

①22-25

# 有效应力对煤层气渗透率影响的研究

Study on Affection to Permeability of  
Gas of Coal Layers by Effective Stress

TD712.52

姜德义  
Jiang Deyi

张广洋  
Zhang Guangyang

胡耀华  
Hu Yaohua

刘立平  
Liu Liping

(重庆大学资源及环境工程学院, 重庆, 400044; 第一作者 32岁)

**摘要** 研究了有效应力对煤层瓦斯渗透率的影响, 推导出的渗透率与有效应力之间的关系为三次多项式, 并经实验进行了验证。

**关键词** 煤; 渗透率; 有效应力

中国图书资料分类法分类号 TD712.52

瓦斯 运移规律

**ABSTRACT** The affection to the permeability of the gas of coal layers by the effective stress is studied and the relationship between the permeability and the effective stress which is a three-order polynomial is derived and is verified by experiment.

**KEYWORDS** coal; permeability; effective stress

## 0 引 言

我国煤炭资源十分丰富, 而煤炭中含有大量的瓦斯, 无论是把煤层瓦斯作为灾害因素加以防治, 如煤与瓦斯突出, 或者把煤层瓦斯作为一种资源, 进行综合开发利用, 都必须研究煤层中瓦斯的运移规律。

煤层瓦斯运移中, 煤的渗透性研究是一项非常重要的理论基础工作。影响煤层瓦斯渗透性的各种因素中, 应力起着重要的作用。煤层采掘后, 由于集中压力的作用, 使部分煤体压缩变形, 孔隙率降低, 妨碍瓦斯渗透, 或由于卸压作用, 造成部分煤体伸张变形, 在煤层中形成新的裂隙, 使煤的渗透性能增加。

应力对煤样渗透率影响的研究, 国内外学者都进行了一些研究<sup>[1~4]</sup>。研究表明, 随着应力的增大, 煤层瓦斯的渗透率下降, 煤层瓦斯的渗透率对应力非常敏感。前人这些研究都是从宏观上揭示了应力对煤渗透性的影响。众所周知, 煤是一种多孔物质, 瓦斯是沿着煤中连通的孔隙流动。在外力作用下, 煤体发生变形, 使得瓦斯流经的通道也发生相应的变形, 从而使煤层瓦斯的渗透率发生改变。笔者试图从煤中孔隙变形的角度, 来研究应力对煤样渗透率的影响, 并建立了相应的模型。

• 收文日期 1996-11-03

国家教委博士点基金资助项目

### 1 模型的建立

假设圆柱形煤样中存在着系列的方向各异的微细裂纹,各个微细裂纹之间相互独立。为研究的方便,假设微细裂纹的截面为矩形,从任一截面到一典型的裂纹*i*,其受力状况如图 1。(当然,这种假设与实际情况有些出入,但作为一种规律性的探讨,这种假设是必要的,而且也是可行的)。

圆柱形煤样在水平方向上受有效应力  $p_e$  作用,则:  $p_e = \sigma_c - \bar{p}$  (1)

式中  $\sigma_c$ ——围压;

$\bar{p}$ ——平均孔隙压力,  $\bar{p} = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)$ ,  $p_1, p_2$  分别为流入、流出煤样的气体压力;

煤样所受的径向应力为  $\sigma_r$ ,切向应力为  $\sigma_\theta$ ,则:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -p_e \quad (2)$$

图 1 中,假设矩形截面微细裂纹的长度为  $l$ ,宽度为  $w$ ,高度为  $h$ ,圆柱煤样半径为  $R$ 。在煤样截面到平行于矩形宽的平面为  $AA'$ ,  $AA'$  的长轴与半径  $R$  的夹角为  $\varphi$ ,作用于孔隙矩形截面上的径向力为  $f_r$ ,切向力为  $f_\theta$ ,如图中所示,则

$$\left. \begin{aligned} f_r &= lw\sigma_r \sin\varphi \\ f_\theta &= lw\sigma_\theta \cos\varphi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

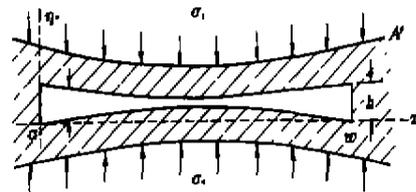
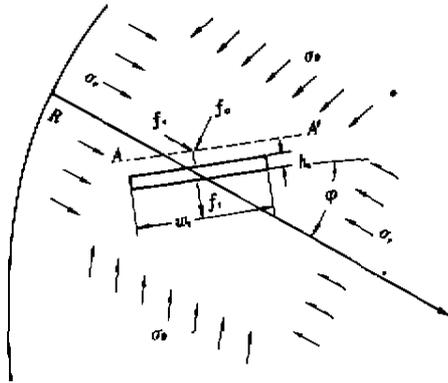


图 1 圆柱形煤样中任一矩形孔*i*的受力分析

图 2 矩形截面孔隙受力变形分析

垂直作用于平面  $AA'$  施于孔隙的力  $f_1$  为:

$$f_1 = lw_1\sigma_1 = lw_1\sigma_r \sin^2\varphi + lw_1\sigma_\theta \cos^2\varphi \quad (4)$$

由(2)、(3)、(4)式看出  $\sigma_1 = \sigma_r = \sigma_\theta = -p_e$  (5)

图 2 为微细裂纹  $i$  的横截面在应力作用下的变形情况。假设微细裂纹的矩形截面与周围骨架组成一梁式结构,梁上受均布截荷  $\sigma_1$ ,由材料力学知,梁的挠度方程为:

$$\eta = \frac{\sigma_1 x^2}{24EI_y} (w - x)^2 \quad (6)$$

式中  $I_y$ ——梁的惯性矩,  $I_y = \frac{w}{12}h^3$ ;

$E$ ——梁的弹性模量;

沿  $x$  方向任一点孔隙的高度  $d$  为:

$$d = h - 2\eta \quad (7)$$

由(5)式、(6)式、(7)式得:  $d = h - mp_c x^2 (w - x)^2$  (8)

式中  $m = \frac{1}{12EI_y}$

作用  $\sigma_c$  后, 孔隙截面变化后的面积为:

$$S = \int_0^w d \cdot dx = w \cdot (h - mp_c w^4 / 30) \quad (9)$$

由于应力  $\sigma_c$  的作用使孔隙沿宽度  $w$  方向上的变化很小, 这里忽略不计。

流体在圆柱形微细裂纹的流动, 由泊松方程<sup>[5]</sup>知:  $Q_s = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128 \mu l}$  (10)

式中  $Q_s$ ——流量;  $D$ ——微细裂纹直径;

$\mu$ ——流体粘度;  $l$ ——微细裂纹。

对于本文的矩形截面微细裂纹, 结合文献[2], 则得出:  $Q_i = \frac{\Delta p d^3}{12 \mu l} w$  (11)

受  $\sigma_c$  作用后, 微细裂纹变形, 对于  $w$  方向上的  $dx$  段:  $dQ_i = \frac{\Delta p d^3}{12 \mu l} dx$  (12)

对于整个  $w$  宽则:  $Q_i = \frac{\Delta p}{12 \mu l} \int_0^w d^3 dx$  (13)

将(8)式代入(13)式积分整理得:

$$Q_i = \frac{\Delta p}{12 \mu l} \left[ h^3 - \frac{h^2 m w^6}{10} p_c + \frac{h m^2 w^9}{210} p_c^2 - \frac{m^3 w^{12}}{12012} p_c^3 \right] \quad (14)$$

(14)式即为矩形截面微细裂纹  $i$  受力变形后的流量表达式, 设流经整个煤样截面的流量为  $Q$ , 则:  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_i + \dots + Q_N = \sum_{i=1}^N Q_i$  (15)

这里假设煤样由  $N$  个微细裂纹组成。

由达西定律知, 瓦斯流过整个煤样截面的流量  $Q$  为:  $Q = \frac{K \Delta p A}{\mu l}$  (16)

式中  $A$ ——煤样的横截面积;  $l$ ——煤样的长度;

$K$ ——煤样的渗透率; 其余同前。

由(11)式、(15)式、(16)式得到煤层瓦斯的渗透率  $K$ :

$$K = A_0 + A_1 p_c + A_2 p_c^2 + A_3 p_c^3 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad A_0 &= \frac{1}{12A} \sum_{i=1}^N \frac{h_i^3 w_i}{l_i}; & A_1 &= -\frac{1}{12A} \sum_{i=1}^N \frac{h_i^2 m w_i^6}{10 l_i} \\ A_2 &= \frac{1}{12A} \sum_{i=1}^N \frac{h_i m^2 w_i^9}{210 l_i}; & A_3 &= -\frac{1}{12A} \sum_{i=1}^N \frac{m^3 w_i^{12}}{12012 l_i} \end{aligned} \quad (18)$$

由(17)式看出, 宏观渗透率  $K$  与微观微细裂纹参数  $h, l, w$  便建立了关系, 从而可以从微观方面了解煤层瓦斯渗透机理, 这对于瓦斯涌出规律, 瓦斯抽放及煤与瓦斯突出的机理的了解具有重要意义。

## 2 实验验证

为了验证上述模型的正确性, 用自制的一套气-固两相三轴仪, 做了煤层瓦斯的渗流实验。实验装置见文献[3]。由于原煤样加工试件比较困难, 同时原煤样与成型煤样在瓦斯渗

透规律方面具有极好的一致性,作为煤瓦斯渗透规律的研究,本文用成型煤样来模拟真实煤层。成型煤样长度为 90 mm,直径为 50 mm。

实验中保持孔隙压力不变,逐步增加围压,分别测出有一级围压下瓦斯的流量,通过达西定律计算煤样瓦斯的渗透率,具体计算公式见文献[3]。

图 3、图 4 即为两种不同煤样的渗透率与有效应力的关系,表 1 为用三次多项式(17)式拟合的系数,由图中看出,实测值与三次多项式曲线极其吻合,从而证明我们提出模型的正确性。

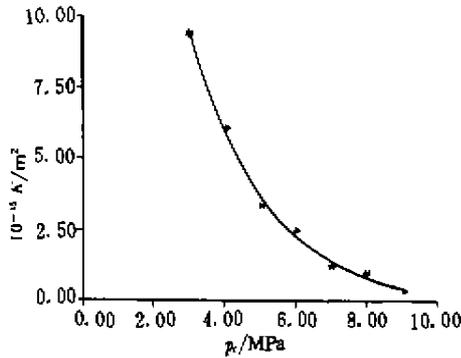


图 3 1 号煤样瓦斯的渗透率  $K$  与有效应力  $p_e$  的关系

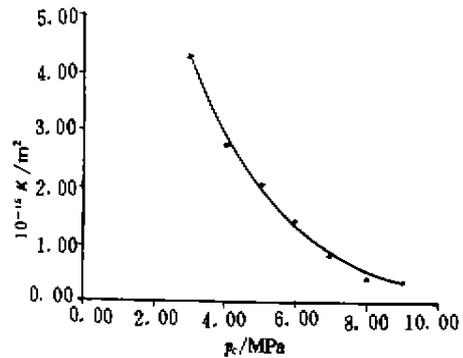


图 4 2 号煤样瓦斯的渗透率  $K$  与有效应力  $p_e$  的关系

表 1 拟合系数表

煤样编号	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
1	29.25	- 9.65	1.14	- 0.05
2	10.80	- 3.01	0.30	- 0.01

### 3 结 论

1) 煤是一种多孔物质,在地应力作用下,煤体将发生变形,使得瓦斯流经的通道也发生相应的变形,从而影响煤层瓦斯的渗透率。

2) 煤瓦斯渗透率与有效应力的关系为:

$$K = A_0 + A_1 p_e + A_2 p_e^2 + A_3 p_e^3$$

$$K = \frac{1}{12A} \sum_{i=1}^n \frac{h_i^3 m_i}{l_i} - \frac{1}{12A} p_e \sum_{i=1}^n \frac{h_i^2 m_i w_i^2}{10l_i} + \frac{1}{12A} p_e^2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i m_i^2 w_i^4}{210l_i} - \frac{1}{12A} p_e^3 \sum_{i=1}^n \frac{m_i^3 w_i^6}{12012l_i}$$

从而建立了宏观参数煤瓦斯渗透率  $K$  与微观参数之间的关系。

### 参 考 文 献

- 1 McKee C R. Effect of Stress-Dependent Permeability on Methane Production From Deep Coal Seams, SPE12858
- 2 Somerton W H. Effect of Stress on Permeability of Coal, Int. J. Rock Mech. Sci, 1974, (12), 129~145
- 3 谭学术. 煤的渗透性研究. 西安矿业学院学报, 1994, 14(1): 22~25
- 4 靳钟铭. 含瓦斯煤层力学特性的实验研究. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(3): 271~279
- 5 A. T. 艾鲁尼著. 煤矿瓦斯动力现象的预测和预防, 唐修义等译. 北京: 煤炭工业出版社, 1992