

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.011

含瓦斯砂岩卸围压变形特征与渗透规律试验研究

张东明^{1,2}, 郑彬彬^{1,2}, 张先萌^{1,2}, 齐消寒^{1,2}, 白鑫^{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 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘 要: 为研究含瓦斯砂岩卸荷破坏过程中的变形及渗流规律, 采用自主研发的含瓦斯煤热-流-固耦合渗流伺服试验系统, 开展了不同围压和相同瓦斯压力条件下的卸围压渗流试验, 建立了基于应变指标的瓦斯渗流模型。得出的主要结论有: (1) 含瓦斯砂岩破坏表现出明显的脆性特征, 峰值应力点后瞬间, 应力、应变及流量均出现突跳; (2) 应力-应变及渗透率变化呈现明显的阶段性特征: 孔隙、微裂隙压密及弹性变形阶段 (I、II 阶段), 砂岩渗透性为 0; 卸荷屈服阶段 (III 阶段), 产生新的损伤, 渗透性小幅增加; 卸荷破坏应力跌落阶段 (IV 阶段), 应力突降, 应变陡增, 裂隙贯通后渗透性陡增, 是渗透性主导阶段; 破坏后阶段 (V), 应力、应变及流量变化均趋于稳定; (3) 含瓦斯砂岩破坏阶段, 受气体压力和泊松效应影响, 使径向应变和体积应变远大于轴向应变; (4) 含层理砂岩卸荷破坏形式以产生沿层理面方向的张剪混合裂缝为主。基于 Kozeny-Carman 方程和裂隙流理论, 建立了应变相关渗透率模型, 揭示了含瓦斯砂岩损伤破坏渗流机制, 对研究瓦斯突出、及在破碎岩体中的运移规律及抽采孔优化设计等具有借鉴意义。

关 键 词: 采矿工程; 瓦斯; 砂岩; 卸围压; 渗透率模型

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 12-3475-10

Experimental study on the deformation characteristics and permeability laws of gas infiltrated sandstone under unloading confining pressure condition

ZHANG Dong-ming^{1,2}, ZHENG Bin-bin^{1,2}, ZHANG Xian-meng^{1,2}, QI Xiao-han^{1,2}, BAI Xin^{1,2}

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

2. College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In this study, a self-developed 'THM coupled with triaxial servo-controlled seepage apparatus for gas infiltrated coal' was employed to study the deformation and permeability laws of sandstone. Seepage experiments were carried out at the same gas pressure and under different unloading confining pressures. Then, a seepage model was established on the basis of strain parameters of sandstone. The results showed that gas infiltrated sandstone exhibited clear brittle feature during the failure process and sudden jumps occurred among the stress, strain and flow immediately after the peak stress point. Both changes of stress-strain and permeability showed obvious periodical characteristics, which means that the gas permeability was zero during pore and micro-fissure compaction, and elastic deformation stages (I and II). During unloading and yield stage (III), new fractures were initiated and the permeability increased slightly. During unloading failure stage (IV), the stress dropped significantly, the strain increased sharply, and the gas flow also increased greatly when fractures connected with each other, which indicated that this period was dominated by the permeability. The strain, stress, and gas flow all tended to be steady after failure (V). At failure state of sandstone, the radial strain and volumetric strain were far larger than the axial strain, due to the effects of gas pressure and the Poisson. The unloading failure mode of bedding sandstone was mainly dominated with extension and shear fracture along beddings. Based on Kozeny-Carman equation and fracture flow theory, the permeability model related to strain was established. Finally, the permeation mechanism of gas infiltrated sandstone at different failure states was revealed.

Keywords: mining engineering; gas; sandstone; unloading confining-pressure; permeability models

1 引 言

受长期地质构造作用的影响, 煤岩体的受力状

态和赋存环境相当复杂^[1], 在其形成过程中, 伴随产生大量的瓦斯气体, 受地质条件影响, 产生的瓦斯气体赋存于覆岩及煤层中^[2], 一旦受到采动影响,

收稿日期: 2016-01-04

基金项目: 国家科技重大专项 (No.2016ZX05045-004)。

This work was supported by the National Science and Technology Major Project of China (2016ZX05045-004).

第一作者简介: 张东明, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山与安全方面的研究与教学工作。E-mail: zhangdm@cqu.edu.cn

煤、岩体的原有应力状态遭到破坏,应力重新分布,进而导致煤、岩体内的孔隙、裂隙结构发生变化,产生新的瓦斯运移通道,进而影响到煤系地层岩石的渗透性^[3-4]。事实证明,隧道开挖、煤层开采、地下厂房施工等活动均是岩体的卸荷行为,卸荷更容易造成岩体的破坏,且破坏程度更加强烈^[5]。尤其在煤矿工作面回采过程中,会导致围岩卸荷,使瓦斯涌出量增大,易引发煤与瓦斯突出,此外,卸荷破坏后岩体渗透性显著增加,在采动影响岩体中进行瓦斯抽放能取得较好的效果^[6],因此,研究卸荷作用下煤系地层含瓦斯岩石的变形破坏特征及瓦斯渗流规律,对预防煤与瓦斯突出、掌握瓦斯在覆岩中的运移与富集规律、优化瓦斯抽采孔设计及提高瓦斯抽采效率均具有重要的现实意义。

针对砂岩卸荷行为,已有学者做过理论和试验研究。王瑞红等^[1]通过三轴卸围压试验研究了卸荷状态下砂岩的弹脆塑性力学模型;刘建等^[7]通过卸围压试验,揭示了高应力条件下砂岩卸荷的力学特性;韩铁林等^[8]分析了卸围压条件下砂岩的破坏特征;俞绍等^[9]探讨了冻融循环后砂岩卸围压力学特性和破坏模式。殷志强^[10]、田利勇^[11]等从不同角度对卸荷砂岩的损伤演化和破坏特征进行了相关试验研究。现有研究主要针对卸围压作用下砂岩的力学特性和破坏形态,然而,含瓦斯砂岩卸荷破坏过程中由于气体压力的存在使其变形特征及渗透规律不同于砂岩的卸荷过程^[5, 7, 12]。

在卸围压气体渗流试验方面,学者主要对含瓦斯煤岩进行研究。尹光志等^[13-14]研究了不同卸围压速度、不同应力路径等条件下的含瓦斯煤岩渗流特性;蒋长宝等^[15-16]研究了含瓦斯煤岩卸围压变形破坏特征及渗透率演化规律;许江等^[17-18]对加卸载条件下含瓦斯煤岩的力学特性和渗透特性进行了研究;潘一山等^[19]采用电荷采集装置,得出了含瓦斯煤围压卸荷过程中瓦斯渗流规律和电荷感应规律。现有研究主要针对煤岩在卸围压作用下的力学特性和渗流规律,通过分析文献^[13, 15-16]发现,含瓦斯砂岩的力学特性和渗流规律与含瓦斯煤之间存在较大差别。

综上所述,研究含瓦斯砂岩卸围压变形特征和渗流规律是很有必要的。本文利用自主研发的含瓦斯煤热-流-固耦合三轴伺服渗流试验装置,对含瓦斯砂岩在卸围压作用下的变形特征、破坏形态和渗流规律进行研究,探讨了卸围压应力路径对瓦斯渗流规律的影响,分析了变形特征与渗透性的关系,研究了含瓦斯砂岩卸围压扩容机制,基于 Kozeny-

Carman 方程^[20]和裂隙流理论,建立了应变相关渗透率模型,揭示了含瓦斯砂岩损伤破坏渗流机制。

2 卸围压试验条件及方法

2.1 试验材料

选用重庆某煤矿顶板砂岩进行试验,为上三叠统须家河组砂岩,无风化现象,均一性较好,层理明显,沿平行层理方向取样,加工成高为 100 mm、直径为 50 mm 标准圆柱形试件,岩样密度约为 2.69 g/cm^3 ,孔隙率约为 6.3%,弹性模量为 43.62 GPa,泊松比约为 0.23,图 1 为部分标准岩样。



图 1 部分标准砂岩试件

Fig.1 Prepared standard sandstones specimens

2.2 试验装置

试验装置采用煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研发的含瓦斯煤热-流-固耦合三轴伺服渗流试验装置^[21],该试验装置为自动控制电液伺服加载系统,主要由伺服加载系统、三轴压力室、水浴恒温系统、孔压控制系统、数据测量系统及辅助系统等 6 部分组成,如图 2 所示。轴向加载分力和位移控制 2 种方式,应力、变形、瓦斯压力、流量等参数均为全自动采集,最大轴压为 100 MPa,最大围压为 10 MPa,力值、变形测试精度均为示值的 $\pm 1\%$,力值控制精度为示值的 $\pm 0.5\%$ 。应力、应变、流量等数据记录频率为 1 次/s。该装置能够满足含瓦斯砂岩的围压卸荷力学特性及渗流规律的研究。



图 2 含瓦斯煤热-流-固耦合三轴伺服渗流试验装置

Fig.2 THM coupled with triaxial servo-controlled seepage apparatus for gas infiltrated coal

2.3 试验方案

煤岩所处的原始应力环境为三向应力状态，开采扰动破坏了原有的应力状态，使工作面前方岩体中出现应力集中，同时水平方向则表现为卸荷状态，应力集中和卸荷共同作用导致岩体的变形破坏，影响渗透性变化。以上述理论为基础，设计试验方案，即岩样破坏前保持轴压不变以模拟应力集中现象，同时采用减小围压的方式模拟卸荷过程，直至岩样破坏。具体试验方案如下：

首先进行常规三轴试验，确定围压卸荷点，然后开展含瓦斯砂岩三轴卸围压渗流试验。

含瓦斯砂岩卸围压渗流试验应力路径如图 3 所示，设计静水压力条件分别为 7、8、9 MPa 的 3 组试验条件。下面以静水压力 7 MPa 为例说明具体试验步骤：① 采用分级加载方式，通过力控制的方式，逐步施加轴压、围压至静水压力条件，即 $\sigma_1 = \sigma_3 = 7$ MPa；② 通瓦斯（瓦斯压力 2.5 MPa），并吸附 24 h；③ 吸附结束后，在保持围压不变的条件下，以力控制方式 0.02 MPa/s 的速度施加轴压至预定的围压卸荷点 σ_1^s ；④ 保持轴压值 σ_1^s 恒定，同时开始以 0.02 MPa/s 的速率卸围压，围压每卸载 1 MPa 均稳定 3 min 后再继续卸围压，直至岩样破坏，岩样失稳破坏后轴向自动切换为位移控制，以 0.1 mm/min 的速度进行加载，直至岩样的残余强度基本保持稳

定。采用北京七星华创质量流量控制器高精度传感器测定试验过程中瓦斯流动情况。

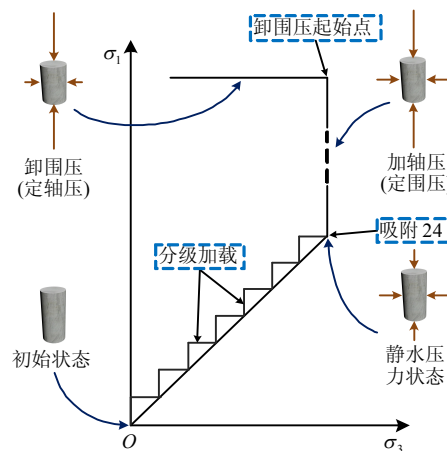


图 3 试验应力路径（箭头长短表示荷载大小）
Fig.3 Experimental stress paths (arrow length indicates the level of load)

3 试验结果与分析

3.1 应力路径和瓦斯流动规律分析

图 4 为初始围压分别为 7、8、9 MPa，瓦斯压力为 2.5 MPa 时，砂岩的三轴围压卸荷应力路径（ $\sigma-t$ 曲线， t 为时间）。图 5 为与应力路径相对应的轴向应变、径向应变、体积应变及瓦斯渗流规律变化曲线。文中应变均以压为正，拉为负表示。

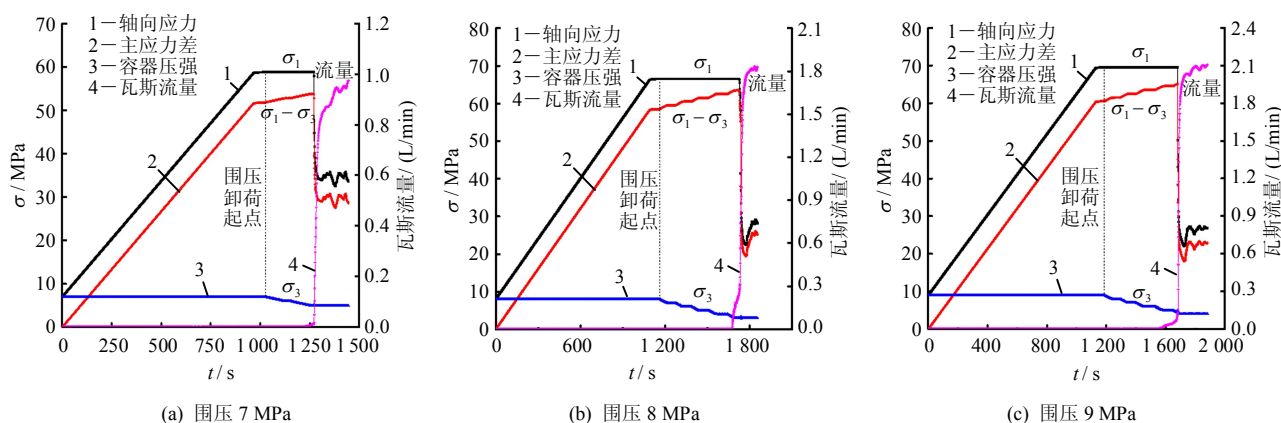


图 4 含瓦斯砂岩围压卸荷应力路径及瓦斯渗流曲线

Fig.4 Stress paths and gas seepage in triaxial unloading confining of gas infiltrated sandstone

由图 4 可以看出，岩样初始状态为静水压力状态，通过力控制方式增加轴压至 σ_1^s ，然后保持轴压 σ_1^s 恒定，开始卸围压，伴随围压降低，主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 不断增大，岩样屈服前，瓦斯流量一直为 0，应力达峰值时，岩样突然破坏，承载能力急剧跌落，表现出强烈的脆性破坏，并发出清脆的破裂响声，同时伴随瓦斯流量急剧升高。通过摩尔圆（见

图 6）分析砂岩卸围压破坏机制：随围压的卸载， σ_3 逐渐减小，主应力差增大，摩尔应力圆增大，摩尔圆逐渐与强度包络线相切，与常规加载相比，卸围压条件下摩尔圆更易达到破坏点，易引发砂岩的突发性破坏。

由图 4、5 可以得出，在加载初始阶段，轴向应变占主导地位，表现为体积压密，瓦斯流量为 0；

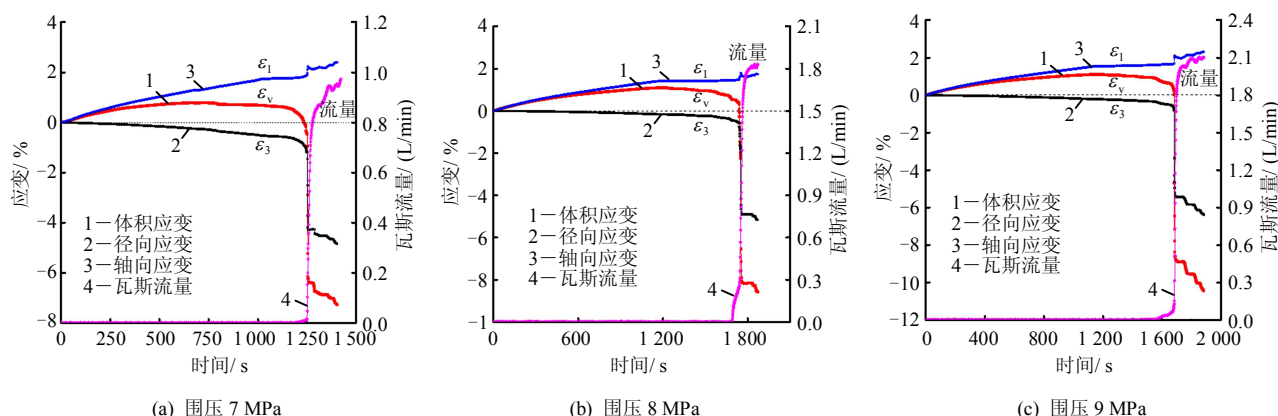


图5 含瓦斯砂岩围压卸荷应变及瓦斯渗流曲线

Fig.5 Curves of strain and gas seepage of gas infiltrated sandstone in triaxial unloading confining tests

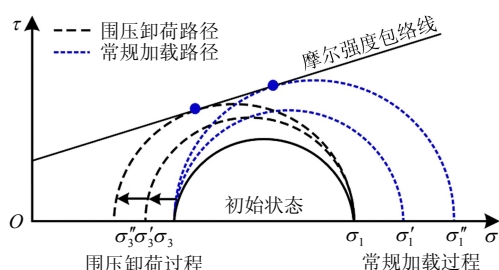


图6 不同应力路径莫尔圆示意图

Fig.6 Mohr circle diagram under different stress paths

在卸围压屈服阶段, 随卸围压开始, 径向应变速率增大, 此阶段变形以径向变形为主; 当卸围压至砂岩破坏点时, 径向应变陡增, 占绝对地位, 体积应变急剧增大, 瓦斯运移通道瞬间形成, 流量出现陡增; 当砂岩破坏后, 轴向控制方式自动切换为位移控制, 轴向和径向应变均小幅变化, 瓦斯流量趋于稳定。

3.2 渗流规律与应变的关系

图7为卸围压过程中含瓦斯砂岩渗流规律、应力-应变关系曲线 (ε 为应变, q 为瓦斯流量)。由

于轴向应变相对较小, 在图中规律显示不明显, 故以初始围压为 9 MPa 时砂岩卸围压应力-应变、渗流规律为例, 绘制图 8 曲线。根据图 7、8 曲线变化规律, 将砂岩卸围压破坏应力-应变曲线分为 5 个特征阶段, 如图 8 所示, 其中: OA 段 (I) 为孔隙、微裂隙压密变形阶段; AB 段 (II) 为弹性变形阶段; BC 段 (III) 为卸荷屈服阶段; CD 段 (IV) 为卸荷破坏应力跌落阶段; DE 段 (V) 为破坏后阶段, 各阶段特征分析如下:

(1) 孔隙、微裂隙压密变形阶段 (I): 此阶段应力-应变曲线稍向上凹, 岩样孔隙裂隙被压密, 不存在瓦斯运移通道, 瓦斯流量为 0, 砂岩渗透性很差。

(2) 弹性变形阶段 (II): 此阶段岩样发生线弹性变形, 符合广义虎克定律, 岩样内部基本没有新损伤产生, 瓦斯流量仍然为 0, 故此阶段砂岩渗透性仍然很差。

(3) 卸荷屈服阶段 (III): 卸围压开始阶段, 岩样径向应变、体积应变增大且产生塑性变形, 部分

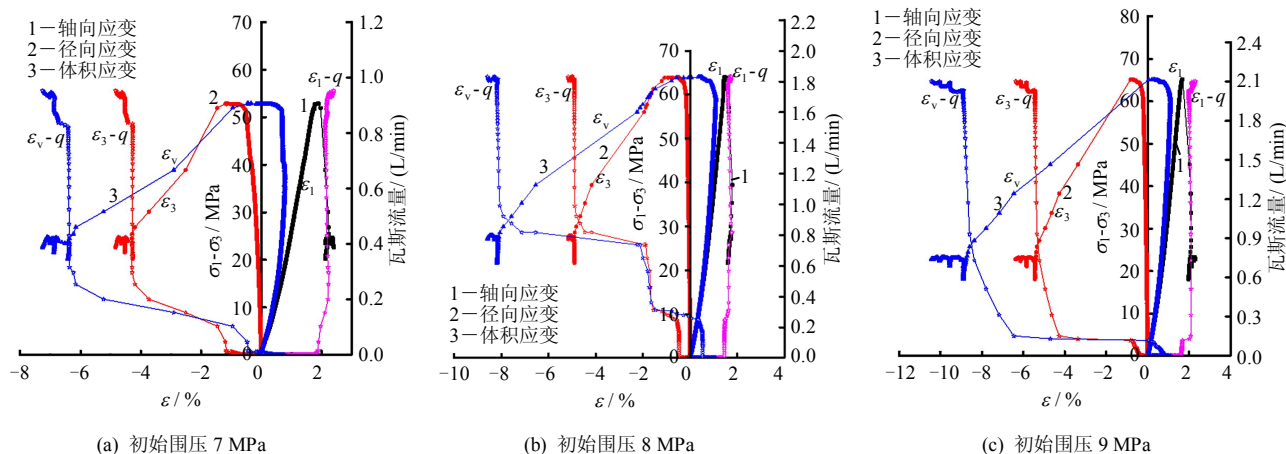


图7 围压卸荷砂岩瓦斯渗流规律、应力-应变关系

Fig.7 Gas seepage and stress-strain curves in unloading confining-pressure tests

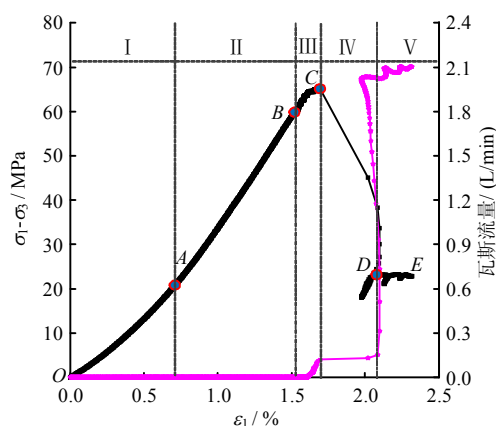


图 8 应力-应变、渗流规律曲线

Fig.8 Curves of stress-strain and gas seepage

孔隙、微裂隙贯通，瓦斯流量出现小幅上升，由图 6 可以看出，初始围压为 7、8、9 MPa 条件下的瓦斯流量均由 0 L/min 分别增大至 0.18、0.23、0.14 L/min，表明砂岩渗透性开始增大。

(4) 卸荷破坏应力跌落阶段 (IV)：由图 7 可以看出，当应力达峰值时，在泊松效应及气体压力的综合作用下、岩样的径向应变、体积应变急剧增大，此时宏观渗流通道瞬间贯通，表现为瓦斯流量陡增，但轴向应变很小，含瓦斯砂岩卸围压破坏试验中岩

样体积应变为轴向应变的 3.5~5.0 倍。分析文献[5, 7, 12]可以得出，砂岩卸荷过程中体积应变与轴向应变之比为 1:1 左右，而含瓦斯砂岩卸荷过程中由于瓦斯气体压力的存在，使得岩样在卸荷破坏时体积应变与轴向应变之比为 3.5:1~5:1 之间，产生了更大的径向变形和体积扩容，从而导致含瓦斯砂岩渗透性急剧增大，这也是砂岩和含瓦斯砂岩卸荷破坏过程中表现出的主要区别。

经历此阶段后，初始围压分别为 7、8、9 MPa 时的瓦斯流量分别增大至 0.94、1.77、2.06 L/min，增幅分别达 5.2 倍、7.7 倍和 14.7 倍，表明本阶段是砂岩渗透性的突变阶段，直接决定了卸荷破坏砂岩的渗透性。

(5) 破坏后阶段 (V)：此阶段围压保持恒定，轴向以位移控制 0.1 mm/min 的速度进行加载，内部微裂隙继续扩展，但砂岩内部宏观裂隙已基本形成，瓦斯流量趋于稳定，进入稳定渗流阶段。

3.3 渗流规律与围压卸荷量的关系

试验过程中，岩样由静水压力状态，先增加轴压至预定值，然后卸围压至岩样破坏，随围压卸荷量增大，瓦斯流量、体积应变均出现变化，但不同阶段对应的体积应变率不等，如图 9 所示。

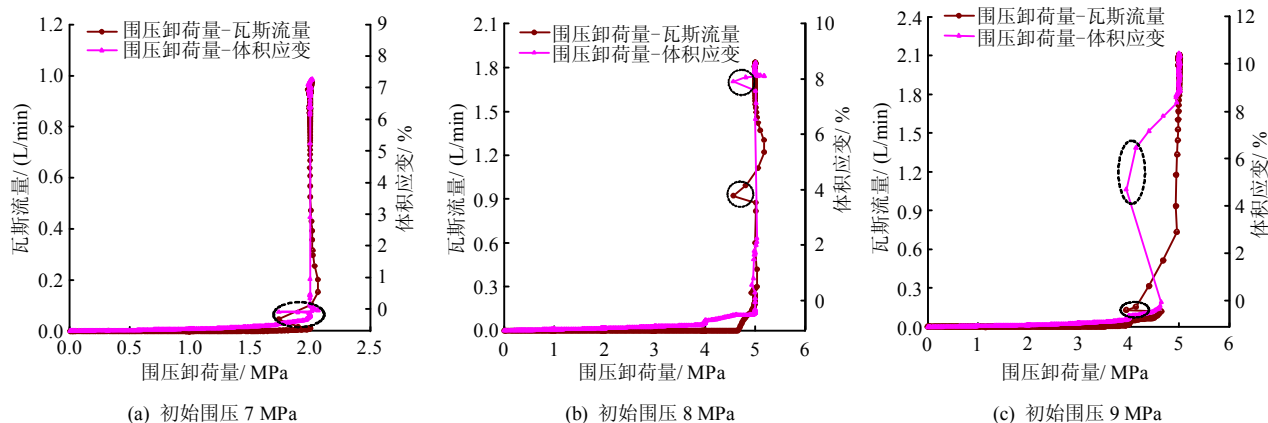


图 9 围压卸荷量与瓦斯渗流、体积应变的关系

Fig.9 Relationship between confining pressure unloading magnitude, and gas seepage, and strain

由图可知，砂岩屈服之前，随围压卸荷量的增大，体积应变变化很小，且增速非常缓慢，瓦斯流量为 0。卸围压屈服阶段，体积应变出现小幅增大，且增速变快，瓦斯流量出现小幅增大。砂岩屈服后，很小的围压卸荷量也可引起很大的流量及体积应变的变化，瓦斯流量和体积应变均呈近直线型的增大态势。屈服、破坏阶段，砂岩的体积应变与瓦斯流量之间存在较好的相关性，故本文第 4 部分建立了与应变相关的瓦斯渗透率模型。

需要说明的是：图 9 中曲线均存在虚线框中奇异数据点，造成上述现象的原因是由于试验设备为伺服试验装置，在岩样突然破坏时，试验设备瞬间提高围压以进行反馈调节和自我保护，而后围压恢复破坏点对应围压值，对试验结果影响较小。

3.4 围压卸荷扩容规律分析

研究表明，砂岩卸荷破坏阶段 (IV 阶段) 的应力跌落量 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与体积应变变化量 $\Delta\varepsilon_v$ 存在较好的指数相关性，即此阶段中应力跌落量越大，则

对应的体积应变的变化量越大, 可以用 $\Delta\varepsilon_v = 4.378 \ 3e^{0.015 \ 7\Delta\sigma}$ 表示, 其中 $\Delta\sigma$ 表示应力跌落量 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$, 表 1 给出了卸荷破坏阶段砂岩应力跌落量与应变变化量的 3 种试验结果, 并绘制应力跌落量与体积应变变化量的关系曲线及其拟合结果 (如图 10 所示)。

表 1 应力跌落量与应变变化量试验结果
Table 1 Results of stress drop and strain variation

岩样 编号	应力跌落量 / MPa	轴向应变 $\Delta\varepsilon_1$ / %	径向应变 $\Delta\varepsilon_3$ / %	体积应变 $\Delta\varepsilon_v$ / %
1	23.70	0.401	3.390	6.379
2	40.57	0.276	4.221	8.164
3	46.40	0.406	4.793	9.180

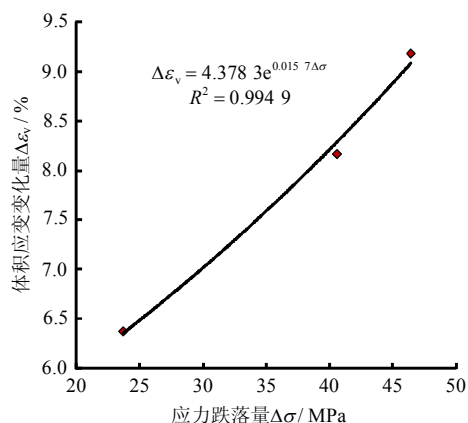


图 10 应力跌落量与体积应变变化量关系曲线
Fig.10 Curves of stress drop and volumetric strain variation

为说明轴向和径向应变在不同阶段对体积扩容的作用, 绘制图 11。初始阶段即 oa 段 (曲线 oa_1 、 oa_3), 岩样轴向被压缩, 体积应变为正, ε_1 - ε_v 曲线稍向上凹, ε_3 - ε_v 曲线稍向下凹, 但 ε_1 - ε_v 曲线斜率比 ε_3 - ε_v 曲线的斜率大的多, 表明此阶段轴向应变对砂岩的体积收缩起主要作用; ab 段 (曲线 a_1b_1 、 a_3b_3), 岩样轴向继续被压缩, 体积应变仍然为正, 此阶段 ε_1 - ε_v 、 ε_3 - ε_v 曲线均呈线性增长, 但 ε_1 - ε_v 曲线斜率较大, 说明此时轴向应变在岩样体积压缩中仍占主要地位; bc 段 (曲线 b_1c_1 、 b_3c_3), 此阶段对应砂岩的卸压屈服阶段, 岩样开始出现体积扩容, 此阶段体积应变仍然为正, 但 ε_3 - ε_v 曲线的斜率转为比 ε_1 - ε_v 曲线斜率大, 表明卸荷屈服阶段径向变形在体积扩容中占主要作用; cd 段 (曲线 c_1d_1 、 c_3d_3), 与砂岩卸荷破坏应力跌落阶段相对应, 此阶段体积应变突然增大, 岩样出现迅速扩容, 此时 ε_3 - ε_v 曲线的斜率比 ε_1 - ε_v 曲线的斜率大得多, 径向应变突然

增大, 在体积扩容中占主导地位。上述分析表明, 径向变形是砂岩体积扩容的控制因素。

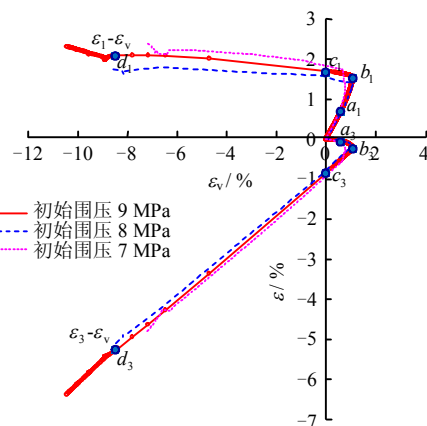


图 11 轴向应变、径向应变与体积应变的关系曲线
Fig.11 Axial strain, radial strain and volume strain curves

3.5 砂岩卸围压破坏形态分析

图 12 给出了部分试验岩样的卸围压破坏形态。由于卸围压相当于在侧向给岩样施加拉应力, 导致径向变形激增, 故砂岩的卸荷破坏表现出强烈的径向扩容。由图可知, 本次试验砂岩的破坏形态主要表现为沿层理方向的张剪混合裂缝, 既存在与轴向平行的张拉裂缝, 也存在剪切裂缝, 且微裂缝也十分发育, 这也说明卸围压会导致更加强烈的破坏程度, 主裂隙的发育程度与径向变形具有较好的相关性, 主裂隙决定了砂岩岩样的渗透性。

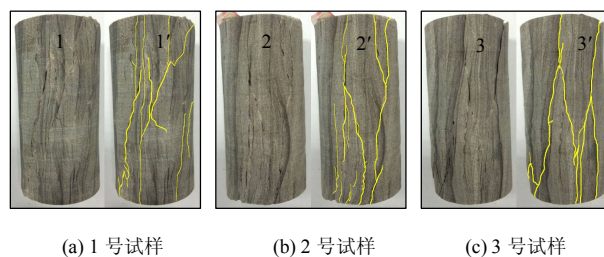


图 12 典型围压卸荷破坏形态描图
Fig.12 Sketches of typical failure of sandstones in unloading tests

4 渗透率模型探讨

对于试验所用的含层理须家河组砂岩而言, 岩样破坏前, 渗流主要发生在砂岩屈服阶段, 此阶段微裂隙是主要的渗流通道。岩样破坏阶段, 宏观裂隙是主要渗流通道, 以裂隙流为主。因此, 砂岩卸荷破坏过程中渗透率演化模型由微裂隙渗透率模型和裂隙渗透率模型两部分组成。

试验表明, 砂岩的渗透性与所处的应变状态密

切相关，建立合理的应变相关渗透率模型是非常必要的。

4.1 屈服阶段渗透率模型

采用多孔介质渗流中广泛应用的 Kozeny-Carman 方程^[20]描述渗透率与孔隙率之间的关系：

$$k = \frac{n}{k_z S_p^2} = \frac{n^3}{k_z S_s^2} \quad (1)$$

式中： k 为渗透率 (10^{-15} m^2)； n 为孔隙率； k_z 为无量纲常数； S_p 为岩样单位孔隙体积的孔隙表面积 (cm^2)； S_s 为岩样单位体积孔隙表面积 (cm^2)。

孔隙率定义为

$$n = V_p / V_b \quad (2)$$

体积应变为

$$\varepsilon_v = \Delta V_p / V_b \quad (3)$$

式中： V_p 为岩样的孔隙体积； V_b 为岩样总体积。

孔隙率与体积应变关系为

$$n = \frac{V_p}{V_b} = 1 - \frac{1 - n_0}{1 - \varepsilon_v} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (1)，因体积应变较小，故可令 $(1 + \varepsilon_v)^3 \approx (1 - \varepsilon_v)$ ，得渗透率表达式为

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{(1 - \varepsilon_v)} \left(1 - \frac{\varepsilon_v}{n_0} \right)^3 \quad (5)$$

式中： k_0 为初始渗透率； n_0 为初始孔隙率。

由于试验所用砂岩岩样初始渗透率极小，因此，初始孔隙率很小，砂岩屈服阶段的渗透性主要是由于微裂隙产生所导致的，故在式 (5) 中引入表征微裂隙结构改变对渗透率影响的比例系数 α ， α 是与体积应变有关的量^[22]， α 可表示为

$$\alpha = 1 - A\varepsilon_v \quad (6)$$

式中： A 为拟合参数。

故含瓦斯砂岩屈服阶段渗透率模型可表述为

$$k = k_0 \frac{\alpha}{(1 - \varepsilon_v)} \left(1 - \frac{\varepsilon_v}{n_0} \right)^3 \quad (7)$$

4.2 破坏阶段渗透率模型

破坏阶段砂岩内部产生宏观裂隙，渗流以裂隙流为主，上述公式不再适用。由图 12 可知，砂岩破坏后裂隙形态以沿层理方向的平行裂隙为主，因此，

可将裂隙简化为平板模型进行研究^[23]。

由 Poiseuille 方程^[20]，并引入与裂隙形态有关的修正系数 β ，得出通过含 m 条平行裂隙的单元体的气体流量为

$$Q = \frac{\beta m b^3 l (p_1^2 - p_2^2)}{12 \mu h p_0} \quad (8)$$

式中： m 、 b 、 l 、 h 分别为裂隙条数、裂隙开度、裂隙长度、高度； p_1 、 p_2 分别为进气口压力和出气口压力； μ 为气体动力黏度系数。

结合前人研究^[22]及本次试验结果，砂岩破坏阶段的渗透率与体积应变呈指数函数关系，因此，采用指数函数表征修正系数 β 与体积应变的关系为

$$\beta = k_{f0} (B_1 + B_2 e^{B_3 \varepsilon_v}) \quad (9)$$

式中： k_{f0} 为裂隙初始渗透率； B_1 、 B_2 、 B_3 为拟合参数。

已知单元体气体流量式 (8)，代入 Darcy 定律公式，得出岩样裂隙内气体渗透率表达式为

$$k = \frac{\beta l L b^3}{12 S h} \quad (10)$$

式中： L 为岩样变形后的长度； S 为横截面积。

由砂岩的变形规律，可得出式 (10) 中各参数与应变的关系为

$$\left. \begin{aligned} l &= (1 - \varepsilon_l) l_0; & L &= (1 - \varepsilon_l) L_0 \\ b &= (1 - \varepsilon_b) b_0; & Sh &= (1 - \varepsilon_v) V_0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中： l_0 、 L_0 、 b_0 、 V_0 分别为初始裂隙长度、岩样初始长度、初始裂隙开度和岩样初始体积。

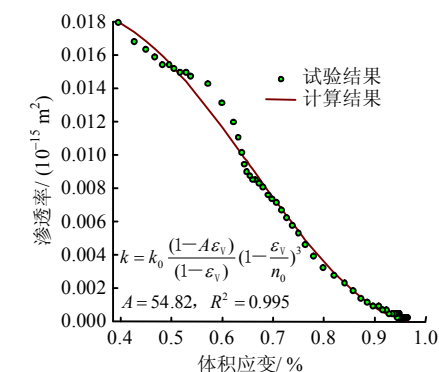
将式 (9)、(11) 代入式 (10) 中，可得出砂岩破坏后裂隙渗流阶段基于应变的渗透率表达式为

$$k_f = \frac{k_{f0} (B_1 + B_2 e^{B_3 \varepsilon_v}) (1 - \varepsilon_l)^2 l_0 L_0 (1 - \varepsilon_b)^3 b_0^3}{12 (1 - \varepsilon_v) V_0} \quad (12)$$

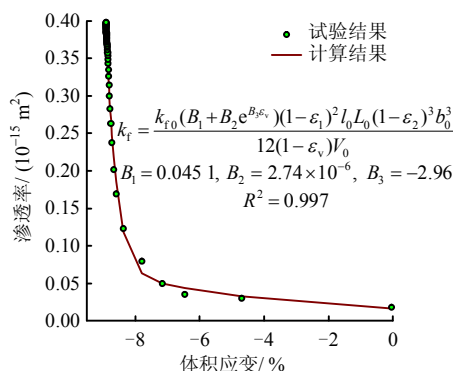
需要说明的是：由于该模型是基于渗透率与体积应变呈指数关系而建立的，故其对具有明显脆性破坏特征的岩样具有很好的适用性，但对脆性破坏特征不明显岩样的适用性尚存在些许不足。

采用 quasi-Newton 算法^[24]分别对式 (7) 和式 (12) 进行计算，得出屈服阶段和破坏后阶段的渗透率计算结果，并与试验结果对比，如图 13 所示，限于文章篇幅，以下仅给出初始围压为 9 MPa 时的渗透率对比图， R^2 值均在 0.99 以上，从而验证了所

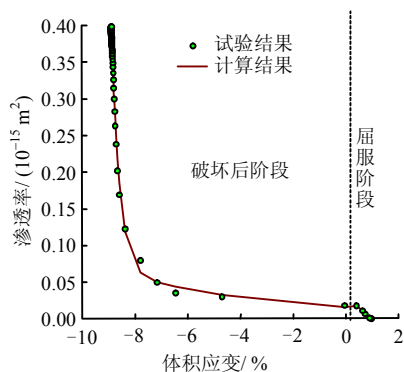
建渗透率模型的有效性。



(a) 屈服阶段渗透率计算值与试验值



(b) 破坏阶段计算值与试验值



(c) 屈服与破坏阶段计算值与试验值

图 13 屈服与破坏阶段渗透率试验结果与计算结果对比

Fig.13 Experimental and calculated results of permeability at the yield and failure stages

5 结 论

(1) 含瓦斯砂岩卸荷破坏表现出明显的脆性特征, 卸荷至峰值点时, 应力突降, 应变突增, 裂隙贯通后瓦斯流量陡增, 存在突跳点。

(2) 卸荷破坏过程的应力-应变及渗透率变化呈现明显的阶段性特征, 分为 5 个特征阶段: I 阶段为孔隙、微裂隙压密阶段, 砂岩渗透性差; II 阶段为弹性变形阶段, 砂岩渗透性差; III 阶段为卸荷屈服阶段, 砂岩渗透性增加; IV 阶段为卸荷破坏应力

跌落阶段, 裂隙贯通后流量陡增, 砂岩渗透性主导阶段; V 阶段为破坏后阶段, 稳定渗流阶段。

(3) 含瓦斯砂岩峰后破坏阶段, 受气体压力和泊松效应影响, 径向应变和体积应变远大于轴向应变。

(4) 基于 Kozeny-Carman 方程和裂隙流理论建立了含瓦斯砂岩屈服阶段与破坏阶段的应变相关渗透率模型, 能够反映含瓦斯砂岩变形破坏不同阶段的渗流机制。

本文对研究瓦斯突出机制、卸压增透及其在破断岩体中的运移规律、抽采孔优化设计等具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 王瑞红, 李建林, 蒋昱州, 等. 开挖卸荷对砂岩力学特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 156—162.
WANG Rui-hong, LI Jian-lin, JIANG Yu-zhou, et al. Experimental study of influence of excavation unloading on mechanical properties of sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.1): 156—162.
- [2] 张宏敏. 砂岩全应力-应变过程气体渗透特性实验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1063—1066.
ZHANG Hong-min. Experimental on gaseous seepage properties of sandstone in complete stress-strain process[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(8): 1063—1066.
- [3] ALAMN A K M BADRUL, NIIOKA MASAKI, FUJII YOSHIKI, et al. Effects of confining pressure on the permeability of three rock types under compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2014, 65: 49—61.
- [4] FUJII Y, ISHIJIMA Y, ICHIHARA Y, et al. Mechanical properties of abandoned and closed roadways in the Kushiro Coal Mine, Japan[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2011, 48: 585—596.
- [5] 朱泽奇, 盛谦, 肖培伟, 等. 岩石卸围压破坏过程的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2675—2681.
ZHU Ze-qi, SHENG Qian, XIAO Pei-wei, et al. Analysis of energy dissipation in process of unloading confining pressure failure of rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.1): 2675—2681.
- [6] 卢平, 沈兆武, 朱贵旺, 等. 岩样应力应变全程中的渗透性表征与试验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2002,

- 32(6): 45—51.
- LU Ping, SHEN Zhao-wu, ZHU Gui-wang, et al. Characterization and experimental study on permeability of rock-samples during complete stress-strain course[J]. **Journal of University of Science and Technology of China**, 2002, 32(6): 45—51.
- [7] 刘建, 李建朋. 砂岩高应力峰前卸围压试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 473—479.
- LIU Jian, LI Jian-peng. Experimental research on sandstone pre-peak unloading process under high confining pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(3): 473—479.
- [8] 韩铁林, 陈蕴生, 宋勇军, 等. 不同应力路径下砂岩力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3959—3966.
- HAN Tie-lin, CHEN Yun-sheng, SONG Yong-jun, et al. Study of mechanical characteristics of sandstone under different loading paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.2): 3959—3966.
- [9] 俞缙, 傅国锋, 陈旭, 等. 冻融循环后砂岩三轴卸围压力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2001—2009.
- YU Jin, FU Guo-feng, CHEN Xu, et al. Experimental study on mechanical properties of sandstone after freezing thawing cycles under triaxial confining pressure unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(10): 2001—2009.
- [10] 殷志强, 李夕兵. 围压卸荷条件下砂岩损伤与动态破碎特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(1): 90—94.
- YIN Zhi-qiang, LI Xi-bing. Research on damage and dynamic fragmentation characteristics of sandstone under unloading with confining pressers[J]. **China Safety Science Journal**, 2013, 23(1): 90—94.
- [11] 田利勇, 朱珍德, 朱姝, 等. 粉砂岩卸荷变形破坏特征试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 44—47.
- TIAN Li-yong, ZHU Zhen-de, ZHU Shu, et al. Deformation and failure characteristics of siltstone under unloading condition[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2013, 30(4): 44—47.
- [12] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下岩石变形特征及本构模型研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 441—447.
- HUANG Run-qiu, HUANG Da. Study on deformation characteristics and constitutive model of rock on the condition of unloading[J]. **Advances in Earth Science**, 2008, 23(5): 441—447.
- [13] 尹光志, 蒋长宝, 王维忠, 等. 不同卸围压速度对含瓦斯煤岩力学和瓦斯渗流特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 68—77.
- YIN Guang-zhi, JIANG Chang-bao, WANG Wei-zhong, et al. Experimental study of confining pressure unloading speed on mechanical properties and gas permeability of containing-gas coal rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 68—77.
- [14] 尹光志, 秦虎, 黄滚. 不同应力路径下含瓦斯煤岩渗流特性与声发射特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1315—1320.
- YIN Guang-zhi, QIN Hu, HUANG Gun. Experimental study of characteristics of seepage and acoustic emission of gas-filled coal under different stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(7): 1315—1320.
- [15] 蒋长宝, 尹光志, 黄启翔, 等. 含瓦斯煤岩卸围压变形特征及瓦斯渗流试验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 802—807.
- JIANG Chang-bao, YIN Guang-zhi, HUANG Qi-xiang, et al. Experiment of deformation property and gas permeation of coal under confining pressure unloading process[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(5): 802—807.
- [16] 蒋长宝, 黄滚, 黄启翔. 含瓦斯煤多级式卸围压变形破坏及渗透率演化规律实验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2039—2042.
- JIANG Chang-bao, HUANG Gun, HUANG Qi-xiang. Experiment on deformation and permeability evolution of gas-containing coal under multi-stage unloading confining pressure[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(12): 2039—2042.
- [17] 许江, 李波波, 周婷, 等. 加卸载条件下煤岩变形特性与渗透特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1493—1498.
- XU Jiang, LI Bo-bo, ZHOU Ting, et al. Experimental study of coal deformation and permeability characteristics under loading-unloading conditions[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(9): 1493—1498.
- [18] 许江, 张丹丹, 彭守建, 等. 三轴应力条件下温度对原煤渗流特性影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1848—1854.
- XU Jiang, ZHANG Dan-dan, PENG Shou-jian, et al. Experimental research on impact of temperature on seepage characteristics of coal containing methane under triaxial stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(9): 1848—1854.