

文章编号: 1673-3363(2011)01-008F-05

# 基于瓦斯解吸特性推算煤层瓦斯压力的方法

安丰华, 程远平, 吴冬梅, 李伟

(中国矿业大学煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 为了能够准确快速确定煤层瓦斯压力, 基于煤层瓦斯解吸特性提出了确定煤层瓦斯压力的新方法. 通过对煤层瓦斯扩散过程理论解的进一步分析得出煤层瓦斯压力与煤层解吸对 1~3 mm 粒径煤样具有确定关系. 解吸测定, 通过不同公式对解吸数据的拟合分析发现对数公式能够更好的拟合解吸曲线, 从而确定对数公式为最佳拟合公式. 对数公式中系数 A 能够表明煤样在不同瓦斯压力下解吸趋势的差异性, 与瓦斯压力具有指数关系. 并且在不同暴露时间下其数值可以保持在稳定值, 可以利用系数 A 与瓦斯压力的关系进行煤层瓦斯压力的推算.

**关键词** 煤层瓦斯压力; 解吸特性; 对数公式; 指数关系

**中图分类号** TD 712 **文献标识码** A

## Determination of Coal Gas Pressure Based on Characteristics of Gas Desorption

AN Feng-hua, CHENG Yuan-ping, WU Dong-mei, LI Wei

(National Engineering Research Center of Coal Gas Control, Faculty of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

**Abstract** For determining coal gas pressure accurately and quickly, a new method is proposed based on characteristics of coal gas desorption. From the analyzing the theoretical solution of gas diffusion from coal cutting, the coal seam gas pressure has a determined relation with gas desorption quantity. In laboratory we measured the desorption data of screened coal sample with a size of 1~3 mm. From the analysis of desorption data we confirm that logarithmic formula can fit desorption curves better than other fitting formulas. Because coefficient A of the logarithmic formula indicates the difference of coal gas desorption characteristics with different gas pressure, it has an exponential relationship with gas pressure. And its value can keep stable with different exposure time. We can use the relationship of coefficient A and gas pressure to calculate gas pressure.

**Key words** coal seam gas pressure; desorption characteristic; logarithmic formula; exponential relationship

煤层瓦斯压力是煤层瓦斯含量计算和煤层突出危险性预测、评价的基本参数, 也是瓦斯防治措施效果检验的主要指标<sup>[1]</sup>. 煤层瓦斯压力的快速准确测定对于煤矿瓦斯防治工作具有重要的意义.

瓦斯压力测定方法可分为直接测定方法和间

接测定方法. 直接测定方法基本上可以分为 2 类:

1) 采用固体物封孔的测压方法, 如黄泥封孔、水泥砂浆封孔、胶囊封孔等, 这种封孔方法由于难以封住钻孔周围的微裂隙, 故而所测瓦斯压力的精度较低; 2) 采用黏液封孔的测压方法, 即用固体封液

收稿日期: 2009-01-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB221503); 国家自然科学基金重点项目(70533050); 国家自然科学基金项目(50674089)

作者简介: 安丰华(1984), 男, 山东省临沂市人, 博士, 从事煤矿瓦斯防治方面的研究.

E-mail: fenghuazm009@126.com Tel: 13585472401

体,液体封气体的测压方法.由于该方法采用了液体封堵钻孔周围的微裂隙,故测压效果较好,所测压力的精度较高;但是,对于裂隙发育的煤体(如卸压区)和煤质较软的煤层,单纯采用黏液封堵裂隙也还有一定困难.周世宁等人提出了采用“固+液+气”三相泡沫封孔法,利用泡沫中所携带的固相填充剂封堵煤体中的裂隙,利用泡沫加黏液封堵其中的微裂隙,从而达到快速准确地测出煤体中的瓦斯压力的目的<sup>[2]</sup>.但是此种测压方法成本较高,操作繁琐,仪器回收困难<sup>[3]</sup>,因而限制了其更为广泛的推广.

对于瓦斯压力间接测定方法较为常用的是瓦斯压力梯度推算方法,根据已测定的瓦斯压力推算未知区域的瓦斯压力,但是结果准确性难以保证.近年来,抚顺煤科院与重庆煤科院各自利用解吸实验和现场所得解吸参数快速测定煤层瓦斯压力,测定过程方便快捷,但是尚未得到广泛应用.此外,王宏图、鲜学福等人利用推导的煤层瓦斯压力解析式来计算煤层瓦斯压力<sup>[4]</sup>.此方法从理论上完善了煤层瓦斯压力的计算方法,但是所需参数繁多,计算较为复杂.

瓦斯压力直接测定方法要求煤层避免受到采动影响,因此在测压期间测压点附近需要停止采掘作业,且瓦斯压力测定周期较长,对煤矿的快速生产产生了不利影响.间接测定煤层瓦斯压力方法具有测定方便,用时较短等优点,弥补了直接测定方法在此方面的缺陷.因此,探索能够准确快速确定煤层瓦斯压力的间接测定方法是十分有必要的.

## 1 煤层瓦斯解吸与压力关系

煤中瓦斯涌出过程是复杂的,瓦斯先从煤基质表面上脱附运动到煤的孔隙裂隙空间,再通过孔隙裂隙通道渗流到煤体外面.煤中瓦斯脱附是在瞬间完成的,但是从煤体中运移到煤体外则需要一定的时间.瓦斯从煤体内运移到煤体外在不同尺寸的气体通道中,遵从不同的流动规律,因此对于煤屑的解吸规律研究者从不同角度提出了多种认识.大多数研究者认为煤粒的瓦斯扩散运动符合菲克扩散定律,当瓦斯通过为数众多的各式微观孔道时,扩散定律是可用的,这时影响其瓦斯解吸的是所有微观孔道的某些平均值,而不是其中单个毛细管、孔隙及裂隙的参数.在对扩散模型进行适当简化的条件下,杨其奎、王佑安运用数理方法得到了煤屑瓦斯扩散方程的理论解<sup>[5]</sup>

$$\frac{Q_t}{Q_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 Bt}, \quad (1)$$

式中:  $Q_t$  为  $t$  时刻煤屑解吸瓦斯量, mL/g;  $Q_\infty$  为煤屑极限瓦斯解吸量, mL/g;  $B = \frac{\pi^2 D}{d^2}$ ;  $D$  为扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $d$  为煤屑半径, cm.

煤的瓦斯吸附曲线呈抛物线状,先快速增加后逐渐缓慢增长,可用对数公式近似表示为

$$X = C' \ln P + D', \quad (2)$$

式中:  $X$  为煤层瓦斯含量, mL/(g·r);  $P$  为瓦斯压力, MPa;  $C'$ ,  $D'$  为拟合常数.

煤屑极限瓦斯含量为煤屑在当时大气压下达至吸附平衡时累计解吸出的瓦斯量,其值可按式(3)计算

$$Q_\infty = (C' \ln P + D' - X_a) \cdot (1 - M_{ad} - A_d) \frac{1}{1 + 0.31M_{ad}}, \quad (3)$$

式中:  $X_a$  为常压下瓦斯含量, mL/(g·r);  $P_a$  为大气压力, MPa;  $M_{ad}$  为煤中灰分, %;  $A_d$  为煤中水分, %.

由式(2), (3)可以得到

$$Q_t = \left[ 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 Bt} \right] (C' \ln P + D' - X_a) \cdot W(1 - M_{ad} - A_d) \frac{1}{1 + 0.31M_{ad}}. \quad (4)$$

在煤样固定的情况下可将式(4)化简为

$$Q_t = Eg(t)(C' \ln P + D''), \quad E = W(1 - M_{ad} - A_d) \frac{1}{1 + 0.31M_{ad}}, \quad (5)$$

$$g(t) = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 Bt},$$

$$D'' = D' - X_a.$$

将  $Q_t$  看作时间的解吸函数  $f(t)$ , 则式(5)可进一步简化为

$$P = e^{\frac{f(t) - D''}{C' E g(t)}}. \quad (6)$$

由式(6)看出煤屑解吸瓦斯量与煤层瓦斯压力有着紧密的关系,煤样的解吸规律反映煤层瓦斯压力的大小,在确定了解吸函数之后可以由此确定煤层的瓦斯压力.为此从现场采取煤样进行了进一步的实验室研究.

## 2 煤样解吸规律实验研究

### 2.1 实验原理

影响煤层瓦斯解吸的因素主要有:煤的变质程度、煤的破碎程度、煤的原始瓦斯含量.煤的变质程度影响着煤的孔裂隙发育,对煤内瓦斯流动通道有

重要的影响。煤的破碎程度即煤样粒径大小的不同，决定了微观解吸扩散路径的长短。煤样粒度小，扩散路径就短，反之则大<sup>[6]</sup>。煤的原始瓦斯含量决定了瓦斯流动动力的大小，对煤的解吸起着重要影响。因此对于煤层瓦斯解吸过程的研究主要集中在这 3 个方面。

在取样地点一定范围内煤的变质程度是相同的，实验所用煤样皆为 1~ 3 mm 粒径，因此煤的变质程度和破碎程度对于瓦斯解吸的影响是确定的，只需对煤的原始瓦斯含量影响因素进行研究。煤层瓦斯含量主要决定于瓦斯压力大小，因此实验室进行了不同瓦斯压力下煤的解吸实验。

### 2.2 实验方法

从淮北矿业集团祁南煤矿 7 煤层采集 10 kg 煤样，在实验室筛选出 1~ 3 mm 粒径煤样作为实验煤样。实验过程可分 7 步，实验流程见图 1。称取一定质量的煤样装入煤样罐中后放入 60 °C 恒温水浴中进行真空脱气 8 h 以上，脱气之后将煤样罐与高压甲烷瓶连接充入预定的瓦斯压力。在 30 °C 恒温水浴中平衡 48 h 以上，此时煤样已达到吸附平衡状态瓦斯压力不再变化，记录此时的平衡压力。快速打开煤样罐阀门放出罐中的游离瓦斯，在罐中压力降至大气压时迅速将其与解吸量筒连接并开始记录煤样解吸瓦斯量和对应的解吸时间，实验装置见图 2。

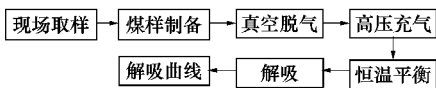


图 1 实验流程图  
Fig. 1 Flow chart of experiment

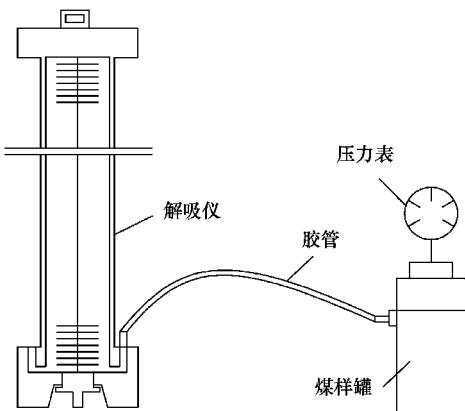


图 2 实验装置图  
Fig. 2 Equipment drawing

### 2.3 实验结果及分析

在不同平衡瓦斯压力下测得煤样解吸曲线如图 3 所示。

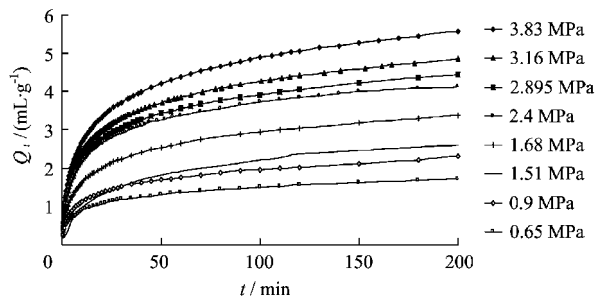


图 3 不同瓦斯压力下的煤样解吸曲线  
Fig. 3 Gas desorption curves of coal samples at different pressure

所测解吸曲线表明煤样解吸量增长趋势是不断衰减的过程，但仍具一定规律性。基于煤屑瓦斯扩散规律国内外研究者提出了巴雷尔式、博特式、孙重旭式等多种解吸公式<sup>[7-9]</sup>，其中巴雷尔公式在直接法测定煤层瓦斯含量中得到广泛应用。也有学者基于实验研究提出了描述煤屑解吸规律的文特式、乌斯基诺夫式、王佑安式等经验公式<sup>[10-12]</sup>。王兆丰验证了文特式、乌斯基诺夫式、王佑安式拟合效果比较理想<sup>[13]</sup>。但是这些经验或半经验公式并不适合所有煤屑的解吸特性，甚至在描述一些煤屑解吸规律中会存在较大的误差，因此，可以用多个公式进行拟合从而得到适合煤样解吸规律的公式。

为寻求适合煤样解吸规律的公式，选用井下解吸法中应用较为广泛的巴雷尔式、乌斯基诺夫式及孙重旭式对解吸曲线进行了拟合比较。

英国剑桥大学 R. M. Barrer<sup>[7]</sup> 基于天然沸石对各种气体的吸附过程测定，认为吸附和解吸是可逆过程，气体累计吸附量和解吸量与时间的平方根成正比

$$Q_t = k_1 \sqrt{t}, \tag{7}$$

式中： $Q_t$  为  $t = 0$  从开始到时间  $t$  时的累计吸附或解吸气体量， $\text{cm}^3/\text{g}$ ； $k_1$  为  $t = 1$  时的瓦斯解吸速度， $\text{cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})$ ； $t$  为解吸时间， $\text{min}$ 。

前苏联学者 H. И. ВСТ ИНОВ 认为煤的瓦斯解吸按达西定律计算得到的数据与实测数据有较大的出入，在实测数据的统计分析基础上得到了与实测数值较吻合的计算用经验公式

$$Q_t = V_0 \left[ \frac{(1+t)^{1-n} - 1}{1-n} \right], \tag{8}$$

式中： $V_0$  为  $t = 0$  时的瓦斯解吸速度， $\text{cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$ ； $n$  为取决于煤质等因素的系数。

孙重旭<sup>[9]</sup>通过对煤屑瓦斯解吸规律的研究，认为煤样粒度较小时，煤中瓦斯解吸主要为扩散过程，其解吸瓦斯含量随时间的变化可用幂函数表示

$$Q_t = at^i, \tag{9}$$

式中:  $a, i$  为与煤的瓦斯含量及结构有关的常数。

同时,在对解吸曲线进行拟合过程中发现解吸量与时间取对数后有很好的线性关系,不同公式拟合结果见表 1。对不同瓦斯压力下解吸曲线拟合比较中发现对数公式  $Q_t = A \ln t + B$  对解吸曲线的拟

合程度最高,其相关系数皆在 0.99 以上,适合作为煤样的解吸函数。之后对淮北任楼煤矿、郑州崔庙煤矿的现场解吸数据进行拟合也符合此结论,说明对数公式作为煤样的解吸函数具有一定的普遍性。

不同瓦斯压力下解吸曲线拟合对数公式见表 2。

表 1 解吸曲线拟合公式相关系数  
Table 1 Correlation coefficient of desorption fitting formulas

压力 $P/\text{MPa}$	相关系数 $r$			
	巴雷尔公式 $Q_t = k\sqrt{t}$	乌斯基诺夫式 $Q_t = v_0 \left[ \frac{(1+t)^{1-n} - 1}{1-n} \right]$	孙重旭式 $Q_t = at^i$	对数公式 $Q_t = A \ln t + B$
3.83	0.9650	0.9922	0.9787	0.9972
3.16	0.9568	0.9826	0.9794	0.9978
2.895	0.9543	0.9899	0.9693	0.9985
2.40	0.9496	0.9806	0.9771	0.9987
1.68	0.9608	0.9931	0.9756	0.9967
1.51	0.9789	0.9733	0.9712	0.9985
0.90	0.9598	0.9916	0.9742	0.9949
0.65	0.9608	0.9787	0.9825	0.9977

表 2 解吸曲线对数拟合公式  
Table 2 Log fitting results of desorption curves

压力 $P/\text{MPa}$	拟合公式	系数 $A$	相关系数 $r$
3.83	$Q_t = 0.9033 \ln t + 0.6753$	0.9033	0.9972
3.16	$Q_t = 0.7524 \ln t + 0.7607$	0.7524	0.9978
2.895	$Q_t = 0.7228 \ln t + 0.6104$	0.7228	0.9985
2.40	$Q_t = 0.6645 \ln t + 0.6651$	0.6645	0.9987
1.68	$Q_t = 0.5578 \ln t + 0.3822$	0.5578	0.9967
1.51	$Q_t = 0.5368 \ln t - 0.2620$	0.5368	0.9985
0.90	$Q_t = 0.3680 \ln t + 0.3061$	0.3680	0.9949
0.65	$Q_t = 0.2614 \ln t + 0.2957$	0.2614	0.9978

从表 2 可以看到在瓦斯解吸量增长趋势在不同瓦斯压力条件下是不同的,这在解吸曲线图上得到了明显的证实。瓦斯压力对于解吸特性的影响在对数公式中反映在系数  $A$  的不同,瓦斯压力越大则同时间段内解吸速度越快,解吸量增长趋势越明显,其拟合系数  $A$  越大。因此,系数  $A$  表明了不同瓦斯压力下煤样解吸特性的差异,其值是和瓦斯压力密切相关的,与煤样暴露时间无关。基于实验室解吸数据,可以得到解吸曲线拟合系数  $A$  随暴露时间的不同其值变化趋势,见图 4。

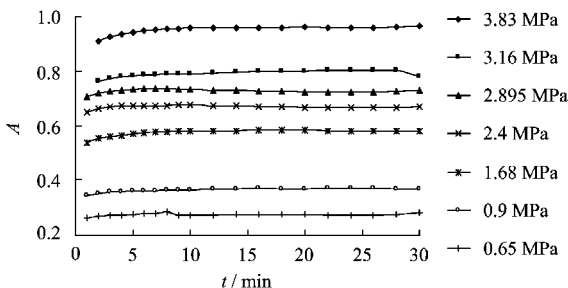


图 4 不同暴露时间下解吸曲线拟合系数  $A$  变化曲线  
Fig. 4 Change curves of coefficient  $A$  at different exposure time

由图 4 可以看到,拟合系数  $A$  随暴露时间不同其拟合值是稳定的,可以看作与解吸时间无关。因此,在现场应用中不同取样损失时间下都可以对现场解吸曲线进行对数拟合得到公式系数  $A$  来表明煤层在取样地点瓦斯压力下的解吸特性。

从以上拟合结果可以看到煤样瓦斯解吸增长趋势可以用对数形式进行表达,即可将解吸函数视为对数函数,带入式(6)可得

$$P = e^{\frac{A \ln t + B}{C E g(t)}} \cdot \frac{Q_t}{C}, \quad (10)$$

$$P = e^{\frac{B}{C E g(t)}} \cdot \frac{Q_t}{C} \cdot e^{\frac{A \ln t}{C E g(t)}}. \quad (11)$$

由于系数  $A$  表明了不同瓦斯压力下煤样解吸特性的差异,其值是和瓦斯压力  $P$  密切相关的,而与解吸时间  $t$  无关。因此只考虑瓦斯压力  $P$  和拟合系数  $A$  关系,以瓦斯压力  $P$  和拟合系数  $A$  为变量,以解吸时间  $t$  为非变量,上式可进一步为

$$P = \alpha e^{\beta A}, \quad (12)$$

式中:  $\alpha = e^{\frac{B}{C E g(t)}} \cdot \frac{Q_t}{C}$ ;  $\beta = \frac{A \ln t}{C E g(t)}$ 。由于解吸时间  $t$  为非变量,所得  $\alpha, \beta$  为常数。

由式(12)可知系数  $A$  与瓦斯压力  $P$  服从指数

关系。根据实验室测得结果，对系数  $A$  与瓦斯压力  $P$  进行指数关系拟合。拟合结果表明二者有较高的相关性，相关系数达 0.990 5，拟合公式为  $P = 0.3412e^{2.9533A}$ ，拟合结果见图 5。

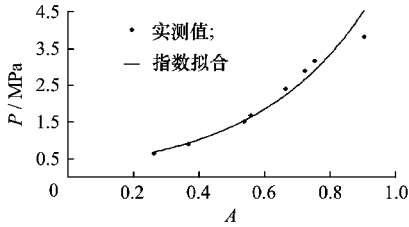


图 5 系数  $A$  与瓦斯压力  $P$  关系  
Fig. 5 The relationship of coefficient  $A$  and gas pressure  $P$

由以上分析可知，在不同取样损失时间下测定解吸曲线所得拟合系数  $A$  是一定的，且系数  $A$  与瓦斯压力  $P$  服从指数关系。那么在现场应用中对现场解吸曲线进行对数拟合得到公式系数  $A$  后，利用实验室所得指数公式可以推算煤层瓦斯压力。

### 3 现场应用

祁南煤矿 7 煤层位于二迭系下石盒子组，包括  $7_1, 7_2$  两层煤。煤层瓦斯赋存整体呈垂向分带规律，瓦斯含量和压力随煤层埋深的增加而增大，具有良好的生、储、盖条件。围岩条件透气性差，以泥岩、粉砂岩等细碎屑岩为主，加上煤层倾角小，后期为巨厚地层覆盖，不利于瓦斯排放。 $7_2$  煤层是矿井主要可采煤层之一，也是突出危险性煤层，曾发生多次煤与瓦斯突出动力现象。

在此实验期间 716 底板巷正在施工底板抽放钻场预抽煤层瓦斯，在此底板巷布置了 3 个测压孔，由于测压设备和技术条件限制测得瓦斯压力均偏低。为避免已施工的抽放钻孔的抽放影响，经分析选用了 18# 号钻场中施工的前几个抽放钻孔进行取样，从钻孔中接到煤屑后迅速筛选出 1~3 mm 粒径煤屑装入解吸罐中进行现场解吸测定，所得解吸曲线见图 6。

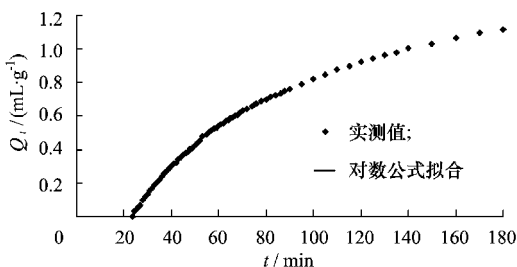


图 6 祁南煤矿 7 煤层实测解吸曲线  
Fig. 6 The desorption curve of coal from coal seam 7 of Qinan mine

利用对数公式对解吸曲线进行拟合可以得到解吸函数系数  $Q_i = 0.564 \ln t - 1.7774$ ，相关系数为 0.999 6。拟合得到系数  $A = 0.564$ ，代入系数  $A$  与压力  $P$  拟合关系式可以得到煤层瓦斯压力为 1.66 MPa。7 煤层瓦斯压力梯度为 0.019 4 MPa/m，压力梯度方程为  $P = 0.0194H - 8.13$ ，取样地点埋深为 520 m，按压力梯度方程计算此深度煤层压力为 1.958 MPa，此煤层同一埋深处 812 运输巷与 82 人行回风联巷瓦斯压力测定结果分别为 1.6, 1.55, 1.81 MPa，与以上瓦斯压力相比较可以确定解吸法所确定煤层瓦斯压力是可靠的，能够可靠地确定煤层瓦斯压力。

### 4 结 论

1) 通过对煤屑瓦斯扩散方程理论解的进一步分析可以看到煤屑解吸瓦斯量与煤层瓦斯压力有密切的关系，煤样的解吸规律会反映煤层瓦斯压力的大小。

2) 通过对祁南矿 7 煤层煤样进行数据分析发现对数公式  $Q_i = A \ln t + B$  能够更好的拟合解吸曲线，能够准确可靠的表明 7 煤的解吸特性，可以作为煤样的解吸函数。

3) 对解吸曲线拟合所得系数  $A$  能够表明不同瓦斯压力下煤屑解吸趋势，且在不同暴露时间的影响下可以保持稳定值，可认为与解吸时间无关。进一步分析可知其值与瓦斯压力符合指数关系，实验结果也证明了此结论。因此可以利用现场解吸曲线拟合系数  $A$  和实验室所得指数公式来推算煤层瓦斯压力。

4) 此方法在祁南煤矿进行了现场验证，验证结果表明此方法所得煤层瓦斯压力是可靠的。

### 参考文献:

[1] 国家安全生产监督管理总局，国家煤矿安全监察局. 防治煤与瓦斯突出规定[M]. 北京：煤炭工业出版社，2009.

[2] 林柏泉，周世宁，张仁贵. 三相泡沫密封性能的实验研究[J]. 中国矿业大学学报，1992，21(3)：13-20.  
LIN Bai quan, ZHOU Shi ning, ZHANG Ren gui. Experiment investigation on the sealing ability of tri-phase foamy fluid[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1992, 21(3): 13-20.

[3] 兰泽全，曲荣飞，陈学习，等. 直接法测定煤层瓦斯压力现状及分析[J]. 煤矿安全，2009(4)：74-78.  
LAN Ze quan, QU Rong fei, CHEN Xue xi, et al. Situation and analysis (下转第 89 页)

- [4] 余永强, 杨小林, 梁为民, 等. 控制爆破致裂提高矿井瓦斯抽放率试验研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 377-381.  
YU Yong qiang, YANG Xiao lin, LIANG Wei min, et al. Testing research of improving mine gas drainage under suction by controlling blasting to cause crack[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 377-381.
- [5] 程远平, 俞启香, 周红星, 等. 煤矿瓦斯治理“先抽后采”的实践与作用[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 389-392.  
CHENG Yuan ping, YU Qi xiang, ZHOU Hong xing, et al. Practice and effectiveness of “draining gas before coal mining” to prevent gas from bursting [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(4): 389-392.
- [6] 游宝坤. 静态爆破技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2008.
- [7] 闫军, 易建政, 崔海萍. 静态胀裂剂(SCA)的研究进展[J]. 工程爆破, 2008, 14(3): 85-87.  
YAN Jun, YI Jian zheng, CUI Hai ping. Progress in the study of static cracking agents[J]. Engineering Blasting, 2008, 14(3): 85-87.
- [8] 王建鹏. 静态破碎剂破岩机理研究[J]. 中国矿业, 2008, 17(11): 90-92.  
WANG Jian peng. Research on broken rock mechanism of static state dose[J]. China Mining Magazine, 2008, 17(11): 90-92.
- [9] 李和利, 王泳涛, 王世民. 钢筋混凝土桥墩的破碎剂胀裂拆除[J]. 爆破, 2003, 20(3): 42-44.  
LI He li, WANG Yong tao, WANG Shi min. Demolition of reinforced concrete railway pier by static blasting agent[J]. Blasting, 2003, 20(3): 42-44.
- [10] 邹俊兴. 静力破碎剂的破坏条件式[J]. 爆破, 1993, 10(3): 8-13.  
ZOU Jun xing. Fracture conditional expression of static blasting agent[J]. Blasting, 1993, 10(3): 8-13.

(上接第 85 页)

- of direct determination of coal gas pressure[J]. Safety in Coal Mines, 2009(4): 74-78.
- [4] 王宏图, 鲜学福, 尹光志, 等. 煤矿深部开采瓦斯压力计算的解析算法[J]. 煤炭学报, 1999, 24(3): 279-283.  
WANG Hong tu, XIAN Xue fu, YIN Guang zhi, et al. Investigation of analytic method for coalbed gas pressure in high temperature and deeply mining mines [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(3): 279-283.
- [5] 杨其奎, 王佑安. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1986(3): 87-94.  
YANG Qi kuan, WANG You an. Theory of methane diffusion from coal cuttings and its application [J]. Journal of China Coal Society, 1986(3): 87-94.
- [6] 张晓东, 桑树勋, 秦勇, 等. 不同粒度的煤样等温吸附研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 427-432.  
ZHANG Xiao dong, SANG Shi xun, QIN Yong, et al. Isotherm adsorption of coal samples with different grain size[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4): 427-432.
- [7] BARRER R M. Diffusion in and through solid[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1951.
- [8] BOLT B A, INNES. Diffusion of carbon dioxide from coal[J]. Fuel, 1959, 38: 333-337.
- [9] 孙重旭. 煤样解吸瓦斯泄出的研究及其突出煤层煤样瓦斯解吸的特点[C]//煤与瓦斯突出第三次学术论文集, 1983.
- [10] WINTER K, JANAS H. Gas emission characteristics of coal and methods of determining the desorbable gas content by means of desorbometers[C]//XIV International Conference of Coal Mine Safety Research, 2003.
- [11] А Э Петросян. 煤矿沼气和涌出[M]. 宋世钊, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [12] 王佑安, 杨思敬. 煤和瓦斯突出危险煤层的某些特征[J]. 煤炭学报, 1981, 6(1): 47-53.  
WANG You an, YANG Si jing. Some characteristics of coal seams with hazard of outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1981, 6(1): 47-53.
- [13] 王兆丰. 空气、水和泥浆介质中煤层气解吸规律与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学安全工程学院, 2001.