

•深部岩体力学与开采理论•

DOI:10.15961/j.jsuese.201800099

常规三轴压力下含瓦斯煤蠕变-渗流演化规律

李祥春^{1,2,3}, 张 良^{1,2*}, 赵艺良⁴

(1.中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083; 2.煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;

3.河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室 省部共建国家重点实验室培育基地,河南 焦作 454000;

4.中国长江三峡集团有限公司移民工作局,北京 100038)

摘 要:在瓦斯抽采、煤层气开采及煤与瓦斯突出过程中,煤岩蠕变引起岩体变形会对瓦斯渗流产生影响。为研究含瓦斯煤蠕变-渗流的演化规律,得到蠕变-渗流的耦合关系,作者进行了不同瓦斯压力下分级加载轴压时煤体常规三轴蠕变-渗流试验。试验结果发现:轴向应变呈梯度增大,直至煤样破坏;期间,煤体内部瓦斯渗透率先减小后增大的趋势。这表明煤样蠕变过程中煤体内部孔隙或微裂隙发生了两次变化:前期蠕变过程中,孔隙或微裂隙压密,瓦斯流通受阻渗透率减小;当应变超过一定阈值时,煤体骨架发生变化,孔隙或微裂隙出现增生或扩展,瓦斯通道贯通渗透率增大。此外,由试验结果可知,煤岩发生失稳破坏时,必须具备应力超过长期强度、应变超过应变阈值两个条件。这一结论为煤岩失稳破坏提供了一条新的思路。进而,为进一步研究蠕变变形和渗透率的关系,基于Kozeny-Carman公式进行合理地假设及推导,得到应变与渗透率的数学关系式。最后,利用蠕变-渗流试验数据验证时,发现应变-渗透率公式能很好地反映蠕变-渗流过程中的耦合规律。结论能为应力场-裂隙场-渗流场耦合研究提供一定的参考价值。

关键词:含瓦斯煤;蠕变-渗流耦合;应变阈值;应变-渗透率公式

中图分类号:X936

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)04-0055-08

Evolution of Gas-filled Coal Creep-seepage Under Conventional Triaxial Compression

LI Xiangchun^{1,2,3}, ZHANG Liang^{1,2*}, ZHAO Yiliang⁴

(1.School of Resources and Safety Eng., China Univ. of Mining & Technol. (Beijing), Beijing 100083, China; 2.State Key Lab. of Coal Resources and Safe Mining, Beijing 100083, China; 3.State Key Lab. Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo 454000, China; 4.China Yangtze River Three Gorges Group Co., Ltd. Immigration Bureau, Beijing 100038, China)

Abstract: The creep of coal rock has an effect on the gas permeability during methane extraction, coal bed gas exploitation and coal and gas outburst in mines. It is important to study the evolution of gas-filled coal creep-seepage and to obtain the coupling relationship between creep and seepage. In this paper, the evolution of gas-filled coal creep-seepage at different gas pressures was tested under conventional triaxial compression. The results showed that the axial strain grew by degrees as the stress increased step by step, until the destruction of coal samples. On the other hand, the gas permeability of coal was declined first and then raised, which can be concluded that micropores and microcraks within the coal body went through two changes. When the stress was less than the long-term strength of coal, the micropores and microcraks were closed; the gas seepage channels were blocked and then the gas permeability was on the decline. While the stress was greater than the long-term strength or the strain was greater than the strain-threshold of coal, the gas seepage was raised. The micropores and microcraks were adjoined and the gas seepage channels were expanded. Therefore, it is suggested that the stress exceeding long-term strength and the strain reaching a threshold are the prerequisites for the instability of coal and rock, which indicates a new way to study coal rock failure. Based on Kozeny-Carman formula, reasonable hypotheses

收稿日期:2018-01-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600708);国家自然科学基金资助项目(51304212);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QZ09);河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目资助(W2018B04)

作者简介:李祥春(1979—),男,副教授,博士生导师,博士。研究方向:瓦斯灾害防治。E-mail: chinalixc123@163.com

* 通信联系人 E-mail: zhangliang9106@hotmail.com

网络出版时间:2018-07-10 12:32:00

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180710.1231.007.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

is and deduction, the coupling formula between strain and permeability was obtained. Moreover, this coupling formula was validated by the test data. The above findings would play an important role in the development of the stress field, fracture field and seepage field coupling theory.

Key words: gas-filled coal; creep-seepage coupling; strain threshold; strain-permeability formula

采矿工程、水利工程、石油开采等工程实践中常常涉及到流固耦合问题。特别是在井下采矿工程中,进行巷道支护设计时需要研究渗流作用下巷道围岩稳定性;对于矿井突水问题,需要研究围岩的变形与水渗流之间的耦合作用;防治煤与瓦斯突出时需要研究煤层及其围岩的变形与瓦斯吸附/解吸、扩散、渗流之间的耦合作用^[1]。且随着地球浅部资源逐渐枯竭,深部矿产资源开采已然趋于常态,深部强扰动和强时效下的多场耦合理论是需要解决的关键科学问题之一,而深部强扰动和强时效下多场多相渗流理论是矿井开采过程中的前沿问题之一^[2]。因此,研究蠕变与渗流间的耦合关系具有十分重要的意义,国内外学者做了大量研究。

李世平等^[3]研究了岩石全应力-应变试验过程中3个不同阶段的渗透率与应变的关系,采用均差法、正交多项式法和线性回归方法得到渗透率与应变的多项式拟合方程。冉启全等^[4]在研究流固耦合油藏数值模拟过程中基于Kozeny-Carman方程推导了渗透率动态变化的理论模型,认为渗透率随体应变增大呈增大的趋势,但缺少试验或工程实践验证。许江等^[5]通过三轴应力下含瓦斯煤蠕变前后渗透性试验,初步探讨了煤体蠕变对渗透率的影响,但受试验条件限制,没有得到蠕变全过程中渗透率的演化规律。阎岩等^[6]改进了蠕变渗流设备与工艺,测得了软岩在分级加载轴压和分级加载水压两种条件下的体应变及水渗透系数的演化规律,试验结果发现两种不同加载条件下渗透系数随时间的演化规律有所不同,并进行了定性分析。Xu等^[7]对坝基硬岩进行了常规三轴流变试验,分析了蠕变变形与渗透率之间的关系,认为渗透率与蠕变变形、损伤变量、水压等因素有关,但没有得到具体的数学显式表达式。陈亮^[8]通过常规三轴压缩条件下型煤和原煤的渗流试验,研究了轴压、围压及孔压对渗透率的影响,根据试验结果依次进行最小二乘法拟合。王登科等^[9]对含瓦斯煤进行常规三轴蠕变渗流试验,得到了蠕变变形和渗透率随时间变化的演化规律,发现分级加载轴压过程中渗透率先减小后增大,但没有建立蠕变与渗流间的数学模型,且每级轴压维持时间过短,稳定蠕变时间只有4 h左右。杨红伟等^[10]研究了细粒砂岩在恒定轴压和围压条件下逐级加载渗流水压的蠕变试验,结果发现发生蠕变破坏时渗流体积速率呈“U”型演化。何峰等^[11]在研究不同围压、孔压条件下煤岩蠕变

-渗流耦合规律时,对一定数量的关键点和试验点进行插值,得到了渗透率与应变的多项式拟合公式,与文献^[3]拟合公式一致,但对拟合关键点的描述不够清晰,缺乏说服力。曹亚军等^[12]以二长花岗岩为研究对象采用分级加载方式,进行低渗透岩石常规三轴流变试验,结合试验数据对破坏应力水平下岩石渗透率和体应变的关系进行了指数拟合。Liu等^[13]研究了花岗岩在常规三轴蠕变试验过程中渗透率的变化规律,通过拟合得到了瞬时蠕变、稳定蠕变和加速蠕变3个阶段渗透率与体应变间的数学关系式。江宗斌等^[14]研究了循环加卸载条件下石英岩蠕变-渗流耦合规律,结合ZSI(zone state index)基于Kozeny-Carman公式建立了渗透率与体应变的关系式。王春波等^[15]基于Kozeny-Carman方程推导出各向异性渗透系数公式,即竖向和水平方向的渗透系数公式,并采用FLAC^{3D}内嵌的FISH语言进行数值模拟,但竖向和水平方向的渗透系数公式实际上为同一形式。谢和平等^[16]研究不同开采方式下煤岩应力场-裂隙场-渗流场行为时,认为传统三轴加载测试中,环向应力固定,煤炭被作为一种岩石类材料进行加载,没有考虑开采方式(扰动)的影响;并推导出了渗透率的增大率与体应变的关系式,认为煤岩渗透率随体积膨胀而增大,但没有进一步验证。Danesh等^[17]在研究蠕变对渗流和瓦斯抽采的影响时提出改进的渗透率模型,模拟了不同应力和单轴应变条件下蠕变对煤渗流和瓦斯抽放的影响。Liu等^[18]认为黏土岩渗透率易受变形影响,可以检测岩石内部微裂隙的变化情况,通过不同围压下的分级加载试验观测了泥岩的蠕变及渗流演化规律,发现气体渗透率在第1级载荷下持续减小,可以用对数函数拟合渗透率与体应变间的关系,但没有得到整个蠕变过程中渗透率与应变间的数学关系式。

可以发现,蠕变-渗流问题的研究成果很多,但主要存在以下问题:1)受试验条件所限,没有得到三轴应力下蠕变变形和渗透率的动态演化规律,或试验数据不充分;2)通过三轴试验定性分析渗透率与应变的变化规律,仅通过牛顿插值等方法得到二者的多项式或指数拟合公式;3)进行理论推导得到渗透率与应变的关系式,但没有进行实验室或工程实践的验证。因此,在前人的研究基础上,采用分级加载法进行多组不同瓦斯压力下的煤体常规三轴蠕变-渗流试验,测得应变和渗透率的演化规律,通过分析

试验结果提出煤岩失稳破坏时必备的两个条件,为相关研究提供了新思路;提出渗透率的二次变化规律,为瓦斯抽采、煤与瓦斯突出等提供资料;通过理论推导得到应变与渗透率的数学公式,并验证其可靠,能为深部强扰动和强时效下多场多相渗流理论研究提供参考。

1 煤岩蠕变-渗流试验

1.1 试验系统及煤样

采用课题组设计的常规三轴煤岩蠕变系统,由于原系统只能测试煤岩受瓦斯压力和不受瓦斯压力影响时的蠕变行为,为测得煤岩在不同瓦斯压力下的三轴蠕变-渗流耦合特性,加入渗流系统所需的出气端、进气端及气体流量采集子系统,即可得到一套改进的测试系统。该系统能测得不同瓦斯压力下煤岩三轴蠕变-渗流的变化特征。试验系统主要包括天辰试验机(压力机)、三轴夹持器、围压加载系统、ES-I型温控仪、气源(浓度99.99%的甲烷)、JC-4A静态应变仪、气体流量采集系统等,试验系统如图1所示。



图1 试验系统

Fig. 1 Test system

试验煤样取自潞安集团余吾煤业,煤块从井下采集至地面后迅速用塑料薄膜将其密封,防止接触空气而氧化,再送至实验室。在取芯机钻取煤样时发现煤质较软,难以得到理想的试验煤样。尹光志等^[19]认为两种含瓦斯煤(原煤和型煤)进行力学试验时,测得的变形特性和抗压强度的变化规律是一样的,考虑到原煤煤样的难制作性,可将型煤煤样替代原煤煤样用于含瓦斯煤样力学性质的一般性规律探讨。相关研究^[5,20-22]也表明型煤煤样和原煤煤样的瓦斯渗透率的变化规律是一致的。因此,本文采用型煤煤样进行试验研究。制作型煤煤样过程中,先将所取煤样粉粹再筛选出40~80目(粒径0.1~0.2 mm)之间的煤粉,加入适量水搅匀;然后在压力机上以100 MPa的应力压缩成型,并将试样置于80 °C的烘箱内烘干,使试样中的水分与原煤水分相当,待冷却后置于真

空箱备用。型煤煤样的规格为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 (\pm 0.25) \text{ mm}$,具体煤样如图2所示。



图2 型煤煤样

Fig. 2 Briquette samples

1.2 试验方案

岩石蠕变试验的加载方法主要有单级加载法、逐级加载法、逐级增量加卸载法^[23-25]。鉴于分级加载法的可操作性强、采用率高,故将采用此方法分级加载轴压,进行3组不同瓦斯压力(0.13、0.30、0.40 MPa)下型煤煤样常规三轴蠕变-渗流试验。试验过程中保持围压恒为2 MPa、常温25 °C,煤样发生稳定蠕变时每级轴压至少加载12 h,以避免稳定蠕变时间过短。具体试验步骤:施加一较小的轴压,然后以0.1 MPa/s的速率加载围压至2 MPa;打开气瓶进气阀从三轴夹持器上端进气口通入甲烷,使进气口瓦斯压力维持在试验预设值,维持一定时间使得煤样吸附瓦斯达到平衡状态^[26];以0.1 kN/s的速率分级加载轴压至设定值并持续足够长时间,直至应变仪的读数稳定再加载下一级轴压,至最后一组轴压加载煤样发生破坏后停止该组试验;更换煤样,重复上述步骤进行下一组试验,保存好试验数据。具体试验方案见表1。

表1 试验方案

Tab. 1 Experimental schemes

试验	瓦斯压力/MPa	围压/MPa	轴压/MPa
1	0.13	2	6、9、12、15
2	0.30	2	3、6、9、12、15、18
3	0.40	2	3、6、9、12、15

2 试验结果及分析

假设瓦斯在煤样中的运移为等温过程且满足理想气体方程,根据Darcy和Boyle定律的可压缩气体水平线性稳定流动方程,可计算出蠕变-渗流试验过程中的瓦斯渗透率^[27-28]:

$$K = \frac{2Q\mu LP_0}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

式中: K 为渗透率, md; Q 为通过渗流面的渗流量, mL/s; μ 为瓦斯动力黏度, cPa; L 为试样长度, cm; A 为

渗流横截面积, cm^2 ; P_0 为大气压, MPa; P_1 、 P_2 分别为进、出气口的瓦斯压力, MPa。

2.1 试验1、2结果及分析

试验1瓦斯压力为0.13 MPa, 每级轴压按照6、9、12、15 MPa的顺序加载。本试验采用的天辰压力机可直接测出煤样的轴向变形情况, 不需要贴应变片, 通过导线连接应变仪可以测算出轴向应变。另外, 瓦斯从三轴腔体上端入口进气, 从下端出口流出, 流量计可测得出口处的渗流量, 根据式(1)即可算出渗透率。蠕变-渗流试验1所测得的轴向应变和渗透率演化规律如图3所示。

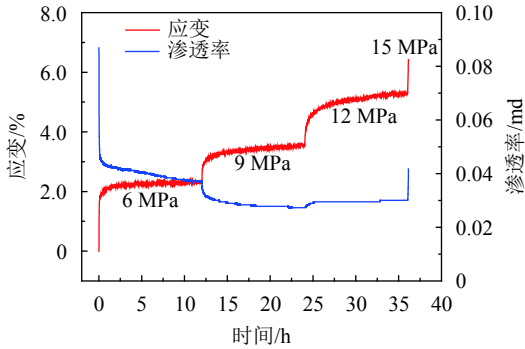


图3 试验1结果

Fig. 3 Results of test 1

由图3可知, 第1级轴压加载过程中, 轴向应变从0增至2.3%并保持稳定; 渗透率从0.087降至0.037 md, 降幅57.5%。第2级轴压加载时, 轴向应变从2.30%增至3.55%并保持稳定, 增幅54%; 渗透率从0.037降至0.027 md, 降幅27%。第3级轴压加载时, 轴向应变从3.55%增至5.30%并保持稳定, 增幅49%; 渗透率从0.027增大至0.03 md, 增幅11%。最后一级轴压加载时, 煤样直接发生破坏变形, 轴向应变和渗透率急剧增大。

相关研究^[29-30]认为应力小于煤体强度时, 煤样发生衰减蠕变, 轴向应变先增大后趋于定值; 应力大于煤体强度时, 煤样发生非衰减蠕变, 轴向应变不断增大。从图3中不难发现, 第3级轴压加载时, 煤样发生衰减蠕变, 轴向应变先增大后趋于定值, 渗透率呈小幅增大的趋势。说明煤体存在应变阈值或应力阈值, 当应变或应力超过阈值时, 煤体内部微观裂隙或孔隙结构发生改变, 由之前的压密闭合态变成扩展贯通态, 所以渗透率会呈现先减小后增大的趋势。由此推断: 1) 应力强度和应变阈值是煤岩的固有属性, 当应力大于应力强度或应变超过应变阈值后, 煤岩会发生非衰减蠕变或加速蠕变; 2) 蠕变过程中渗透率比应变更灵敏, 当渗透率出现增大趋势时, 说明煤体内部结构已经发生改变, 如果继续增大应力, 则会发生非衰减蠕变或破坏变形。图3中, 试验1煤样所受

轴压达到15 MPa时发生破坏变形, 说明煤样长期强度介于12~15 MPa之间; 破坏时轴向应变不小于5.5%, 说明煤样应变阈值在5.5%左右。

试验2瓦斯压力为0.30 MPa, 每级轴压按照3、6、9、12、15、18 MPa的顺序加载, 测得轴向应变和渗透率的演化规律如图4所示。

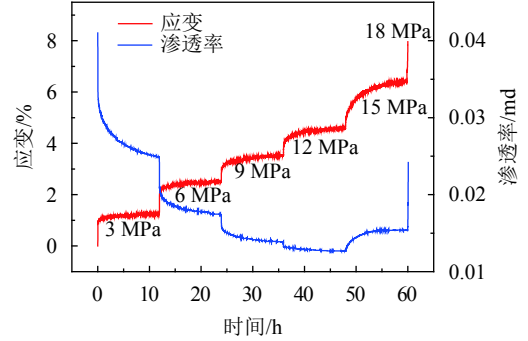


图4 试验2结果

Fig. 4 Results of test 2

由图4可知, 前4级轴压加载时, 煤样发生衰减蠕变, 最后一级轴压加载时, 煤样发生破坏变形。轴压为3、6、9、12 MPa时, 渗透率逐级减小, 煤样发生稳定蠕变时, 渗透率不断减小, 说明煤体内部孔隙或微裂隙压密; 轴压为15 MPa时, 渗透率呈增大趋势, 从0.013增大至0.016 md, 增幅23%, 比试验1轴压为12 MPa时渗透率的增幅大。说明轴压为15 MPa时煤样发生衰减蠕变过程中, 煤体内部已然伴随着孔隙或微裂隙的增生或扩展, 此时若进一步增大轴压, 煤体会出现加速变形或破坏变形, 渗流比蠕变早一步表征煤样是否会发生失稳破坏。此外, 图4中试验2煤样所受轴压达到18 MPa时发生破坏变形, 说明煤样长期强度介于15~18 MPa之间; 破坏时轴向应变不小于6.8%, 说明煤样应变阈值在6.8%左右。

2.2 试验3结果及分析

试验3瓦斯压力为0.40 MPa, 每级轴压按照3、6、9、12、15 MPa的顺序加载, 测得轴向应变和渗透率的演化规律如图5所示。

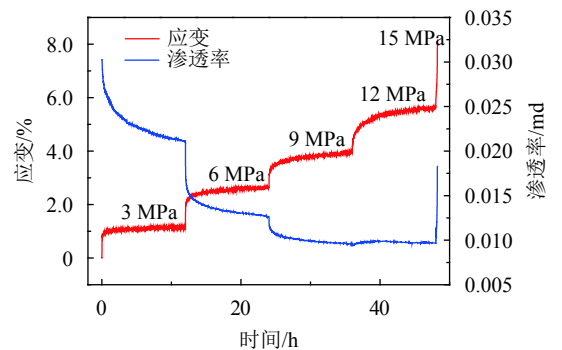


图5 试验3结果

Fig. 5 Results of test 3

由图5可知,前4级轴压加载时,煤样发生衰减蠕变;最后一级轴压加载时,煤样发生加速蠕变。轴压为3、6、9 MPa时,渗透率逐级减小,煤样内部孔隙或裂隙压密,瓦斯通道受阻流动困难;轴压为12 MPa时,渗透率先表现出增大的趋势,从0.009 41增大至0.009 88 md,增幅4.99%,然后又降至0.009 68 md,降幅2.87%,但整体比上一级轴压加载结束时的渗透率大。试验3煤样所受轴压达到15 MPa时发生破坏变形,说明煤样长期强度介于12~15 MPa之间;破坏时轴向应变不小于5.7%,说明煤样应变阈值在5.7%左右。

由试验结果可知,煤体蠕变渗流演化规律是应力场-裂隙场-渗流场多场耦合作用的结果,应力作用使得煤体内部孔隙或裂隙压密,渗透率减小,煤体发生衰减蠕变;当应力超过长期强度或应变超过应变阈值后,煤体内部孔隙或裂隙增生或扩张,渗透率增大。说明蠕变与渗流间的确存在很大的相关性。为得到二者的数学模型,可以将孔隙或裂隙作为“桥梁”,进行合理地假设及推导。

3 蠕变-渗流耦合模型及验证

Kozeny-Carman基于毛细管束模型,建立了渗透率与孔隙度、比表面、形状因子和迂曲度间的关系,提出渗透率方程^[4,31]:

$$K = \frac{C\varphi^3}{\tau\Sigma^2} \quad (2)$$

式中: C 为Kozeny常数,与试样横截面的形状有关; τ 为迂曲度; φ 为孔隙度; Σ 为单位体积多孔介质内孔隙的表面积。假设试样形状因子与迂曲度的比值为常数。

设煤样初始孔隙度为:

$$\varphi_0 = \frac{V_{P0}}{V_{b0}} \quad (3)$$

式中, V_{P0} 为试样内部初始孔隙体积; V_{b0} 为试样初始体积。应力作用下煤体发生收缩变形孔隙压密,当应力超过长期强度或应变超过应变阈值时,孔隙增生或扩张。第1节蠕变-渗流试验中,轴向应变逐级增大,煤体在轴向方向上一直处于压缩状态,煤体发生破坏变形时轴向应变均大于6%,而渗透率先减小后增大。这说明煤体蠕变过程中,煤体骨架和内部裂隙均在发生变化。假设骨架变形和孔隙变形共同体现在孔隙体积的变化上,那么,蠕变过程中孔隙度是动态改变的,孔隙度变为:

$$\varphi = \frac{(V_{P0} + \Delta V_P)/V_{b0}}{(V_{b0} + \Delta V_P)/V_{b0}} = \frac{\varphi_0 + \varepsilon_v}{1 + \varepsilon_v} \quad (4)$$

式中, ε_v 为体应变, ΔV_P 为孔隙体积的变化量。

同理可得:

$$\Sigma = \frac{(A_{s0} + \Delta A_s)/V_{b0}}{(V_{b0} + \Delta V_P)/V_{b0}} = \frac{\Sigma_0 + \Delta A_s/V_{b0}}{1 + \varepsilon_v} \quad (5)$$

式中, ΔA_s 为孔隙表面积的变化量。

联立式(2)~(5)可得:

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\Sigma_0^2}{(\Sigma_0 + \Delta A_P/V_{b0})^2} \frac{(\varphi_0 + \varepsilon_v)^3}{\varphi_0^3(1 + \varepsilon_v)} \quad (6)$$

根据式(6)可知,渗透率为关于体应变的函数,为计算方便可将其简化成一般式:

$$K = \frac{a_1(\varepsilon_v^3 + b_1\varepsilon_v^2 + c_1\varepsilon_v + d_1)}{1 + \varepsilon_v} \quad (7)$$

试验测得的是轴向应变和渗透率,受试验条件所限,在充瓦斯气体过程中,环向应变无法测得。假设煤样变形过程中始终为圆柱状,即

$$\pi r^2 h(1 + \varepsilon_v) = \pi r^2(1 + \varepsilon_2)^2 h(1 + \varepsilon_1) \quad (8)$$

式(8)左右两边化简得:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_1\varepsilon_2^2 \quad (9)$$

从试验结果可以推知,轴向应变 ε_1 和环向应变 ε_2 乘积的数量级为 10^{-4} 左右,可忽略不计,式(9)可写成 $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$ 。当煤样发生稳定蠕变时应变均为常数,此时轴向应变和体应变呈线性关系。同时,相关文献^[32]认为煤岩渗透率与变形(体应变、轴向应变和环向应变)的关系可用同一形式的方程式表示。试验过程中煤样侧面用密封软胶套包裹,环向受围压作用,使得煤样环向不会有瓦斯溢出。故渗透率与轴向应变的关系可表达为:

$$K = \frac{a(\varepsilon_1^3 + b\varepsilon_1^2 + c\varepsilon_1 + d)}{1 + \varepsilon_1} \quad (10)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 均为系数。

式(10)可模拟出三轴压缩时煤体渗透率与蠕变间的耦合规律,根据试验1、2、3的结果,通过数学软件MATLAB的CF TOOL命令进行数值分析,得到的各参数及精度见表2。

表2 蠕变-渗流试验拟合结果

Tab. 2 Fitting results of creep seepage test					
试验	a	b	c	d	R^2
1	0.003 483 0	-7.279	16.11	26.26	0.973 2
2	0.000 763 2	-7.073	18.21	63.44	0.988 2
3	0.000 580 4	-6.407	11.03	76.97	0.988 2

由表2可知,3组试验的拟合精度均大于0.97,具体的拟合曲线如图6所示。由图6可知,不同瓦斯压力下分级加载轴压煤体蠕变-渗流过程中,随着应变的

增大,渗透率均呈先减小后增大的变化趋势。说明煤样从稳定蠕变到失稳破坏全过程轴向不断压缩,内部孔隙或微裂隙从压密、闭合到增生、扩张;当应变或渗透率超过一个阈值后,煤样可能会发生失稳破坏。所提出的应变-渗透率公式能体现蠕变-渗流间的耦合关系。

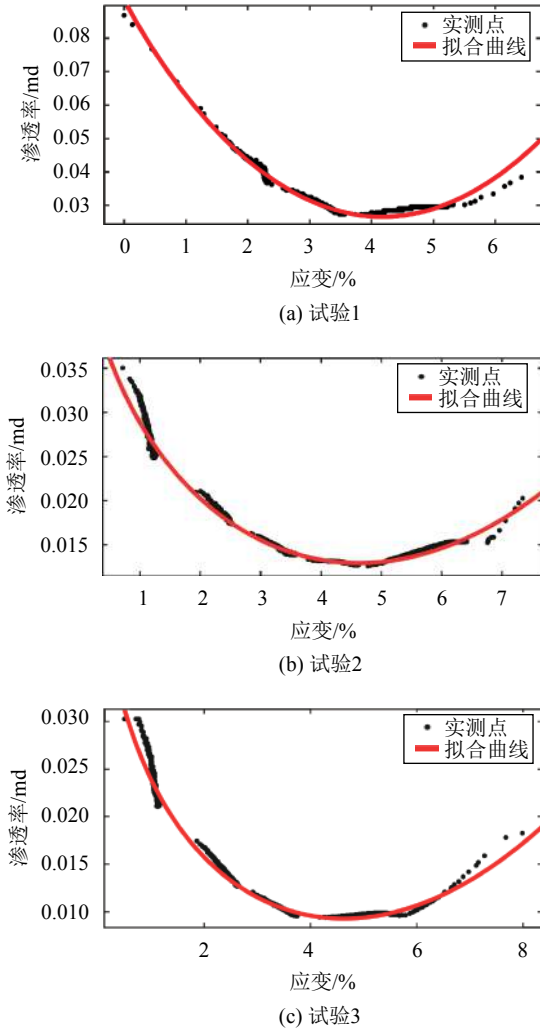


图 6 蠕变-渗流试验拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of creep seepage test

4 讨论

通过分级加载轴压方式研究含瓦斯煤在常规三轴应力下的蠕变及渗流演化规律,弥补了相关研究的不足,得到了轴向应变及渗透率随时间的变化规律,考虑了三轴应力及瓦斯压力对试验的影响。发现不同瓦斯压力下,煤样的蠕变-渗流变化规律基本一致:前几级轴压加载过程中轴向应变均呈逐级增大的趋势,直到最后一级轴压加载时煤样发生破坏变形,这一蠕变规律与相关文献的试验结果一致。人们普遍认为应力超过应力阈值后煤岩会发生失稳破

坏,将研究重点放在煤岩长期强度上,却忽略了煤岩发生失稳破坏时具备两个条件,即应力超过煤岩强度、应变超过应变阈值。所以,以后研究煤岩蠕变时仅考虑长期强度是不够的,还应该分析应变阈值。

为得到蠕变-渗流的耦合规律,大部分学者是通过试验观察蠕变过程中应变和渗透率的变化规律,采用最小二乘法或均差法等数学手段得到轴向应变和渗透率的拟合关系式。但对其拟合模型的适用情况(常规三轴试验或真三轴试验)及工程应用领域尚未给出一个清晰的交代。在前人的研究基础上,作者结合试验结果,借助裂隙场这一桥梁,基于Kozeny-Carman公式,假设蠕变过程中煤样发生骨架变形和孔隙变形最终表现在孔隙体积的变化,得到了蠕变与渗流的数学模型,通过多组试验验证,模型应用效果十分显著。

同时,本文存在一定的缺陷或不足,受试验条件所限,未能进行真三轴蠕变试验,只进行了常规三轴应力试验。但考虑了瓦斯压力对蠕变-渗流试验的影响,进行了多组不同瓦斯压力下的试验,试验的可重复性较好。由于不同瓦斯压力下的蠕变和渗流演化规律一致,受篇幅所限只列举了其中3组试验结果。本文提出的煤岩蠕变-渗流耦合模型经过常规三轴试验验证,能反映出蠕变过程中渗透率的变化规律,后续可通过真三轴试验进行验证。另外,测得的是型煤煤样轴向应变的演化规律,后续可进一步观察原煤煤样蠕变-渗流过程中轴向应变和径向应变的演化规律,从而为瓦斯抽采、预防煤与瓦斯突出等工程实践提供必要的资料。

5 结论

1)煤岩发生失稳破坏时应同时具备两个条件:应力超过长期强度,应变大于应变阈值。预防煤岩失稳破坏时,应该同时考虑长期强度和应变阈值这两个因素。

2)常规三轴蠕变-渗流试验过程中煤体内部孔隙或微裂隙先后经过两次变化:煤体受三轴应力压缩,孔隙或微裂隙压密,瓦斯流动通道受阻渗透率减小;煤体临近加速蠕变或破坏变形过程中,孔隙或微裂隙增生扩展,瓦斯通道贯通渗透率增大。煤岩受三轴应力作用发生蠕变时,渗透率变化异常预示着煤岩很有可能会发生煤岩失稳破坏、煤与瓦斯突出等灾害,能为工程实际提供参考资料。

3)本文提出的渗透率与应变的数学公式,经常规三轴蠕变-渗流试验结果验证可靠,可以体现蠕变-渗流耦合关系。能为深部开采应力场-裂隙场-渗流场耦合研究提供一定的参考价值。

4) 本文提出的渗透率与应变的数学公式,是基于Kozeny-Carman公式进一步假设和推理得到的,发现与型煤试验结果相吻合。但考虑到原煤内部孔隙结构及其不均匀性,在推广应用于原煤前有必要先进行试验验证,将会对此进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈占清.采动岩体蠕变与渗流耦合动力学[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] Xie Heping.Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J].Advanced Engineering Sciences,2017,49(2):1-16.[谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.]
- [3] Li Shiping,Li Yushou,Wu Zhenye.Permeability-strain equation for corresponding stress-strain process of rock[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1995,17(2):13-19.[李世平,李玉寿,吴振业.岩石全应力应变过程对应的渗透率-应变方程[J].岩土工程学报,1995,17(2):13-19.]
- [4] Ran Qiquan,Li Shilun.Study on dynamic model of physical parameters in numerical simulation of fluid-solid coupling reservoir[J].Petroleum Exploration and Development,1997,24(3):61-65.[冉启全,李士伦.流固耦合油藏数值模拟中物性参数动态模型研究[J].石油勘探与开发,1997,24(3):61-65.]
- [5] Xu Jiang,Peng Shoujian,Tao Yunqi,et al.Experimental analysis of influence of creep on permeability of gas-bearing coal[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(11):2273-2279.[许江,彭守建,陶云奇,等.蠕变对含瓦斯煤渗透率影响的试验分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(11):2273-2279.]
- [6] Yan Yan,Wang Enzhi,Wang Sijing,et al.Study of seepage-rheology coupling experiment of rocks[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,31(7):2095-2103.[阎岩,王恩志,王思敬,等.岩石渗流-流变耦合的试验研究[J].岩土力学,2010,31(7):2095-2103.]
- [7] Xu Weiya,Wang Rubin,Wang Wei,et al.Creep properties and permeability evolution in triaxial rheological tests of hard rock in dam foundation[J].Journal of Central South University,2012,19(1):252-261.
- [8] Chen Liang.Research on failure strain and permeability evolution of the coal ahead of working face and its application[D].Beijing:China University of Mining & Technology (Beijing),2016.[陈亮.工作面前方煤体变形破坏和渗透率演化及其应用研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.]
- [9] Wang Dengke,Peng Ming,Wei Jianping,et al.Development and application of tri-axial creep-seepage-adsorption and desorption experimental device for coal[J].Journal of China Coal Society,2016,41(3):644-652.[王登科,彭明,魏建平,等.煤岩三轴蠕变-渗流-吸附解吸试验装置的研制及应用[J].煤炭学报,2016,41(3):644-652.]
- [10] Yang Hongwei,Xu Jiang,Nie Wen,et al.Experimental study on creep of rocks under step loading of seepage pressure[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(9):1613-1619.[杨红伟,许江,聂闻,等.渗流水压力分级加载岩石蠕变特性研究[J].岩土工程学报,2015,37(9):1613-1619.]
- [11] He Feng,Wang Laigui,Wang Zhenwei,et al.Experimental study on creep-seepage coupling law of coal (rock)[J].Journal of China Coal Society,2011,36(6):930-933.[何峰,王来贵,王振伟,等.煤岩蠕变-渗流耦合规律试验研究[J].煤炭学报,2011,36(6):930-933.]
- [12] Cao Yajun,Wang Wei,Xu Weiya,et al.Permeability evolution of low-permeability rocks in triaxial creep tests [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(Supp 2):3822-3829.[曹亚军,王伟,徐卫亚,等.低渗透岩石流变过程渗透演化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增2):3822-3829.]
- [13] Liu L,Xu W Y,Wang H L,et al.Permeability evolution of granite gneiss during triaxial creep tests[J].Rock Mechanics & Rock Engineering,2016,49(9):1-8.
- [14] Jiang Zongbin,Jiang Annan,Li Hong.Creep-seepage coupling laws of quartzite under cyclic loading-unloading conditions[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(10):1832-1841.[江宗斌,姜谔男,李宏,等.加卸载条件下石英岩蠕变-渗流耦合规律试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(10):1832-1841.]
- [15] Wang Chunbo,Ding Wenqi,Liu Shubin,et al.Analysis of dynamic changes of anisotropic permeability coefficient with volumetric strain in seepage coupling[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(Supp 1):3015-3021.[王春波,丁文其,刘书斌,等.各向异性渗透系数随应变场动态变化分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增1):3015-3021.]
- [16] Xie Heping,Zhang Zetian,Gao Feng,et al.Stress-fracture-seepage field behavior of coal under different mining layouts[J].Journal of China Coal Society,2016,41(10):2405-2417.[谢和平,张泽天,高峰,等.不同开采方式下煤岩应力场-裂隙场-渗流场行为研究[J].煤炭学报,2016,41(10):2405-2417.]
- [17] Danesh N N,Chen Z,Aminossadati S M,et al.Impact of creep on the evolution of coal permeability and gas drainage performance[J].Journal of Natural Gas Science & Engineering,2016,33:469-482.
- [18] Liu Z B,Shao J F,Liu T G,et al.Gas permeability evolution mechanism during creep of a low permeable claystone[J].Applied Clay Science,2016,129:47-53.
- [19] Yin Guangzhi,Wang Dengke,Zhang Dongming,et al.Test

- analysis of deformation characteristics and compressive strengths of two types of coal specimens containing gas[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(2):410-417.[尹光志,王登科,张东明,等.两种含瓦斯试样变形特性与抗压强度的试验分析[J].*岩石力学与工程学报*,2009,28(2):410-417.]
- [20] Lin Baiquan,Zhou Shining.Experimental investigation on the permeability of the coal samples containing methane[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 1987(1): 21-28.[林柏泉,周世宁.试样瓦斯渗透率的试验研究[J].*中国矿业大学学报*,1987(1):21-28.]
- [21] Zhao Yangsheng,Hu Yaoqing.The experimental study of the gas seepage law of rock related to adsorption under 3D stresses[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,1999,18(6):651-653.[赵阳升,胡耀青.三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,1999,18(6):651-653.]
- [22] Sun Peide.Testing study of coal specimen permeability during solid deformation process[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2001,20(Supp 1):1801-1804.[孙培德.变形过程中试样渗透率变化规律的试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2001,20(增1):1801-1804.]
- [23] 谢和平,陈忠辉.岩石力学[M].北京:科学出版社,2004.
- [24] Yan Yan.Creep test of rock under seepage and study of creep equation with variable parameters[D].Beijing:Tsinghua University,2009.[阎岩.渗流作用下岩石蠕变试验与变参数蠕变方程的研究[D].北京:清华大学,2009.]
- [25] Xu Huining,Pang Xibin,Xu Jin,et al.Study on triaxial creep test of silty mudstone[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2012,44(1):69-74.[徐慧宁,庞希斌,徐进,等.粉砂质泥岩的三轴蠕变试验研究[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2012,44(1):69-74.]
- [26] Zhang Zunguo,Cao Shugang,Guo Ping,et al.Comparison of the deformation characteristics of coal in gas adsorption process for raw and briquette coals[J].*Journal of China University of Mining & Technology*,2014,43(3):388-394.[张遵国,曹树刚,郭平等.原煤和型煤吸附-解吸瓦斯变形特性对比研究[J].*中国矿业大学学报*,2014,43(3):388-394.]
- [27] Wan Wen,Wang Min,Zhao Yanlin.Fluid-solid coupling experimental study on damage bedded rock salt[J].*Journal of Central South University(Science and Technology)*,2016,47(7): 2341-2346.[万文,王敏,赵延林.损伤层状盐岩蠕变-渗透的流固耦合试验研究[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2016,47(7):2341-2346.]
- [28] Jiang C,Duan M,Yin G,et al.Experimental study on seepage properties,AE characteristics and energy dissipation of coal under tiered cyclic loading[J].*Engineering Geology*, 2017,221:114-123.
- [29] Cao Shugang,Xian Xuefu.Experimental study of rock creep damage characteristics of coal[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2001,20(6):817-821.[曹树刚,鲜学福.煤岩蠕变损伤特性的试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2001,20(6):817-821.]
- [30] 耶格.岩石力学基础[M].北京:科学出版社,1981.
- [31] 孔祥言.高等渗流力学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1999.
- [32] Xu Jiang,Li Bobo,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.[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.]

(编辑 李轶楠)

引用格式: Li Xiangchun,Zhang Liang,Zhao Yiliang.Evolution of gas-filled coal creep-seepage under conventional triaxial compression[J].*Advanced Engineering Sciences*,2018,50(4):55-62.[李祥春,张良,赵艺良.常规三轴压力下含瓦斯煤蠕变-渗流演化规律[J].*工程科学与技术*,2018,50(4):55-62.]