

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0824-07

# 瓦斯参数变化规律的定量化研究

吴立云<sup>1</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 杨玉中<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 贵州省六盘水市安全生产监督管理局, 贵州 六盘水 553000)

**摘要** 煤层瓦斯参数的变化规律对矿井瓦斯灾害防治具有重要的指导意义。利用理论推导和数值模拟的方法对瓦斯涌出初速度、工作面前方的支承应力、瓦斯涌出量、煤层透气性系数等参数进行了分析研究,发现这些指标具有相似的或相反的变化规律,它们是关于距离  $x$  或者时间  $t$  的 S 型曲线和倒 S 型曲线的组合。透气性系数关于距离的曲线形式和瓦斯压力、支承应力关于距离的曲线形式具有不很严格的对称性。结合具体矿井的条件即可确定出参数的变化规律,从而为矿井瓦斯灾害防治提供有效的理论指导。

**关键词** 瓦斯参数; 变化规律; S 型; 倒 S 型

**中图分类号** TD 712

**文献标志码** A

## Quantitative research on gas parameter variation

WU Liyun<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, YANG Yuzhong<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozou, Henan 454000, China;

2. Liupanshui Administration of Work Safety, Liupanshui, Guizhou 553000, China)

**Abstract** Gas parameters variation has significant influence on the gas disaster prevention in coal mines. In this paper, the initial velocity of gas emission, abutment pressure ahead of the face, gas emission and permeability coefficient in coal seam, et al, were analyzed by the theoretical analysis and numerical simulation. The results show that there are similar or opposite variation regularity among these parameters, which are the combinations of S-shaped curve and inverted S-shaped curve associated to the distance  $x$  or time  $t$ . Meanwhile, permeability coefficient curve with distance, as well as gas pressure and abutment pressure with distance, all present not exactly symmetrical characteristics. Thus, the variation regularity of parameters can be ascertained with specific coal mine conditions. The research results can provide theoretical guidance to the prevention and control of gas disaster in coal mines.

**Key words** gas parameter; variation regularity; S-type; inverted S-type

煤矿科技工作者经过多年的研究发现,瓦斯涌出初速度、工作面前方的支承应力、瓦斯涌出量、煤层透气性系数等煤层的技术参数具有共同的或相反的变化规律。不妨用钻孔瓦斯涌出初速度  $q$  值曲线来进行说明。

钻孔瓦斯涌出初速度  $q$  值是预测煤与瓦斯突出的一个重要指标。根据前苏联马凯耶夫煤矿安全研究所提出的资料,钻孔瓦斯涌出初速度曲线  $q=f(t)$  具有某个最大值,并且大多数情况下极大值位于开始测量后 0.5~5 min(从打钻结束  $t_0$  到开始测量的时

收稿日期: 2013-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274089, 51104056, 51174080); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(2011HASTIT014)

作者简介: 吴立云(1973—), 女, 河北省藁城市人, 副教授, 博士, 从事瓦斯灾害预警和安全系统工程等方面的研究。

E-mail: jitwly@hpu.edu.cn

Tel: 0391-3987959

间  $t_H$  通常不会超过 2~3 min), 即极大值出现在打完钻孔后的 2.5~8 min 之间。

由文献[1-4]可以发现: 钻孔瓦斯涌出初速度  $q$ 、综放工作面前方的支承应力、瓦斯涌出量及掘进工作面前方的瓦斯压力关于时间或距离的曲线具有相同的变化趋势, 它们可以用同一类型的方程进行描述。

### 1 采煤工作面前方超前支承应力 $p$ 的方程

#### 1.1 Origin 软件拟合的方法

在郭村矿 12041 工作面前方不同距离处布置测点, 收集数据研究采煤工作面前方超前支承应力的变化规律。根据研究的需要, 对数据进行了适当变换, 把最远处的支承应力 8 MPa 作为原岩应力, 用原岩应力分别除以所测的 22 个超前支承应力数据所得到的系数  $K$  称为变异系数, 通过对  $K$  的研究可以推知超前支承应力与距离工作面  $x$  的关系, 其中, 超前支承应力的变异系数为  $K_i = p_{\text{原岩}}/p_i$ 。根据测定的数据, 绘制出超前支承应力、变异系数  $K$  距工作面不同距离时的变化曲线, 如图 1 所示。

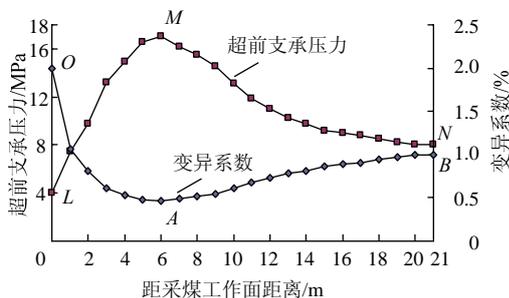


图 1 超前支承应力、变异系数  $K$  与采煤面不同距离  $x$  的变化曲线

Fig.1 Curve of abutment stress ahead of face and coefficient of variation  $K$  from mining face

将图 1 中的  $K$  值分成 2 个部分: 第 1 部分是  $K$  值从 2 下降到 0.471, 即曲线  $OA$  段; 第 2 部分是  $K$  值从 0.471 增加到 1, 即曲线  $AB$  段。分别对曲线  $OA$  段和曲线  $AB$  段进行拟合, 求出它们的拟合方程。

$$y = \text{circ} \left[ \frac{x}{6} \right] \cdot \left( 0.47864 + 1.50906 \cdot e^{\frac{-x}{1.17746}} \right) + \left( 1 - \text{circ} \left[ \frac{x}{6} \right] \right) \cdot \left( \frac{-0.66129}{1 + e^{\frac{x-13.522}{2.7053}}} + 1.0279 \right)$$

即方程:

$$y = \text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \cdot \left( y_0 + A_0 \cdot e^{\frac{-x}{t_0}} \right) + \left( 1 - \text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \right) \cdot \left( \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} + A_2 \right)$$

1) 曲线  $OA$  段是距工作面 0~6 m 时的  $K$  值所组成的曲线, 利用 Origin 软件对这 7 个点进行方程拟合, 拟合的方程参数见表 1 所列。曲线  $OA$  段拟合的方程为

$$y = 0.47864 + 1.50906e^{\frac{-x}{1.17746}}$$

表 1 对曲线  $OA$  段拟合的方程  $y_0 + A_0 e^{-\frac{x}{t_0}}$  的参数

Table 1 Parameters of fitting equation to curve  $OA$

平均剩余残差平方和	相关系数	参数	数值	误差
0.002 07	0.995 42	$y_0$	0.478 64	0.030 64
		$A_0$	1.509 06	0.051 54
		$t_0$	1.177 46	0.103 38

注:  $A_0$  为强度,  $t_0$  为衰减因子。

根据拟合的方程可以判定, 曲线  $OA$  段显示出“倒 S 型”曲线的性质(倒 S 型曲线证明见 1.2 节)。

2) 曲线  $AB$  分别是距工作面 6~21 m 时的  $K$  值所组成的曲线, 利用 Origin 软件对这 16 个点进行方程拟合, 拟合的方程参数见表 2 所列。曲线  $AB$  的拟合方程为

$$y = \frac{-0.66129}{1 + e^{\frac{x-13.522}{2.7053}}} + 1.0279$$

根据拟合的方程可以判定, 曲线  $AB$  段显示出“S 型”曲线的性质。

表 2 曲线  $AB$  段拟合方程  $\frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} + A_2$  的参数

Table 2 Parameters of fitting equation to curve  $AB$

平均剩余残差平方和	相关系数	参数	数值	误差
0.000 147 6	0.997	$A_1$	0.367	0.037
		$A_2$	1.028	0.017
		$x_0$	11.602	0.330
		$dx$	3.119	0.345

注:  $A_1$  为初始值,  $A_2$  为终值,  $dx$  为宽度。

综合曲线  $OA$  段和曲线  $AB$  段的拟合方程, 那么  $K$  值曲线可表示为

式中：圆域函数  $\text{circ}\left[\frac{x}{l}\right] = \begin{cases} 1, & \frac{x}{l} \leq 1 \\ \frac{x}{l}, & x, l \in [0, \infty), l \text{ 为} \\ 0, & \frac{x}{l} > 1 \end{cases}$

出现最小  $K$  值点(即超前支承应力最大值点)对应的  $x$  的坐标。

可见，超前支承应力的  $K$  值曲线是由“倒 S 型

$$\text{circ}\left[\frac{x}{l}\right] \cdot (y_0 + A_0 \cdot e^{-\frac{x}{l_0}}) + \left(1 - \text{circ}\left[\frac{x}{l}\right]\right) \cdot \left(\frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} + A_2\right) = \frac{P_{\text{原岩}}}{p} \Rightarrow p = \frac{P_{\text{原岩}}}{\text{circ}\left[\frac{x}{l}\right] \cdot (y_0 + A_0 \cdot e^{-\frac{x}{l_0}}) + \left(1 - \text{circ}\left[\frac{x}{l}\right]\right) \cdot \left(\frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} + A_2\right)}$$

将  $p$  代入超前支承应力的  $K$  值曲线方程，得到郭村矿 12041 采煤工作面前方的超前支承应力的方程为

$$p = \frac{8}{\text{circ}\left[\frac{x}{6}\right] \cdot \left(0.47864 + 1.50906 \cdot e^{-\frac{-x}{1.17746}}\right) + \left(1 - \text{circ}\left[\frac{x}{6}\right]\right) \cdot \left(\frac{-0.66129}{1 + e^{\frac{x-13.522}{2.7053}}} + 1.0279\right)}$$

根据图 1，超前支承应力曲线是由“S 型曲线+倒 S 型曲线”组合而成的，它与超前支承应力的  $K$  值曲线是“对称”的。郭村矿煤层各参数曲线如图 2 所示。由图 2 可知，工作面前方的超前支承应力

$$\frac{P_{\text{原始瓦斯}}}{P} = \text{circ}\left[\frac{x}{l}\right] \cdot (y_0 + A_0 \cdot e^{-\frac{x}{l_0}}) + \left(1 - \text{circ}\left[\frac{x}{l}\right]\right) \cdot \left(\frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} + A_2\right) \Rightarrow P = \frac{P_{\text{原始瓦斯}}}{\text{circ}\left[\frac{x}{l}\right] \cdot (y_0 + A_0 \cdot e^{-\frac{x}{l_0}}) + \left(1 - \text{circ}\left[\frac{x}{l}\right]\right) \cdot \left(\frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} + A_2\right)}$$

曲线+S 型曲线”组合而成的。这是通过 Origin 软件拟合得出的结果，相关的数学证明见 1.2.1。

因此，郭村矿采煤工作面前方的超前支承应力  $p$  关于距离  $x$  的方程的求解过程如下。

根据变异系数的定义和上述  $K$  值曲线的方程可得

与工作面前方的瓦斯压力关于距工作面的距离具有相似的变化趋势，它们可以用同一类方程来描述。因此，郭村矿工作面前方的瓦斯压力  $P$  的方程也有如下的求解过程：

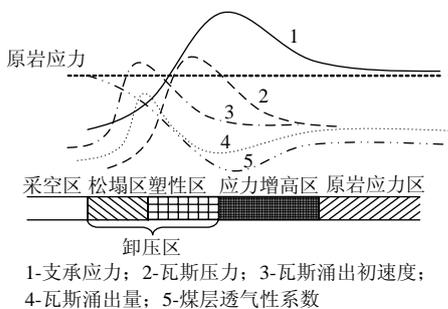


图 2 煤层各参数曲线图  
Fig.2 Curves of five parameters in coal bed

变异系数  $K(x)$  的曲线形状与煤层透气性系数  $\lambda$  的曲线形状很相似，究其原因，矿山压力对煤层瓦斯的影响，主要是超前支承应力(来自于三轴应力中的垂直应力)随着工作面的推进，采空区上、下区域卸压，使得垂直应力集中在工作面前方煤壁和采空区中的支撑体上这 2 个类似于“拱角”的地方，并且这 2 个地方的剪应力非常大，导致工作面周围区域中由近及远划分为卸压区、应力集中区和原岩应力区，从而改变工作面周围煤体中的煤层透气性系数，距工作面由近及远的透气性系数分别为：由大

到小，再增大到原始透气性系数；透气性系数的改变，使得工作面周围瓦斯压力变化与超前支承应力具有相似的变化趋势。即：支承应力的改变→煤层透气性系数的改变→煤层瓦斯压力的改变，而煤层透气性系数与瓦斯压力共同决定了煤层的瓦斯涌出。在透气性系数较大的地方，瓦斯很快就涌出，因此瓦斯不会大量聚集，瓦斯压力就小；相反，透气性系数较小的地方，瓦斯很难涌出，导致瓦斯大量聚集，使得瓦斯压力异常增大。所以，透气性系数曲线与瓦斯压力曲线具有相反的变化趋势，显示出某种“对称性”。

从图 2 可看出：对煤层透气性系数曲线进行水平方向上的伸缩和平移变换、垂直方向上的振幅变换(或垂直方向上振幅变换后，再对煤层透气性系数曲线进行对称变换)后，煤层透气性系数曲线会与其他曲线呈现对称关系(或与其他曲线相重合)，因此，可以得出：

1) 支承应力、瓦斯压力、瓦斯涌出初速度曲线具有相似的变化趋势，它们之间的差别可以通过水平伸缩、平移和垂直方向上的振幅变换来消除，使

它们相重合。因此它们之间的差别是相位、振幅和频率的差别。

2) 煤层透气性系数曲线与支承应力、瓦斯压力、瓦斯涌出初速度曲线具有相反的变化趋势，它们之间的差别可以通过水平伸缩、水平位移和垂直方向上的纵坐标的振幅变换(或纵坐标的振幅变换后，再进行对称变换)后，使得煤层透气性系数曲线与支承应力、瓦斯压力、瓦斯涌出初速度曲线相对称(或相重合)。

3) 瓦斯涌出量曲线比较特别，以下会进行归纳。

由图 2 可看出，支承应力、瓦斯压力关于距工作面的距离具有相似的变化趋势，瓦斯压力的峰值到工作面的距离比支承应力的峰值到工作面的距离要近。这是因为采煤工作面前方，随着支承应力由小变大，特别是支承应力大于原岩应力后，煤体出现裂隙，即在支承应力的峰值前方已经出现裂隙，附近的煤体中吸附的瓦斯迅速解吸并沿裂隙涌向工作面，于是在支承应力前方瓦斯压力出现峰值。

根据上述的研究，煤层透气性系数  $\lambda$  关于距离  $x$  的方程有如下 2 种形式：

1) 煤层透气性系数  $\lambda$  关于距离  $x$  的方程为(根据  $K$  值曲线方程)：

$$\lambda(x) = \text{circ}\left[\frac{x}{l}\right] \cdot \left(y_0 + A_0 \cdot e^{-\frac{x}{l_0}}\right) + \left(1 - \text{circ}\left[\frac{x}{l}\right]\right) \cdot \left(\frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} + A_2\right)$$

式中： $l$  为煤层透气性系数最小处距钻孔(或工作面)的距离； $x_0$  为煤层透气性系数变化剧烈的地方。

2) 煤层透气性系数  $\lambda$  关于距离  $x$  的方程也可以写成

$$\lambda(x) = \lambda_0 \cdot k'(x)$$

其中  $k'(i) = \frac{\lambda_i}{\lambda_0}$ ， $(i=1, 2, 3, \dots, n)$ ； $\lambda_0$  为煤层原始透气性系数。

于是，煤层透气性系数  $\lambda$  曲线是由“倒 S 型曲线+S 型曲线”组合而成的。

考虑到煤层瓦斯各参数的变化规律，可以做如下归纳(具体图形如图 2 所示)：

1) “S 型曲线+倒 S 型曲线”：瓦斯涌出初速度曲线，超前支承应力曲线，瓦斯压力曲线，顶底板移动速度曲线，巷道两帮移动速度曲线；

2) “S 型曲线+倒 S 型曲线+S 型曲线”：瓦斯涌出量曲线；

3) “倒 S 型曲线+S 型曲线”： $K$  值曲线，煤层透气性系数  $\lambda$  曲线。

## 1.2 数学推导倒 S 型曲线方程

### 1.2.1 超前支承应力求解

由于 S 型曲线方程为  $y = \frac{k}{1 + e^{a-rt}}$  ( $t > 0$ )，

倒 S 型曲线的方程为  $y = \frac{k}{1 + e^{-\frac{r}{a}x}}$  ( $x > 0$ )，运用

迭代的方法，可以算出方程。

假设给出 3 个任意点  $(X_1, Y_1)$ ， $(X_2, Y_2)$ ， $(X_3, Y_3)$ ，不妨设  $X_1 < X_2 < X_3$ 。

$$\begin{cases} Y_1 = B + Ae^{rX_1} \\ Y_2 = B + Ae^{rX_2} \\ Y_3 = B + Ae^{rX_3} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Y_2 - Y_1 = A(e^{rX_2} - e^{rX_1}) \\ Y_3 - Y_1 = A(e^{rX_3} - e^{rX_1}) \end{cases}$$

$$\Rightarrow s = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_3 - Y_1} = \frac{e^{rX_2} - e^{rX_1}}{e^{rX_3} - e^{rX_1}} = g(r)$$

迭代公式：

$$r_{n+1} = \frac{1}{(X_3 - X_1)} \ln\left(\frac{e^{r_n(X_2 - X_1)} + s - 1}{s}\right)$$

依次算出  $r_1, r_2, \dots, r_n$ ，随着迭代次数的递增， $r$  值开始减小，最后稳定在 9.9 附近，因此取  $r \approx 9.9$ 。

算出  $r$  值以后，根据

$$\begin{cases} A = \frac{Y_2 - Y_1}{e^{rX_2} - e^{rX_1}} \\ B = Y_1 - Ae^{rX_1} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = 0.1268 \\ B = 0.0346 \end{cases} \text{ 及 } k = \frac{1}{B}$$

$a = \ln(kA)$

故超前支承应力的  $MN$  段满足倒 S 型曲线的方程，方程为  $y = \frac{28.5}{1 + e^{-\frac{13.99}{x}}}$ 。

工作面前方 6~21 m 的超前支承应力(即图 1 中的  $MN$  段)的实测值与迭代值的比较如图 3 所示。

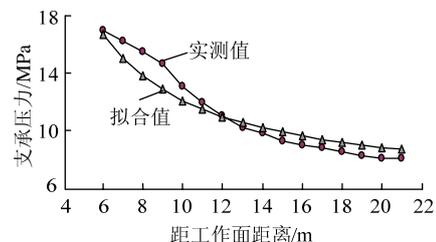


图 3 工作面前方 6~21 m 的超前支承应力实测值与拟合值对比

Fig.3 Comparison between measuring values and fitting values of abutment stress from 6 m to 21 m ahead of face

由图 3 可看出，拟合曲线与实测值曲线还是很

接近的,在曲线结尾处,相差较大,为 0.6 MPa,其他数值相差不大,因此,本节对超前支承应力 MN 段的变化趋势的数学证明是成立的。即:MN 段确实是满足倒 S 曲线的性质,也证明了利用 Origin 软件拟合方法的合理性,对 MN 段的拟合和数学证明显示,在上节和本节求出的这 2 个方程是同一种类型,只是表达式不同而已。

对工作面前方 0~6 m(图 1 中的 LM 段)的超前支承应力值利用 Origin 拟合曲线,如图 4 所示。表 3 为工作面前方 0~6 m(图 1 中的 LM 段)的拟合曲线的参数。根据图 4 可知,LM 段是满足 S 型曲线的,它的曲线方程为

$$y = \frac{-20.9315}{1 + e^{\frac{x-1.2065}{1.6464}}} + 18.247$$

因此工作面前方超前支承应力的方程为

$$p = \text{circ} \left[ \frac{x}{6} \right] \cdot \left( \frac{-20.9315}{1 + e^{\frac{x-1.2065}{1.6464}}} + 18.247 \right) + \left( 1 - \text{circ} \left[ \frac{x}{6} \right] \right) \cdot \left( \frac{28.5}{1 + e^{\frac{1.3-\frac{9.9}{x}}{1.6464}}} \right)$$

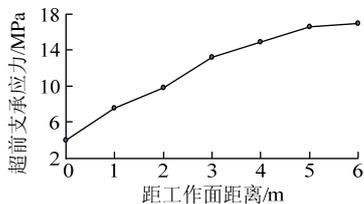


图 4 LM 段数值拟合曲线  
Fig.4 Fitting curve of LM

表 3 超前支承应力 LM 段拟合曲线参数  
Table 3 Parameters of fitting equation to curve LM

平均剩余残差平方和	相关系数	参数	数值	误差
0.170 68	0.996 47	$A_1$	-2.684 5	5.58
		$A_2$	18.247	1.08
		$x_0$	1.205 6	0.822
		$dx$	1.646 4	0.515

1.2.2 瓦斯压力方程及瓦斯压力最值预测

在郭村矿采煤工作面前方不同距离处打钻孔测瓦斯压力,由于条件限制,只测出了距工作面 7 m 以后的 11 个测点的瓦斯压力,如表 4 所列。

利用 2.2.1 节的迭代手法,最后  $r$  的稳定值为 10.9,求得工作面前方的瓦斯压力与工作面距离(7 m 以后)的方程为

$$P_{\text{瓦斯}} = \frac{3.9}{1 + e^{\frac{2.53 \cdot 10.9}{x}}}, x \geq 7 \text{ m}$$

表 4 郭村矿采煤工作面前方瓦斯压力测定值  
Table 4 Gas pressure ahead of mining face in Guocun Coalmine

距工作面距离/m	7	9	11	13	15	17
瓦斯压力/MPa	1.09	1.06	0.99	0.85	0.71	0.57
距工作面距离/m	19	21	23	25	27	29
瓦斯压力/MPa	0.49	0.42	0.36	0.31	0.29	0.28

实测值与拟合值的对比如图 5 所示,拟合值的最终结果比实测值大 0.1 MPa,2 条曲线最大相差 0.3 MPa。可以对拟合曲线做一个瓦斯压力最大值、最小值预测,取最大值、最小值与拟合值之间相差 0.3 MPa,将每一个拟合值都加減 0.3 MPa,如图 5 所示,因此工作面前方瓦斯压力预测区间属于 0.18~1.37 MPa 之间,显然,实测值是包含在预测瓦斯压力最大、最小值曲线之间的。

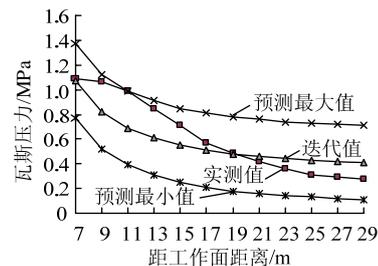


图 5 工作面前方的瓦斯压力实测值、拟合值、预测最大、最小值曲线

Fig.5 Measuring value, fitting value, the maximum and minimum values of gas pressure ahead of face

实测值和拟合值相差 0.3 MPa 是由于瓦斯压力测点少的缘故,随着瓦斯压力测点的增多,拟合曲线和实测值曲线会逐渐接近,当测点趋于无穷多时,拟合曲线和实测值曲线在理论上会完全重合。因此,瓦斯压力预测最大、最小值曲线类似于 2 个上下瓦斯压力理论极限,即 2 个瓦斯压力理论边界。

1.2.3 最大理论瓦斯压力值和理论原始瓦斯压力值预测

对于  $P_{\text{瓦斯}} = \frac{3.9}{1 + e^{\frac{2.53 \cdot 10.9}{x}}}$  进行数学分析:

1) 在  $x$  等于 4.3 m 时,瓦斯压力为 1.95 MPa,根据经验,瓦斯压力先于支承应力达到峰值,4.3 m < 6 m,故可以把 1.95 MPa 作为受到采动影响的区域内的理论最大瓦斯压力值;

2) 在  $x$  趋向于  $+\infty$  时,此时的瓦斯压力值约为

0.29 MPa, 可以把 0.29 MPa 作为未受到采动影响的区域内瓦斯压力值, 即理论原始瓦斯压力值。

对于上述 2 点, 显然数值都是偏大的, 这是因为测点少的技术性原因所造成的, 随着测点的增多, 分子值会变小, 因此计算出的采动后的最大理论瓦斯压力值和理论原始瓦斯压力值会变小, 也更接近真实值。在理论上, 可以这样说, 只要测点足够多, 就可以准确地预测出受到采动影响的区域内的最大理论瓦斯压力值和理论原始瓦斯压力值。

### 1.2.4 煤层瓦斯参数的实际应用

#### 1) 巷道变形速度

巷道变形速度包括顶底板移近速度和两帮移近速度。在郭村矿 12041 工作面运输巷设置测点, 进行回采工作面巷道的矿压观测, 确定巷道围岩变形量、工作面的超前支承应力分布范围及分布变化规律, 为巷道超前支护方式及支护范围提供理论依据, 确保巷道在服务期限内处于良好状态。

在运输巷设置 11 个单体液压支柱, 支柱间隔 2 m, 分别距工作面 0, 2, 4, …, 20 m; 对运输巷顶底板移近速度及两帮移近速度的观察共设 20 个监测点, 每个测点间隔 1 m, 分布为距工作面 1,

2, …, 20 m。通过数据观测和整理, 绘制成图, 如图 6 所示。

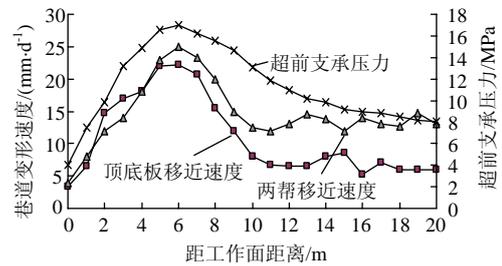


图 6 12041 工作面运输巷支柱载荷及巷道变形速度数据  
Fig.6 Load of pillars and surrounding rock deformation in haulage way of 12041 working face

由图 6 可看出, 超前支承应力与顶底板移近速度、两帮移近速度相关度非常高; 而且两帮的移近速度明显大于顶底板移近速度, 但是两帮移近速度与顶底板移动速度相协调, 这说明, 两帮移近速度除了受超前支承应力影响, 还受到了水平地应力的影响。从图 6 还可看出, 顶底板的移近速度与两帮的移近速度与工作面距离的方程同超前支承应力方程是同一类型的, 即顶底板的移近速度与工作面距离的方程为

$$S(x) = \frac{S_0}{\text{circ}\left[\frac{x}{l}\right] \cdot \left(y_0 + A_0 \cdot e^{-\frac{x}{l_0}}\right) + \left(1 - \text{circ}\left[\frac{x}{l}\right]\right) \cdot \left(\frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{l}}}\right) + A_2}$$

式中:  $S_0$  为距工作面较远处的顶底板的稳定移近速度, 为一常数, 它的曲线形式为“S 型曲线+倒 S 型曲线”。两帮移近速度曲线同顶底板移近速度曲线类似, 不再赘述。

#### 2) 郭村矿的煤层透气性系数

工作面前方煤层透气性系数  $\lambda$  的方程可表示为

$$\lambda(x) = \lambda_0 \cdot k'(x)$$

其中  $k'(i) = \frac{\lambda_i}{\lambda_0}$  ( $i=1,2,3,\dots,n$ );  $\lambda_0$  为煤层原始透

气性系数, 为  $2.4 \times 10^{-4} - 4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 。

$k'(x)$  可以用顶底板移近速度的  $K$  值曲线来代替, 这是因为对郭村矿的煤层来说, 水平地应力是形成煤层原始透气性系数的重要原因, 在水平地应力不变的前提下, 超前支承应力改变了工作面前方的透气性系数(即改变了煤层原始透气性), 因此可以用顶底板移近速度的  $K$  值曲线代替煤层透气性系数的  $K$  值曲线, 顶底板移近速度的  $K$  值曲线经过计算, 作图如图 7 所示。

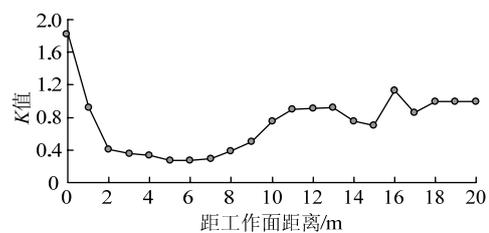


图 7 顶底板移近速度  $K$  值曲线  
Fig.7  $K$  Curve of moving speed of roof and floor

$$k(x) = \text{circ}\left[\frac{x}{6}\right] \cdot \left(0.26191 + 1.56669 \cdot e^{-\frac{x}{1.04646}}\right) + \left(1 - \text{circ}\left[\frac{x}{6}\right]\right) \cdot \left(\frac{-0.64655}{1 + e^{\frac{x-9.3313}{0.67674}}} + 0.92269\right)$$

令  $k(x) = k'(x)$

$$k'(x) = \text{circ}\left[\frac{x}{6}\right] \cdot \left(0.26191 + 1.56669 \cdot e^{-\frac{x}{1.04646}}\right) + \left(1 - \text{circ}\left[\frac{x}{6}\right]\right) \cdot \left(\frac{-0.64655}{1 + e^{\frac{x-9.3313}{0.67674}}} + 0.92269\right)$$

因此, 12041 工作面前方透气性系数方程为

$$\lambda(x) = \lambda_0 \cdot \text{circ} \left[ \frac{x}{6} \right] \cdot \left( 0.26191 + 1.56669 \cdot e^{\frac{-x}{1.04646}} \right) + \left( 1 - \text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \right) \cdot \left( \frac{-0.64655}{1 + e^{\frac{x-9.3313}{0.67674}}} + 0.92269 \right)$$

## 2 结 论

1) 采煤工作面前方超前支承应力曲线为“S 型曲线+倒 S 型曲线”, 超前支承应力的方程为

$$p = \frac{P_{\text{原岩}}}{\text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \cdot \left( y_0 + A_0 \cdot e^{\frac{-x}{t_0}} \right) + \left( 1 - \text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \right) \cdot \left( \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dv}}} + A_2 \right)}$$

2) 煤层透气性系数  $\lambda$  曲线为“倒 S 型曲线+S 型曲线”, 煤层透气性系数  $\lambda$  关于距离  $x$  的方程为

$$\lambda(x) = \text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \cdot \left( y_0 + A_0 \cdot e^{\frac{-x}{t_0}} \right) + \left( 1 - \text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \right) \cdot \left( \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dv}}} + A_2 \right)$$

或  $\lambda(x) = \lambda_0 \cdot k'(x)$

式中  $k'(x)$  可以使用超前支承应力的  $K$  值曲线代替, 可以使用顶底板移动速度的  $K$  值曲线来代替, 也可以使用工作面前方的瓦斯压力的  $K$  值曲线来代替使用, 或者也可以是这几种  $K$  值曲线的组合, 给每个  $K$  值曲线确定不同的权重, 视具体情况而定。

3) 工作面前方的瓦斯压力曲线为“S 型曲线+倒 S 型曲线”, 瓦斯压力场方程为

$$P = \frac{P_{\text{原始}}}{\text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \cdot \left( y_0 + A_0 \cdot e^{\frac{-x}{t_0}} \right) + \left( 1 - \text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \right) \cdot \left( \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dv}}} + A_2 \right)}$$

4) 瓦斯涌出初速度曲线, 顶底板移动速度曲线, 巷道两帮移动速度曲线都为“S 型曲线+倒 S 型曲线”, 方程形式为

$$y = \frac{y_{\text{原始}}}{\text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \cdot \left( y_0 + A_0 \cdot e^{\frac{-x}{t_0}} \right) + \left( 1 - \text{circ} \left[ \frac{x}{l} \right] \right) \cdot \left( \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dv}}} + A_2 \right)}$$

5) 通过软件拟合和数学证明, 瓦斯涌出量曲线为“S 型曲线+倒 S 型曲线+S 型曲线”。

## 参考文献:

[1] 仇海生, 曹鑫林, 都峰, 等. 钻孔瓦斯涌出初速度指标的影响因素分析[J]. 煤矿安全, 2010(4): 99-101.  
QIU Haisheng, CAO Yaolin, DU Feng, et al. Analysis of influencing factors on the initial velocity of gas emission from borehole[J]. Safety in Coal Mines, 2010(4):

99-101.

- [2] 高建良, 侯三中. 掘进工作面动态瓦斯压力分布及涌出规律[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1127-1131.  
GAO Jianliang, HOU Sanzhong. Dynamic distribution of gas pressure and emission around a diving roadway[J]. Journal of China Coal, 2007, 32(11): 1127-1131.
- [3] 李树刚, 刘志云. 综放面矿山压力与瓦斯涌出监测研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 19(1): 100-102.  
LI Shugang, LIU Zhiyun. Research on monitoring of ground pressure and gas emission in fully mechanized caving face[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(1): 100-102.
- [4] 郑国宝, 成恒棠. 掘进工作面瓦斯压力场与应力场的分布关系[J]. 中州煤炭, 2010(1): 86-87.  
ZHENG Guobao, CHENG Hengtang. Distribution relationship between gas pressure and stress field in driving face[J]. Zhongzhou Coal, 2010(1): 86-87.
- [5] 刘爱国, 崔宜兰. 倒 S 型曲线模型的研究[J]. 工科数学, 1996, 12(2): 21-24.  
LIU Aiguo, CUI Yilan. Research on curve model of inverse S[J]. Journal of Mathematics for Technology, 1996, 12(2): 21-24.
- [6] 王基镛. 大范围收敛的迭代法求解非线性回归的参数[J]. 数学的实践与认识, 1991(2): 49-57.  
WANG Jirong. Calculation of non-linear regression parameters with iterative method converged in large scale[J]. Mathematics in Practice and Theory, 1991(2): 49-57.
- [7] 王晓亮, 郭勇义, 吴世跃. 煤层中瓦斯流动的计算机模拟[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(4): 402-405.  
WANG Xiaoliang, GUO Yongyi, WU Shiyue. The simulation of gas flow in coal seams[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34(4): 402-405.
- [8] 秦祥基. 关于钻孔瓦斯涌出初速度法预测煤巷掘进工作面突出危险性的探讨[J]. 焦作矿业学院学报, 1993(3): 1-5.  
QIN Xiangji. Discussion on outburst risk prediction of driving face in coal tunnel by initial velocity of borehole gas emission[J]. Journal of Jiaozuo Mining Institute, 1993(3): 1-5.
- [9] 李化敏, 王文, 熊祖强. 采动围岩活动与工作面瓦斯涌出关系[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1): 11-16.  
LI Huamin, WANG Wen, XIONG Zuqiang. Relationship between mining induced surrounding rock movement and gas emission in working face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(1): 11-16.
- [10] 江长青. 用智能化瓦斯涌出初速度仪监测钻孔  $q$  值动态过程[J]. 焦作工学院学报, 1996, 15(5): 64-68.  
JIANG Changqing. Monitoring the dynamic process of gas emission from borehole by intelligent gas rate meter[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 1996, 15(5): 64-68.