JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY

文章编号:0253-9993(2008)07-0775-05

构造煤的瓦斯放散特征

富 向^{1,2}, 王魁军², 杨天鸿¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110000; 2. 煤炭科学研究总院 抚顺分院科研中心, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要:通过对构造煤与非构造煤在微观结构上差异的分析,进行了构造煤瓦斯放散的微观与宏观数学模型理论研究.通过研制的自动化瓦斯放散速度测试仪器,在实验室测定了最小突出压力吸附下煤的瓦斯放散速度,并结合构造煤瓦斯放散的数学模型,得出构造煤的瓦斯放散特征.认为构造煤在应力降低或解除时,瓦斯运移规律用菲克定律描述比达西定律更合理;构造煤前60 s的瓦斯放散速度规律更符合文特式 $V=V_1t^{-a}$,且第1秒时的瓦斯放散速度 V_1 、衰减系数、 Q_{0-60} 、 Δp 值均与非构造煤有很大的差异.

关键词:构造煤;放散速度;扩散定律;煤质指标

中图分类号: TD712 文献标识码: A

Gas irradiation feature of tectonic coal

FU Xiang^{1,2}, WANG Kui-jun², YANG Tian-hong¹

(1. College of Resources and Civil Engineering, Northeast University, Shenyang 110000, China; 2. Fushun Branch Research Center, China Coal Research Institute, Fushun 113001, China)

Abstract: Analyzed the difference of tectonic coal and none tectonic coal in micro structure, discussed tectonic coal irradiation micro and macro mathematic model theory. By using automatic gas release velocity test equipment, determinating coal gas irradiation velocity in the least burst pressure adsorption condition in the lab, and combining tectonic coal gas irradiation mathematic model, gas irradiation feature of tectonic conclusion was drawn. When tectonic coal gas stress is decreased or stress relieved, gas migration law described by Fick law is more reasonable than Darcy law; the gas irradiation velocity rule of tectonic coal in 60 seconds accords with Winter $V = V_1 t^{-a}$, and the first second gas irradiation velocity V_1 , attenuation coefficient α , irradiation total amount Q_{0-60} in 60 seconds, Δp index have the significant difference with none tectonic coal.

Key words: tectonic coal; irradiation velocity; diffusing law; coal quality index

由于煤层的强度在含煤岩系中最小,煤体的原生结构在构造变动过程中最易受到破坏而形成构造煤. 构造煤按破坏程度的不同表现为破裂状、碎裂状、颗粒状和粉末状等,呈现出层理紊乱、煤质松软、镜面 发育、孔隙率高,原生结构遭到破坏或完全消失^[1-2].实践证明,构造煤和突出的发生有密切的联系,特 别是煤的这种瞬间突然放散瓦斯能力的大小与突出的发生、发展有着直接联系^[3].此前,由于实验设备 的制约,对构造煤应力急剧降低或消除短时间内的瓦斯放散规律研究较少.

煤是一种多孔介质,当煤体内瓦斯气体存在压力梯度或浓度梯度时,会发生瓦斯在煤体的运移与扩

收稿日期: 2007-08-09 责任编辑: 毕永华

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(9732006CB202201-6);"十一五"国家科技支撑计划(2006BAK04A09-02-02);煤炭科学研究总院青年基金资助项目(2006QN08)

作者简介: 富 向 (1973—), 男, 甘肃民勤人, 高级工程师. Tel: 024-24117170, E-mail: fsfuxiang@163. com

776 煤炭学报 2008年第33卷

散,而该过程是个复杂的过程^[4].目前国内外提出了一些有关瓦斯流动或运移的微观模型,主要有:① 纯扩散模型,认为瓦斯在煤层中的流动服从菲克扩散定律^[5-6];② 纯渗透模型,认为煤层气在煤层中的流 动服从线性达西渗透定律^[7].

1 构造煤瓦斯放散规律微观数学模型

在压力梯度或浓度梯度的作用下,甲烷的放散过程:甲烷分子脱离孔隙表面→向大孔、裂隙系统扩散 →甲烷分子扩散到煤基质外表面→进入甲烷气体气相主体.甲烷分子通量决定因素除扩散系数和渗透率以 外,必定受甲烷浓度梯度、压力梯度控制.吸附平衡破坏后同时存在一个沿孔隙流动的扩散场和沿裂隙流 动的渗流场,瓦斯在煤层或煤粒中的传质不能认为是纯扩散或纯渗流,而是两者共同作用的结果,但在不 同外部条件下,两者必有其一占主导,起决定性作用.

构造煤孔隙-裂隙结构系统非常发育,而甲烷分子直径大致为0.414 nm,比一般的微孔都要小,可以 在煤层孔隙和裂隙中自由移动,因此当裂隙(或孔隙)宽度大于10⁻⁷ m时,煤层中瓦斯的运移主要呈层 流运动,瓦斯在构造煤煤层中缓慢地流动一般认为是以层流为主导,用达西定律来描述比较恰当.

当含瓦斯煤体失稳时,其内在瓦斯能、弹性能开始释放,地应力变得很小,煤体裂隙得到充分扩张, 渗透率大大增加,瓦斯的渗流运动阻力降到最低,裂隙中的渗流速度远大于孔隙中的扩散速度. 在宽度小 于 10⁻⁷ m 的裂隙中,甲烷分子的运动不再取决于压力梯度,而取决于浓度梯度. 当煤粒小于极限粒度时, 煤粒中孔隙结构组成对甲烷气体的运移起主导作用,即扩散速度决定瓦斯放散速度的大小,瓦斯的运移可 简化为用扩散定律来描述.

2 构造煤瓦斯放散规律微观表达式

扩散是由于分子的自由运动使得物质由高浓度体系运移到低浓度体系的浓度平衡过程^[8]. 从分子运 动观点来看,气体分子在孔隙壁上的吸附和解吸是瞬间完成的,但实际上该过程需要一定的时间,这是因 为瓦斯通过孔隙和裂隙时要克服阻力. 瓦斯在煤粒中的扩散过程符合菲克定律 (Fick):

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x},\tag{1}$$

式中,J为扩散流体通过单位面积的扩散通量, $g/(m^2 \cdot s)$;c为扩散流体的浓度, g/m^3 ;D为煤体瓦斯 扩散系数, m^2/s .

假设:① 煤粒由球形颗粒组成;② 煤为各向同性均质体;③ 瓦斯流动遵循质量守恒定律、连续性原理;④ 煤中瓦斯解吸为等温等压解吸过程.忽略浓度 *c* 和时间 *t* 对扩散系数的影响,可得到球面坐标系下的扩散第二定律:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial c}{\partial r}\right) , \qquad (2)$$

式中, r 为极坐标半径, m; t 为时间, s.

令 u = cr, 代入得 $\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial r^2}$, 按一定的边界条件与初始条件,解微分方程后忽略相关误差函数,得出其解为

 $Q_t = K_1 \sqrt{t} , \qquad (3)$

式中, K_1 为系数,指煤样暴露1 min 内的瓦斯解吸量, mL/min; Q_i 为累计解吸量, mL/g.

3 国内常用的瓦斯放散规律宏观表达式

在宏观上,煤对瓦斯放散规律在不同试验条件、不同时间段也有不同的特征.依据不同的煤质情况及外部条件,瓦斯解吸规律表达式^[9-10]有多种,见表1.

富 向等:构造煤的瓦斯放散特征

表1

	Table 1	Gas irradiation amount,	irradiation velocity expression
名 称	放散量公式	放散速度公式	参数
巴雷尔式	$Q_t = K_1 \sqrt{t}$	$V_t = 0.5K_1t^{-0.5}$	K_1 为系数,指煤样暴露 1 min 内的瓦斯解吸量, mL/min
文特式	-	$V_t = V_1 t^{-\alpha}$	V_1 为暴露 1 s 时的瓦斯解吸速度, cm ³ /(g·s); α 为衰减系数
孙式	$Q_i = at^i$	$V_t = ait^{i-1}$	a, i 为常数
指数函数	-	$V_t = V_0 e^{-\alpha t}$	V_0 为 $t=0$ 时的瓦斯解吸速度, cm ³ /(g·s); α 为衰减系数
乌斯基诺夫式	$Q_t = V_0 \frac{(1+t)^{1-n} - 1}{1-n}$	$V_t = V_0 (1+t)^{-n}$	V_0 为 $t=0$ 时的瓦斯解吸速度, cm ³ /(g·min); n为煤结构常数
王佑安式	$Q_t = \frac{ABt}{1 + Bt}$	$V_t = \frac{AB}{(1 + Bt)^2}$	A为极限放散量, mL/min; B 为反映煤质变化的常数,
			min/mL
博特式	$Q_t = Q_\infty (1 - A e^{-\lambda t})$	$V_t = AQ_{\infty} \lambda e^{-\lambda t}$	A , λ 为经验常数; Q_{∞} 为极限瓦斯解吸量, mL/g

瓦斯放散量、放散速度表达式

4 构造煤放散速度的实验测定

利用煤炭科学研究总院抚顺分院研制的 WT-2000 型瓦斯放散速度测定仪对 18 组煤样解除压力后 0~ 60 s 放散量、放散速度进行实时连续测定. 图1(a)为九里山掘二15021 工作面突出点煤样(构造煤)、 勃力县煤矿煤样(非构造煤)放散量曲线;图1(b)为上述2个煤样放散速度曲线.



图 1 煤样放散量与放散速度曲线

Fig. 1 Coal sample irradiation amount and velocity curve

由图 1 可知,在最初的几秒钟放散速度很大,大多在 0.1~3.5 mL/(s·g).在 10 s 左右时,放散量 急速增加至 0.3~6.5 mL/g, 而放散速度却大幅降低至 0.03~0.37 mL/(s・g), 衰减很快. 至 30~60 s 时,放散速度变得小目平稳.

5 构造煤放散速度的宏观表达式

将测定数据用各种公式的导数式 进行曲线拟合, 拟合效果的好坏用相 关指数 R² 来度量^[11].由于篇幅关 系, 仅以九里山 25071 运输巷煤样 1,2号为例,仅将部分公式的计算 结果列入表2.

分析得出煤的放散速度公式大致 可分为2类:① 幂函数有孙式、文

表2 1,2 号煤样放散速度曲线拟合结果 Table 2 Irradiation velocity curve fitting results for

No. 1, 2 coal sample					
序号	公式名称	公式	公式内容	相关指数	
1	指数式	$V_t = V_0 \mathrm{e}^{-\alpha t}$	$V_t = 0.031 \ 6e^{-0.035 \ 6t}$	$R^2 = 0.761$	
2	文特式	$V_t = V_1 t^{-a}$	$V_t = 0.353 t^{-1.0476}$	$R^2 = 0.950$	
1	指数式	$V_t = V_0 \mathrm{e}^{-\alpha t}$	$V_t = 0.026 \ 4e^{-0.035 \ 9t}$	$R^2 = 0.785$	
2	文特式	$V_t = V_1 t^{-a}$	$V_t = 0.181 t^{-0.925}$	$R^2 = 0.902$	

特式、王佑安式、巴雷尔式、乌斯基诺夫式; ② 指数函数有指数式和博特式. 拟合出的孙式、文特式导 数式曲线完全重合,两者与乌斯基诺夫式放散速度曲线在水平方向上仅存在1s的偏移,且乌式 t→0 时, $V_{i} \rightarrow V_{0}$. 文特式中 $t \rightarrow 0$ 时, $V_{i} \rightarrow \infty$. 巴雷尔放散速度式($V_{i} = K_{i} f_{i}$)实质是文特式的一种特殊形式, 部分煤

煤炭学报 2008 年第33 卷

样在放散初期与该公式相关性较好,如图2所示,说明实验结果与菲克定律推出的公式(3)相吻合的[11].

统计得出幂函数式拟合相关指数为 0.830 ~ 0.970,平均为 0.921;指数函数式拟合相关指数为 0.680 ~ 0.860,平均为 0.793. 大致在第 15 秒以后,二者均有较好的拟合效果;但在第 15 秒以前,指数 函数式与实测有较大偏差,而幂函数与实测点始终有较好的拟合效果,如图 3 所示.



Fig. 2 Barel format irradiation amount fitting curve



irradiation velocity fitting curves

6 构造煤的瓦斯放散特征

经过理论分析与实验测试,得到构造煤不同于非构造煤的瓦斯放散特征.

(1) 60 s 内, 文特式 *V*=*V*₁*t*^{-a}与煤样放散速度的相关性较好, 而与构造煤相关性更高(图4(a)), 说 明文特式更适合构造煤.

(2) 构造煤放散瓦斯时衰减较快,衰减系数 α 平均为 1.08; 非构造煤平均为 0.86 (图 4 (b)).

(3) 构造煤第1秒时的瓦斯放散速度 V₁较大. 实验测得构造煤 V₁=1.00~3.62 mL/(s・g),平均 1.52 mL/(s・g);非构造煤在 0.05~1.00 mL/(s・g),平均 0.30 mL/(s・g). 故 V₁ 适合作煤放散速度指标(图4(c)).

(4) 构造煤前 60 s 放散总量 Q₀₋₆₀较大,此次测值平均为 5.27 mL/g,而非构造煤为 1.46 mL/g;构造 煤 Δ*p* 值较大,此次测值平均为 2.9 kPa,而非构造煤为 0.7 kPa.





7 结 论

(1)构造煤与非构造煤在煤体物理结构、孔隙分布等方面有着明显的差异.特别是在受采动影响下 其应力降低或解除时,瓦斯运移规律用扩散定律来描述较为恰当.

(2) 煤对瓦斯前 60 s 的放散速度规律符合文特式 V=V1t^{-a},且对于构造煤的相关指数更高.

(3) 构造煤放散瓦斯时衰减较快,第1秒时的瓦斯放散速度 V_1 、前 60 s 放散总量 Q_{0-60} 、 Δp 值均较

大. 这对于研究突出中的瓦斯作用机理有重要意义,而且为煤与瓦斯突出区域预测提供了新的煤质指标.

参考文献:

 [1] 张红日.构造煤的孔隙特征——河北下花园矿 [3及Ⅲ3 煤层分析 [J].山东科技大学学报(自然科学版), 1999, 18 (1): 12-16.

Zhang Hongri. Features of porosity of the structural coal analysis of the I 3 and Ⅲ 3 coal seams of Xiahuayuan colliery in Hebei province [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 1999, 18 (1): 12 –16.

[2] 李建铭. 煤与瓦斯突出防治技术手册 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2006: 154-159.
 Li Jianming, Prevention and control handbook of coal and gas outburst [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006: 154-159.

[3] 郝吉生,袁崇孚,张子戌.构造煤及其对煤与瓦斯突出的控制作用 [J]. 焦作工学院学报,2000,19 (6):403-406.

Hao Jisheng, Yuan Chongfu, Zhang Zixu. The tectonic coal and its effects on coal and gas outburst [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 2000, 19 (6): 403-406.

- [4] 俞启香. 矿井瓦斯防治 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1992: 88-89.
 Yu Qixiang. Mining gas prevention and control [M]. Xuzhou: Press of China University of Mining and Technology, 1992: 88-89.
 -89.
- [5] 杨其銮,王佑安. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用 [J]. 煤炭学报, 1986, 23 (3): 87-94.
 Yang Qiluan, Wang Youan. Theory of methane diffusion from coal cuttings and its application [J]. Journal of China Coal Society, 1986, 23 (3): 87-94.
- [6] 杨其銮.关于煤屑瓦斯放散规律的试验研究 [J].煤矿安全, 1987, 18 (2): 9-16.
 Yang Qiluan. About research study of coal cutting gas diffusion law [J]. Mining Safety, 1987, 18 (2): 9-16.
- [7] 吴世跃,郭勇义. 煤层气运移特征的研究 [J]. 煤炭学报, 1999, 24 (1):65-69.
 Wu Shiyue, Guo Yongyi. Study on the movement property of coal seam methane [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24 (1):65-69.
- [8] 何龙庆,林继成,石 冰. 菲克定律与扩散的热力学理论 [J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2006, 12 (4): 38-39.

He Longqing, Lin Jicheng, Shi Bing. Fick Law and the diffusion's thermodynamics theory [J]. Journal of Anqing Teachers College (Natural Science Edition), 2006, 12 (4): 38-39.

- [9] 王兆丰. 空气、水和泥浆介质中煤的瓦斯解析规律与应用研究 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2001.
 Wang Zhaofeng. Gas adsorption law and application research in air, water and mud medium [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2001.
- [10] 孙贤斌,孙东玲. 突出预测指标 K₁和 f 值确定临界值试验研究 [J]. 矿业安全与环保, 2000, 27 (4): 23-25.
 Sun Xianbin, Sun Dongling. Trial study of determining critical values of outburst prediction indicators value K₁ and f [J].
 Mining Safety & Environmental Protection, 2000, 27 (4): 23-25.
- [11] 富 向. 最小突出压力下瓦斯瞬时放散速度指标的实验研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2005.
 Fu Xiang. Research study of gas transient diffusion velocity index at the least outburst pressure [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2005.