619.
- XUE Luan-luan, CHEN Sheng-hong. Composite element model of seepage-normal stress coupling for rock fractures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 2613—2619.
- [18] 尹立明, 陈军涛. 渗透水压对节理-渗流耦合特性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2563—2568.
- YIN Li-ming, CHEN Jun-tao. Experimental study of influence of seepage pressure on joint stress-seepage coupling characteristics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2563—2568.
- [19] 赵瑜, 王超林, 万文. 压剪作用下裂隙扩展过程渗流与应力耦合模型研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2180—2186.
- ZHAO Yu, WANG Chao-lin, WAN Wen. Seepage flow during crack propagation process and stress coupled model under compression-shear stress conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2180—2186.
- [20] 肖维民, 夏才初, 邓荣贵. 岩石节理-渗流耦合试验系统研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 3456—3465.
- XIAO Wei-min, XIA Cai-chu, DENG Rong-gui. Advances in development of coupled stress-flow test system for rock joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp.2): 3456—3465.
- [21] 许江, 刘义鑫, 尹光志, 等. 煤岩剪切-渗流耦合试验装置的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 2987—2995.
- XU Jiang, LIU Yi-xin, YIN Guang-zhi, et al. The development of coal rock shear-flow coupling test device[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp.1): 2987—2995.