

文章编号:1000-582X(2010)09-074-05

煤样初始内部结构对瓦斯流动特性的影响

赵洪宝^{1a,b}, 尹光志²

(1. 中国矿业大学(北京) a. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室; b. 资源与安全工程学院, 北京 100083;
2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘要:以组成不同的3种煤样为研究对象,采用密度计算法、扫描电镜等对其内部结构进行了研究,并采用自行研制的三轴瓦斯渗流仪对其内部的瓦斯流动特性进行了试验研究。结果表明:相同条件下由不同煤粉制备的型煤试件内部结构不同,但煤粉颗粒直径对煤样内部结构影响并非线性;煤样全应力-应变过程中瓦斯流动特性复杂,总体呈先减小后增加趋势,且煤样初始瓦斯流动速度小于煤样破坏后的流动速度,瓦斯流动特性表现出明显的滞后性;煤样内部结构对其内的瓦斯流动特性影响呈非线性;煤样组成对其内瓦斯流动影响的应力状态的敏感性很强,煤样初始结构越复杂,对轴向载荷敏感性越差,而对围压的敏感性越强。

关键词:内部结构;瓦斯流动;围压;敏感度

中图分类号:TU452

文献标志码:A

The influence of initial-internal structure of coal sample on gas flow characteristic

ZHAO Hong-bao^{1a,b}, YIN Guang-zhi²

(1a. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining; b. School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, P. R. China;
2. College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Three kinds of coal samples with different components are chosen as study objects. Density calculation and SEM are adopted to study their internal structures, and a self-made triaxial gas seepage instrument is used to study their internal gas flow characteristics. The results show that internal structures of coal samples made of different particle size coal powders under identical external conditions are various, and nonlinearity is presented on the influence caused by fabric. Gas flow characteristic is complex in complete stress-strain process, generally it firstly increases and then decreases, initial gas flow velocity is lower than the one after the failure of coal sample, and obvious hysteretic nature of gas flow characteristic is showed. The influence of gas flow characteristic caused by initial-internal structure of coal sample is nonlinear and the stress-sensitivity is high on the influence of gas flow characteristic caused by initial-internal structure. The more complex the initial-internal structure of the coal sample is, the lower the axial stress-sensitivity is, and the higher the confining pressure-sensitivity is.

Key words: internal structure; gas flow; confining pressure; sensitivity

收稿日期:2010-04-10

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50834005);国家自然科学基金资助项目(50874124)

作者简介:赵洪宝(1980-),男,博士,主要从事岩石力学与安全工程方向的研究,(E-mail)hongbaozhao@126.com。

煤与瓦斯突出灾害发生时,大量的瓦斯将从煤体内的孔隙、裂隙结构涌出^[1];现代矿井为了实现煤与瓦斯双能源开采,也趋于利用采动对煤体结构产生的影响增加瓦斯能源的采出率。因此,研究构造煤体,特别是内部结构不同的煤体内瓦斯流动特性,将对煤与瓦斯突出灾害机理的认识和煤与瓦斯双能源的开采产生重要的理论指导意义。

国内外对煤体的渗透特性研究较多,但多集中在水在破碎煤体中的渗透特性和峰前煤体瓦斯渗透特性、数值模拟和瓦斯在煤样内的渗流特性研究等方面^[2-10],如张杰分析了浅埋煤层中应力场与渗流场的相互影响规律^[11];庞义辉、张勇等分析了承压水渗流过程中的影响因素^[12];易俊等研究了利用声场促进煤层气渗流的应力-温度-渗流压力场的流固耦合动态模型^[13];尹光志等研究了地应力对煤体内瓦斯渗流特性的影响^[14];赵洪宝等研究了煤体应力状态与其内瓦斯流动速度的耦合关系^[15-16]。但均未涉及煤样内部初始结构不同对其内的瓦斯流动特性影响。因此,利用组成结构不同的3种型煤试件,通过扫描电镜研究了其内部结构的差异,并对其内部结构不同对瓦斯流动特性的影响进行了研究,研究结果对煤与瓦斯双能源共采具有一定的理论指导意义。

1 试验设备及方法

为了进行初始内部结构不同的煤体内瓦斯流动特性试验研究,研制开发了“三轴瓦斯渗流仪”,其实现气体渗流部分原理图如图1。试验前先对煤样进行抹硅橡胶和包裹热缩管处理,目的是防止提供围压的液压油浸入煤样和煤样内的瓦斯沿煤样侧壁溢出。试样准备及煤样处理如图2所示。

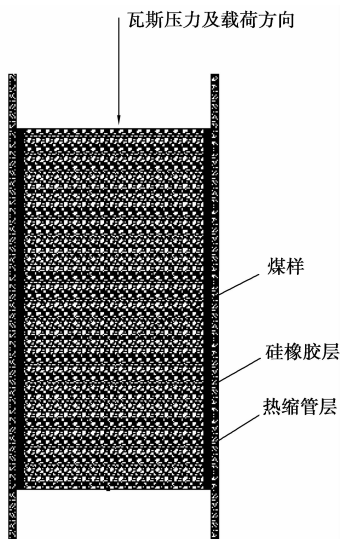


图1 试验原理

为检验试验前后硅橡胶层是否破裂,试验后小心打开热缩管层,对试验前后硅橡胶层进行对比分析,发现硅橡胶层完好,证明实验过程中瓦斯气体确实从煤样中通过。试验时,按试验设计要求安装好煤样试件,分别进行相同瓦斯压力、围压下由粒径20~40目、40~60目、60~80目煤粉经相同条件加压成型制得的煤样试件内瓦斯流动特性实验研究。试件装备好后,持续通瓦斯24h,目的是使煤样内瓦斯充分吸附。



(a) 试件

(b) 试验前后对比

图2 试样准备

3 煤样结构分析

为了模拟煤样不同结构对其内瓦斯流动特性的影响,采用不同煤粉经加压成型制得标准煤样试件,尺寸为: $\phi=50\text{ mm}$ 、 $L=100\text{ mm}$ 。为了查明其内部结构的差异,首先对制得的煤样试件烘干24h后进行称重处理,计算每种试件的平均密度,3种试件的平均密度如表1所示。

表1 3种煤样的组成参数

组成煤样	几何尺寸	重量/g	平均密度
煤粉粒径/目	/(mm×mm)		/(g·cm ⁻³)
20~40(X1)	48.0×100.0	194.0	1.072 6
40~60(X2)	49.0×99.0	214.6	1.150 1
60~80(X3)	50.0×101.0	246.2	1.242 1

由表1可知,随着组成煤样煤粉粒径的增加,煤样的平均密度呈减小趋势,因此可以断定,由粒径较大煤粉组成的煤样,试件内部的孔隙、裂隙结构将更加复杂,且其裂隙、孔隙体积将更大。

为了证明煤样内孔隙、裂隙结构的差异,对煤样试件进行了电镜扫描试验,如图3。从图中可以看出,组成煤样的颗粒越大,煤样内的孔隙、裂隙越多,且孔隙、裂隙的张开程度越大;而由细粒组成的煤样试件,孔隙、裂隙结构较少且张开程度也较小。

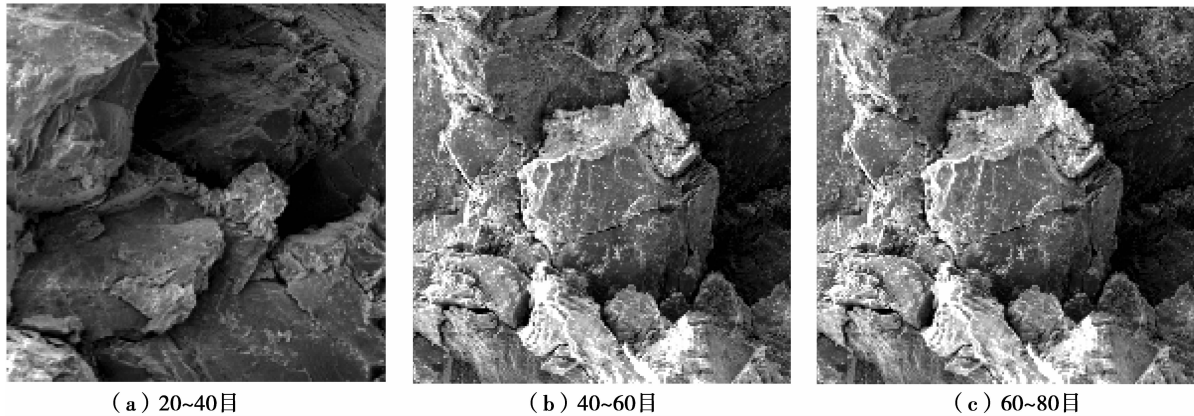


图 3 煤样电镜扫描

3 煤样内瓦斯流动特性试验

因处于屈服阶段后的结构煤体内部可能形成了宏观瓦斯流动通道,此时煤样内的瓦斯流动既包括瓦斯渗流又包括瓦斯宏观流动,因此采用瓦斯流动速度作为煤样内瓦斯流动特性的研究参数,分别研

究不同煤样内瓦斯流动速度变化特性^[11]。

3.1 煤样全应力-应变过程中瓦斯流动规律

为了研究煤样结构对瓦斯流动特性的影响,首先进行了煤岩全应力-应变过程中的瓦斯流动特性研究。根据试验数据,得到图 4 曲线。

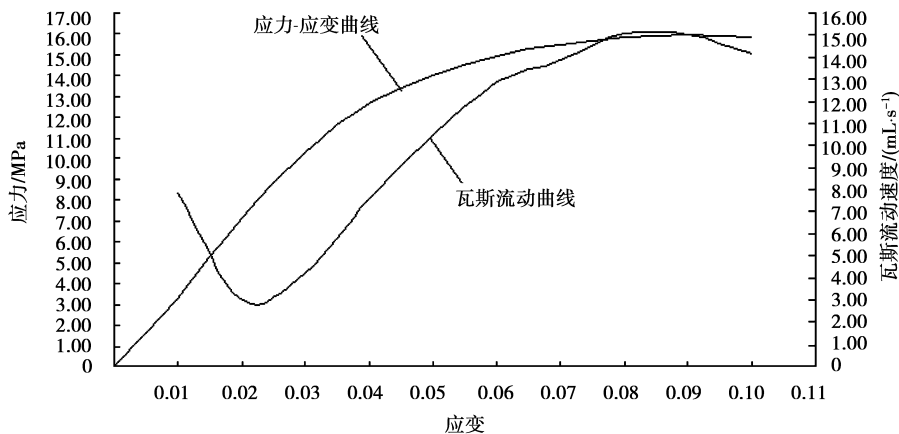


图 4 煤样全应力应变过程的瓦斯流动特性(围压 3.00 MPa)

在煤样的全应力应变各阶段里,煤样内的瓦斯流动特性较为复杂:

1) 压密阶段。此阶段里瓦斯流动速度呈少许下降趋势,但在此阶段的前期,瓦斯流动速度降低不明显;而后期瓦斯流动速度降低较大。这可能是采用的煤样试件为经过加压成型的型煤试件,其内部孔隙、裂隙结构相对较少,尽管煤样内部的初始孔隙、裂隙结构趋向闭合,但对整个煤样内的结构影响不大所致。

2) 线弹性阶段。瓦斯流动速度在进入此阶段少许的应力-应变点,出现流动速度最小点,为瓦斯流动困难应力点;越过此点后,煤样内的瓦斯流动速度

也呈现线性增加趋势。这可能是由于煤样内瓦斯流动过程较复杂,既包括了瓦斯压力作用下的游离瓦斯流动,又包括了吸附瓦斯的解吸产生的影响,因此表现出进入此阶段才出现瓦斯渗流困难应力点的特性;而线弹性阶段内的煤样结构和煤样固体的规律性变形,又是导致瓦斯流动规律性增加的原因。

3) 屈服阶段。此阶段里瓦斯流动速度变化规律表现为增速逐渐降低、逐渐趋向于最大值。煤样进入屈服阶段后,内部结构开始向出现宏观破坏发展,致使瓦斯流动通道变得通畅,瓦斯流动阻力变小;但由于煤样内的裂隙结构已接近宏观破坏,其变化程度也逐渐减小,因而导致瓦斯流动速度变化也逐渐减小。

4)峰值强度阶段。煤样达到峰值强度时,煤样宏观破裂形成,此时其内部瓦斯流动以宏观瓦斯流动占主导,瓦斯流动速度在峰值后达到最大。

5)峰后阶段。此阶段里瓦斯流动速度达到最大后,开始产生稍微的降低。可能是破坏后的煤样在继续施加的轴向位移、围压和热缩管的综合束缚作用下,又产生了轴向和侧向的压缩变形,致使煤样内的瓦斯流动通道恶化所致。

6)煤样全应力-应变过程中的瓦斯流动特性总体表现出了明显的滞后特性。

3.2 煤样组成对载荷敏感性

以位移控制方式,对相同围压作用下,不同组成煤样内瓦斯流动特性进行研究,得到了煤样轴向应力与煤样内瓦斯流动速度的关系曲线,如图5所示。

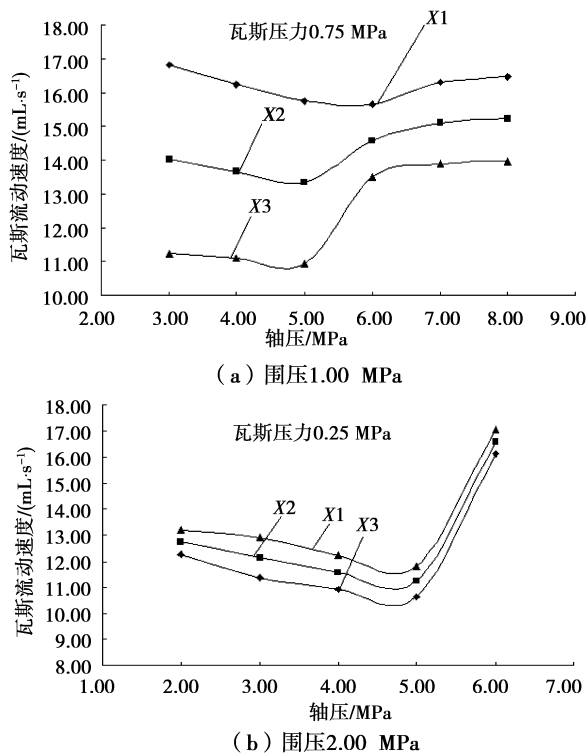


图5 不同煤样轴向应力与瓦斯流动速度关系

由图可知,内部结构不同煤样内的瓦斯流动特性对载荷敏感性较复杂:

1)在相同外界条件下,煤样内部孔隙、裂隙结构丰富的煤样内瓦斯流动速度越大。这可能是由于裂隙结构越丰富,其内部的瓦斯流动通道在相同的外界应力状态和内部瓦斯压力作用下越通畅所致。

2)在相同外界条件下,内部孔隙、裂隙结构越复杂的煤样,其内部瓦斯流动速度受到应力状态影响的程度越小,而结构简单的煤样内瓦斯流动对应力状态的依赖性更强。这可能是因为在受到较小应力

作用时,内部结构复杂的煤样变化较小,基本不影响煤样内的总结构;而煤样内结构较简单的煤样,即使微小的结构变化也可能导致瓦斯流动通道的相对较大变化。当在大的应力作用下,煤样内部开始形成宏观破坏,此时瓦斯流动通道主要是宏观破坏,而初始结构对其影响较小,而初始结构不复杂的煤样此时的内部结构发生了重大变化,造成瓦斯流动通道变化剧烈,导致瓦斯流动速度所受应力影响明显。

3)煤样的初始结构对煤样全应力-应变过程内的瓦斯流动速度影响并非线性。在达到煤样内瓦斯流动困难应力点前,煤样的初始结构对其内的瓦斯流动速度影响较大;越过此点后,煤样的初始结构对其内的瓦斯流动速度影响减小。这可能是由于瓦斯流动困难应力点前的瓦斯流动变化均是由于煤样初始结构的压密变化导致,故煤样的初始结构对此阶段的瓦斯流动影响很大;而瓦斯流动困难应力点后的瓦斯流动通道的变化则是由于煤样内部新的孔隙、裂隙结构发展、发育所致,特别是进入线弹性阶段以后的各阶段里,煤样内的结构大量为新形成的结构且占据煤样内部结构的主导地位,与煤样的初始结构关系不再密切,故而影响不明显。

4)煤样内的初始结构对瓦斯流动特性的影响随着作用围压的增加而减小。当围压较小时,煤样受到载荷作用产生轴向应变和侧向应变,由于围压的束缚作用较小,煤样的变形较容易,其内部孔隙、裂隙结构可以较自由的发展、发育,致使瓦斯流动通道的变化是在一个较大水平上发生的,致使其内部结构对瓦斯流动的影响更显著;在大的围压作用下,煤样受到轴向载荷和较大的侧向载荷的束缚作用,其内部结构均被压缩到一个极低的水平,致使煤样初始结构对煤样内瓦斯流动通道的影响减小,表现为围压越大,煤样结构对其内的瓦斯流动特性影响越不明显。

4 结 语

1)在相同的成型压力作用下制得的型煤试件,其内部孔隙、裂隙结构随着组成煤粒粒径的增大而增大,且此影响呈非线性关系。

2)煤样全应力-应变过程中其内瓦斯流动特性较为复杂。根据与全应力-应变曲线的对应关系可分为5个阶段;总体呈随应变的增加先减小后增加趋势,煤样的起始瓦斯流动速度小于煤样破坏后其内的瓦斯流动速度,且在整个过程中瓦斯流动表现出明显的滞后性。

3)煤样内屈服阶段后的瓦斯流动以宏观流动为

主,煤样固体颗粒内瓦斯渗流和孔隙间瓦斯渗流对破坏后煤样内瓦斯流动的影响较小。

4)煤样内的初始结构对其内的瓦斯流动影响较大,初始结构复杂的煤样内瓦斯流动速度维持在一个较高数值水平上,而结构较简单的煤样内瓦斯流动速度则较小,煤样初始结构对其内的瓦斯流动特性影响呈非线性。

5)煤样结构对其内瓦斯流动产生的影响对应力状态的敏感性较强。

参考文献:

- [1] 周世宁,林柏泉.煤矿瓦斯动力灾害防治理论及控制技术[M].北京:科学出版社,2007.
- [2] 杨彩红,王永岩,李剑光,等.含水率对岩石蠕变规律影响的试验研究[J].煤炭学报,2007,32(7):695-699.
YANG CAI-HONG, WANG YONG-YAN, LI JIAN-GUANG, et al. Testing study about the effect of different water content on rock creep law[J]. Journal of China Coal Society, 2007,32(7):695-699.
- [3] 马占国,缪协兴,陈占清,等.破碎煤体渗透特性的试验研究[J].岩土力学,2009,30(4):985-989.
MA ZHAN-GUO, MIU XIE-XING, CHEN ZHAN-QING, et al. Experimental study of permeability of broken coal [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4):985-989.
- [4] 李树刚,钱鸣高,石平五.煤样全应力应变过程中的渗透系数-应变方程[J].煤田地质与勘探,2001,29(1):22-24.
LI SHU-GANG, QIAN MING-GAO, SHI PING-WU. Permeability-strain equation relation to complete stress strain path of coal sample [J]. Coal Geology & Exploration, 2001,29(1):22-24.
- [5] 刘卫群.破碎岩体的渗流理论及其应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2002.
- [6] 李顺才,缪协兴,陈占清,等.承压破碎岩石非 Darcy 渗流的渗透特性试验研究[J].工程力学,2008,25(4):85-92.
LI SHUN-CAI, MIU XIE-XING, CHEN ZHAN-QING, et al. Experimental study on seepage properties of non-darcy flow in confined broken rocks [J]. Engineering Mechanics,2008,25(4):85-92.
- [7] 姜振泉,季梁军,左如松,等.岩石在伺服条件下的渗透性与应变、应力的关联性特征[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10):1442-1446.
JIANG ZHEN-QUAN, JI LIANG-JUN, ZUO RU-SONG, et al. Correlativity among rock permeability and strain, stress under servo-control condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(10):1442-1446.
- [8] KUO J K, YEN T S, CHEN C K. Improvement of performance of gas flow channel in PEM fuel cells[J]. Energy Conversion and Management, 2008,49(10):2776-2787.
- [9] BOUNO Y R, MIYAKE T, OHTSUKA T K. Study of the effects of gas flow channel and operating condition on the performance of polymer electrolyte fuel cell (PEFC)[J]. Memoirs of the Faculty of Engineering, Miyazaki University, 2005, 34 (1): 65-70.
- [10] ROYALL P G, CRAIG D Q M, READING M, et al. Development of gas-flow modulation for high-frequency MTDSC measurements [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2002,60(3):795-805.
- [11] 张杰.采场覆岩破坏流固耦合的数值模拟分析[J].采矿与安全工程学报,2009,29(3):313-319.
ZHANG JIE. Numerical simulation of liquid-solid coupling of overburden failure in mining stope [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2009,29(3):313-319.
- [12] 庞义辉,张勇.三维应力下岩石渗透率实验研究[J].采矿与安全工程学报,2009,29(3):367-371.
PANG YI-HUI, ZHANG YONG. Experimental study of rock permeability under triaxial compression[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, 29 (3): 367-371.
- [13] 易俊,姜永东,鲜学福,等.声场促进煤层气渗流的应力-温度-渗流压力场的流固动态耦合模型[J].岩土力学,2009,30(10):2945-2950.
YI JUN, JIANG YONG-DONG, XIAN XUE-FU, et al. A liquid-solid dynamic coupling model of ultrasound enhanced coalbed gas desorption and flow[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(10):2945-2950.
- [14] 尹光志,李晓泉,赵洪宝,等.地应力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12):2557-2561.
YIN GUANG-ZHI, LI XIAO-QUAN, ZHAO HONG-BAO, et al. Experimental research on effect of geostress on outburst coal's gas seepage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12):2557-2561.
- [15] 赵洪宝,尹光志,李小双.突出煤渗透特性与应力耦合试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增2):3357-3362.
ZHAO HONG-BAO, YIN GUANG-ZHI, LI XIAO-SHUANG. Test study on coupling relationship between permeability characteristics and stress of outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(S2):3357-3362.
- [16] 赵洪宝.含瓦斯煤失稳破坏及声发射特性的理论与实验研究[D].重庆:重庆大学,2009.

(编辑 赵静)