

安全科学与工程



移动扫码阅读

张明杰,李亚西,闫江伟,等.瓦斯涌出衰减特征法测定水力冲孔抽采影响半径[J].煤炭科学技术,2022,50(7):156-162.

ZHANG Mingjie, LI Yaxi, YAN Jiangwei, et al. Determination of influence radius of hydraulic punch extraction by gas emission attenuation characteristic method[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 156-162.

# 瓦斯涌出衰减特征法测定水力冲孔抽采影响半径

张明杰<sup>1,2</sup>, 李亚西<sup>2</sup>, 闫江伟<sup>1,2</sup>, 谭志宏<sup>1,2</sup>, 刘宽小<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003)

**摘 要:** 确定水力冲孔瓦斯抽采影响半径参数对于提高瓦斯抽采效率, 消除钻孔间防突空白带, 保证煤矿安全生具有重要的现实意义。在研究分析钻孔周围煤体松动对瓦斯涌出的影响, 负压抽采下排放钻孔瓦斯流动、涌出特点, 发现排放钻孔瓦斯涌出可分为前期、后期 2 个阶段, 应用钻孔瓦斯涌出量负幂指数方程分别计算前期瓦斯排放量和后期瓦斯极限排放量, 两者加和为钻孔瓦斯极限排放量  $Q_j$ , 提高了计算求解的准确性; 指出负压抽采影响下排放钻孔周围煤体瓦斯流向抽采钻孔, 是排放孔后期瓦斯涌出衰减系数突变性减少原因, 造成排放孔百米钻孔瓦斯极限排放量与未受抽采影响的显著差异性; 根据受负压抽采影响出现的排放钻孔瓦斯涌出衰减系数突变性、排放钻孔百米瓦斯极限排放量显著差异特征, 提出了瓦斯涌出衰减系数特征法测定水力冲孔抽采影响半径的方法; 运用此法在鹤壁中泰煤业公司进行了现场测试, 结果表明, 煤孔平均冲出煤量 1.3 t/m, 抽采时间 60 d, 抽采影响半径为 5.1 m。

**关键词:** 水力冲孔; 抽采影响半径; 瓦斯涌出衰减特征法; 极限排放量

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2022)07-0156-07

## Determination of influence radius of hydraulic punch extraction by gas emission attenuation characteristic method

ZHANG Mingjie<sup>1,2</sup>, LI Yaxi<sup>2</sup>, YAN Jiangwei<sup>1,2</sup>, TAN Zhihong<sup>1,2</sup>, LIU Kuanxiao<sup>2</sup>

(1. Safety Science & Engineering School, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Provincial Key Laboratory of Methane Geology & Methane Prevention, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** It is of great practical significance to determine the influence radius parameters of gas drainage by hydraulic punching through strata for improving the gas drainage efficiency, eliminating the gap between the drilling holes and ensuring the safety of coal mines. This paper studied and analyzed the influence of coal loose around the borehole on gas emission, and the characteristics of gas flow and emission from the borehole under negative pressure extraction. The negative power exponential equation of borehole gas emission calculates the gas emission in the early stage and the limit gas emission in the later stage respectively, and the sum of the two improves the accuracy of calculation and solution for the limit gas emission in the borehole; It is pointed out that the flow direction of coal gas around the drainage hole under the influence of negative pressure extraction is the reason for the sudden reduction of gas emission attenuation coefficient at the later stage of the drainage hole, resulting in a significant difference between the gas emission limit of 100-meter borehole of the drainage hole under the influence of negative pressure extraction and the one that has not been affected by the drainage; According to the abrupt change of gas gushing attenuation coefficient of discharge boreholes affected by negative pressure drainage and the significant difference of gas discharge limit of 100 meters of discharge boreholes, a characteristic method of gas gushing attenuation coefficient is proposed to deter-

mine the influence radius of hydraulic punching drainage. Using this method, the field test was carried out in Hebi Zhongtai Coal Industry. The results show that the average amount of coal flushed out of the coal hole is 1.3 t/m, the extraction time is 60 days, and the extraction influence radius is 5.1 m.

**Key words:**hydraulic punching; drainage influence radius; characteristic method of gas emission attenuation coefficient; limit discharge

## 0 引言

随着煤田开采深度的不断增加,地应力不断加大,煤层透气性差,瓦斯保存条件较好,瓦斯压力较大,水力冲孔封孔联抽措施成为降低煤层瓦斯,防治煤与瓦斯突出一种重要措施<sup>[1]</sup>。但冲孔钻孔布孔间距是影响瓦斯抽采效果的重要因素,布孔间距过大,在抽采范围内容易形成空白带,造成安全隐患;布孔间距过小,造成工程量的增加,浪费人力物力。因此,确定冲孔钻孔瓦斯抽采影响半径是提高瓦斯抽采效果,保证煤矿安全生产的关键技术之一。现场实测法中,徐东方等<sup>[2]</sup>、梁冰等<sup>[3]</sup>研究了压降法测定钻孔抽放影响半径原理及测试方法,并进行了现场测试,确定了抽采半径。陈金玉等<sup>[4]</sup>通过对SF<sub>6</sub>示踪气体的性质和特点分析,采用此气体在现场进行了测试,利用瓦斯抽放半径与抽放时间之间符合幂函数的关系,拟合出了其关系曲线,为抽放时间的设定与抽放钻孔的间距设计提供了依据。刘三钧等<sup>[5]</sup>依据煤层瓦斯压力和瓦斯含量的对应关系,推导出瓦斯压力变化与瓦斯抽采率的关系,提出了基于瓦斯含量的相对压力测定有效半径技术。秦贵成等<sup>[6]</sup>、孙玉峰等<sup>[7]</sup>在分析现有的测定瓦斯抽采半径方法的基础上,选用瓦斯抽采流量法,分别以瓦斯抽采流量的变化和既定的抽采率确定抽采半径。计算机数值模拟法中,刘海等<sup>[8]</sup>、华国明等<sup>[9]</sup>采用理论计算与COMSOL数值模拟相结合的方法建立瓦斯抽采流固耦合模型,分别考察了淹没射流条件下和不同方向上钻孔瓦斯抽采有效影响半径。郭培红等<sup>[10]</sup>采用Fluent软件中基于Darcy定律的多孔介质模型,通过解算抽采过程中钻孔周围瓦斯压力分布,依据预抽率判定准则确定出抽采有效半径。WU等<sup>[11]</sup>基于FLAC<sup>3D</sup>的瓦斯抽采半径的数值模拟方法,并用压降指数法对计算结果进行了验证。得出基于FLAC<sup>3D</sup>的数值模拟能够快速、准确地确定瓦斯抽放半径。理论计算法中,季淮军等<sup>[12]</sup>、周红星等<sup>[13]</sup>依据瓦斯流动相关理论,建立抽采钻孔周围瓦斯压力分布数学模型,设计了基于VB.NET的解算程序,利用计算机求解确定抽采半径,并进行了现场应用。舒才等<sup>[14]</sup>通过建立瓦斯抽采量与有效抽采半径的关系数学模型,提出了模型参数确定法,现场

实测结果与模型计算结果基本一致。朱南南等<sup>[15]</sup>基于瓦斯径向非稳定渗流方程,采用自模拟方法求出近似解析解,建立了有效抽采半径的数学表达式,得出在无限流场条件下,有效抽采半径与抽采时间的平方根成正比,与抽采负压满足非线性的正相关关系,并通过相关实例验证了有效抽采半径表达式的准确性。

以上几种测定方法虽在一定程度上满足了生产实践的需要,但均存在一定的不足:压降法对封孔质量要求高,工序繁琐施工量较大,测定时间较长;示踪气体法一般采用检测灵敏度高的惰性气体,但向煤层注入另外一种气体势必会改变煤层原始压力梯度,且没有考虑示踪气体和瓦斯的在煤层中运移特性的差异,测定过程可靠性不高<sup>[16]</sup>;瓦斯含量法由于瓦斯含量的测试受地质条件影响较大,抽采半径不易确定;瓦斯流量法现场钻孔施工较多,需对钻孔抽采进行计量分析,过程比较繁琐;计算机数值模拟法较为理想,数值模型假设条件过多,难以有效地指导现场抽采钻孔布置<sup>[17]</sup>;理论计算法中参数不具有时间效应,未考虑地质构造的时空特性与煤与瓦斯的流变性。因此,依据笔者等<sup>[18-19]</sup>提出的钻孔瓦斯自然涌出规律与负压抽采影响下钻孔瓦斯涌出特征这2种测定影响半径的方法,提出瓦斯涌出衰减特征法测定水力冲孔抽采影响半径,此法相对于其他现场实测法,耗时较短,操作及计算简单;相对于数值模拟法与理论计算法,在本煤层试验测定,测定结论较为准确,对于指导现场冲孔布置具有实用意义。

## 1 瓦斯涌出衰减特征法测定原理

### 1.1 钻孔瓦斯涌出分段性特征

根据径向稳定流场瓦斯运移规律,钻孔瓦斯涌出量<sup>[20-21]</sup>为:

$$Q = 2\pi\lambda L \frac{p_0^2 - p_1^2}{\ln R_0 - \ln R_1} \quad (1)$$

式中, $Q$ 为钻孔的瓦斯涌出量, $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $\lambda$ 为煤层透气性系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ ;  $L$ 为煤孔长度, $\text{m}$ ;  $p_0$ 为煤层原始瓦斯压力, $\text{MPa}$ ;  $p_1$ 为钻孔瓦斯压力, $\text{MPa}$ ;  $R_1$ 为钻孔半径, $\text{m}$ ;  $R_0$ 为瓦斯源半径, $\text{m}$ 。由于钻孔施工造成钻孔周围煤体破碎,使其周围形成一个小范围的塑性区<sup>[22]</sup>,塑性区内煤层透气性增大。由式(1)可

知,瓦斯涌出量与透气性系数呈正比(这里由于塑性区很小,认为瓦斯源半径基本不变),透气性增加导致瓦斯涌出量变大,但这种在外力作用下引起的宏观裂隙范围很小,所以持续时间较短;塑性区外的弹性区与原始区煤层瓦斯流动遵循扩散和渗流原理,煤体瓦斯由吸附态不断地解吸为游离态,通过煤层裂隙流向钻孔排出,此过程瓦斯流量稳定,衰减速度较慢,持续时间较长,一直到达到新的平衡状态为止。根据理论分析和现场实测,自然排放钻孔瓦斯涌出整个过程,瓦斯涌出量存在一个明显的转折(图 1),表现出前期瓦斯涌出量较大,后期瓦斯涌出量较小,转折点的出现一般在测定的前 7 d 左右,据此划分前期和后期 2 个阶段。

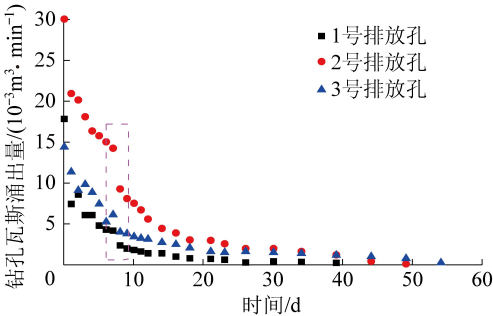


图 1 自然排放钻孔瓦斯涌出量观测数据示例  
Fig.1 Sample of gas emission observed from natural discharge borehole

1.2 穿层钻孔瓦斯涌出特征

自然排放或抽采钻孔瓦斯涌出量一般呈现随着时间的延长而衰减的变化规律,符合负幂指数方程:

$$q_t = q_0 e^{-\alpha t} \tag{2}$$

式中,  $q_t$  为时间  $t$  下的钻孔瓦斯涌出量,  $m^3/min$ ;  $q_0$  为钻孔的初始瓦斯涌出量,  $m^3/min$ ;  $\alpha$  为钻孔瓦斯涌出量衰减系数,  $d^{-1}$ ;  $t$  为瓦斯涌出时间,  $d$ 。

水力冲孔抽采钻孔随着抽采时间的延长,冲孔与排放孔影响半径都会逐渐增大,其中冲孔影响半径增加较多,如图 2 所示,瓦斯源半径从  $r$  增大到  $R$ (选择若干冲孔抽采孔周围的排放孔作为观测孔,

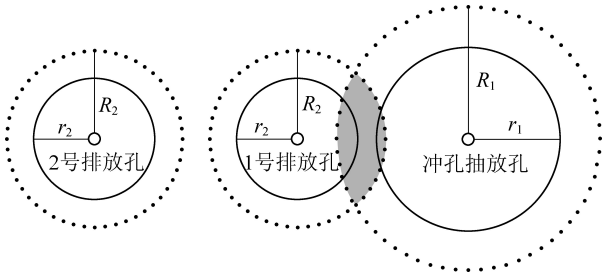


图 2 钻孔影响半径随时间变化示意  
Fig.2 Schematic of influence radius of borehole over time

认为观测孔影响半径基本相同,均用  $R_2$  表示)。

根据钻孔瓦斯涌出分段性特征,以及穿层钻孔直径固定其对应抽采影响半径基本不变的特征,穿层钻孔瓦斯涌出特征包括 2 个方面:① 后期衰减系数基本相同;② 钻孔长度相同瓦斯极限排放量基本相同,为方便考察,选用百米钻孔极限排放量。

1.2.1 穿层钻孔瓦斯涌出衰减特征

穿层钻孔自然排放瓦斯时瓦斯涌出受瓦斯在煤层裂隙结构中的流动阻力和瓦斯源与排放孔之间的压力差控制,如前述,钻孔瓦斯涌出分段性特征,排放孔后期衰减系数基本相同,因此后期数据常用于表示钻孔瓦斯涌出衰减系数;当用作观测孔的穿层钻孔受到带抽冲孔负压影响时,抽采负压与瓦斯源压力共同作用下冲孔周围煤体瓦斯流动将发生如下变化:

1)在抽采影响范围内钻孔瓦斯运移及涌出特征。当冲孔抽采时与 1 号观测孔瓦斯源半径分别增大到  $R_1, R_2$  时,此时两者出现重叠区域(图 2)。受抽采负压影响的观测孔与冲孔抽放孔重叠区域的瓦斯将向冲孔钻孔运移,被抽出,观测孔瓦斯涌出量就会减少,瓦斯涌出量衰减系数变大。

2)在抽采负压影响范围外钻孔瓦斯运移及涌出特征。2 号观测孔瓦斯源由于离冲孔距离较远,不在其抽采负压影响圈内(图 2),其瓦斯源仍正常涌入观测孔,不会受冲孔抽采孔负压影响,瓦斯涌出量不发生变化,瓦斯涌出量衰减系数不变。

总之,由于在抽采影响范围内的观测孔受到负压抽采影响,观测孔内瓦斯涌出量衰减速率大于未受到影响的观测孔,为判断抽采影响半径提供了理论依据。

1.2.2 百米钻孔瓦斯极限排放量特征

依据钻孔瓦斯排放有效时间  $t$  内与瓦斯排放总量之间的变化曲线,团队建立了以下函数关系式<sup>[22]</sup>:

$$Q_j = \int_0^t 1\,440q_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{1\,440q_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \tag{3}$$

式中,  $Q_j$  为累积时间  $t$  内钻孔瓦斯排放量,  $m^3$ ;  $q_0$  为钻孔刚施工完成时瓦斯涌出初始速度,根据若干个测点回归得到。

当  $t \rightarrow \infty$  时,钻孔排放瓦斯量达到极限:

$$Q_j = \frac{1\,440q_0}{\alpha} \tag{4}$$

根据单个钻孔实际揭露煤孔长度,计算百米钻孔瓦斯极限排放量:

$$Q_j 100/m = Q_w \tag{5}$$



式中, $m$  为煤孔长度,m; $Q_w$  为百米钻孔瓦斯极限排放量, $m^3$ 。

由 1.2 节可知,抽采的整个过程,未受到抽采影响的排放钻孔瓦斯涌出量衰减速率稳定,衰减系数大小相近,由式(5)可知百米钻孔瓦斯极限排放量大小相近;受到抽采影响的排放孔的瓦斯源里的瓦斯大都被抽采孔抽走,排放钻孔瓦斯涌出量衰减快,衰减系数变大,极限排放量相对其他未受到抽采影响的排放孔将减少很多。

2 测定方法

2.1 钻孔布置与参数观测

水力冲孔封孔联抽措施之所以成为防治煤与瓦斯突出强化措施,其原因在于冲孔后随着冲孔直径增大,其周围煤体破碎范围增大,在其周围形成一个较大范围塑性区<sup>[23]</sup>,使抽采孔影响半径、防突有效范围相应增加,所以在布置冲孔抽采影响半径观测孔时需要根据冲出煤量适当增加观测孔数量,增加观测孔与冲孔直径的距离。

根据钻孔设计示例如图 3 所示,采用  $\phi 94$  mm 钻头施工钻孔,先施工观测孔,每一个观测孔钻孔施工完毕后,及时缩孔,将观测孔缩为内径 50 mm,采用 ML 型煤孔瓦斯多级流量计测定观测孔瓦斯涌出量。施工冲孔钻孔并完成冲孔后,立即封孔带抽。抽采期间测定观测孔瓦斯涌出量时,要根据抽采时间设计观测频率,初始时每天测定一次,测定 1 周左右,之后随着时间延长改为 2 d 测定一次,测定 2 周左右。后期可根据瓦斯涌出量的减少变化情况,适当增加测定间隔时间,直到观测孔瓦斯涌出量接近于零时停止测定。期间做好测试时间与测定数据的记录,为保证观测结果真实可靠,测定完毕之前,观测孔不能封孔带抽。

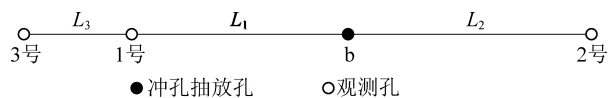


图 3 钻孔终孔位置示例

Fig.3 Example of final hole location of drilling

2.2 数据分析与影响半径的判定

由于自然排放钻孔瓦斯涌出具有分段性特征,前后期瓦斯涌出量数值差别较大,若直接对整个测定过程的观测孔数据进行负幂指数规律拟合分析,衰减系数突变情况不明显且相关度不高;且在抽采负压作用下,前期抽采影响半径较小,观测孔涌出量一般不受抽采负压影响,随着抽采时间延长,抽采影响半径增加,受负压抽采影响衰减速率突变主要表

现在后期,因此在分析排放钻孔的衰减系数变化时主要根据后期观测数据进行对比,尽量减少排放钻孔由于周围煤体松动造成的前期瓦斯涌出衰减的影响。

根据观测时间与观测钻孔瓦斯涌出量数据,建立时间与涌出量散点图(图 1),分析观测钻孔瓦斯涌出量明显变化时间,依次确定观测钻孔瓦斯涌出前期和后期观测数据。依据观测钻孔前期、后期的观测数据进行拟合,得出各观测孔前、后期钻孔瓦斯涌出量负幂指数方程和钻孔瓦斯涌出衰减系数(表 1)。

表 1 观测孔前后期拟合方程

Table 1 The equation was fitted before and after the observation hole

观测孔	前期拟合方程	后期拟合方程
1 号	$q_t = q_{1f}e^{-\alpha_{1f}t}$	$q_t = q_{1g}e^{-\alpha_{1g}t}$
2 号	$q_t = q_{2f}e^{-\alpha_{2f}t}$	$q_t = q_{2g}e^{-\alpha_{2g}t}$
3 号	$q_t = q_{3f}e^{-\alpha_{3f}t}$	$q_t = q_{3g}e^{-\alpha_{3g}t}$

注:下标 f 表示前期方程系数;下标 g 表示后期方程系数。

通过式(3)、式(4)分别计算前期瓦斯排放量 $Q_q$ 和后期的瓦斯极限排放量 $Q_h$ ,两者相加后为钻孔瓦斯极限排放量 $Q_j$ ,采用式(5)换算出各观测孔百米钻孔瓦斯极限排放量 $Q_{w1}$ 、 $Q_{w2}$ 、 $Q_{w3}$ 等;从后期指数方程中提出各观测孔衰减系数 $\alpha_{1g}$ 、 $\alpha_{2g}$ 、 $\alpha_{3g}$ 等,比较各观测孔 $Q_w$ 和 $\alpha$ 的突变情况,作出抽采影响半径判断:若 $\alpha_{1g}$ 远大于 $\alpha_{2g}$ 、 $\alpha_{3g}$ , $Q_{w1}$ 远小于 $Q_{w2}$ 、 $Q_{w3}$ ,且 $Q_{w2}$ 、 $Q_{w3}$ 处于同一水平,则 1 号孔位于抽采影响范围内,抽采影响半径大于或等于 1 号孔距;若 $\alpha_{2g}$ 与 $\alpha_{1g}$ 相近且远大于 $\alpha_{3g}$ , $Q_{w2}$ 明显小于 $Q_{w3}$ ,则抽采影响半径在 1 号孔与 2 号孔之间;若 2 号孔位于抽采影响范围内,抽采影响半径大于或等于 2 号孔距离且小于 3 号孔距离,以此类推,直到得出衰减系数表现加速衰减最远观测孔,结合各观测孔百米钻孔瓦斯极限排放量确定抽采影响半径,结合各观测孔百米钻孔瓦斯极限排放量确定抽采影响半径。

3 现场测试

3.1 测定地点概况

测试地点选择鹤壁中泰矿北翼-450 m 水平回风上山抽采示范区。鹤壁中泰矿二<sub>1</sub>煤层赋存于山西组下部大占砂岩之下,结构简单,本煤层属稳定厚煤层,埋深 700 m,平均厚度 7.33 m,倾角平均 12°,煤层瓦斯原始含量 8.27 m<sup>3</sup>/t;煤层瓦斯绝对压力 0.9 MPa。

3.2 测定结果及分析

在北翼-450 m 水平回风上山抽采示范区进行

穿层钻孔试验,钻孔设计与钻孔参数如图4和表2所示,a钻孔冲出煤量10.5 t,煤孔长度8 m,为方便表示冲孔钻孔冲出煤量与影响半径的关系,设计单位煤孔长度冲出煤量为1.3 t/m。

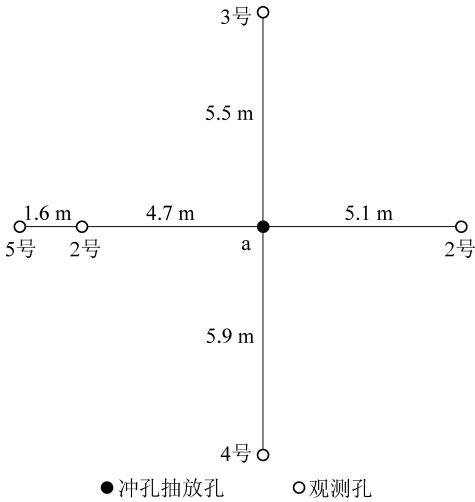


图4 水力冲孔试验钻孔终孔位置示意  
Fig.4 Schematic of position of end hole  
of hydraulic punching test

表2 钻孔参数

Table 2 Borehole parameter

孔号	方位角/(°)	倾角/(°)	孔深/m	煤孔深/m
1号	126	73	29	8
2号	126	73	29	8
3号	126	63	31	9
4号	126	84	30	8
5号	126	73	29	8
a孔	126	73	29	8

根据近两个月实测数据,分前后期拟合成观测孔瓦斯涌出量散点回归分析如图5、图6、表3所示。

以3号观测孔瓦斯涌出量回归方程为例,由于受到塑性区的影响,钻孔前期7 d内瓦斯涌出量衰减速度较快,以此为时间节点分界,分前后期,分别用式(3)、式(4)计算瓦斯排放量。钻孔初始瓦斯自然涌出量为

前期: $q_0=25.638\times10^{-3}\text{ m}^3/\text{min}$

后期: $q_0=11.949\times10^{-3}\text{ m}^3/\text{min}$

通过计算,钻孔前期排放量 $Q_q=159.99\text{ m}^3$ ,后期极限放量: $Q_h=573.55\text{ m}^3$ ,排放总量: $Q_j=733.54\text{ m}^3$ ,由表2可知,煤孔长度9 m,孔深31 m,则由式(5)换算成百米钻孔极限瓦斯排放量, $Q_w=8\,150.46\text{ m}^3$ 。以同样的计算原理及方式算出其他观测孔的百米钻孔瓦斯极限排放量并由表3中的负

指数方程提出各观测孔前后期瓦斯涌出的衰减系数见表4。

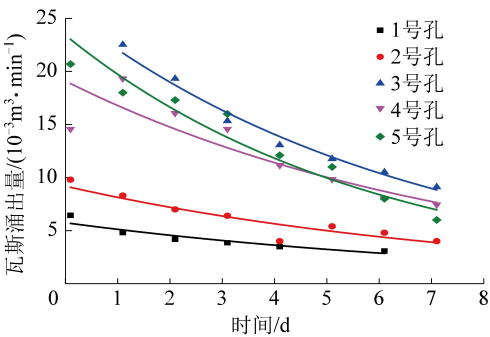


图5 观测孔前期瓦斯涌出量回归分析  
Fig.5 Regression analysis of gas emission in  
early stage of observation hole

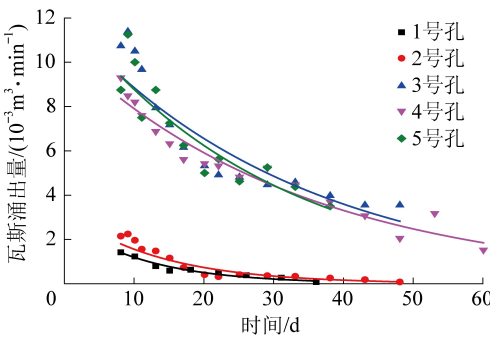


图6 观测孔后期瓦斯涌出量回归分析  
Fig.6 Regression analysis of gas emission at later stage  
of observation hole

表3 观测孔瓦斯涌出量指数拟合方程

Table 3 Fitting equation of gas emission of observation hole

观测孔	前期拟合方程	后期拟合方程
1号	$y=5.742\,6e^{-0.115x}$	$y=2.824e^{-0.086x}$
2号	$y=9.191\,2e^{-0.122x}$	$y=3.299\,8e^{-0.075x}$
3号	$y=25.638e^{-0.15x}$	$y=11.949e^{-0.03x}$
4号	$y=19.105e^{-0.129x}$	$y=10.565e^{-0.029x}$
5号	$y=23.423e^{-0.171x}$	$y=12.324e^{-0.034x}$

表4 观测孔瓦斯涌出量衰减系数和百米钻孔瓦斯  
极限排放量

Table 4 Attenuation coefficient of gas emission from  
observation hole and limit gas discharge from  
100-meter hole

观测孔	百米钻孔瓦斯极限 排放量/ $\text{m}^3$	前期衰减 系数/ $\text{d}^{-1}$	后期衰减 系数/ $\text{d}^{-1}$
1号	1 081.79	0.115	0.086
2号	1 570.63	0.122	0.075
3号	8 150.46	0.150	0.030
4号	8 142.81	0.129	0.029
5号	8 245.20	0.171	0.034

由表 4 可知:5 个观测孔前期钻孔瓦斯涌出量衰减系数在  $0.115\sim0.171\text{ d}^{-1}$ ,后期瓦斯涌出量衰减系数在  $0.029\sim0.086\text{ d}^{-1}$ ,表现出钻孔瓦斯涌出具有明显的分段特征。后期 3 号孔~5 号孔衰减系数大小相近,为 1 号孔、2 号孔衰减系数的 0.4 倍,说明 1 号、2 号观测孔处于抽采影响范围内,受抽采负压影响,钻孔周围瓦斯在抽采负压的作用下被抽走,钻孔瓦斯涌出量衰减系数出现突变。由此可知,抽采影响半径应小于 3 号观测孔可控距离,等于或大于 2 号观测孔可控距离。

3 号~5 号观测孔百米钻孔瓦斯极限排放量相近且显著大于 1、2 号观测孔,大 5~7 倍,表明 1 号、2 号观测孔在冲孔抽采孔控制范围内,煤层瓦斯解吸和渗流瓦斯大部分经抽采孔排出;2 号观测孔百米钻孔极限排放瓦斯量是 1 号观测孔的 1.46 倍,说明 2 号观测孔受抽采负压影响小于 1 号观测孔。

通过比较各观测孔瓦斯涌出量衰减系数和百米钻孔瓦斯极限排放量突变情况,得出 1 号孔、2 号孔在冲孔抽放孔影响范围内,3 号孔~5 号孔不在其影响范围内。

4 结 论

1)由于受钻孔周围煤体松动的影响,自然排放瓦斯钻孔瓦斯涌出具有分段性特征,一般在前 7 d 左右出现明显分界点,前期瓦斯涌出速度快,衰减系数大;后期瓦斯涌出速度较缓,衰减系数较小。分段拟合处理数据可提高计算抽采影响半径结果的准确性。

2)在水力冲孔钻孔并带抽情况下,在冲孔抽放钻孔影响范围内的排放孔瓦斯涌出量会减少,瓦斯涌出量衰减率变大,不在冲孔抽放钻孔影响范围内排放孔瓦斯涌出量稳定,瓦斯涌出量衰减率不发生改变。

3)提出了基于瓦斯涌出量衰减系数的变化结合计算观测孔百米钻孔瓦斯极限排放量测定水力冲孔抽采影响半径的方法,并在鹤壁中泰矿业公司进行了应用,得出在平均冲出煤量  $1.3\text{ t/m}$  下,水力冲孔钻孔抽采 2 个月时间,抽采影响半径为 5.1 m,依此优化了穿层钻孔水力冲孔抽采方案,提高抽采效果。

参考文献(References):

[1] 程远平,俞启香.中国煤矿区域性瓦斯治理技术的发展[J].采矿与安全工程学报,2007(4):383-390.  
CHENG Yuanping, YU Qixiang. Development of regional gas con-

trol technology for Chinese coalmines[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007(4):383-390.

[2] 徐东方,王兆丰.压降法测定钻孔的抽放影响半径试验研究[J].煤矿安全,2009,40(5):1-3.  
XU Dongfang, WANG Zhaofeng. Experimental investigation on pressure falling method measuring the borehole's influence radius [J]. Safety in Coal Mines, 2009,40(5):1-3.

[3] 梁冰,袁欣鹏,孙维吉,等.分组测压确定瓦斯有效抽采半径试验研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):132-135.  
LIANG Bing, YUAN Xinpeng, SUN Weiji, et al. Grouped pressure test to determine effective gas drainage radius [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013,30(1):132-135.

[4] 陈金玉,马丕梁,孔一凡,等.SF6气体示踪法测定钻孔瓦斯抽放有效半径[J].煤矿安全,2008,39(9):23-25.  
CHEN Jinyu, MA Piliang, KONG Yifan, et al. Determination of effective radius of borehole gas drainage by SF6 gas tracer method [J]. Safety in Coal Mines, 2008,39(9):23-25.

[5] 刘三钧,马耕,卢杰,等.基于瓦斯含量的相对压力测定有效半径技术[J].煤炭学报,2011,36(10):1715-1719.  
LIU Sanjun, MA Geng, LU Jie, et al. Relative pressure determination technology for effective radius found on gas content [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(10):1715-1719.

[6] 秦贵成,李阳,舒龙勇.本煤层分段水力造穴钻孔抽采半径考察试验研究[J].煤炭科学技术,2020,48(8):106-113.  
QIN Guicheng, LI Yang, SHU Longyong. Investigation and experimentation research on extraction radius of segmented hydraulic cavitation borehole in mining-coalbed[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8):106-113.

[7] 孙玉峰,许卫国,龚巍峥.基于瓦斯流量法的瓦斯抽采半径确定方法[J].煤矿机械,2014,35(8):137-139.  
SUN Yufeng, XU Weiguo, GONG Weizheng. Determination of gas drainage radius based on gas flow method [J]. Coal Mining Machinery, 2014,35(8):137-139.

[8] 刘海,王龙.低渗煤层淹没射流扩孔瓦斯抽采有效影响半径模拟研究[J].煤炭科学技术,2019,47(8):135-141.  
LIU Hai, WANG Long. Simulation study on effective influencing radius of submerged water jet for gas-drainage in low permeability coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8):135-141.

[9] 华明国,姚邦华,李建伟.倾斜煤层水力冲孔有效影响半径数值模拟研究[J].工矿自动化,2020,46(2):88-93.  
HUA Mingguo, YAO Banghua, LI Jianwei. Numerical simulation research on effective influence radius of hydraulic punching in inclined coal seam [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(2):88-93.

[10] 郭培红,李海霞,朱建安.煤层钻孔瓦斯抽放数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(S1):260-262.  
GUO Peihong, LI Haixia, ZHU Jian'an. Numerical simulation of gas drainage from boreholes in coal seams [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2009, 28(S1):260-262.

[11] 吴兵,华明国,冯晓彦,等.基于数值模拟确定瓦斯抽采有效半径的方法[J].煤炭科学技术,2020,48(8):106-113.  
WU Bing, HUA Mingguo, FENG Xiaoyan, et al. Study on methods of determining gas extraction radius with numerical simulation

- [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 45: 345-351.
- [12] 季淮君,李增华,杨永良,等. 基于瓦斯流场的抽采半径确定方法[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(6): 917-921.  
JI Huaijun, LI Zenghua, YANG Yongliang, *et al.* Drainage radius measurement based on gas flow field [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2013, 30(6): 917-921.
- [13] 周红星,程远平,谢战良. 计算机模拟确定瓦斯抽放有效半径的方法研究[J]. *能源技术与管理*, 2005(4): 81-82.  
ZHOU Hongxing, CHENG Yuanping, XIE Zhanliang. Computer simulation method to determine the effective radius of gas drainage[J]. *Energy Technology and Management*, 2005(4): 81-82.
- [14] 舒才,王宏图,任梅青,等. 基于瓦斯抽采量的有效抽采半径数学模型及工程验证[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(5): 1021-1026.  
SHU Cai, WANG Hongtu, REN Meiqing, *et al.* Model of effective borehole gas drainage radius based on volume of gas drainage and its engineering verification[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(5): 1021-1026.
- [15] 朱南南,张浪,范喜生,等. 基于瓦斯径向渗流方程的有效抽采半径求解方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(10): 105-110.  
ZHU Nannan, ZHANG Lang, FAN Xisheng, *et al.* Study on the solution method of effective extraction radius based on gas radial seepage equation [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(10): 105-110.
- [16] 郝富昌,刘明举,孙丽娟. 瓦斯抽采半径确定方法的比较及存在问题研究[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(12): 55-58, 110.  
HAO Fuchang, LIU Mingju, SUN Lijuan. Study on comparison of methods to determine gas drainage radius and existed problems [J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(12): 55-58, 110.
- [17] 徐三民. 确定瓦斯有效抽放半径的方法探讨[J]. *煤炭工程师*, 1996(3): 43-44.  
XU Sanmin. Discussion on the method of determining the effective gas drainage radius[J]. *Coal Engineer*, 1996(3): 43-44.
- [18] 张明杰,贾文超,梁锡明,等. 基于瓦斯自然涌出规律的有效抽采半径研究[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(10): 98-104.  
ZHANG Mingjie, JIA Wenchao, LIANG Ximing, *et al.* Research on effective extraction radius based on natural gas emission law [J]. *Chinese Safety Science Journal*, 2018, 28(10): 98-104.
- [19] 张明杰,田加加,付帅. 基于瓦斯涌出量衰减特征的钻孔抽采影响半径测定方法[J]. *煤矿开采*, 2014, 19(2): 121-124.  
ZHANG Mingjie, TIAN Jiajia, FU Shuai. Measurement method of bore-hole drainage influence radius based on methane gushing amount attenuation rule[J]. *Coal Mining*, 2014, 19(2): 121-124.
- [20] 周世宁,林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998.  
ZHOU Shining, LIN Baiquan. Coal seam gas occurrence and flow theory [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1998.
- [21] 张明杰,贾文超,冯阵东,等. 基于穿层钻孔瓦斯涌出特征测定有效抽采半径的方法; ZL201610944436.5. 2019-07-05.  
ZHANG Mingjie, JIA Wenchao, FENG Zhendong, *et al.* A method for determining effective drainage radius based on gas emission characteristics of through-layer boreholes; ZL201610944436.5. 2019-07-05.
- [22] 蔡成功,周革忠. 自动变径大直径钻孔抽放煤层瓦斯试验[J]. *煤炭科学技术*, 2004, (12): 39-41.  
CAI Chenggong, ZHOU Gezhong. Gas drainage in seam with large auto variable diameter bore holes [J]. *Coal Science and Technology*, 2004, (12): 39-41.