

DOI: 10.11779/CJGE201902016

# 冲击地压煤层局部保护层开采的减压机理研究

姜福兴<sup>1</sup>, 刘 烨<sup>\*1</sup>, 刘 军<sup>2</sup>, 张 明<sup>1</sup>, 杜建鹏<sup>2</sup>, 孙维顺<sup>3</sup>, 张文鹏<sup>4</sup>

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 河南大有能源股份有限公司, 河南 义马 472300; 3. 鞍山市工业研究院, 辽宁 鞍山 114000; 4. 晋城煤业集团寺河矿, 山西 晋城 048205)

**摘要:** 保护层开采是区域性防治冲击地压的有效方法, 但当开采保护层不具有经济价值、不开采保护层又不能保证主采煤层防冲安全的条件下, 提出了开采局部保护层的防冲方案并进行了防冲和防大变形灾害的机理研究。为了论证开采局部保护层防冲方案的安全性, 通过建立局部保护层和被保护层的力学关系模型, 推导了在局部保护层作用下岩体应力的计算公式, 绘制了不同宽度局部保护层条件下引起冲击的垂直应力和剪应力分布云图, 给出了发生冲击和大变形边界的应力判据, 为设计被保护层巷道的安全位置提供了理论依据。结合河南某煤矿的实际情况, 给出局部保护层减压效果的计算方法, 计算结果在该煤矿强冲击危险工作面设计中得到了应用。

**关键词:** 采矿工程; 冲击地压; 局部保护层; 应力分析; 冲击危险性

中图分类号: TD821 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)02-0368-08

作者简介: 姜福兴(1962-), 博士, 教授, 主要从事矿山压力与岩层控制、微震监测工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangfuxing1@163.com。

## Pressure-releasing mechanism of local protective layer in coal seam with rock burst

JIANG Fu-xing<sup>1</sup>, LIU Ye<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>2</sup>, ZHANG Ming<sup>1</sup>, DU Jian-peng<sup>2</sup>, SUN Wei-shun<sup>3</sup>, ZHANG Wen-peng<sup>4</sup>

(1. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Henan Dayou Energy Co., Ltd., Yima 472300, China; 3. Anshan Industry Research Institute, Anshan 114000, China; 4. Sihe Coal Mine of Jincheng Coal Mining Group Co., Ltd., Jincheng 048205, China)

**Abstract:** The exploitation of protective layer is a regional effective method for prevention of rock burst. However, when the exploitation of protective layer has little economic value and the safety of main coal seam cannot be guaranteed without it, a new method called local protective layer is proposed, and the mechanism of prevention of rock burst and large deformation is studied. In order to prove the security of the proposed method, a formula for calculating the stress of rock mass under the action of local protective layer is derived by establishing the mechanical relationship model for the local protective layer and the protected layer. The distribution of the main stress and shear stress under different widths of local protection layer is plotted. The stress criterion for the occurrence of shock and large deformation boundary is given. Based on the actual situation of a coal mine in Henan, the calculation method for the effects of the local protection layer is given. The calculated results are applied in the design of a dangerous rock burst face in the coal mine.

**Key words:** mining engineering; rock burst; local protective layer; stress analysis; rock burst hazard

## 0 引言

冲击地压属矿井动力现象, 是煤矿开采过程中, 井巷和采场周围煤、岩体在一定高应力条件下释放变形能而产生的煤岩体突然破坏、垮落或抛出现象。冲击地压对煤矿的生产安全有极大的威胁<sup>[1-3]</sup>。

开采保护层是一种区域性降低冲击危险性的卸压措施。然而, 在开采全部保护层没有经济价值或接续紧张的情况下, 如果不开采保护层, 则安全风险很大, 且防冲投入大, 既不安全又不经济。为了保障矿山的安全和经济效益, 本文提出了“局部保护层”的概念

和开采方法: 即开挖一部分保护层, 用于解除主采层具有高度冲击危险区域的冲击危险性, 实现“安全前提下的局部高效卸压”。

开采局部保护层需要解决的核心问题是使被保护区域巷道或工作面围岩应力小于临界冲击应力, 同时避开塑性滑移区域从而避免被保护巷道发生大变形。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0801408); 国家自然科学基金项目(51674014, 51634001)

收稿日期: 2017-12-28

\*通讯作者(E-mail: louislondon@126.com)

即既要满足防冲的力学条件, 又要满足防止大变形的力学条件。因此, 需要建立保护层和被保护层之间的应力传递关系的力学模型。

本文通过建立保护层和被保护层之间应力传递关系的力学模型, 应用弹性理论分析局部保护层作用下的围岩应力场, 探讨局部保护层卸压的有效性, 为确定局部保护层的宽度与被保护区宽度之间的关系提供理论依据。结合河南某煤矿的实际情况, 给出了局部保护层宽度的计算方法。

## 1 局部保护层开采的理论与实践基础

### 1.1 “局部保护层开采”方案的理论基础

在高应力区域内开挖一个硐室, 在硐室的底板内将形成一个低应力区, 在该低应力区内布置重要的、长期使用的硐室是安全的。这就是“硐室卸压”原理<sup>[4]</sup>。

如果把卸压硐室扩展成较大宽度的卸压层, 即成为“局部保护层”; 如果把卸压硐室扩展成标准的回采工作面, 即成为常规的“保护层”。

本文开采“局部保护层”的目的, 是为了实现具有高度冲击危险的被保护层巷道掘进和回采期间的防冲安全。

### 1.2 “局部保护层开采”方案的成功案例

山东某煤矿开采深度1000~1300 m, 地层中有厚度大于500 m的巨厚砾岩, 主采的四层煤具有强冲击倾向性。为了解决厚度6 m的四层煤防冲问题, 采用开采上部40 m处、厚度1 m、具有弱冲击倾向性的一层煤作为保护层。由于一层煤属于薄煤层, 开采薄煤层不具有经济价值, 因此, 选用了宽度60 m的短工作面局部保护层方案, 重点保护下部四层煤的上顺槽。经过该矿的开采实践, 证明了该方案能有效地防治四层煤的上顺槽的冲击地压。

## 2 局部保护层开采后下部岩体中的应力分布研究

### 2.1 局部保护层围岩的应力计算模型

设计局部保护层需要解决的核心问题是解算保护层和被保护层之间的应力传递关系。为此建立了如下的力学模型。

图1是局部保护层的沿倾向剖面示意图。图中, 地面至被保护层的距离为H, 保护层至被保护层的距离为h, 保护层的宽度为2r。

开挖局部保护层后, 其两侧煤体上的应力分布可简化为应力线性增高区和原始应力区两个部分<sup>[2, 4]</sup>。如图2所示。

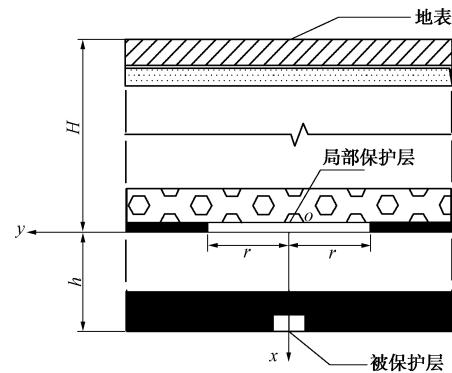


图1 局部保护层剖面图

Fig. 1 Cross-section of local protective layer

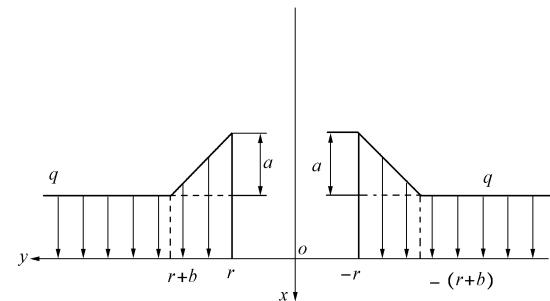


图2 局部保护层及其两侧受力情况分布图

Fig. 2 Distribution of forces on local protective layer and its two sides

表达式为

$$Q(y) = \begin{cases} q & (y \geq r + b), \end{cases} \quad (1a)$$

$$\begin{cases} q' + q + \frac{q'}{b}(r - y) & (r \leq y < r + b), \end{cases} \quad (1b)$$

$$\begin{cases} 0 & (-r \leq y < r), \end{cases} \quad (1c)$$

$$\begin{cases} q' + q + \frac{q'}{b}(r + y) & (-r - b \leq y < -r), \end{cases} \quad (1d)$$

$$\begin{cases} q & (y < -r - b). \end{cases} \quad (1e)$$

式中,  $Q$  为局部保护层及其两侧受到的应力集度 (MPa),  $q$  为开挖保护层前煤层受到的地应力 (MPa), 满足

$$q = K\gamma H. \quad (2)$$

式中  $\gamma$  为岩石的重度 (kN/m<sup>3</sup>);  $K$  为由地质因素和采动因素导致的应力集中系数, 一般取 1.1~2.0。 $q'$  为保护层导致的应力增加峰值 (MPa), 满足

$$q' = (k - 1)q, \quad (3)$$

式中,  $k$  为保护层导致的应力集中系数, 由保护层宽度决定, 一般取 1.1~2。 $b$  为采空区导致的应力增加的范围 (m), 满足

$$b = \frac{2r}{k - 1}. \quad (4)$$

### 2.2 局部保护层下方的应力计算

根据弹性力学<sup>[5]</sup>, 由分布力引起的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{2}{\pi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{Q(\xi)x^3 d\xi}{[x^2 + (y - \xi)^2]^2}, \\ \sigma_y &= -\frac{2}{\pi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{Q(\xi)x(y - \xi)^2 d\xi}{[x^2 + (y - \xi)^2]^2}, \\ \tau_{xy} &= -\frac{2}{\pi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{Q(\xi)x^2(y - \xi)d\xi}{[x^2 + (y - \xi)^2]^2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将  $Q$  的表达式中的第一部分即式(1a)代入式(5), 可得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b-y}{x} + \frac{x(r+b-y)}{x^2 + (r+b-y)^2} \right] - \frac{q}{2}, \\ \sigma_y &= \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b-y}{x} - \frac{x(r+b-y)}{x^2 + (r+b-y)^2} \right] - \frac{q}{2}, \\ \tau_{xy} &= \frac{q}{\pi} \frac{x^2}{x^2 + (r+b-y)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将式(1)、(2)代入式(5), 可得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{q' + q + \frac{q'}{b}(r-y)}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b-y}{x} - \arctan \frac{r-y}{x} + \frac{x(r+b-y)}{x^2 + (r+b-y)^2} - \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right], \\ \sigma_y &= -\frac{q' + q + \frac{q'}{b}(r-y)}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b-y}{x} - \arctan \frac{r-y}{x} - \frac{x(r+b-y)}{x^2 + (r+b-y)^2} + \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right], \\ \tau_{xy} &= -\frac{q' + q + \frac{q'}{b}(r-y)}{\pi} \left[ \frac{x^2}{x^2 + (r+b-y)^2} - \frac{x^2}{x^2 + (r-y)^2} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将式(6)、(7)叠加, 可以得到  $y$  轴正方向的应力分布:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{q' + \frac{q'}{b}(r-y)}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b-y}{x} - \arctan \frac{r-y}{x} + \frac{x(r+b-y)}{x^2 + (r+b-y)^2} - \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right] + \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{r-y}{x} + \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right] - \frac{q}{2}, \\ \sigma_y &= -\frac{q' + \frac{q'}{b}(r-y)}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b-y}{x} - \arctan \frac{r-y}{x} - \frac{x(r+b-y)}{x^2 + (r+b-y)^2} + \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right] + \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{r-y}{x} - \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right] - \frac{q}{2}, \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= -\frac{q' + \frac{q'}{b}(r-y)}{\pi} \left[ \frac{x^2}{x^2 + (r+b-y)^2} - \frac{x^2}{x^2 + (r-y)^2} \right] + \frac{q}{\pi} \frac{x^2}{x^2 + (r-y)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

同样的, 将式(1d)、(1e)代入式(5), 并进行整理, 可以得到  $y$  轴负方向的表达式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{q' + \frac{q'}{b}(r+y)}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b+y}{x} - \arctan \frac{r+y}{x} + \frac{x(r+b+y)}{x^2 + (r+b+y)^2} - \frac{x(r+y)}{x^2 + (r+y)^2} \right] + \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+y}{x} + \frac{x(r+y)}{x^2 + (r+y)^2} \right] - \frac{q}{2}, \\ \sigma_y &= -\frac{q' + \frac{q'}{b}(r+y)}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b+y}{x} - \arctan \frac{r+y}{x} - \frac{x(r+b+y)}{x^2 + (r+b+y)^2} + \frac{x(r+y)}{x^2 + (r+y)^2} \right] + \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+y}{x} - \frac{x(r+y)}{x^2 + (r+y)^2} \right] - \frac{q}{2}, \\ \tau_{xy} &= -\frac{q' + \frac{q'}{b}(r+y)}{\pi} \left[ \frac{x^2}{x^2 + (r+b+y)^2} - \frac{x^2}{x^2 + (r+y)^2} \right] + \frac{q}{\pi} \frac{x^2}{x^2 + (r+y)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式(8)、(9)相加, 可以得到在局部保护层下方煤岩体的应力分布:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{q' + \frac{q'}{b}(r-y)}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b-y}{x} - \arctan \frac{r-y}{x} + \frac{x(r+b-y)}{x^2 + (r+b-y)^2} - \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right] + \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{r-y}{x} + \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right] - \frac{q}{2}, \\ \sigma_y &= -\frac{q' + \frac{q'}{b}(r+y)}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b+y}{x} - \arctan \frac{r+y}{x} + \frac{x(r+b+y)}{x^2 + (r+b+y)^2} - \frac{x(r+y)}{x^2 + (r+y)^2} \right] + \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+y}{x} + \frac{x(r+y)}{x^2 + (r+y)^2} \right] - q, \end{aligned} \right\} \quad (10a)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= -\frac{q' + \frac{q'}{b}(r-y)}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b-y}{x} - \arctan \frac{r-y}{x} - \frac{x(r+b-y)}{x^2 + (r+b-y)^2} + \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right] + \frac{q}{\pi} \frac{x^2}{x^2 + (r-y)^2}. \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ \frac{x(r+b-y)}{x^2 + (r+b-y)^2} + \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right] + \\
 & \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{r-y}{x} - \frac{x(r-y)}{x^2 + (r-y)^2} \right] - \\
 & \frac{q' + \frac{q'}{b}(r+y)}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+b+y}{x} - \arctan \frac{r+y}{x} - \right. \\
 & \left. \frac{x(r+b+y)}{x^2 + (r+b+y)^2} + \frac{x(r+y)}{x^2 + (r+y)^2} \right] + \\
 & \frac{q}{\pi} \left[ \arctan \frac{r+y}{x} - \frac{x(r+y)}{x^2 + (r+y)^2} \right] - q, \quad (10b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_{xy} = & -\frac{q' + \frac{q'}{b}(r-y)}{\pi} \left[ \frac{x^2}{x^2 + (r+b-y)^2} - \frac{x^2}{x^2 + (r-y)^2} \right] + \\
 & \frac{q}{\pi} \frac{x^2}{x^2 + (r-y)^2} - \frac{q' + \frac{q'}{b}(r+y)}{\pi}.
 \end{aligned}$$

$$\left[ \frac{x^2}{x^2 + (r+b+y)^2} - \frac{x^2}{x^2 + (r+y)^2} \right] + \frac{q}{\pi} \frac{x^2}{x^2 + (r+y)^2}. \quad (10c)$$

至此, 利用式 (10a) ~ (10c), 可以计算出局部保护层下方煤(岩)体中任意一点的垂直应力和剪应力, 结合煤(岩)冲击倾向性和强度, 可以对冲击危险区域、危险程度以及大变形危险区域、危险程度作出评估。

### 3 冲击危险性和大变形危险性工程判据

#### 3.1 冲击危险性工程判据

冲击地压发生是多因素共同作用的结果, 一般认为煤岩体具备冲击倾向性是冲击地压发生的必要条件<sup>[1-2, 4, 6]</sup>。当煤岩体的弹性能量指数满足

$$W_{et} < 2 \quad (11)$$

时, 认为煤岩体不具有冲击倾向性。其中,  $W_{et}$  为煤岩体的弹性能量指数。

冲击地压的发生根据应力形式的不同, 可以分为由垂直应力引起的压缩型冲击地压和由剪应力引起的剪切型冲击地压<sup>[7-9]</sup>, 分别对应两种不同的应力准则。

##### (1) 压缩型冲击地压

在煤岩体有冲击倾向性的情况下, 当煤体中的应力  $\sigma$  小于 1.5 倍, 即

$$\frac{\sigma}{[\sigma_c]} < 1.5 \quad (12)$$

时, 煤炭体就不具备发生压缩型冲击地压的条件。其中,  $[\sigma_c]$  为煤体的单轴抗压强度。

当煤岩体的冲击倾向性不满足式 (11) 且应力不满足式 (12) 时, 就认为发生压缩型冲击地压的

危险性很高。

##### (2) 剪切型冲击地压

煤岩体有冲击倾向性的情况下, 当煤体中的剪应力  $\tau$  小于煤体单轴抗压强度  $[\tau]$  的 1.5 倍, 即

$$\frac{\tau}{[\tau]} < 1.5 \quad (13)$$

时, 煤体就不具备发生剪切型冲击地压的应力条件。

同样的, 当煤岩体的冲击倾向性不满足式 (11) 且应力不满足式 (13) 时, 就认为发生剪切型冲击地压的危险性很高。

在煤岩体具有冲击倾向性, 即不满足式 (11) 的情况下, 开挖巷道时, 巷道及其两侧一定距离内, 其应力条件应同时满足式 (12)、(13), 这样巷道的冲击危险性较低, 可以避免压缩型冲击和剪切型冲击地压的发生。

#### 3.2 大变形危险性工程判据

1946 年, Terzaghi 首次提出了挤出性岩石和膨胀性岩石的概念。受到 Terzaghi 思想的影响, 人们一般把大变形机制分为以下两类: ①挤压性变形; ②膨胀变形<sup>[10-11]</sup>。

Hoek<sup>[12]</sup>对单轴抗压强度为 12 MPa 的软岩进行了研究, 给出了洞壁位移与巷道半径的百分比——岩体强度与地应力之比的关系图, 如图 3 所示。图 3 中划分了挤压变形程度等级, 可以有效地判断挤压性变形等级。

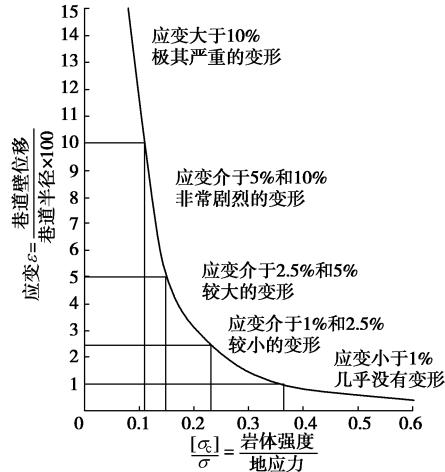


图 3 不同应变条件下坚硬围岩变形等级<sup>[12]</sup>

Fig. 3 Tunneling problems associated with different levels of strain

根据巷道周围岩体所受的应力与煤岩体单轴抗压强度的比值, 可以判断巷道的大变形等级。

而在工程实践中, 煤层巷道(顺槽)服务年限短, 高度和宽度方向允许最大变形率可以控制在 15% 以内, 以此为判别大变形的工程标准<sup>[13]</sup>。根据何满潮等<sup>[14]</sup>运用有限元方法对地应力与巷道变形量关系的分析, 煤层巷道的围岩变形等级更接近于图 4。

根据巷道周围岩体所受的应力与煤岩体单轴抗压强度的比值,可以判断巷道的大变形等级当围岩应力满足式(12)时,变形量小于10%,因此在工程实践中,只要应力条件满足式(12)就可以认为发生大变形的可能性较小。

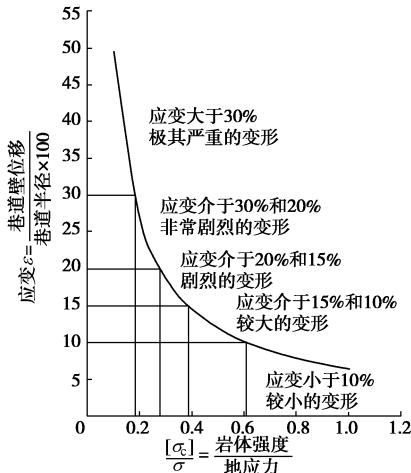


图4 不同应变条件下煤层巷道变形等级(服务年限短)

Fig. 4 Deformation grades of coal seam roadway under different strains

## 4 局部保护层应力模型的应用

### 4.1 河南某煤矿A工作面的基本情况

河南某煤矿的A工作面为23采区下部第5个工作面(如图5),东为矿井边界煤柱,西为23区下山保护煤柱,北为23130综放工作面(已采),南临F16断层。平均采深为910 m。工作面可采长度为980 m,工业储量为 $428 \times 10^6$  t,可采储量为 $350 \times 10^6$  t。工作面回采煤层平均煤厚12.2 m,纯煤厚9.3 m,属特厚煤层。

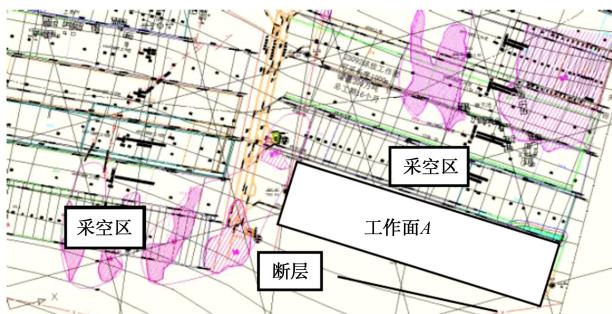


图5 河南某煤矿A工作面基本条件

Fig. 5 Basic conditions of working face A in a coal mine in Henan

经试验测定,该煤矿工作面煤样的动态破坏时间为103 ms,弹性能量指数为7.988,冲击能量指数为4.631,单轴抗压强度为16.474 MPa。

煤层综合柱状图如图6所示。在主采的2-1煤层上方,有不可采的1-2煤层,距离可采煤层顶板的高度约30 m,计划在1-2煤层中开采局部保护层。

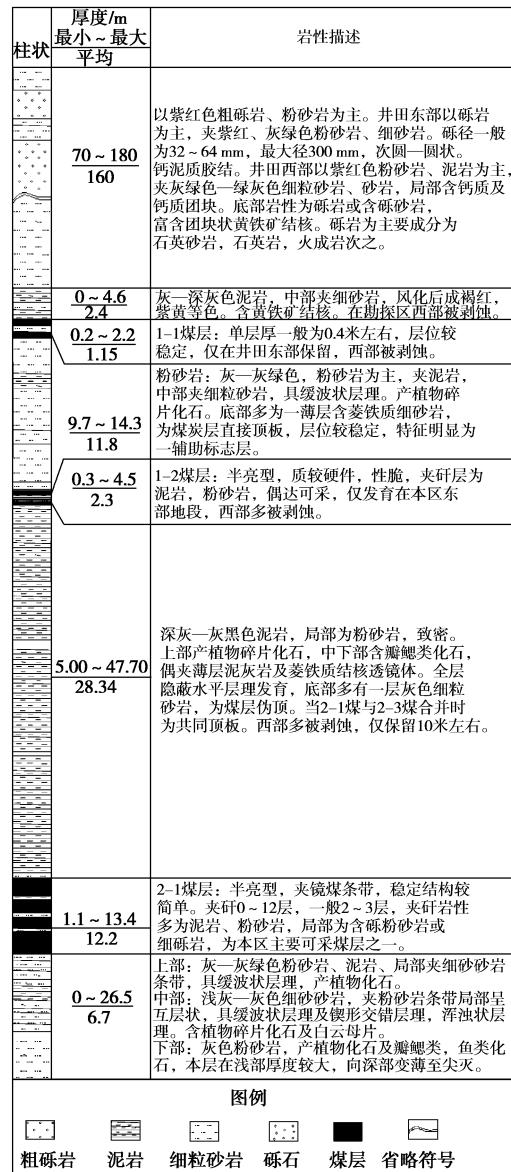


图6 A工作面煤层综合柱状图

Fig. 6 Comprehensive histogram of coal seam in working face A

### 4.2 局部保护层下方的应力分布

#### (1) 局部保护层方案

根据该煤矿的情况,有两种方案可供选择,即单巷两侧卸压方案和双巷中间卸压方案,如图7所示。

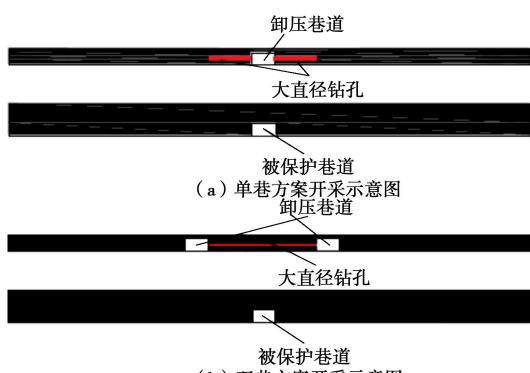


图7 两种开采方案对比

Fig. 7 Comparison of two mining schemes

### a) 单巷两侧卸压方案

如图 7 (a) 所示, 在薄及中厚煤层中掘进一条巷道, 称为卸压巷道, 在卸压巷道内沿巷道两帮密集布置煤层大直径钻孔, 钻孔的长度根据煤厚及与被保护层关系确定。钻孔倾角与煤层倾角一致, 再进行爆破落煤卸压。

这种方案所开采的局部保护层宽度较小, 有一定的卸压效果, 能够在一定程度上减少下方巷道的冲击危险性, 而投资成本较少, 施工速度较快。

### b) 双巷中间卸压方案

如图 7 (b), 在薄及中厚煤层中掘进两条卸压巷道, 在卸压巷道内沿巷道中间密集布置煤层大直径钻孔, 钻孔的长度根据煤厚及与被保护层关系确定。钻孔倾角与煤层倾角一致, 再进行爆破落煤卸压。

这种方案所开采的局部保护层宽度较大, 有良好的卸压效果, 可以较大幅度地减少下方巷道的冲击危险性, 但投资成本很高, 施工进度较慢。

下面对两种局部保护层方案的减压效果进行对比。

#### (2) 垂直应力的分布情况

工作面开采深度近似取 1000 m, 岩石重度取 25 kN/m<sup>3</sup>, 由断层导致的应力集中系数取 1.3, 由类孤岛工作面导致的应力集中系数取 1.2, 因此, 综合应力集中系数近似为  $K=1.5$ , 代入式 (2), 可得  $q=K\gamma H=37.5$  MPa。

#### a) 单巷方案

取局部保护层宽度为 50 m, 即  $r=25$  m,  $k$  取 1.5, 将这些参数代入式 (3)、(4)、(10), 可以得到局部保护层下方垂直应力的分布情况, 如图 8 所示。

在局部保护层的作用下, 垂直应力会在一定范围内减小, 形成局部的低应力区, 应力谷值就在局部保护层正下方。而在局部保护层的两侧, 会有一对对称的高应力区, 应力峰值就在局部保护层的边缘。随着深度的增加, 低应力区的范围会减小, 且应力谷值会变大; 而高应力区的范围则会扩大, 且峰值的位置会先向两侧移动, 后向中间移动, 大小则会减小。在一定深处, 应力趋于一个恒定值。

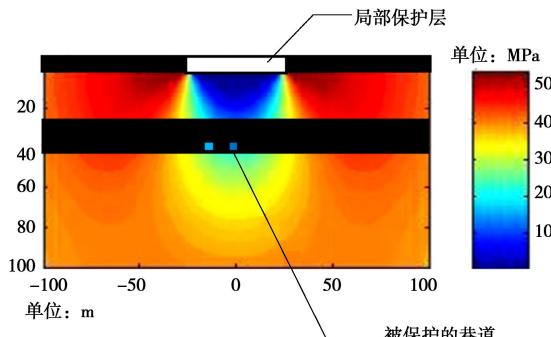


图 8 局部保护层作用下垂直应力分布云图 ( $r=25$  m)

Fig. 8 Cloud map of vertical stress distribution under action of local protective layer ( $r=25$  m)

根据式 (12) 所确定的冲击危险性较低的区域 (即安全区) 和冲击危险性较高的区域 (即非安全区) 如图 9 所示。图 9 可以看出, 在局部保护层下方 30 m 处, 垂直应力对应的安全区宽度约为 40 m。

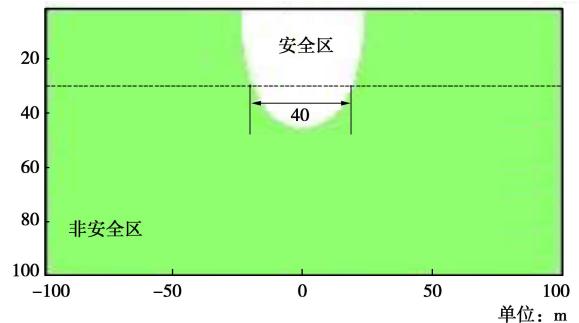


图 9 局部保护层作用下的垂直应力安全区与非安全区 ( $r=25$  m)

Fig. 9 Safe and unsafe zones of vertical stress under action of local protective layer ( $r=25$  m)

#### b) 双巷方案

取局部保护层宽度为 100 m, 即  $r=50$  m,  $k$  取 1.5, 将这些参数代入式 (3)、(4) 和 (10), 可以得到局部保护层下方垂直应力的分布情况, 如图 10 所示。

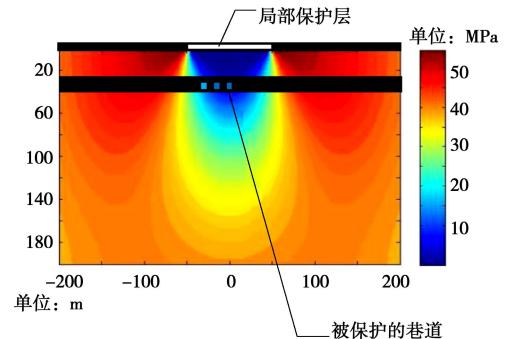


图 10 局部保护层作用下垂直应力分布云图 ( $r=50$  m)

Fig. 10 Cloud map of vertical stress distribution under action of local protective layer ( $r=50$  m)

根据式 (12) 所确定的冲击危险性较低的区域 (即安全区) 和冲击危险性较高的区域 (即非安全区) 如图 11 所示。由图 11 可以看出, 在局部保护层下方 30 m 处, 垂直应力对应的安全区宽度约为 92 m。

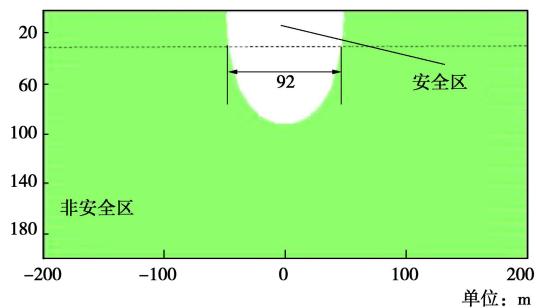


图 11 局部保护层作用下的垂直应力安全区与非安全区

( $r=50$  m)

Fig. 11 Safe and unsafe zones of vertical stress under action of local protective layer ( $r=50$  m)

### (3) 剪应力的分布情况

a) 单巷方案

当局部保护层宽度为 50 m 时, 剪应力的分布情况如图 12 所示。

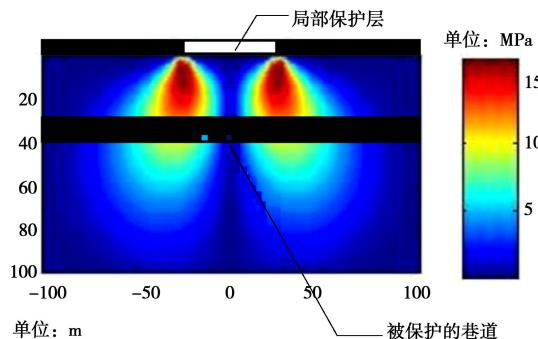


图 12 局部保护层作用下剪应力分布云图( $r=25$  m)

Fig. 12 Cloud map of shear stress distribution under action of local protective layer ( $r=25$  m)

在局部保护层的作用下，剪应力会出现一对对称的高应力区，其大小相等。应力峰值出现在局部保护层的边缘。随着深度的增加，应力峰值会向两侧移动。在一定深处，主应力趋于一个恒定值。

假设煤的抗剪强度为单轴抗压强度的  $1/3$ ，根据式(13)所确定的冲击危险性较低的区域(即安全区)和冲击危险性较高的区域(即非安全区)如图 13 所示。在局部保护层下方  $30\text{ m}$  处，剪应力对应的安全区宽度约为  $52\text{ m}$ 。综合垂直应力，安全区宽度为  $40\text{ m}$ 。

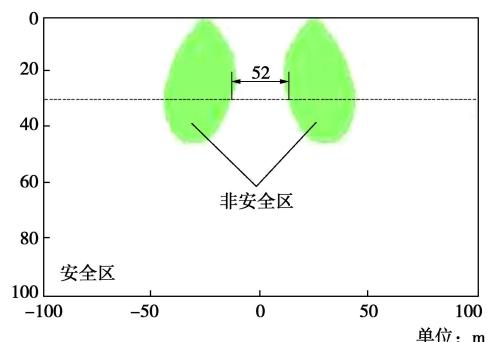


图 13 局部保护层作用下的剪应力安全区与非安全区( $r=25$  m)  
 Fig. 13 Safe and unsafe zones of shear stress under action of local protective layer ( $r=25$  m)

### b) 双巷方案

当局部保护层宽度为 100 m 时, 最大剪应力的分布情况如图 14 所示。

根据式(13)所确定的冲击危险性较低的区域(即安全区)和冲击危险性较高的区域(即非安全区)如图15所示。

在局部保护层下方 30 m 处, 剪应力对应的安全区宽度约为 50 m。综合垂直应力, 安全区宽度为 50 m。

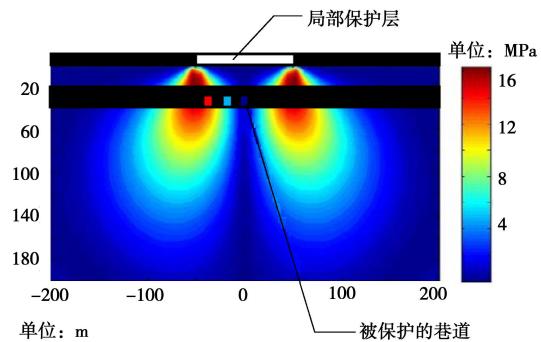


图 14 局部保护层作用下最大剪应力分布云图( $r=50$  m)

Fig. 14 Cloud map of maximum shear stress distribution under action of local protective layer ( $r=50$  m)

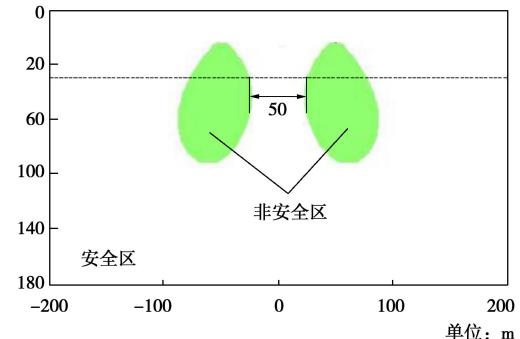


图 15 局部保护层作用下的剪应力安全区与非安全区( $r=50$  m)  
 Fig. 15 Safe and unsafe zones of shear stress under action of local protective layer ( $r=50$  m)

## 5 结论

(1) 在开采保护层不具有经济价值、不开采保护层又不能保证主采煤层防冲安全的条件下, 本文提出了开采局部保护层的防冲方案并进行了防冲和防大变形灾害机理的研究。

(2)运用弹性力学的方法,对局部保护层作用下,煤岩体的应力分布的情况进行了计算,给出了垂直应力和剪应力的计算方法;结合冲击地压和大变形的发生条件,给出了是否会发生冲击地压或大变形的工程判据。

(3) 在河南某煤矿中应用局部保护层设计方法,论证了局部保护层在该矿应用的可行性,并给出了局部保护层的设计参数。

本文提出的局部保护层设计方法在具有褶曲、断层等对应力有较大影响的条件下，需要进一步改进，结合具体的条件进行修正。

### 参考文献：

- [1] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001. (DOU Lin-ming, HE Xue-qiu. Theory and technology of rock burst prevention[M]. Xuzhou:

- China University of Mining and Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991. (QIAN Ming-gao LIU Ting-cheng. Mine pressure and its control[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1991. (in Chinese))
- [3] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205 - 213. (JIANG Yao-dong, PAN Yi-shan, JIANG Fu-xing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205 - 213. (in Chinese))
- [4] 姜福兴, 王玉霄, 李明, 等. 上保护层煤柱引发被保护层冲击机理研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1689 - 1696. (JIANG Fu-xing, WANG Yu-xiao, LI Ming, et al. Mechanism of rockburst occurring in protected coal seam induced by coal pillar of protective coal seam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1689 - 1696. (in Chinese))
- [5] 徐芝纶. 弹性力学. 上册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. (XU Zhi-lun. Flexible Mechanics(volume I)[M]. Beijing: People Education Publisher, 2006. (in Chinese))
- [6] 姜福兴, 魏全德, 姚顺利, 等. 冲击地压防治关键理论与技术分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 6 - 9. (JIANG Fu-xing, WEI Quan-de, YAO Shun-li, et al. Key theory and technical analysis on mine pressure bumping prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 6 - 9. (in Chinese))
- [7] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844 - 1844. (PAN Yi-shan, LI Zhong-hua, ZHANG Meng-tao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844 - 1844. (in Chinese))
- [8] 石强, 潘一山, 李英杰. 我国冲击矿压典型案例及分析[J]. 煤矿开采, 2005, 10(2): 13 - 17. (SHI Qiang, PAN
- Yi-shan, LI Ying-jie. The typical cases and analysis of rockburst in China[J]. Coal Mining Technology, 2005, 10(2): 13 - 17. (in Chinese))
- [9] 赵扬锋, 潘一山, 于海军. 基于剪切梁层间失效模型的断层冲击地压分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1571 - 1576. (ZHAO Yang-feng, PAN Yi-shan, YU Hai-jun. Analysis of fault rockburst based on shear beam model for interface failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1571 - 1576. (in Chinese))
- [10] AYDAN Ö, AKAGI T, KAWAMOTO T. The squeezing potential of rocks around tunnels: theory and prediction[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 1993, 26(2): 137 - 163.
- [11] ANAGNOSTOU G. A model for swelling rock in tunneling[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 1993, 26(4): 307 - 331.
- [12] HOEK E. Big tunnels in bad rock[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(9): 726 - 740.
- [13] 杨光宇, 姜福兴, 王存文. 大采深厚表土复杂空间结构孤岛工作面冲击地压防治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 189 - 194. (YANG Guang-yu, JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen, et al. Prevention and control technology of mine pressure bumping of coal mining face in seam island based on deep mining and thick topsoil of complex spatial structure of overlying strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 189 - 194. (in Chinese))
- [14] 何满潮, 郭宏云, 陈新, 等. 基于和分解有限变形力学理论的深部软岩巷道开挖大变形数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4050 - 4055. (HE Man-chao, GUO Hong-yun, CHEN Xin, et al. Numerical simulation analysis of large deformation of deep soft rock engineering based on solar decomposition theorem[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 4050 - 4055. (in Chinese))