

文章编号:1000-582X(2011)04-020-04

水射流促进煤基质收缩提高煤层透气性机理分析

卢义玉, 宋晨鹏, 刘勇, 康勇

(重庆大学 a. 复杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室;
b. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 高压脉冲水射流割缝是新型有效的增透技术, 但增透机理尚未明确, 制约了其在不同赋存条件煤层中的推广应用。文中从煤基质收缩提高煤层透气性角度出发, 在分析高压水射流冲击煤体的动态效应基础上, 得出冲击动态方程; 理论分析了在高压脉冲水射流作用下煤基质的受力状态, 得出了高压脉冲水射流能够促使煤基质收缩, 并推导出射流冲击力-煤基质的关系方程, 在此基础上采用 P-M 模型, 得出射流作用下煤层内瓦斯渗流方程, 为高压脉冲水射流割缝增透技术的推广应用提供了理论支撑。

关键词: 高压脉冲水射流; 煤基质收缩; 煤层透气性; 瓦斯渗流

中图分类号: TD712

文献标志码: A

Mechanism analysis of permeability based on promoting coal matrix shrinkage by water jet

LU Yi-yu, SONG Chen-peng, LIU Yong, KANG Yong

(a. National & Local Joint Engineering Laboratory of Gas Drainage in complex coal seam;
b. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and Environmental Disaster Control Engineering of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: High pressure pulsed water jet (HPWJ) is a new technology of effectively improving coal seam permeability. However, the mechanism of increased permeability is not yet clear, which restricts the application of HPWJ in different coal seams. From the perspective of improving permeability by coal matrix shrinkage, the impelled dynamic equations is established based on analysis of coal dynamic effects by water jet. According to theoretical analysis of the stress state of coal matrix, it is concluded that HPWJ can promote coal matrix shrinkage, and the relationship equation between jet impact-coal matrix is derived. Besides, the gas seepage function in the coal slotted by the HPWJ is gained by using PM model, which provides theoretical support for generalizing the technology in the coal mine.

Key words: high pressure pulsed water jet; coal matrix shrinkage; permeability of coal; gas seepage

高压脉冲水射流增透技术是利用脉冲射流的压力脉冲特性、自激空化特性和切割煤岩特性, 在钻进煤层瓦斯预抽孔时利用钻头中自激振荡喷嘴产生的

脉冲射流在煤层中切缝, 增加煤层瓦斯涌出自由面, 生成新裂隙、促使原始裂隙贯通, 强化瓦斯解析, 从而提高煤层透气性, 增大瓦斯抽采量。该技术具有

收稿日期: 2010-10-23

基金项目: 国家创新群体基金资助项目(50921063); 重庆市杰出青年基金资助项目(CSTC, 2009BA6047); 重庆大学研究生科技创新基金资助项目(2001005B1B0010342)

作者简介: 卢义玉(1972-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事高压水射流、煤矿安全等方面的研究, (Tel)023-65112372; (E-mail)luyiyu@cqu.edu.cn。

系统组成简单、容易操作等特点;已成功应用于中国西南矿区高瓦斯低透气性煤层的石门揭煤、本煤层瓦斯预抽,使瓦斯抽采量提高了 15 倍,抽采时间缩短了 40%,石门揭煤时间缩短 50%,具有较高的推广应用价值^[1-2]。但该技术提高煤层透气性机理尚未明确。文中从高压脉冲水射流冲击对煤基质性质的变化,进而改变煤层瓦斯渗透率的角度分析得出冲击载荷作用下煤体内瓦斯渗流方程,从瓦斯渗流角度分析高压脉冲水射流提高煤层透气性机理。对煤矿综合利用瓦斯、瓦斯治理具有重要的工程意义。

1 高压脉冲水射流对煤体内瓦斯渗透率的影响

高压脉冲水射流对煤体的冲击力,主要来自振荡喷嘴产生的脉动应力对煤体产生的应力波^[3]。当射流冲击煤体的压缩应力波传播到煤体的自由表面时,对瓦斯渗流有两方面影响:一是导致煤体的有效应力发生变化,引起煤体孔隙、裂隙的变化。当瓦斯发生解吸时,煤炭颗粒的表面张力和基质微孔隙表面自由能增加,煤基质就会收缩,其体积变小,进而扩大了孔隙、裂隙的尺寸;另一方面,孔隙率的变化会引起瓦斯渗透系数的变化^[4]。

1.1 高压脉冲水射流对煤体的冲击动态方程

高压脉冲水射流作用于煤体表面时,形成一个半径为 r 的冲击圆(如图 1),冲击圆内任意一点 i 处,作用于煤体表面上的轴向压力为^[5-6]

$$p = p_w 0.5 \left(\frac{r_i}{r_c} \right)^{2\lambda}, \quad (1)$$

式中: p 为 i 处煤体所受到的冲击力; p_w 为喷嘴出口压力; r_i 为任意一点 i 处的半径; r_c 为特征半径,指 $p_r/p_s = 0.5$ 时 P_s 处的半径, m ; p_r 指半径 r 处的轴向冲击压力; P_s 为沿射流方向 x 处的轴心动压; $\lambda = p_s/p_w$ 为轴心压力衰减系数。

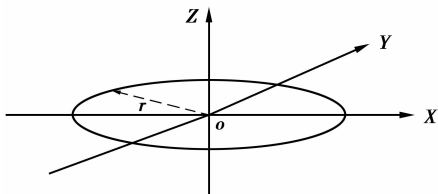


图 1 煤体表面冲击圆示意图

从喷嘴喷出的射流以压力 p 作用于煤体,在一定范围之内,射流能够宏观上破坏煤体,在煤层中切割出圆盘状缝隙,导致煤体暴露面积增加,瓦斯涌出自由面增大。在宏观作用范围之外,射流渗入煤体以压应力的形式作用于煤基质。

1.2 高压脉冲水射流对煤基质的影响

假设煤体为各向同性弹性介质,且煤体应变远

小于其长度,孔隙内瓦斯流动遵循达西定律,则应变与位移之间的关系为^[7-8]

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2)$$

式中: ϵ_{ij} 为煤体应变变量, u_i 为位移量。则平衡方程为

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0, \quad (3)$$

式中: σ_{ij} 为煤体所受应力 $\sigma_{ij} = p_{ij}$, f_i 为体积力。

假设瓦斯吸附体积应变 ϵ_s 。各个方向应变变量相等;射流以压应力作用于煤体引起的煤基质收缩应变为^[9]:

$$\epsilon_v = \frac{1}{2G} p_{ij} - \left(\frac{1}{6G} - \frac{1}{9K} \right) p_{kk} \delta_{ij} + \frac{\alpha}{3K} \delta_{ij} + \frac{\epsilon_s}{3} \delta_{ij}, \quad (4)$$

式中: ϵ_v 为煤基质收缩引起的应变; G 为煤体剪切模量, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, E 为煤体杨氏模量, ν 为煤体泊松比; K 为煤体体积弹性模量, $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$; $\alpha = 1 - \frac{K}{K_s}$, K_s 为煤体颗粒体积模量; $p_{kk} = p_{11} + p_{22} + p_{33}$; α 为 Biot 系数; δ_{ij} 为克罗内克尔 δ 函数。

通过运算可以得到

$$\epsilon_v = -\frac{1}{K} (\bar{p} - \alpha p_g) + \epsilon_s, \quad (5)$$

式中: $\epsilon_v = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$; \bar{p} 为平均压应力, $\bar{p} = -\frac{p_{kk}}{3}$; 瓦斯吸附体积应变 ϵ_s 符合 Langmuir 型曲线,则煤体的体积应变可以通过 Langmuir 型方程计算而得,即:

$$\epsilon_s = \epsilon_L \frac{p}{P_L + p_g}, \quad (6)$$

式中: ϵ_L 为 Langmuir 体积应变,表示无限孔隙压力时体积应变的常数; P_L 为 Langmuir,表示煤体体积应变为 $0.5\epsilon_L$ 时的孔隙压力; p_g 为瓦斯压力。

可以得出,煤体体积应变变量与射流压力成正比。应变变量增大,煤基质收缩,其收缩量决定于射流压力的大小。

1.3 煤基质收缩对瓦斯渗透率的影响

目前,国内外学者做了很多关于煤基质收缩对瓦斯渗透率的影响研究,并建立相关数学模型。其中,Palmer 和 Mansoori 的 P-M 模型^[10],从应变-应力角度考虑了煤体在单轴压力下的线弹性变形对煤层瓦斯渗透率的影响。考虑在单轴应力变化导致的基质弹性压缩和膨胀,对煤层瓦斯孔隙度和渗透率变化。

首先,认为煤基质压缩是线弹性压缩过程。煤体中的孔隙体积增量 $d\epsilon_p$ 为

$$d\epsilon_p = \frac{d\epsilon_{ij}}{\varphi} \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right) d\epsilon_v, \quad (7)$$

式中: $d\epsilon_{ij}$ 为煤体体积应变增量; $d\epsilon_v$ 为煤基质收缩引起的应变增量; φ 为煤层孔隙度。

在单轴压力作用下, 孔隙体积增量 $d\epsilon_p$ 引起煤层孔隙度的变化为

$$-d\varphi = \left[\frac{1}{M} - (1-\varphi)f\gamma \right] (dS - dP_L) + \left[\frac{K}{M} - (1-\varphi) \right] \gamma dP_L - \left[\frac{K}{M} - (1-\varphi) \right] \alpha dT, \quad (8)$$

式中: M 煤体轴向约束模量; S 为上覆岩层压力; γ 为煤基质的可压缩性; P_L 为孔隙压力; T 为温度 ($^{\circ}F$); α 为煤颗粒的热膨胀系数。

类似煤层这样的多孔性物质, $\varphi \ll 1$ 。并且在煤层压缩过程中, 上覆岩层压力基本没有发生改变 ($dS=0$)。因此, 式(8)改写为

$$-d\varphi = -\frac{1}{M} dP_L + \left[\frac{K}{M} + f - 1 \right] r dP_L - \left[\frac{K}{M} - 1 \right] \alpha dT. \quad (9)$$

由于温度的变化, 将影响到煤基质收缩状态, 孔隙中瓦斯吸附情况发生变化, 进而导致孔隙压力的变化。其中温度与孔隙压力有如下关系:

$$\alpha dT \equiv \frac{d}{dP_L} \left(\frac{\epsilon_\ell \beta P_L}{1 + \beta P_L} \right) dP_L, \quad (10)$$

式中: β, ϵ_ℓ 为 Langmuir 型曲线中的参数; T 为煤层中瓦斯的绝对温度。

将式(10)带入式(9)可得

$$-d\varphi = -\frac{dP_L}{M} + \left[\frac{K}{M} + f - 1 \right] \gamma dP_L - \left[\frac{K}{M} - 1 \right] \frac{d}{dP_L} \left(\frac{\epsilon_\ell \beta P_L}{1 + \beta P_L} \right) dP_L. \quad (11)$$

设 $C_m = \frac{1}{M} - \left[\frac{K}{M} + f - 1 \right] r$, 将其代入式(11)后, 并积分:

$$\int_{\varphi_0}^{\varphi} -d\varphi = \int_{p_g}^{P_L} \left\{ C_m dP_L + \epsilon_\ell \left[\frac{K}{M} - 1 \right] \frac{d}{dP_L} \left(\frac{\beta P_L}{1 + \beta P_L} \right) dP_L \right\}, \quad (12)$$

式中: φ_0 为煤体初始孔隙度; p_g 为瓦斯压力。

将式(12)除以 φ_0 , 可得

$$\frac{\varphi}{\varphi_0} = 1 + \frac{C_m}{\varphi_0} (P_L - p_g) + \frac{\epsilon_\ell}{\varphi_0} \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \times \left(\frac{\beta P_L}{1 + \beta P_L} - \frac{\beta p_g}{1 + \beta p_g} \right). \quad (13)$$

假设认为煤层渗透率与煤层孔隙度成立方关系^[11], 有

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3, \quad (14)$$

式中: k 为煤层渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; k_0 为煤层初始渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

根据以上的分析, 由 Palmer-Mansoori 模型的假设, 联立(13)和(14), 当高压脉冲水射流所施加载荷 p , 对煤层渗透率的影响为

$$k = k_0 \exp[3c_f(p - p_g)], \quad (15)$$

式中, c_f 为煤基质压缩系数, MPa^{-1} 。

2 高压脉冲水射流作用下煤体内瓦斯渗流方程的建立

瓦斯在煤体内的流动可以认为是线性渗流, 瓦斯的流动速度与煤层中的瓦斯压力 p_g 的梯度成正比, 符合达西定律。可得高压脉冲水射流作用下的瓦斯运动微分方程:

$$v_i = -\frac{\rho}{\mu} \left(K_{i1} \frac{\partial \psi}{\partial x_1} + K_{i2} \frac{\partial \psi}{\partial x_2} + K_{i3} \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \right), \quad i = 1, 2, 3. \quad (16)$$

式中: v_i 为瓦斯渗流速度; ρ 为瓦斯密度; μ 为运动粘性系数; $\psi = p_g + \rho g x_3$ 为流动势, p_g 为瓦斯压力。

这里假设 v_i 与位势梯度之间仍然维持线性关系。考虑到流体在各向异性介质中的性质, 式(16)可以改写成:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = -\frac{\rho}{\mu} \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \\ \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

由于坐标轴相应发生旋转, 则 \mathbf{K} -矩阵将发生改变。如果矩阵是对称阵, 则坐标轴旋转到某一特定位置时将产生对称的对角线型 \mathbf{K} -矩阵。即, 如果:

$$\mathbf{K}_{ij} = \mathbf{K}_{ji}, \quad i = 1, 2, 3; \quad j = 1, 2, 3, \quad (18)$$

则 \mathbf{K} -矩阵可采取下列形式:

$$(\mathbf{K}'\text{-矩阵}) = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

和 \mathbf{K}' -矩阵对应的这一组特定的坐标轴的方向称为多孔介质的主轴。则在与主轴平行的坐标系中, 达西定律的表示为以下形式:

$$v_i = -K_i \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial \psi}{\partial x_i}. \quad (20)$$

根据物理量守恒, 煤层瓦斯连续性方程为

$$-\nabla \cdot \hat{\Omega} + G = \frac{\partial \Gamma}{\partial t}, \quad (21)$$

式中: ∇ 为散度算子; $\hat{\Omega}$ 为单元体通量密度,

$\hat{\Omega} = \rho \hat{v}$, φ 为煤层孔隙度 G 为流体源; Γ 为流体的浓度, $\Gamma = \varphi \rho$ 。

将 $\hat{\Omega} = \rho \hat{v}$, $\Gamma = \varphi \rho$ 带入式(32), 可得

$$-\nabla \cdot (\rho \hat{v}) + G = \varphi \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (22)$$

瓦斯在煤层中流动时, 可以认为无流体源的流动, 即忽略 G 。则煤层瓦斯连续性方程变为

$$-\nabla \cdot (\rho \hat{v}) = \varphi \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (23)$$

由于煤层瓦斯压缩性比液体大的多, 因此, 采用真实气体的状态方程:

$$\rho = \frac{p}{ZRT}, \quad (24)$$

由此可得

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p_g}{p_0} \frac{Z_0 T_0}{ZT} \quad (25)$$

式中: T 为煤层中瓦斯的绝对温度; T_0 为大气温度; Z 为煤层中压缩因子; Z_0 为一个大气压下瓦斯压缩因子, 一般取为 1。

将式(20)、(25)带入(23)式得:

$$-\nabla \cdot \left[-\frac{\left(\rho_0 \frac{p_g}{p_0} \frac{z_0 T_0}{ZT}\right)^2 \left[K_1 \frac{\partial \psi}{\partial x_1} + K_2 \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \right]}{\mu} \right] + K_3 \frac{\partial \psi}{\partial x_3} = \varphi \frac{\partial \left(\rho_0 \frac{p_g}{p_0} \frac{z_0 T_0}{ZT} \right)}{\partial t} \quad (26)$$

式(26)为煤层中瓦斯未受到外力干扰时的渗流方程, 当高压脉冲水射流冲击煤体, 煤体渗透率的改变式(15)为高压脉冲水射流对煤层渗透率的影响, 代入式(26)为

$$-\nabla \cdot \left[-\frac{\left(\rho_0 \frac{p_g}{p_0} \frac{z_0 T_0}{ZT}\right)^2 K_0 \left[e^{-3c_f \langle p_{r,x1} - p_{x1} \rangle} \frac{\partial \psi}{\partial x_1} + e^{-3c_f \langle p_{r,x2} - p_{x2} \rangle} \frac{\partial \psi}{\partial x_2} + e^{-3c_f \langle p_{r,x3} - p_{x3} \rangle} \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \right]}{\mu} \right] = \varphi \frac{\partial \left(\rho_0 \frac{p_g}{p_0} \frac{z_0 T_0}{ZT} \right)}{\partial t}, \quad (27)$$

式中: $p_{r,x1}$, $p_{r,x1}$ 分别为高压脉冲水射流对煤体载荷的 3 个主轴的分量。

式(27)为高压脉冲水射流作用煤体内瓦斯渗流方程。

从最终的结果可以得出以下 2 点: 1) 高压脉冲水射流切割煤体, 改变煤体内的有效应力, 引起煤体孔隙、裂隙的变化。2) 高压水进入煤层中的孔隙, 扩大了孔隙量, 致使孔隙压力下降, 瓦斯解析量增加, 基质微孔隙表面自由能增加, 基质发生收缩、产生新

的孔隙、裂隙, 孔隙度增大, 从而使渗透率增高。

3 结 论

1) 高压脉冲水射流能够使煤基质发生收缩, 使孔隙发生变形, 产生新的孔隙、裂隙, 孔隙度增大, 从而使渗透率增高。

2) 从瓦斯渗流角度分析出高压脉冲水射流提高煤层透气性机理。通过简化模型得出了在高压脉冲水射流冲击载荷作用下煤体内瓦斯渗流方程。

参考文献:

- [1] 李晓红, 卢义玉, 赵瑜, 等. 高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1386-1390. LI XIAO-HONG, LU YI-YU, ZHAO YU, et al. Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed water jet [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1386-1390.
- [2] 李晓红, 卢义玉, 向文英. 水射流理论及在矿业工程的应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007.
- [3] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 山东: 石油大学出版社, 1998.
- [4] 张广洋, 胡耀华, 姜德义. 煤的瓦斯渗透性影响因素的探讨[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1995, 18(3): 27-30. ZHANG GUANG-YANG, HU YAO-HUA, JIANG DE-YI. Study on the factors affecting gas permeability of coal [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 1995, 18(3): 27-30.
- [5] 刘勇. 高压脉冲水射流增透技术在煤矿石门揭煤中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [6] LAN GRAY. Reservoir engineering in coal seams; part 1-the physical process of gas storage and movement in coal seams[R]. USA: San Antonio Texax, SPE 12514, 1987.
- [7] BIOT MA. General theory of three-dimensional consolidation[J]. J Appl Phys, 1941, 12: 155-64.
- [8] DETOURNAY E, CHENG AHD. Fundamentals of poroelasticity. In: Fairhurst C, editor [M]. Oxford: Pergamon, Comprehensive rock engineering, 1993, 113-71.
- [9] ZHANG H B, LIU J H, ELSWORT D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: A new FE model [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45: 1226-1236.
- [10] PALMER IAN, MANSOOR IJOHN. How permeability depends on stress and pore pressure in coal beds: a new model[R]. Norway: SPE 36737, 1996.
- [11] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress-Dependent permeability and porosity of coal [C]. Tuscaloosa, Alabama: In proceedings of the 1987 international coalbed methane symposium, 1987.

(编辑 陈移峰)