

DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2018.03.010

煤与页岩渗透性对比实验研究

刘浩¹, 侯吉峰¹, 姜永东², 赵丽娟¹

(1.山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同 037000; 2.重庆大学 资源环境科学学院, 重庆 400000)

摘要: 利用常规三轴渗流模拟实验装置, 对煤和页岩的渗流规律进行了研究。实验表明: 页岩样的渗透率要比煤样低3个数量级上, 为了将两者进行对比, 引入渗透率变化比 I , 这样就可以在同一幅图中显示两者的差异。研究进一步指出: 煤、页岩的渗透率变化规律具有相同趋势, 两者的渗透率变化与岩石的变形特性匹配, 在弹性阶段和塑性扩展阶段之间存在渗透率极小值点, 两者的渗透率随围压的增加呈负指数关系递减, 煤的衰减幅度和衰减速率均大于页岩, 随孔隙压力的增加呈指数形式增大, 但页岩对气体压力更敏感。

关键词: 煤; 页岩; 渗流; 渗透率变化比; 围压

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 1003-496X(2018)03-0036-04

Experimental Comparison Study on Permeability of Coal and Shale

LIU Hao¹, HOU Jifeng¹, JIANG Yongdong², ZHAO Lijuan¹

(1.College of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037000, China; 2.College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400000, China)

Abstract: The seepage laws of coal and shale were studied by means of the conventional triaxial seepage simulation test. The experimental results showed that the permeability of shale sample is three orders of magnitude lower than that of coal sample. In order to compare the two, we introduce the permeability change ratio I , so that the difference between the two can be shown in the same picture. Based on these results, we suggested that the permeability of coal and shale has the same trend, the permeability variation of the two samples matches with the deformation characteristics of the rock and there is a minimum permeability point between the elastic phase and the plastic expansion phase, the permeability decreases with the increasing of confining pressure, but the attenuation amplitude and decay rate of coal are both higher than that of shale, and it also increases exponentially with the increase of the pore pressure, on the contrary, shale is more sensitive to gas pressure.

Key words: coal; shale; seepage; permeability change ratio; confining pressure

随着油气资源量需求的日益增加, 非常规油气藏已成为中国能源战略的重要组成部分。近年来研究^[1-5]表明: 中国煤层气资源潜力巨大, 在山西南部沁水盆地已实现商业开发; 邹才能等首次在该页岩气储层中发现纳米级孔隙, 四川盆地东部下志留统龙马溪组页岩被认为是中国页岩气勘探的最重要层位之一。张明剑^[6]针对豫西“三软”煤层透气性低的实际情况, 通过采取射流钻割技术, 研究解决瓦斯抽放效果差、生产接替紧张等问题。袁梅^[7]通过三轴渗流试验得出: 当有效应力、温度和试件两端压差恒定时, 渗透率以指数关系随着间隙气压的增加而下降; 当有效应力、温度和间隙气压恒定时, 渗透率随着两端压差的增大而减少。许多学者对煤、页

岩的渗流特性作出了研究^[8-11], 但关于两者渗透规律差异的研究较少。因此采用多场耦合渗流装置测试了煤、页岩试样在应力、气压耦合作用下的渗流规律, 实验研究结果为非常规气藏的开采提供科学依据。

1 渗透率测试实验

1.1 实验设备

试验采用重庆大学的常规三轴渗流系统, 该装置由围压系统、轴向加载系统、气体供给系统、测量系统等部分组成。围压采用电动液压泵加压, 围压最大可达 8 MPa, 压力仪表最小刻度 0.05 MPa, 最大轴向载荷为 200 kN, 精度为 0.5 kN, 试件轴向变形采用百分表测试; 气体由高压甲烷气瓶经减压阀供给, 最大气压力 5 MPa, 精度 0.1 MPa; 甲烷流量采用

气体流量计测定,甲烷气渗流实验装置如图 1。

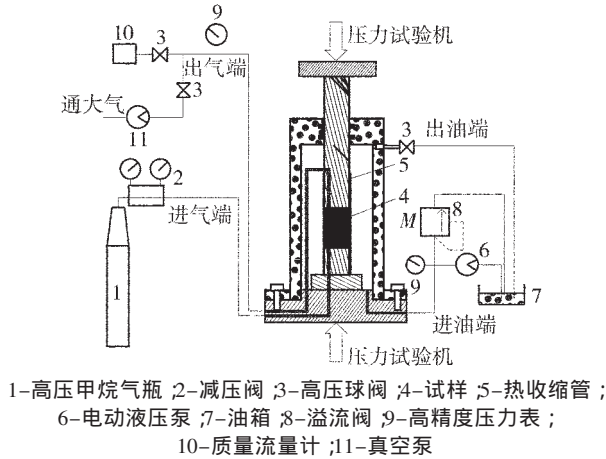


图 1 甲烷气渗流实验装置示意图

1.2 实验方法

1) 将试件与压头用热收缩管密封,放入三轴压力室内,拧紧缸体上的螺栓。

2) 开启液压泵向压力室内注油以排出空气,关闭出油阀,将轴压、围压加载至初始值。

3) 启动真空泵,对试样进行抽真空,持续时间不少于 4 h。

4) 打开进气阀,关闭出气阀,调整气压阀开关位置,使高压钢瓶中的甲烷以预定压力流过试件,直到试件吸附甲烷并达到平衡,吸附时间一般为 5 h。

5) 打开出气阀,测定该应力状态下的稳定流量。

6) 逐级施加下一级载荷,重新测量相应的稳定流量(条件 1:恒定气体压力,试件受力状态变化);或逐级减小进气阀压力,同时打开出气阀排除多余气体,稳定 30 min 左右,重新测量相应的稳定流量(条件 2:恒定试件受力状态,气体压力变化)。

7) 重复步骤 6),记录实验过程中应力、应变值,直至实验结束。不同的实验条件下渗透率实验需要重复 2~3 试件。

2 实验结果与分析

2.1 实验数据处理

气体渗透率的计算:孔隙-裂隙介质的渗透能力取决于流动方向上的孔隙、裂隙数量、宽度及连通性和孔隙、裂隙两端的压差。孔隙、裂隙的渗透率可用流体通过狭缝的层流流动方程导出。由于气体具有可压缩性,渗透率 K 计算如下:

$$K = \frac{2Qp_a\mu L}{A(p_1^2 - p_2^2)} \quad (1)$$

式中 K 为试样渗透率, $0.001 \mu\text{m}^2$; Q 为试样气体的流量, cm^3/s ; μ 为气体黏性系数,取常数 $1.08 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; L 为试样长度, cm ; A 为试样横截面面积, cm^2 ; p_a, p_1, p_2 分别为大气压力、进气口、出气口的压力, MPa 。

通过对实验数据进行分析:此次选用煤试样的气体渗透率一般介于 $1 \times 10^{-13} \sim 10 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 之间,页岩的气体渗透率则为 $1 \times 10^{-16} \sim 10 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 。渗透率的数量级具有明显的差异,为了便于 2 类试样的数据对比,引入渗透率变化比 I ,即:

$$I = \frac{K_i}{K_0} \quad (2)$$

式中 K_i 为所受载荷或进气压力改变时,试样的绝对渗透率, m^2 ; K_0 为选取相应的初始载荷或初始进气压力条件下,试样的绝对渗透率, m^2 。

2.2 实验结果

2.2.1 试件变形特性

在三轴加载条件下,煤、页岩渗透率随应变变化关系如图 2。

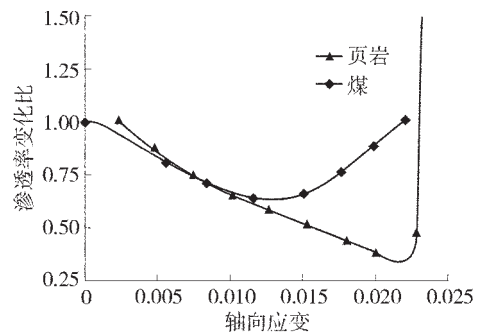


图 2 煤、页岩的渗透率随应变变化关系曲线

从整体上看两者的曲线形态具有同一性,随着试件应变不断增加,煤和页岩的渗透率都有先减小后增大的趋势;进一步分析表明:①两者渗透率受影响的程度不同,煤试样从刚开始加载到直至试件破坏前其渗透率有极小值,其值约为初始渗透率的 62.8%,而页岩对应的渗透率极值点只有 32.4%;②2 条曲线都表现出相对渗透率的下降段(曲线前半段)较其增加段(曲线后半段)范围大,加载过程中页岩渗透率增加段与煤相比不明显,区间更窄。

通过煤和页岩的三轴应力应变曲线分析,两者在整个过程中都经历岩石变形中的初始压密、弹性变形、塑性扩展和应变软化 4 个阶段,但在各阶段力学特性差异明显:首先,在应力方面页岩的三轴抗压强度为 62 MPa,而煤仅为 24 MPa;其次,页岩的压

密阶段不明显,这主要是试样原始孔隙相对较少;弹性阶段页岩应力应变曲线斜率大于煤,而且页岩此阶段应变范围也比煤广,说明此页岩试样弹性模量大于煤,更多的呈现弹脆性特征,煤试样在第3阶段应变范围增大,表现出比页岩更强的塑性特征。煤和页岩的应力应变关系如图3。

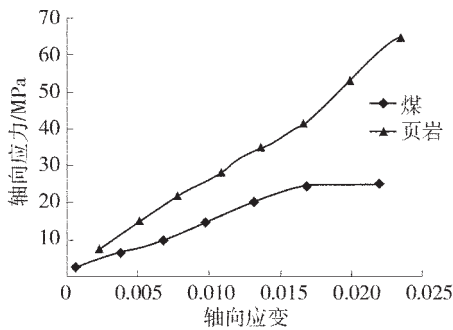


图3 煤和页岩的应力-应变关系曲线

2.2.2 围压的影响

保持轴压和进气阀压力不变,逐级增大试件围压,得到的渗透率随围压变化曲线如图4。

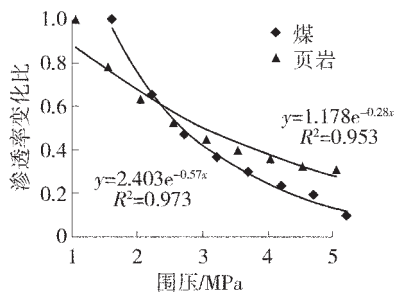


图4 煤和页岩的渗透率随围压变化关系曲线

从图4中可以看出:无论煤还是页岩其渗透率随有效围压的增加而呈负指数形式递减,两者的拟合程度都很高,说明指数函数很好的反映了渗透率与围压的非线性关系,但2条曲线的斜率不同,并产生了交叉点,页岩斜率变化相对平缓。试件围压从1 MPa增加到5 MPa的过程中,煤的相对渗透率从100%降低到9.8%,页岩则由初始渗透率降到原来的31.6%,煤与页岩相比,煤对围压的响应更显著。渗透率随围压的增大而减小的事实,说明围压主要通过改变孔裂隙闭合程度来影响岩石的渗透能力,围压越大,试件中原有的孔隙被压实,气体能通过的有效断面减小,渗透率降低。

2.2.3 孔隙压力的影响

煤、页岩试件在保持轴压和围压不变的条件下,

改变通过试样的气体压力,得到的渗透率随孔隙压力变化曲线如图5。

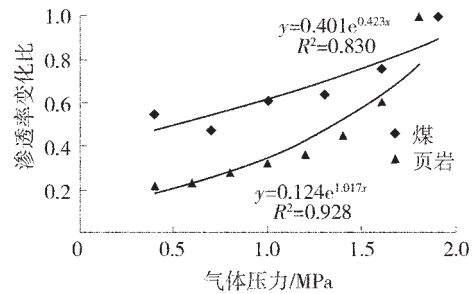


图5 煤和页岩渗透率随孔隙压力变化曲线

随着孔隙压力的增加,两者的渗透率均有不同程度的提高,煤的相对渗透率变化范围为0.55~1,而同等条件下页岩渗透率变化更大,变化范围为0.22~1,增大了5倍之多。从拟合效果来看,拟合曲线采用指数函数能比较理想的反映渗透率与孔隙压力的关系,相关系数 R 均大于91%;与围压的拟合曲线相比,相关系数较低的原因是孔隙压力对渗透率的影响还应考虑有效应力系数,该系数并非定值,在不同实验条件下会发生变化。

2.3 讨论分析

结合煤与页岩的变形特性可以看出:试样渗透率与应变曲线的形态与岩石变形的4个阶段有明显的正相关性,由于渗透率的大小取决于试件中孔裂隙规模和其连通程度,在应力应变曲线的弹性阶段中,随着有效应力增大,试件内部原生的孔隙裂隙收缩(乃至闭合)占主导地位,渗透率逐渐降低,当应力超过其弹性极限时,塑性变形达到一定程度后,会产生新的裂隙并促使其不断发展,并在一定程度上贯通,成为主要因素,试件的渗透率因而又出现拐点,持续增加。页岩与煤变形特性的差异性导致了图2中煤的渗透率曲线呈近似对称的下凹型,而页岩则表现为“簸箕型”。

在开采非常规天然气的过程中,通过水力压裂提高油气藏采收率已成为普遍共识。其核心是在目的岩(煤)层中产生若干组裂隙,压裂结束后尽管孔隙压力降低,然而支撑剂的存在有效地阻止了新裂隙的闭合,堆叠的砂粒之间仍然存在剩余的间隙,它将构筑起运移的新通道,水和甲烷分子可以自由通过,直接导致气井产量的增加。但由于砂粒堆叠和新裂隙周围岩石组成的“稳定结构”,裂隙的围岩压力通过充填其中的砂子传递,促使孔隙、裂隙周围的围压不起作用(此时可认为运移通道上的围压已

降低至接近0),从而保证运移通道的渗透能力最大,为实现高产稳产提供必要条件。从图2~图4还可以看出,压裂页岩层需要更大的水压力,相同工艺条件下压裂后页岩储层的改造程度要比煤层理想,渗透率变化比显著提高,渗透率明显增大。

生产气井在排采过程中,通过排水降低储层内的孔隙压力,使甲烷不断解吸,最终运移到井筒中,在距离井筒较近的地方水压衰减较快,距离愈远衰减减小,直至储层压力与临界解吸压力相当,煤中甲烷吸附解吸平衡,排采半径正相关于储层的压降,因此降低井筒内的水压是增大排采半径的有效途径。但从前面的分析可以看出,随着孔隙压力的降低,储层的渗透率呈指数形式下降,而渗透率的大小直接关系到流体渗流的效率,渗透率过小,单位时间内的产气量有限,以至于不能获得工业气流。为了获得最佳的产气效益,需要平衡这2方面的矛盾,合理控制储层压力衰减是必要的。

3 结论

1)煤、页岩的渗透率变化曲线总体上具有一致性,但由于2种材料的弹性模量和孔隙度差异,两者的渗透率相差3~5个数量级。

2)两者的渗透率变化与岩石变形特性匹配,在弹性阶段和塑性扩展阶段之间存在渗透率极小值点。

3)两者的渗透率随围压的增加呈负指数关系递减,煤的衰减幅度和衰减速率均大于页岩;随孔隙压力的增加呈指数形式增大,但页岩对气体压力更敏感。

4)通过实验结果讨论得出:页岩储层压裂效果要好于煤层,同时应尽可能降低裂隙、孔隙的围岩压力,保证储层压力衰减梯度适宜,使气井获得最佳经济产气量。

参考文献:

- [1] 王红岩,李景明,赵群,等.中国新能源资源基础及发展前景展望[J].石油学报,2009,30(3):469-474.
- [2] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等.中国页岩气研究现状与发展趋势[J].石油学报,2010,31(4):689-694.
- [3] 邹才能,朱如凯,白斌,等.中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J].岩石学报,2011,27(6):1857-1864.
- [4] 王怀勤,朱炎铭,李伍,等.煤层气赋存的两大地质控制因素[J].煤炭学报,2011,36(7):1129-1134.
- [5] 刘树根,马文辛,LUBAJansa,等.四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J].岩石学报,2011,27(8):2239-2252.
- [6] 张明剑.“三软”低透气性煤层高压水射流钻割卸压增透技术[J].煤矿安全,2011,42(9):33-38.
- [7] 袁梅,李波波,许江,等.不同瓦斯压力条件下含瓦斯煤的渗透特性试验研究[J].煤矿安全,2011,42(3):1-4.
- [8] 杨小鹏.负压抽采条件下孔隙率对动态加载构造煤渗透率影响的实验研究[J].煤矿安全,2016,47(9):4.
- [9] Javadpour F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone)[J]. JCPT, 2009,48(8):15-21.
- [10] 李治平,李智锋.页岩气纳米级孔隙渗流动态特征[J].天然气工业,2012,32(4):50-53.
- [11] 彭凯,宁正福,王桂丽.页岩气藏双重介质渗流模型研究[J].重庆科技学院学报,2012,14(1):8-11.

作者简介:刘浩(1988—),男,山西晋城人,助教,硕士,主要从事非常规天然气开发及利用研究工作。

(收稿日期:2017-02-10;责任编辑:王福厚)

(上接第35页)

- [6] 张少春,张杰,肖永福.保水采煤合理推进距离实验研究[J].陕西煤炭,2005(1):17-19.
- [7] 段王拴.富水覆岩综放开采工作面透水机理及控制技术研究[D].西安:西安科技大学,2010.
- [8] 魏义强.大采深条件下采煤活动引起的覆岩移动变形及破坏规律研究[D].太原:太原理工大学,2010.

作者简介:陈卓立(1993—),男,广西梧州人,大连大学在读硕士研究生,主要从事采矿工程、地下工程岩体稳定性方面研究。

(收稿日期:2017-05-18;责任编辑:陈洋)

