

文章编号: 1001-1986(2009)04-0006-03

# 瓦斯在煤基多孔介质中运移及煤与瓦斯突出机理

虎维岳<sup>1</sup>, 李 静<sup>1</sup>, 王寿全<sup>2</sup>

- (1. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西 西安 710054;  
2. 四川省煤炭产业集团有限责任公司, 四川, 成都, 610031)

**摘要:** 分析了瓦斯在煤基多孔介质中的运移条件; 推导和讨论了瓦斯在煤基多孔介质中运移扩散的基本方程和影响因素; 分析了煤与瓦斯突出产生的机理和渗透力学条件。提出瓦斯在煤基多孔介质中的运动是孕育煤与瓦斯突出的前提, 而瓦斯压力梯度与浓度梯度的存在是驱动瓦斯在多孔介质中运动的内动力; 煤与瓦斯突出的危险性主要取决于瓦斯压力梯度及其变化量的大小, 而和瓦斯的绝对压力大小没有直接关系。煤与瓦斯突出的条件是由煤基多孔介质中瓦斯压力梯度的大小和煤体固体骨架的抗剪强度大小所决定。低渗透性的构造煤因对瓦斯运移阻力较大而容易形成瓦斯压力梯度的增加, 从而更易于发生煤与瓦斯突出。

**关键词:** 多孔介质; 瓦斯运移; 压力梯度; 煤与瓦斯突出

中图分类号: TD712.51; P618.11 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2009.04.002

## The flowing and outburst mechanism of gas in coal-based pore and fractured medium

HU Weiyue<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, WANG Shouquan<sup>2</sup>

- (1. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China;  
2. Sichuan Coal Industry Group Limited Liability Company, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The paper analyzed the flowing conditions of gas in coal-based pore and fractured medium, discussed the basic movement equation of gas flow and diffusion in the pore and fractured medium as well as the main influence factors, analysed the coal and gas outburst mechanism and its dynamic conditions. It was recognized that gas flowing is the preliminary condition of coal and gas outburst, the gas pressure gradient is the basic force of coal and gas outburst. Coal and gas outburst was closely related to the gas pressure gradient instead of gas pressure. The coal and gas outburst conditions are mainly determined by gas pressure gradient and coal shear stress. It is easier to form coal and gas outburst in fractured coal due to its low permeability and high gas flowing resistance.

**Key words:** pore and fractured medium; gas flowing; pressure gradient; coal and gas outburst

### 1 瓦斯在煤基多孔介质中的运移条件

煤特别是被破坏比较严重的构造煤层是一种典型的结构性孔隙、构造裂隙和颗粒骨架所构成的多孔介质结构体, 其中结构性微细孔隙占总空隙的绝大多数, 而构造裂隙虽然较结构性孔隙要宽大很多, 但在总空隙中所占的体积比例则相对较小。在自然埋藏条件下, 煤中富含的大量瓦斯气体充填于这些孔隙和裂隙之中, 且在长期的地质历史过程中, 赋存于不同类型空隙中的瓦斯气体压力几乎相等, 由于压力平衡作用(不存在不同位置因瓦斯压力差异而引起的压力梯度), 赋存于不同空隙中的气体压力在各个方向相等, 如图 1 所示, 有:

$$P_x = P_y = P_z, \quad (1)$$

故瓦斯气体在各个方向的流动速度为零, 即:

$$V_x = V_y = V_z = 0. \quad (2)$$

当掘进巷道或开采工作面揭露煤层后, 在煤层的某个方向形成瓦斯自由逸散面, 赋存于煤层空隙中的瓦斯便从逸散面开始逸出, 从而造成逸散面附近煤层中瓦斯压力降低, 而且这种瓦斯压力降低逐渐由逸散面向煤层内部扩展, 形成了煤层中不同位置瓦斯压力的差异(图 2)。由于煤层中不同位置瓦斯压力的差异必然形成孔隙与裂隙介质中瓦斯的压力和浓度梯度, 正是这一梯度的存在才形成了驱动瓦斯在多孔介质中运移的动力, 从而使瓦斯在煤基多孔介质中产生运动。

收稿日期: 2008-09-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202200)

作者简介: 虎维岳(1963—), 男, 甘肃镇原人, 研究员, 博士, 博士生导师, 国家安全生产专家组成员, 享受国务院政府特殊津贴, 主要从事矿井水文地质、灾害地质等科学研究、教学与技术咨询工作。

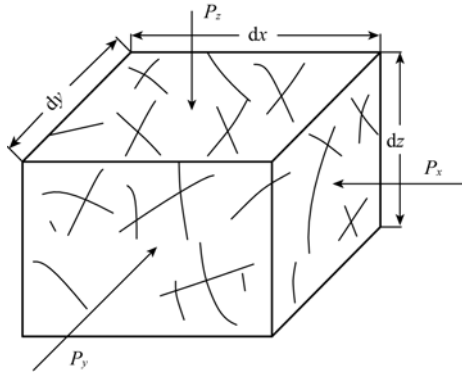


图1 煤基多孔介质典型单元体结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of coal-based multi-pore medium

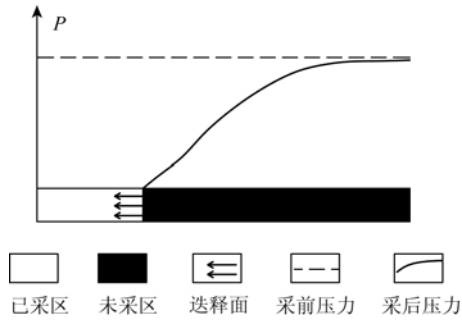


图2 煤层开采前后瓦斯压力分布示意图

Fig. 2 Gas pressure distribution diagram before and after mining

## 2 瓦斯在煤基多孔介质中的运动方程

瓦斯在煤基多孔介质中运动形式主要分两种情况,一种是在瓦斯压力梯度作用下的渗移运动,另一种是在瓦斯浓度梯度作用下的扩散运动。根据渗移运动的达西公式,瓦斯在煤基介质中某一方向  $x$  上的渗移运动速度可表示为<sup>[1]</sup>:

$$V_x = K_x \frac{dP}{dx} \quad (3)$$

同理可得  $y$ 、 $z$  方向上的渗移速度为:

$$V_y = K_y \frac{dP}{dy} \quad (4)$$

$$V_z = K_z \frac{dP}{dz} \quad (5)$$

式中  $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的渗透系数,  $m/d$ ;  $P$  为煤层空隙中的瓦斯压力,  $MPa$ 。

以图1所示的典型单元体为例,在  $dt$  时段内,设瓦斯压力梯度作用下,在  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向流入单元体的瓦斯通量分别为  $Q_x dt$ 、 $Q_y dt$  和  $Q_z dt$ ,流出单元体的瓦斯通量分别为  $(Q_x + dQ_x)dt$ 、 $(Q_y + dQ_y)dt$  和  $(Q_z + dQ_z)dt$ ,且:

$$Q_x = K_x \frac{\partial P}{\partial x} dydz \quad (6)$$

$$Q_y = K_y \frac{\partial P}{\partial y} dx dz \quad (7)$$

$$Q_z = K_z \frac{\partial P}{\partial z} dx dy \quad (8)$$

则在瓦斯压力梯度作用下,  $dt$  时段内流入流出单元体的瓦斯通量之差(单元体内瓦斯赋存量的变化量)为:

$$\begin{aligned} \sum dQ &= (dQ_x + dQ_y + dQ_z)dt = \\ &\left[ \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial P}{\partial x} dydz dx) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial P}{\partial y} dx dz dy) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial P}{\partial z} dx dy dz) \right] dt \quad (9) \end{aligned}$$

同理,在浓度梯度作用下,设在  $dt$  时段内从  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向分别扩散进入单元体的瓦斯通量为  $W_x dt$ 、 $W_y dt$  和  $W_z dt$ ,流出单元体的瓦斯通量分别为  $(W_x + dW_x)dt$ 、 $(W_y + dW_y)dt$  和  $(W_z + dW_z)dt$ ,且:

$$W_x = D_x \frac{\partial C}{\partial x} dydz \quad (10)$$

$$W_y = D_y \frac{\partial C}{\partial y} dx dz \quad (11)$$

$$W_z = D_z \frac{\partial C}{\partial z} dx dy \quad (12)$$

则在瓦斯浓度梯度作用下,  $dt$  时段内逸入逸出单元体的瓦斯通量之差为:

$$\begin{aligned} \sum dW &= (dW_x + dW_y + dW_z)dt = \\ &\left[ \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x} dydz dx) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y} dx dz dy) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial C}{\partial z} dx dy dz) \right] dt \quad (13) \end{aligned}$$

式中  $C$  为单元体中瓦斯的质量浓度,  $g/m^3$ ;  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  为单元体内瓦斯在不同方向上的浓度扩散系数,  $m^2/s$ 。

研究表明,  $dt$  时段,单元体内瓦斯赋存量的变化量主要由压力变化所引起的解析瓦斯和浓度变化引起的解析瓦斯组成,即:

$$\sum dU = dQ + dW = \xi \frac{dP}{dt} + \eta \frac{dC}{dt} \quad (14)$$

式中  $\xi$  为瓦斯压力解析系数;  $\eta$  为瓦斯浓度解析系数。从而,可得在压力和浓度梯度共同作用下,瓦斯在单元体内多孔介质中的运动方程为:

$$\begin{aligned} &\left[ \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial P}{\partial x} dydz dx) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial P}{\partial y} dx dz dy) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial P}{\partial z} dx dy dz) \right] dt + \left[ \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x} dydz dx) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y} dx dz dy) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial C}{\partial z} dx dy dz) \right] dt \end{aligned}$$

$$= \left[ \xi \frac{dP}{dt} + \eta \frac{dC}{dt} \right] dx dy dz dt, \quad (15)$$

即：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial P}{\partial x} + D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial P}{\partial y} + D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial P}{\partial z} + D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \xi \frac{dP}{dt} + \eta \frac{dC}{dt}. \end{aligned} \quad (16)$$

由此可见，瓦斯在煤基多孔介质中的运动与瓦斯的绝对压力和浓度大小无关，而与瓦斯压力梯度及其变化量和瓦斯浓度梯度及其变化量有着密切的关系；同时，运动特征与瓦斯在煤基多孔介质中的渗透系数和浓度扩散系数有较密切的关系。

### 3 煤与瓦斯突出产生的机理和条件

煤与瓦斯突出的前提是瓦斯必须在多孔介质中产生较强的运动。要使瓦斯产生运动，必须在多孔介质中形成瓦斯压力梯度和浓度梯度，梯度才是驱动瓦斯运动的动力，而不是煤中瓦斯的绝对压力大小和浓度大小。所以说，瓦斯绝对压力的大小和煤与瓦斯突出没有直接的关系，只有压力梯度及梯度的变化幅度大小才是产生煤与瓦斯突出的根本原因。

当流经煤中某一断面的瓦斯渗移量和扩散量一定时，瓦斯压力梯度  $\frac{dP}{ds}$  的大小与煤中孔隙的渗透

系数  $K$  成反比，浓度梯度  $\frac{dC}{ds}$  的大小与瓦斯扩散系数  $D$  成反比。也就是说，当煤中孔隙的瓦斯渗透系数  $K$  越大时，越不容易形成高瓦斯压力梯度，也不利于形成瓦斯突出的环境。反之，当煤的瓦斯渗透系数很小时，就很容易形成高瓦斯压力梯度，从而形成有利于煤与瓦斯突出的环境条件。当煤中瓦斯的渗透性能存在非均质和各向异性时，会造成瓦斯压力梯度的剧烈变化，即  $\frac{d^2 P}{ds^2}$  增加，这也是容易造成煤与瓦斯突出的重要原因。瓦斯浓度梯度的大小会直接影响到瓦斯压力梯度的变化，同时瓦斯浓度梯度的变化还会引起瓦斯运移速度强度的变化，这些都可引起瓦斯突出条件的巨大变化。

当煤的结构性能(瓦斯渗透性)一定时，瓦斯在煤基孔隙介质中的运动速度完全取决于瓦斯压力梯度的大小(而不是绝对瓦斯压力的大小)，而运动速度在流速场中的变化量则取决于瓦斯压力梯度大小的变化程度。瓦斯在由煤体骨架、多种孔隙组成的多孔介质中运动时，必然对煤体固体颗粒骨架产生气体流动推力，这种推力(气推力)可称之为瓦斯渗透力。渗透力强度可定义为单位体积煤体骨架受到

的瓦斯流动推力总和，它是形成煤与瓦斯突出的主动营力。同样，瓦斯在煤基多孔介质中流动时，也会受到煤体颗粒骨架的阻力，瓦斯压力梯度的形成实际上是瓦斯运动过程中克服煤体骨架阻力所产生能量损耗的结果。骨架对瓦斯运移阻力的大小主要受下列因素控制：

- 煤体结构性质。如煤的致密性、内聚力等；
- 煤体受到的有效应力大小。有效应力越大，越容易造成孔隙、裂隙的闭合<sup>[2]</sup>，使煤的渗透性降低，从而增加固体骨架对瓦斯的渗透阻力；
- 煤体破碎程度及煤中孔隙、裂隙比表面积的大小。孔隙度越大，单个孔隙和裂隙越小，会造成孔隙比表面积的增加，对瓦斯的渗透阻力就越大。所以，构造煤(沫煤)对瓦斯运动的阻力较大。

实际上，煤体骨架对瓦斯的渗透阻力越大，就越容易形成煤中的高瓦斯压力梯度，从而形成煤与瓦斯突出的潜在危险性，这点正好揭示了低渗透性构造煤易发生煤与瓦斯突出的内在原因。

### 4 煤与瓦斯突出产生的力学条件

瓦斯在煤体中运动时，会对煤体固体骨架产生一个渗透力(气推力)，同时，煤体骨架对瓦斯运动会产生一定的阻力，这两个力是一对作用力和反作用力(图 3)<sup>[3]</sup>。

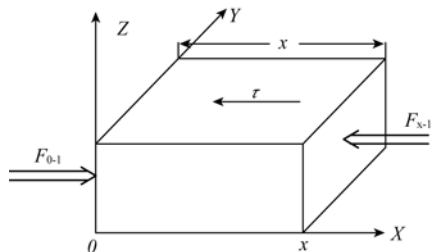


图 3 煤体固体骨架受力情况示意图

Fig. 3 The diagram of forces applying to solid coal mass

设单位断面 0-1 上的气推力为  $F_{0-1}$ ，单位断面  $x-1$  上的气推力为  $F_{x-1}$ ，则作用于 0-1 到  $x-1$  断面之间煤体骨架的气推力之和为： $F = F_{0-1} - F_{x-1}$ ，即：

$$F = P_{0-1} \cdot S_{0-1} - P_{x-1} \cdot S_{x-1} = P_{0-1} - P_{x-1} = \int_0^x J(x) dx,$$

式中  $J(x)$  为瓦斯压力梯度； $P_{0-1}$  为 0-1 断面上的瓦斯压强； $S_{0-1}$  为 0-1 断面的面积； $P_{x-1}$  为  $x-1$  断面上的瓦斯压强； $S_{x-1}$  为  $x-1$  断面面积。

设单位体积煤体的抗剪强度为  $\tau$ ，则从 0-1 断面到  $x-1$  断面之间煤体骨架的总抗剪力为：

$$T = \int_0^x \tau(x) dx.$$

式中  $\tau(x)$  为煤体骨架在  $x$  方向上的抗剪强度。

(下转第 14 页)

湖侵体系域晚期)镜质组含量变化较大(14.6 %~84.7 %),说明此时泥炭沼泽内可容空间增加速率与泥炭产生速率不平衡,泥炭时而暴露时而被强水覆盖,形成 F 煤层顶部煤岩显微组分剧烈变化的特征。总体看来,F 煤层垂向上镜质组含量向上呈增加趋势,说明 F 煤层主要形成于三级层序 S<sub>6</sub>湖侵体系域基准面上升速率逐渐加快(剩余可容空间逐渐增加)的动力学背景。

#### 4 结 论

a. 研究区识别出区域不整合面、河流下切谷、区域构造应力转换面和地层颜色突变面等 9 个层序界面,将侏罗纪煤系划分为 3 个二级层序和 8 个三级层序。

b. 研究区主要煤层(F 煤)形成于三级层序 S<sub>6</sub>湖侵体系域中晚期的废弃辫状河冲积平原之高位沼泽环境,煤岩有机显微组分以高惰质组(平均 57.7 %)和低镜质组(平均 32.0 %)为特征。

c. 根据垂向煤岩显微组分变化,将 F 煤划分为 1 个四级层序和 5 个五级层序,指出 F 煤层夹矸主要受控于五级层序基准面变化,并倾向发育于五级层序基准面上升速率最快的最大湖泛面位置。

d. F 煤层在 S<sub>1</sub>湖侵体系域,可容空间增加速率与泥炭产生速率平衡且其值小于泥炭产生速率,造成部分泥炭暴露、氧化,形成 F 煤层中下部镜质组含量低、但煤岩组分含量稳定的煤岩特征;在 S<sub>1</sub>高位体系域,可容空间增加速率与泥炭产生速率不平衡,泥炭时而暴露时而被强水覆盖,形成 F 煤层顶部煤岩组分剧烈变化的特征。

e. 总体看,F 煤层垂向上镜质组含量向上呈增加趋势,说明 F 煤层主要形成于三级层序 S<sub>6</sub>湖侵体系域基准面上升速率逐渐加快(剩余可容空间逐

渐增加)的动力学背景。

#### 参考文献

- [1] BOHACS K, SUTER J. Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: fundamental controls and paralic examples[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81: 1612-1639.
- [2] AITKEN J F, FLINT S S. The application of high resolution sequence stratigraphy to fluvial systems: a case study from the Upper Carboniferous Breathitt Group, eastern Kentucky, USA[J]. Sedimentology, 1995, 42: 3-30.
- [3] SHAO Longyi, ZHANG Pengfei, GAYER R A, et al. Coal in a carbonate sequence stratigraphic framework: the Late Permian Heshan Formation in central Guangxi, southern China[J]. Journal of Geological Society London, 2003, 160: 285-298.
- [4] 邵龙义,陈家良,李瑞军,等. 广西合山晚二叠世碳酸盐岩型煤系层序地层分析[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 168-174.
- [5] 吴因业,宋岩,贾承造,等. 柴北缘地区层序格架下的沉积特征[J]. 地质前缘, 2005, 12(3): 195-203.
- [6] 彭立才,杨慧珠. 柴达木盆地大煤沟侏罗系剖面高分辨率含煤层序分析[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2000, 17(1): 6-10.
- [7] 杨明慧,夏文臣. 非海相前陆盆地含煤沉积层序地层分析[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 26(3): 1-4.
- [8] 戴俊生,叶兴树,汤良杰,等. 柴达木盆地构造分区及其油气远景[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 291-296.
- [9] 哲平,周成滨. 青海省第三次煤炭资源预测与评价[R]. 西宁: 青海省煤炭地质勘探公司, 1994.
- [10] MOORE T A, SHEARER J C. Peat/coal type and depositional environment-are they related? [J]. International Journal of Coal Geology, 2003, 56: 233-252.
- [11] 秦勇,王文峰,李状福,等. 海侵作用影响下的高分辨率煤相序列及其古泥炭沼泽发育模式[J]. 地质学报, 2008, 82(2): 234-246.
- [12] DIESSEL C F K, BOYD R, WADSWORTH J, et al. On balanced and unbalanced accommodation/peat accumulation ratios in the Cretaceous coals from Gates Formation, Western Canada, and their sequence-stratigraphic significance [J]. International Journal of Coal Geology, 2000, 43: 143-186.

(上接第 8 页)

在 0-x 区间,煤与瓦斯突出与否取决于 F 与 T 的大小:

当  $F > T$ , 即  $J(x) > \tau(x)$  时, 发生突出;

当  $F < T$ , 即  $J(x) < \tau(x)$  时, 不发生突出;

当  $F = T$ , 即  $J(x) = \tau(x)$  时, 为判断煤与瓦斯突出的临界条件。

#### 5 结 论

通过本文分析可知,瓦斯在煤基多孔介质中的运动是孕育煤与瓦斯突出的前提,而瓦斯压力梯度与浓度梯度的存在是驱动瓦斯在多孔介质中运动的内动力,煤与瓦斯突出的危险性主要取决于瓦斯压力梯度

及其变化量的大小,而和瓦斯的绝对压力大小没有直接关系。煤与瓦斯突出的条件是由煤基多孔介质中瓦斯压力梯度的大小和煤体固体骨架的抗剪强度大小所决定。低渗透性的构造煤因对瓦斯运移阻力较大而容易形成瓦斯压力梯度的增加,从而更易于发生煤与瓦斯突出。

#### 参考文献

- [1] 富向,王魁军,杨天鸿. 构造煤的瓦斯散放特征[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 775-778.
- [2] 韩军,张宏伟,霍丙杰. 向斜构造煤与瓦斯突出机理探讨[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 908-911.
- [3] 山东工学院. 工程流体力学[M]. 北京:水利电力出版社, 1984.