

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0756-08

# 考虑卸压和抽采效果的水力冲孔布孔参数优化研究

郝富昌<sup>1</sup>, 孙丽娟<sup>2</sup>, 刘明举<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000;

2. 河南理工大学安全技术培训学院, 河南 焦作 454000)

**摘要** 为了提高水力冲孔技术的消突效果, 建立了考虑煤的塑性软化、扩容特性和流变特性的钻孔周围煤体黏弹塑性模型, 得到了不同冲煤量钻孔的卸压范围, 建立了考虑渗透率动态变化和吸附特征的渗流-应力耦合模型, 采用 COMSOL 软件对建立的耦合模型进行求解, 研究了不同冲煤量钻孔的抽放半径, 优化了水力冲孔布孔参数。结果表明: 在确定水力冲孔布孔参数时, 应综合分析水力冲孔的卸压范围和抽放半径, 冲煤量为 0.5, 1.0 和 1.5 t/m 时, 卸压范围分别为 3.71, 4.61 和 5.8 m, 抽放半径分别为 3.5, 4.3 和 5.0 m, 义安矿平均冲煤量为 1.0 t/m, 由此确定水力冲孔布孔间距为 8.0 m, 区域措施效果检验和工作面预测数据表明, 确定的布孔参数合理可靠。

**关键词** 水力冲孔; 多场耦合; 布孔参数; 应力场; 渗流场; 抽放半径; 卸压范围

**中图分类号** TD 713

**文献标志码** A

## Research on boreholes space optimization of hydraulic flushing considering press relief and gas drainage effect

HAO Fuchang<sup>1</sup>, SUN Lijuan<sup>2</sup>, LIU Mingju<sup>1</sup>

(1. The Collaborative Innovation Centre of Coal Safety Production of Henan Province, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. School of Safety Technology Training, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

**Abstract** In order to improve outburst elimination of hydraulic flushing, the visco-elastic-plastic model of coal around boreholes considering plastic softening, dilatancy and rheological characteristic has been established, obtaining the parameter of relief ranges of different punching coal amount. At the same time the seepage-stress coupling model considering dynamic change of permeability and adsorption characteristics has been established, and the coupling model has been solved by COMSOL software. Drainage radius of different punching coal amount have been studied, and the boreholes space of hydraulic flushing coal has been optimized. The results show that relief range and drainage radius should be comprehensively analyzed in order to determine boreholes space of hydraulic flushing. When the punching coal amount is 0.5, 1.0 and 1.5 t/m, the relief range is 3.71, 4.61 and 5.8 m, and the drainage radius is 3.5, 4.3 and 5.0 m accordingly. Boreholes space of hydraulic flushing is determined to be 8.0 m because of the average punching coal amount of 1.0 t/m. The data of regional measures effect test and working face prediction show that the boreholes space is reasonable and reliable.

收稿日期: 2013-06-18

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAK09B02-1); 河南理工大学博士基金项目(B2013-001); 河南省教育厅项目(13B440030)

作者简介: 郝富昌(1981—), 男, 河南省南阳市人, 副教授, 工学博士, 从事瓦斯灾害预测与防治方面的研究。

E-mail: haofuchang@163.com

Tel: 0391-3987890

**Key words** hydraulic flushing; multi-physics coupling; boreholes space; stress field; seepage field; drainage radius; relief range

水力冲孔技术可有效对煤体进行卸压, 增大煤层的透气性系数, 提高抽放效果, 被广泛应用于松软低透气性煤层的防突工作中<sup>[1-2]</sup>。采用该项技术, 很关键的一环就是确定合理的水力冲孔布孔间距, 钻孔布孔间距过密, 会增加防突成本, 加剧采掘接替紧张的局面; 钻孔间距过大, 会形成应力集中和抽放盲区, 无法消除采掘工作面的突出危险性, 甚至会加剧突出危险性。水力冲孔技术主要起到2个方面的作用: 一方面是对煤体进行卸压, 降低煤体的弹性潜能; 另一方面增加煤层的透气性, 提高抽放效果, 因此要确定合理的水力冲孔布孔间距, 应充分考虑水力冲孔的卸压范围和有效抽放半径。在钻孔的卸压范围研究方面, 前人多采用 Kastner 公式分析钻孔的应力分布规律及卸压范围, 由于 Kastner 公式认为煤体破坏后的强度始终保持原来的峰值强度, 忽略了煤的塑性软化和扩容特性, 计算的卸压范围偏小<sup>[3-4]</sup>。在水力冲孔有效抽放半径的考察方面, 前人多采用瓦斯压力降低法和瓦斯流量法等现场实测法<sup>[5]</sup>。由于现场实测法一次只能测试某个地点的抽采参数, 成本较高, 得到的有效抽放半径是一区间值; 不同埋藏深度和瓦斯压力的地点抽采参数差别很大, 现场实测法不能随瓦斯地质条件的改变动态确定瓦斯抽采参数。为此, 笔者考虑采用数值模拟的方法确定水力冲孔有效影响半径, 这种方法的核心就是研究瓦斯的运移规律。大量理论研究表明, 瓦斯的运移受渗流场和应力场的控制, 是瓦斯渗流和煤层变形相互耦合的过程; 因此要分析采用水力冲孔后钻孔周围煤体的瓦斯运移规律, 必须综合分析应力场和渗流场对瓦斯运移的控制作用<sup>[6-13]</sup>。为此笔者研究了钻孔周围煤体的应力分布特征, 建立了抽放过程流固耦合动态模型, 对水力冲孔布孔参数进行了优化, 研究成果可为水力冲孔钻孔布置提供依据。

## 1 试验矿井防突技术存在的问题

义煤集团义安矿主采二<sub>1</sub>煤层, 构造煤全层发育, 煤层瓦斯压力为 0.66~1.57 MPa, 煤的透气性系数为 0.0052~0.0083 m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup>·d), 为高应力低透气性严重突出煤层。22011 轨道平巷在煤巷掘进期间, 设计采用顺层钻孔预抽煤巷条带瓦斯区域防突措施, 共掘进巷道 120 m。由于二<sub>1</sub>煤层煤质松软、透

气性较差且塌孔严重, 瓦斯抽放效果差。如图 1 所示。义安矿采用瓦斯涌出初速度  $q_{\max}$ 、钻屑瓦斯解吸指标  $\Delta h_2$  和钻屑量  $S$  值作为工作面预测指标, 其临界值经考察定为 3.5 L/min, 200 Pa 和 6 kg/m。在前 120 m 巷道掘进过程中, 钻屑量  $S$  值超标 1 次,  $\Delta h_2$  超标 3 次,  $q_{\max}$  超标 6 次, 并发生了一次煤与瓦斯突出动力现象, 巷道月进尺仅 40 m 左右。

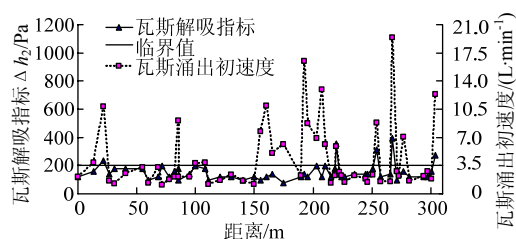


图1 22011 轨道平巷前 300 m 工作面预测参数分布图  
Fig.1 Working face prediction parameters distribution before 300 m in 22011 track roadway

为了保障煤巷安全掘进, 提出了底板巷水力冲孔卸压增透技术, 具体方法为, 在二<sub>1</sub>煤层底板 15 m 位置布置底板岩巷, 施工穿层钻孔, 然后采用高压水射流冲孔, 冲孔完毕后封孔联入抽放系统进行抽放, 待预抽区消突后再掘进煤巷。在初始试验阶段, 采用瓦斯压力降低法和瓦斯流量法考察了水力冲孔的有效影响半径, 确定水力冲孔布孔间距为 13 m, 在距开口 120~303 m 的区域采取此布孔参数。由于现场考察方法误差较大, 确定的布孔参数不合理, 在煤巷掘进期间, 工作面预测指标超标频繁,  $\Delta h_2$  超标 6 次,  $q_{\max}$  超标 14 次, 其中  $q_{\max}$  最大达到 19.4 L/min,  $\Delta h_2$  和  $q_{\max}$  超标次数和最大值均大于先前措施的预测指标, 说明当布孔间距不合理时采取水力冲孔措施, 会导致煤层应力集中, 突出危险性反而增大的现象。因此准确确定水力冲孔布孔参数就显得特别重要。

## 2 多物理场耦合模型

### 2.1 钻孔周围煤体的应力应变分析

大量试验表明, 含瓦斯煤具有如下特征: ① 存在着塑性软化特征, 即当煤体所受应力超过峰值强度  $\sigma_c$  后, 煤体进入塑性软化阶段, 煤体自身的强度随着应变值增大逐渐衰减, 直至残余强度  $\sigma_c^*$ ; ② 在塑性软化和残余变形阶段煤体存在着剪胀扩容现象; ③ 含瓦斯煤具有明显的流变特性, 即会随时

间发生蠕变变形。依据煤体的上述特征,将钻孔周围煤体划分为 3 个区,即黏弹性区、塑性软化区和破坏区(图 2),3 个区分别用“e”,“p”,“b”来表示。破坏区和塑性软化区半径均为时间的函数,用  $R_b(t)$  和  $R_p(t)$  来表示,钻孔初始孔径为  $r_0$ 。黏弹性区采用鲍埃丁-汤姆逊模型,塑性区和破坏区采用塑性流动模型,其破坏符合莫尔-库仑准则。

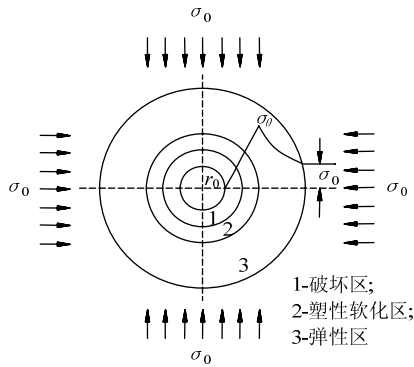


图 2 钻孔周围煤体力学模型

Fig.2 Mechanical model around boreholes

由于钻孔长度远大于钻孔孔径,故煤体变形可做平面应变问题处理,满足以下平衡和几何方程:

$$\text{平衡方程} \quad \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\text{几何方程} \quad \varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  分别为煤体所受的径向和切向应力;  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\theta$  分别为径向和切向应变;  $u$  为径向位移。

### 2.1.1 孔周围煤体的应力分析

#### 1) 弹性区

由平衡方程(1)、几何方程(2)及鲍埃丁-汤姆逊模型可得黏弹性区的应力应变方程为:

$$\begin{aligned} \sigma_r^e &= \sigma_0 - \frac{MR_p^2(t)}{r^2} \\ \sigma_\theta^e &= \sigma_0 + \frac{MR_p^2(t)}{r^2} \\ u &= \frac{A(t)R_p^2(t)}{r} \\ \varepsilon_r^e &= -\frac{A(t)R_p^2(t)}{r^2} \\ \varepsilon_\theta^e &= \frac{A(t)R_p^2(t)}{r^2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $A(t)$  为时间的函数,有:

$$A(t) = \frac{M}{2} \left\{ \frac{1}{G_\infty} \left[ 1 - e^{\left( -\frac{t}{\eta_{\text{ret}}} \right)} \right] + \frac{1}{G_0} e^{\left( -\frac{t}{\eta_{\text{ret}}} \right)} \right\} \quad (4)$$

$$M = \frac{\sigma_0(K_p - 1) + \sigma_c}{K_p + 1} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_0$  为煤体所受的初始应力,包括初始地应力和初始瓦斯压力,MPa;  $G_0$ ,  $G_\infty$  分别为煤体的初始和长时剪切模量,MPa;  $\eta_{\text{ret}}$  为钻孔周围煤体流变的延迟时间, d;  $t$  为时间, d;  $K_p = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ ,  $\varphi$  为煤体的内摩擦角, ( $^\circ$ );  $\sigma_c$  为煤的峰值强度,MPa。

#### 2) 塑性软化区

在塑性软化区煤体变形具有扩容现象,有

$$\Delta \varepsilon_r^p + \eta_1 \Delta \varepsilon_\theta^p = 0 \quad (6)$$

式中  $\eta_1$  为塑性软化区扩容系数。

由式(2), (6)可得塑性软化区应变方程为:

$$\begin{aligned} u^p &= \frac{2A(t)r}{\eta_1 + 1} \left( \frac{R_p(t)}{r} \right)^{\eta_1 + 1} + \frac{\eta_1 - 1}{\eta_1 + 1} A(t)r \\ \varepsilon_r^p &= -\frac{2A(t)\eta_1}{\eta_1 + 1} \left( \frac{R_p(t)}{r} \right)^{\eta_1 + 1} + \frac{\eta_1 - 1}{\eta_1 + 1} A(t) \\ \varepsilon_\theta^p &= \frac{2A(t)}{\eta_1 + 1} \left( \frac{R_p(t)}{r} \right)^{\eta_1 + 1} + \frac{\eta_1 - 1}{\eta_1 + 1} A(t) \end{aligned} \quad (7)$$

塑性软化区煤体破坏符合莫尔-库仑准则,煤体的强度  $\sigma_c^p$  是应变的函数:

$$\sigma_c^p = \sigma_c - \frac{2A(t)M_c}{\eta_1 + 1} \left[ \left( \frac{R_p(t)}{r} \right)^{\eta_1 + 1} - 1 \right] \quad (8)$$

式中  $M_c$  为软化模量,MPa。

将式(8)和(1)联立,利用边界条件  $(\sigma_r)_{r=R_p(t)} =$

$(\sigma_r^p)_{r=R_p(t)}$  可得

$$\begin{aligned} \sigma_r^p &= \frac{2}{K_p + 1} \left[ \sigma_0 + \frac{\sigma_c}{K_p - 1} + \frac{(K_p + 1)M_c A(t)}{(K_p - 1)(K_p + \eta_1)} \right] \cdot \left( \frac{r}{R_p(t)} \right)^{K_p - 1} + \\ &\quad \left[ \frac{1}{K_p + \eta_1} \left( \frac{R_p(t)}{r} \right)^{1 + \eta_1} - \frac{1}{K_p - 1} \right] \cdot \frac{2M_c A(t)}{1 + \eta_1} - \frac{\sigma_c}{K_p - 1} \\ \sigma_\theta^p &= K_p \sigma_r^p + \sigma_c - \frac{2A(t)M_c}{\eta_1 + 1} \left[ \left( \frac{R_p(t)}{r} \right)^{\eta_1 + 1} - 1 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

#### 3) 破坏区

破坏区煤体屈服符合莫尔-库仑准则,认为煤体的残余强度  $\sigma_c^*$  固定不变,由平衡方程(1)和边界条件  $(\sigma_r^b)_{r=r_0} = 0$ , 得到破坏区的应力表达式为:

$$\begin{aligned} \sigma_r^b &= \frac{\sigma_c^*}{K_p - 1} \left[ \left( \frac{r}{r_0} \right)^{K_p - 1} - 1 \right] \\ \sigma_\theta^b &= \frac{K_p \sigma_c^*}{K_p - 1} \left[ \left( \frac{r}{r_0} \right)^{K_p - 1} - 1 \right] + \sigma_c^* \end{aligned} \quad (10)$$

在破坏区煤体变形具有扩容现象, 有

$$\Delta \varepsilon_r^b + \eta_2 \Delta \varepsilon_\theta^b = 0 \quad (11)$$

式中  $\eta_2$  为破坏区煤的扩容系数。

由式(2), (11)和非关联流动法则可得破坏区应变方程为:

$$u^b = 2A(t)r \left\{ \left[ \frac{1}{1+\eta_1} + \frac{1}{1+\eta_2} \left[ \left( \frac{R_b(t)}{r} \right)^{1+\eta_2} - 1 \right] \right] \left( \frac{R_p(t)}{R_b(t)} \right)^{1+\eta_1} + \frac{\eta_1 - 1}{2(1+\eta_1)} \right\} \quad (12)$$

$$\varepsilon_r^b = \frac{du_b}{dr}, \quad \varepsilon_\theta^b = \frac{u_b}{r}$$

### 2.1.2 钻孔的卸压范围

钻孔的破坏区半径又称为卸压范围, 在塑性软化区和破坏区的交界处, 即  $r=R_b(t)$ ,  $\sigma_c^p = \sigma_c^*$ ; 并在

破坏区和塑性软化区交界处, 钻孔周围煤的径向应力相等, 由此可得破坏区半径  $R_b(t)$  为

$$R_b(t) = \left\{ \left[ \left[ \sigma_0 + \frac{\sigma_c}{K_p - 1} + \frac{(K_p + 1)M_c A(t)}{(K_p - 1)(K_p + \eta_1)} \right] \frac{2}{K_p + 1} N^{1-K_p} + \left[ \frac{N^{1+\eta_1}}{K_p + \eta_1} - \frac{1}{K_p - 1} \right] \frac{2M_c A(t)}{1 + \eta_1} - \frac{\sigma_c}{K_p - 1} \right] \frac{K_p - 1}{\sigma_c^*} + 1 \right\}^{\frac{1}{K_p - 1}} \cdot r_0 \left[ 1 + \frac{(1 + \eta_1)(\sigma_c - \sigma_c^*)}{2A(t)M_c} \right]^{\frac{1}{1+\eta_1}} \quad (13)$$

塑性软化区半径  $R_p(t)$  为

$$R_p(t) = \left[ 1 + \frac{(1 + \eta_1)(\sigma_c - \sigma_c^*)}{2A(t)M_c} \right]^{\frac{1}{1+\eta_1}} R_b(t) \quad (14)$$

### 2.1.3 体积应变

钻孔周围煤体的体积变形为径向应变和切向应变之和, 由此可得:

$$\varepsilon_v^c = 0, \quad \varepsilon_v^p = 2A(t) \frac{1 - \eta_1}{1 + \eta_1} \left( \frac{R_p(t)}{r} \right)^{\eta_1 + 1} + 2A(t) \frac{\eta_1 - 1}{\eta_1 + 1} \quad (15)$$

$$\varepsilon_v^b = \left\{ \frac{2}{1 + \eta_1} - \frac{2}{1 + \eta_2} + \frac{1 - \eta_2}{1 + \eta_2} \left( \frac{R_b(t)}{r} \right)^{1+\eta_2} \right\} 2A(t) \left( \frac{R_p(t)}{R_b(t)} \right)^{1+\eta_1} + 2A(t) \frac{1 - \eta_1}{1 + \eta_1} \left( \frac{R_p(t)}{R_b(t)} \right)^{\eta_1 + 1} + 4A(t) \frac{\eta_1 - 1}{\eta_1 + 1}$$

## 2.2 渗透率的动态变化模型

煤的渗透率是进行流固耦合研究的桥梁, 其变化是煤的蠕变变形和瓦斯压力综合作用的结果, 依据孔隙率  $\varphi$  的定义和 Kozeny-Carman 方程可得渗透率  $K$  的动态变化模型<sup>[14]</sup>:

$$K = \frac{K_0}{1 + \varepsilon_v} \left( 1 + \frac{\varepsilon_v}{\varphi_0} - \frac{K_Y(p_0 - p)(1 - \varphi_0)}{\varphi_0} + \frac{2a\rho_s RT K_Y (\ln(1 + bp_0) - \ln(1 + bp))}{9V\varphi_0} \right)^3 \quad (16)$$

式中:  $K_0$  为初始渗透率;  $K_Y$  为体积压缩系数;  $p_0$  为初始瓦斯压力;  $\varphi_0$  为初始孔隙率;  $p$  为瓦斯抽放过程的瓦斯压力;  $a, b$  为煤的吸附常数;  $\rho_s$  为煤的视密度;  $R$  为通用气体常数;  $V$  为气体摩尔体积;  $T$  为绝对温度。

由式(16)可知渗透率  $K$  主要受到体积应变  $\varepsilon_v$  和瓦斯压力  $p$  的影响, 而  $\varepsilon_v$  受应力场控制,  $p$  受渗流场控制, 通过渗透率  $K$  实现瓦斯抽放过程的流固耦合。

### 2.3 瓦斯抽放过程流固耦合动态模型

瓦斯抽放过程中, 瓦斯气体在煤中的运移符合

质量守恒定律, 由此可得单位体积煤体的瓦斯渗流连续性方程<sup>[15]</sup>为:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot v) = 0 \quad (17)$$

式中:  $M$  为单位体积煤体内的瓦斯质量;  $\rho$  为瓦斯密度;  $v$  为瓦斯渗流速度。

假定瓦斯为理想气体, 其密度和瓦斯压力满足如下关系:

$$\rho = \frac{pM_g}{RT} \quad (18)$$

式中  $M_g$  为瓦斯气体的分子量, kg/kmol。

瓦斯在煤体中以吸附态和游离态存在, 因此煤中的瓦斯含量由游离瓦斯含量  $M_y$  和吸附瓦斯含量  $M_x$  组成, 所以有:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial M_x}{\partial t} + \frac{\partial M_y}{\partial t} \quad (19)$$

游离瓦斯含量  $M_y$  为

$$M_y = \rho \varphi \quad (20)$$

由式(18), (20)可得

$$\frac{\partial M_y}{\partial t} = \beta \left( p \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (21)$$

忽略膨胀应力和孔隙压力对煤的孔隙率的影响, 由此可得

$$\frac{\partial M_y}{\partial t} = \beta \left( \frac{p(1-\phi_0)}{(1+\varepsilon_v)^2} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{\phi_0 + \varepsilon_v}{1+\varepsilon_v} \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (22)$$

煤吸附瓦斯符合 Langmuir 方程, 且瓦斯吸附受煤的水分、灰分、挥发分的影响, 不同变质程度的煤水分对其影响不同, 由此可得

$$M_x = \frac{abc p \rho_n}{1+bp} \quad (23)$$

其中

$$c = \rho_s \left( \frac{1}{1+0.147e^{0.022V_{ad}M_{ad}}} e^{n(T_s-T)} \right) \frac{100-M_{ad}-A_{ad}}{100} \quad (24)$$

式中:  $c$  为煤的校正参数,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_n$  为标准大气压下的瓦斯密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $T_s$  为试验室作吸附试验的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T$  为井下煤体温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $M_{ad}$  为煤中水分含量, %;  $V_{ad}$  为煤中挥发分含量, %;  $A_{ad}$  为煤中灰分含量, %;  $n$  为系数, 按下式确定:

$$n = \frac{0.02}{0.993+0.07p} \quad (25)$$

由此可得

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} = \frac{abc p_n}{(1+bp)^2} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\beta abc p_n}{(1+bp)^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (26)$$

瓦斯在煤层中的运移遵从 Darcy 定律, 可以得出钻孔周围煤体瓦斯的渗流速度

$$v = -\frac{K}{\mu} \cdot \nabla p \quad (27)$$

式中  $\mu$  为瓦斯动力黏度系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

将式(21), (26)和(27)代入式(20)可得

$$\frac{2p(1-\phi_0)}{(1+\varepsilon_v)^2} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{\phi_0 + \varepsilon_v}{p(1+\varepsilon_v)} \frac{\partial p^2}{\partial t} + \frac{abc p_n}{(1+bp)^2} \frac{\partial p^2}{\partial t} = \nabla \left( \frac{K}{\mu} \cdot \nabla p^2 \right) \quad (28)$$

式(28)即为考虑煤的流变特性、渗透率动态变化和吸附特征的渗流-应力耦合模型。

### 3 不同冲煤量水力冲孔布孔参数确定

#### 3.1 数值模拟参数的确定

单孔冲煤量越大, 抽放钻孔孔径扩大倍数越大, 措施的卸压增透效果越好; 但由于喷嘴有效射程、有效压力、冲孔时间的限制和防止冲孔后煤层内存在空洞的需要, 单孔冲煤量不能过大。义安矿初始抽放钻孔孔径为 94 mm, 煤的视密度为  $1.42 \text{ t/m}^3$ , 冲煤量为 0.5, 1.0 和 1.5 t/m 的钻孔, 扩大后的孔径分别为 676, 952 和 1 164 mm。义安矿 22011

轨道平巷埋藏深度约为 710 m, 所受初始地应力为 19.0 MPa 左右, 水平应力与垂直应力基本相等。由于煤层顶底板岩层透气性极小, 为此假定顶底板岩层为不透水边界。对义安矿的煤体参数进行测试, 测试结果如表 1 所示。

表 1 数值模拟所用的煤体参数

Table 1 Coal parameters used in the numerical simulation

名称	值	名称	值
动力黏性系数/(Pa·s)	$1.08 \times 10^{-5}$	初始孔隙率/%	2
初始应力/MPa	19.6	延迟时间/d	24
初始剪切模量/MPa	1000	泊松比	0.3
长期剪切模量/MPa	500	钻孔半径/m	0.054
初始瓦斯压力/MPa	1.0	开氏温度/K	295
吸附常数 $a$ 值/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	32.368	初始渗透率/ $\text{m}^2$	$1.2 \times 10^{-19}$
吸附常数 $b$ 值/ $\text{MPa}^{-1}$	0.706	软化模量/MPa	2 000
通用气体常数/( $\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ )	8.314 3	煤的密度/( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1.42
气体摩尔体积/( $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ )	0.022 4		

松软煤层的蠕变变形较为剧烈, 在高应力作用下, 很容易发生堵孔现象, 阻塞瓦斯抽放的通道。为了防止堵孔阻塞抽放通道, 在冲孔结束后, 立即向钻孔内安装抽放管, 抽放管材质为无缝钢管, 把抽放管下至煤层顶板, 在见煤段的抽放管上开孔, 提供瓦斯抽放的通道。根据采掘部署, 抽放瓦斯时间为 1 个月。

#### 3.2 不同冲煤量钻孔的卸压范围

单孔冲煤量越大, 钻孔扩大倍数越大, 水力冲孔措施的卸压增透效果越好。义安矿钻孔的初始孔径为 108 mm, 煤的视密度为  $1.42 \text{ t/m}^3$ , 可计算不同冲煤量扩大后的孔径如图 3 所示。

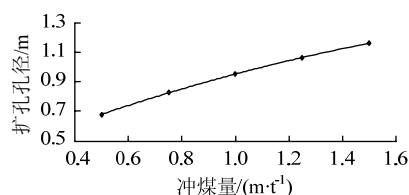


图 3 不同冲煤量扩大后的孔径

Fig.3 Expanded aperture of different punching coal amount

钻孔的破坏区半径即为卸压范围, 将表 1 和图 3 数据代入式(13)中, 采用 COMSOL 软件对不同冲煤量的钻孔初始受力情况进行模拟, 如图 4~6 所示。切向应力黑圈的位置即为卸压范围。

从图 4~6 可以看出: 冲煤量为 0.5, 1.0 和 1.5 t/m 时, 钻孔的初始卸压范围分别为 3.71, 4.61 和 5.8 m, 随着冲煤量的增加, 钻孔的卸压范围逐渐增大。

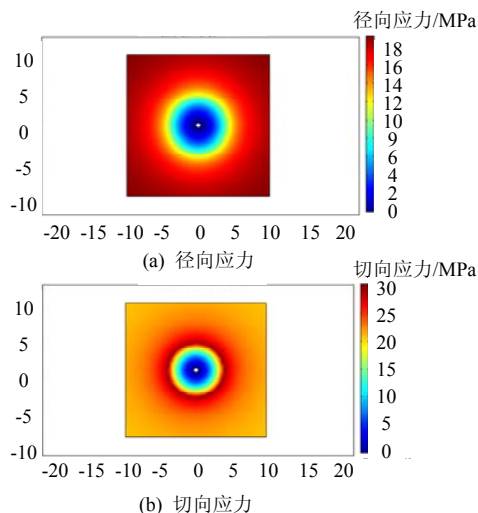


图4 冲煤量 0.5 t/m 钻孔周围煤体初始应力分布  
Fig.4 Initial stress distribution around boreholes of punching coal amount 0.5 t/m

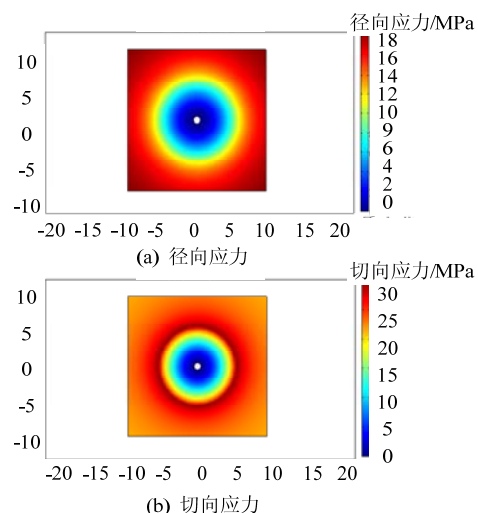


图5 冲煤量 1.0 t/m 钻孔周围煤体初始应力分布  
Fig.5 Initial stress distribution around boreholes of punching coal amount 1.0 t/m

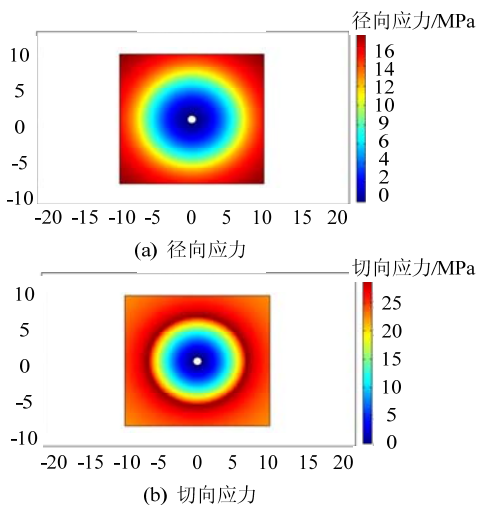


图6 冲煤量 1.5 t/m 钻孔周围煤体初始应力分布  
Fig.6 Initial stress distribution around boreholes of punching coal amount 1.5 t/m

若不考虑煤的塑性软化和扩容特性, 采用 Kastner 公式, 计算冲煤量 1.0 t/m 的卸压范围为 3.2 m, 与本文解答相比, 明显偏小。

### 3.3 不同冲煤量抽放半径的确定

将瓦斯压力降低为 0.74 MPa 的区域认为是有效抽放半径的影响范围。采用 COMSOL 软件, 选取 PDE 模式系数型, 以二次开发方式对建立的多物理场流固耦合模型进行求解, 可得冲煤量为 0.5, 1.0, 1.5 t/m, 抽放时间为 1 个月的钻孔周围煤体瓦斯压力分布图, 如图 7 所示。

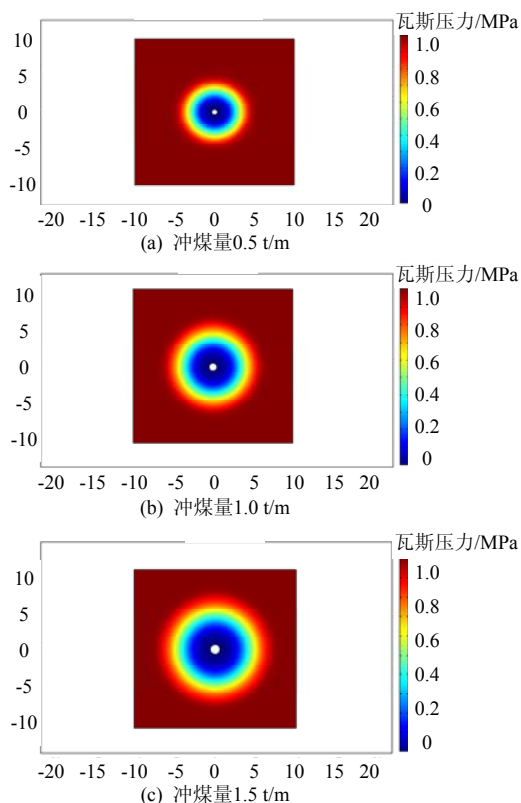


图7 冲煤量 1.5 t/m 钻孔周围煤体瓦斯压力分布  
Fig.7 Gas pressure distribution around boreholes of punching coal amount 1.5 t/m

从图 7 可看出: 冲煤量为 0.5 t/m 的钻孔, 在距孔壁 3.5 m 处, 瓦斯压力降低为 0.74 MPa 以下, 即抽放半径为 3.5 m, 冲煤量为 1.0 t/m 的钻孔抽放半径为 4.3 m, 冲煤量为 1.5 t/m 的钻孔抽放半径为 5.0 m。随着冲煤量的增加, 钻孔的抽放半径逐渐增大。

### 3.4 水力冲孔布孔参数的确定

水力冲孔消突技术主要起到 2 个方面的作用:

1) 扩大钻孔孔径, 对煤体进行卸压, 大幅度地释放了煤层和围岩中的弹性潜能; 2) 提高煤层的透气性, 有效抽取煤层中的瓦斯, 降低煤层中的瓦斯潜能。因此, 在确定水力冲孔布孔间距时, 需要综合

考虑钻孔的卸压范围和抽放半径。根据义安矿的冲孔实践,单孔冲煤量平均为 1.0 t/m。冲煤量 1.0 t/m 时,钻孔的卸压范围为 4.61 m,抽放半径为 4.3 m,考虑到一定的安全系数,把抽放钻孔的终孔间距定为 8.0 m。

## 4 布孔参数的生产验证

### 4.1 钻孔布置方式

22011 轨道平巷 303~600 m 区域采用水力冲孔技术,钻孔布置如图 8 所示。

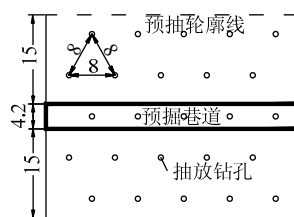


图 8 水力冲孔终孔布置图 (m)

Fig.8 Final hole layout of hydraulic punching

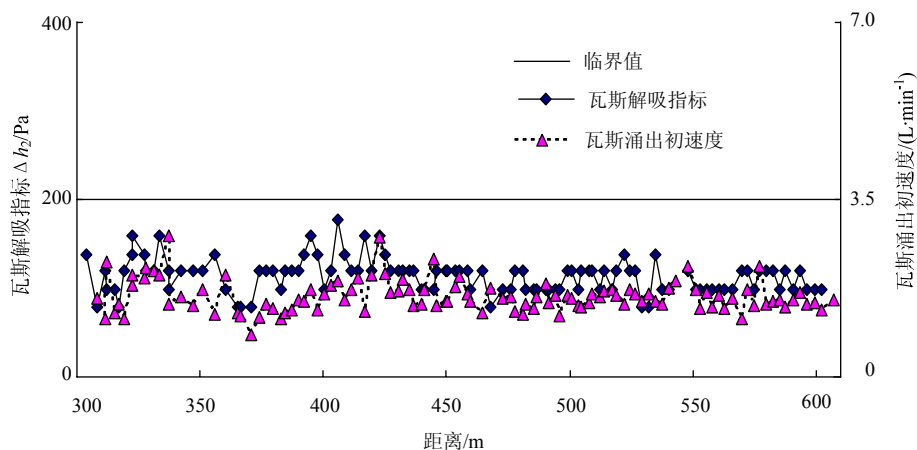


图 9 22011 轨道平巷后 300 m 工作面预测参数分布图

Fig.9 Working face prediction parameters distribution after 300 m in 22011 track roadway

## 5 结 论

1) 依据含瓦斯煤的力学性质,建立了考虑煤的塑性软化、扩容特性和流变特性的钻孔周围煤体黏弹塑性模型,得到了不同冲煤量钻孔卸压范围的表达式。冲煤量为 0.5, 1.0, 1.5 t/m 时,钻孔的卸压范围分别为 3.71, 4.61, 5.8 m。

2) 水力冲孔措施后抽放瓦斯的过程是应力场和渗流场耦合作用的过程,建立了考虑煤的渗透率动态变化和吸附特征的渗流-应力耦合模型,获得了不同冲煤量钻孔的抽放半径。冲煤量为 0.5, 1.0, 1.5 t/m 时,钻孔的抽放半径分别为 3.5, 4.3, 5.0 m。

3) 在确定水力冲孔布孔参数时,应综合分析水

力冲孔的卸压范围和抽放半径,依据义安矿不同冲煤量孔洞的卸压范围和抽放半径,确定水力冲孔布孔间距为 8.0 m,区域措施效果检验和工作面预测数据表明,确定的布孔参数合理可靠。

### 4.2 区域消突效果考察

义安矿 22011 工作面原始瓦斯含量为 10.50~12.88 m<sup>3</sup>/t,瓦斯压力为 0.80~1.0 MPa,具有煤与瓦斯突出危险性。采用确定的布孔参数,实施底板巷水力冲孔卸压增透和区域预抽措施后,共实测残存瓦斯含量 22 套,值域为 3.81~6.77 m<sup>3</sup>/t,平均为 5.25 m<sup>3</sup>/t,小于区域防突措施效果检验瓦斯含量临界值 8.0 m<sup>3</sup>/t,说明水力冲孔布孔参数合理可靠。

### 4.3 区域验证

22011 轨道平巷 303~600 m 之间巷道掘进期间,采用  $q_{\max}$ ,  $\Delta h_2$  和  $S$  值指标进行区域验证。图 9 为工作面预测参数分布图,从该图可以看出,瓦斯涌出初速度  $q_{\max}$ 、钻屑瓦斯解吸指标  $\Delta h_2$  均未出现超标现象,并且巷道月进尺达到了 120 m 左右,说明确定的水力冲孔布孔间距合理可靠。

力冲孔的卸压范围和抽放半径,依据义安矿不同冲煤量孔洞的卸压范围和抽放半径,确定水力冲孔布孔间距为 8.0 m,区域措施效果检验和工作面预测数据表明,确定的布孔参数合理可靠。

## 参考文献:

- [1] 刘彦伟,任培良,夏仕柏,等.水力冲孔措施的卸压增透效果考察分析[J].河南理工大学学报,2009,28(6): 695-699.  
LIU Yanwei, REN Peiliang, XIA Shibo, et al. Analysis of pressure-relief and permeability improvement effect of hydraulic flushing[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2009, 28(6): 695-699.
- [2] 刘明举,孔留安,郝富昌,等.水力冲孔技术在严重

- 突出煤层中的应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 451-454.
- LIU Mingju, KONG Liu'an, HAO Fuchang, et al. Application of hydraulic flushing technology in severe outburst coal[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 451-454.
- [3] HAIMSON B C, CHANG C. True triaxial strength of the KTB amphibolites under borehole wall conditions and its use to estimate the maximum horizontal in situ stress [J]. J Geophysics Res, 2002, 107(15): 1-14.
- [4] 姚向荣, 程功林, 石必明. 深部围岩遇弱结构瓦斯抽采钻孔失稳分析与成孔方法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2073-2081.
- YAO Xiangrong, CHENG Gonglin, SHI Biming. Analysis on gas extraction drilling instability and control method of pore-forming in deep surrounding-rock with weak structure[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2073-2081.
- [5] 魏建平, 李波, 刘明举, 等. 水力冲孔消突有效影响半径测定及钻孔参数优化[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(5): 39-42.
- WEI Jianping, LI Bo, LIU Mingju, et al. Measuring on effective influence radius of hydraulic flushing borehole to eliminate outburst and borehole parameters optimization[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(5): 39-42.
- [6] HARPALANI S, CHEN G L. Influence of gas production induced volumetric strain on permeability of coal[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1997, 15(4): 303-325.
- [7] VALLIAPPANS, ZHANG W H. Numerical modeling of methane gas migration in dry coal seams[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, 31(20): 571-593.
- [8] 胡国忠, 许家林, 王宏图, 等. 低渗透煤与瓦斯的固-气动态耦合模型及数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 1-6.
- HU Guozhong, XU Jialin, WANG Hongtu, et al. Research on a dynamically coupled deformation and gas flow model applied to low-permeability coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(1): 1-6.
- [9] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 固流耦合作用下煤层气解吸-渗流实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2): 274-278.
- TANG Jupeng, PAN Yishan, LI Chengquan, et al. Experimental study of desorption and seepage of coalbed methane under solid-fluid coupling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(2): 274-278.
- [10] 丁厚成, 蒋仲安, 韩云龙. 顺煤层钻孔抽放瓦斯数值模拟与应用[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(11): 1205-1210.
- DING Houcheng, JIANG Zhong'an, HAN Yunlong. Numerical simulation and application of boreholes along coal seam for methane drainage[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(11): 1205-1210.
- [11] 杨天鸿, 陈仕阔, 朱万成, 等. 煤层瓦斯卸压抽放动态过程的气-固耦合模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2247-2252.
- YANG Tianhong, CHEN Shikuo, ZHU Wancheng, et al. Coupled model of gas-solid in coal seams based on dynamic process of pressure relief and gas drainage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2247-2252.
- [12] 王宏图, 江记记, 王再清, 等. 本煤层单一顺层瓦斯抽放钻孔的渗流场数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(4): 24-29.
- WANG Hongtu, JIANG Jiji, WANG Zhaiqing, et al. Numerical simulation of seepage field of gas extraction drilling of single bedding of mining-coal bed[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(4): 24-29.
- [13] 司鹄, 郭涛, 李晓红. 钻孔抽放瓦斯流固耦合分析及数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(11): 105-110.
- SI Hu, GUO Tao, LI Xiaohong. Analysis and numerical simulation of fluid-structure coupling of gas drainage from boreholes[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(11): 105-110.
- [14] 郝富昌. 基于多物理场耦合的瓦斯抽采参数优化研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
- [15] 周世宁, 林伯泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997: 35-52.