

DOI: 10.11779/CJGE201608024

# 冲击煤层煤柱变形与地面建筑物保护关系研究

张 明<sup>1</sup>, 姜福兴<sup>\*1</sup>, 李克庆<sup>1</sup>, 翟明华<sup>2</sup>, 苗传靠<sup>3</sup>, 杨根地<sup>3</sup>, 张俊飞<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014;  
3. 枣庄矿业集团高庄煤业有限公司, 山东 济宁 277605)

**摘 要:** 保护煤柱合理宽度(或停采位置)是确保地面重要设施长期稳定的关键。以山东某矿地面引水渠(“南水北调”工程组成部分)下不规则下山保护煤柱宽度设计为工程背景, 首先, 通过分析煤柱变形可能引起地面建(构)筑物的破坏方式, 提出了控制长期高应力作用下冲击煤层煤柱变形的原则: ①走向方向煤柱不发生冲击失稳破坏; ②走向方向煤柱不发生煤体长时强度降低而导致的失稳破坏; ③倾斜方向煤柱保持均匀变形, 从而使地面不发生明显拉伸破坏。其次, 依据煤柱上方覆岩空间结构形式, 建立了煤柱应力估算模型, 提出了保持煤柱长期稳定及地面建筑安全的煤柱设计方法。最后, 应用研究成果, 分析了工程案例的煤柱应力、围岩稳定性和变形特征, 并对该引水渠工程和井下开采设计进行了安全评估。该研究成果对类似开采条件下的保护煤柱宽度确定具有指导意义。

**关键词:** 采矿工程; 冲击煤层; 煤柱变形; 覆岩空间结构; 冲击失稳; 均匀变形

中图分类号: TD324 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)08-1541-08

**作者简介:** 张 明(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究工作。E-mail: ok\_ming\_ming@126.com。

## Relationship between deformation of coal pillars in coal seam with rockburst hazards and protection of surface buildings

ZHANG Ming<sup>1</sup>, JIANG Fu-xing<sup>1</sup>, LI Ke-qing<sup>1</sup>, ZHAI Ming-hua<sup>2</sup>, MIAO Chuan-kao<sup>3</sup>, YANG Gen-di<sup>3</sup>, ZHANG Jun-fei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Shandong Energy Group Co., Ltd., Ji'nan 250014, China; 3. Gaozhuang Coal Industry Co., Ltd., Zaozhuang Mining Group, Jining 277605, China)

**Abstract:** It is essential to ensure the long-term stability of surface infrastructures by designing a reasonable protective width (or stopping line) of coal pillars. The design of the irregular downhill protective pillars under a surface diversion canal (part of South-to-North Water Transfer Project) in a mine is regarded as the engineering background. First, the governing principles for deformation of coal pillars under the function of long-term high stress in the coal seam with rockburst hazards are proposed by analyzing the damage modes of surface buildings induced by pillar deformation as follows: (1) No rockburst instability damage occurs in strike coal pillars; (2) No instability damage due to strength decrease over time takes place in strike coal pillars; (3) The deformation of dip coal pillars is uniform so that tensile damage does not take place on surface. Second, an evaluation model for pillar stress is established, and the design method for keeping pillars to be stable and surface buildings to be safe in a long-term period is proposed according to the spatial structure in the overlying strata. Finally, the stresses of coal pillars, stability of surrounding rock and deformation stability of the engineering case are analyzed, and the safety evaluation for diversion canal project and undermine mining design is carried out. The results are of great guiding significance for the width design of protective coal pillars in similar mines.

**Key words:** mining engineering; coal seam with rockburst hazard; coal pillar deformation; spatial structure in overlying stratum; rockburst instability; uniform deformation

## 0 引 言

“南水北调”工程是中国的“百年大计”和世纪工程, 其部分建(构)筑物通过矿区地表。根据《建

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2010CB226803); 国家自然科学基金项目(51274022, 51174016)

收稿日期: 2015-06-16

\*通讯作者(E-mail: jiangfuxing@163.com)

筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》规定<sup>[1-2]</sup>，地面设施的保护煤柱主要按照岩层移动（角）这一参数确定，但是，由于地面“南水北调”工程的特殊性、重要性和长期性，留设的煤柱需要“经受”长期稳定性“考验”，如果煤柱留设不合理，在长期应力作用下受到外来因素（冲击煤体卸压、巷道翻修等）影响，煤柱持续产生变形，可能造成建（构）筑物损害甚至引起地表突发性塌陷<sup>[3-4]</sup>。

根据现有研究成果，宋义敏等<sup>[5]</sup>根据能量原理，研究了煤柱在受载变形过程中的能量积聚和释放规律及其与最终失稳模式之间的关系；史红等<sup>[6]</sup>通过对覆岩空间结构的运动规律研究，认为高应力是煤柱诱发动力失稳的应力条件，而煤柱及其周围形成的高应力差是动力失稳的根本诱因；陈绍杰等<sup>[7]</sup>采用钻孔应力计与位移监测仪对条带煤柱进行了长期实测研究，确定了煤柱各分区的范围及各分区的支撑（强度）能力；王连国等<sup>[8]</sup>采用断裂力学 I-II 复合型裂纹模型，建立了煤柱工作面边缘破坏区的边界方程，得出了煤柱破坏宽度的计算公式。已有研究成果对煤柱能量积聚、应力分布特征、失稳条件以及破坏宽度等进行了较为广泛的研究，但是有关冲击煤层煤柱变形引起地面重要建（构）筑破坏方式以及控制方法还未见报道。

本文以山东某矿下山保护煤柱为工程研究背景，考虑到开采煤层具有强冲击倾向性、煤柱留设不规则等特点，为保证地面“南水北调”水利设施的安全，提出了保持煤柱长期稳定及地面建筑安全的煤柱设计方法，对“三下”开采地面保护以及煤柱设计具有重要的科学意义和实用价值。

## 1 工程背景

某大型现代化国有矿井，主采煤层为山西组中部3煤（ $3_{上}$ ， $3_{下}$ ），采用综合机械化采煤与综采放顶煤采煤方法，煤层具有冲击倾向性。其西十一采区位于井田西翼-430 m 水平以下，与西五采区（充分采动区域）紧邻，井下工作面平面布置如图1所示。采用中部下山双翼开采的布置方式，下山保护煤柱宽度从南至北呈增加趋势，并且在 $3_{上}509$ 采空区与 $3_{上}507$ 采空区交界处，停采线发生宽度“突变”，煤柱宽度从200 m“突变”至350 m。根据实际煤柱留设宽度大小，在平面图上自南向北沿煤柱长度方向上划分为3段：0~555 m，煤柱宽度约200 m；556~1000 m，煤柱宽度约350 m；1001~1500 m段两侧工作面尚未采动。

工作面平均开采深度达到450 m（从南至北煤层埋深逐渐增加，采深 $H=300\sim 580$  m）， $3_{上}$ ， $3_{下}$ 煤层平均厚度分别为5，4 m， $3_{上}$ 煤底板为泥岩（即为 $3_{下}$

煤顶板），层间距平均厚度为8 m。煤层倾角为 $9^{\circ}\sim 13^{\circ}$ ，煤层结构简单、产状较为稳定。

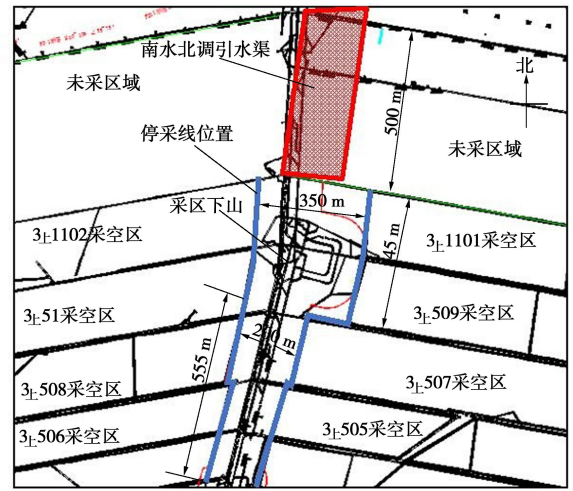


图1 工作面平面位置图

Fig. 1 Layout of working face

工作面采用下行开采顺序， $3_{上}1101$ 工作面和 $3_{上}1102$ 工作面开采完毕后，煤柱保护区地面没有发生变形，当 $3_{下}1101$ 工作面和 $3_{下}1102$ 工作面开采完毕并经充分沉降后，556~1000 m段煤柱保护区（地面引水渠附近河道）开始出现裂纹和坍塌现象，见图2所示。后续工作面开采可能对地面引水渠变形影响，保护煤柱合理宽度研究异常重要。

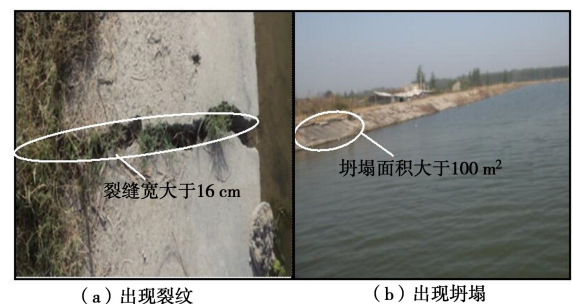


图2 煤柱保护区构筑物变形

Fig. 2 Structural deformation on ground over coal reserves

通过对上述工程案例初步分析得到：基于岩层移动（角）设计的保护煤柱由于没有考虑煤柱应力、围岩稳定性和变形特征等因素，存在一定的缺陷。冲击煤柱在长期应力作用条件下，煤柱变形引起地面重要建（构）筑物破坏到的方式主要有3种：

(1) 冲击煤层煤柱冲击失稳引起地面建（构）筑物破坏。煤柱留设宽度不合理或者开采深度较大，造成煤柱上覆岩层重力大于煤体支撑（强度）能力，长期应力作用下煤柱可能冲击失稳破坏。

(2) 煤柱在高应力长期作用下，煤体的长时强度逐渐降低，煤柱也可能发生破坏，对地面建（构）筑物产生影响。

(3) 倾向方向煤柱不均匀变形引起地面建（构）

筑物拉伸破坏。如果倾斜方向上不规则煤柱的变形具有不同步性, 井下煤柱不均匀变形扩展至地面之后, 造成的地面变形超过建(构)筑物允许范围而发生拉伸破坏。

### 2 控制长期高应力作用下煤柱变形的原则

当前多数大型煤矿采用中部下山双翼开采的布置方式, 由于煤层埋深不同, 在大巷煤柱(煤柱有多层煤以及中间岩层组成)两侧煤体开采完毕后, 由浅至深遗留煤柱大致呈梯形状, 如图 3 所示。煤体采出至采空区上覆岩层充分采动沉降后, 煤柱两侧垮落的岩层在重力作用下处于完全移动状态(I—I 剖面), 煤柱上方岩层直接作用在煤柱上, 在重力作用下处于压实状态(II—II 剖面), 总体上煤柱宽度  $d$  随煤层埋深  $H$  增加而增加, 设煤层平均倾角为  $\varphi$ 。

煤柱沿走向和倾斜两个方向的任意剖面都能保持稳定, 可以描述为: 煤体采出后形成“孤岛”煤柱能够对上覆岩层长期、稳定支撑, 如图 3 (b) 所示; 同时, 煤层不同埋深情况下, 煤柱整体变形保持相对均匀, 地面不会出现较大范围的差异沉降, 如图 3 (c) 所示。

因此, 根据煤柱变形特征以及对建(构)筑物影响, 控制长期高应力作用下冲击煤层煤柱变形的原则:

- (1) 走向方向煤柱不发生冲击失稳破坏。
- (2) 走向方向煤柱不发生煤体长时强度降低而导致的失稳破坏。

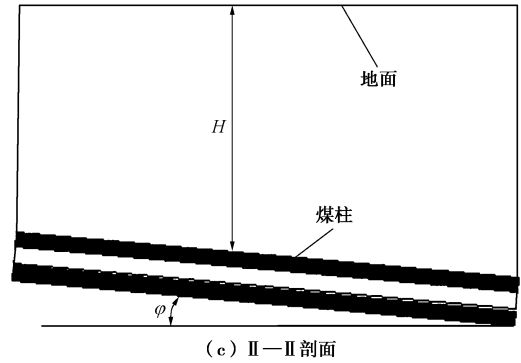
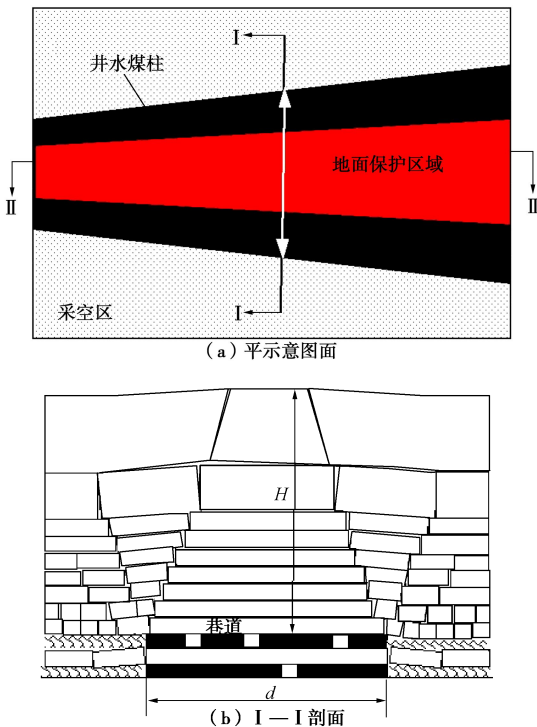


图 3 保护煤柱示意图

Fig. 3 Sectional view of protection coal pillar

(3) 倾斜方向煤柱保持均匀变形, 从而使地面不发生明显拉伸破坏。

### 3 煤柱静态应力估算

设开采结束后岩梁断裂点连线与水平方向的夹角称为覆岩移动角  $\beta$ , 岩梁触矸点连线与水平方向的夹角称覆岩触矸角  $\alpha$ , 如图 4 所示。关键层理论表明<sup>[9]</sup>, 采空区上覆岩层的运动大致以岩层组为基本单位, 每一岩层组中的厚硬岩层作为关键层, 控制着该组岩层的运动与变形, 关键层载荷包括关键层的自重及其由其控制的岩层组的重量, 在充分采动状态下, 将煤柱两侧及其上部的岩层按照对煤柱应力作用方式分为两部分: ①煤柱上方两条覆岩移动线之间的岩层(梯形区域)全部重量直接作用煤柱上; ②煤柱两侧覆岩移动线与触矸线之间岩层(倒三角区域)的重量只有一半传递至煤体上。

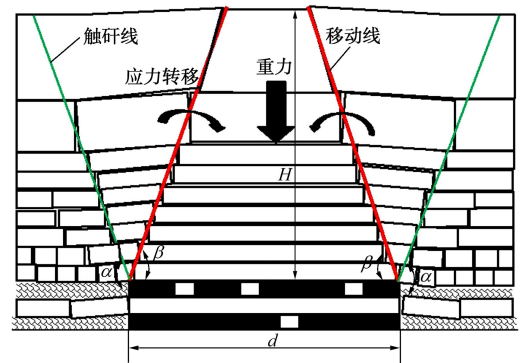


图 4 煤柱支撑压力估算的顶板结构模型

Fig. 4 Roof structure model to estimate abutment pressures on coal pillar

所以, 煤层(柱)的静态支撑压力  $\bar{\sigma}$  由自重应力  $\sigma_q$  和采空区覆岩转移应力(附加应力)  $\Delta\sigma$  两部分组成, 考虑煤柱两侧覆岩分布的对称性特点:

$$\bar{\sigma} = 2\Delta\sigma + \sigma_q \quad (1)$$

根据模型中几何关系, 煤柱承受的自重应力  $\sigma_q$  和

采空区覆岩转移应力（附加应力） $\Delta\sigma$  分别表示为

$$\sigma_q = \frac{d - H \cot \beta}{d} \gamma H, \quad (2)$$

$$\Delta\sigma = \frac{\cot \alpha + \cot \beta}{4d} \gamma H^2. \quad (3)$$

将式(2)、(3)带入式(1)，求得两侧充分采空情况下，煤柱静态支承压力结果为

$$\bar{\sigma} = \gamma H + \frac{\cot \alpha - \cot \beta}{2d} \gamma H^2, \quad (4)$$

式中， $\gamma$  为上覆岩层平均重度 ( $\text{kN/m}^3$ )， $H$  为煤层埋深 (m)， $d$  为留设煤柱宽度 (m)。

一般情况下，未采动煤体平均支承应力按  $\gamma H$  计算，根据文献[10, 11]监测研究表明：触研角  $\alpha <$  移动角  $\beta$ ，即有  $\cot \alpha > \cot \beta$  存在，显然  $\bar{\sigma} > \gamma H$  成立，说明工作面采空后，“孤岛”煤柱所承受的静态支承压力将大于原岩应力，应力增加值为  $\frac{\cot \alpha - \cot \beta}{2d} \gamma H^2$ 。

## 4 保持煤柱长期稳定及地面建筑安全的煤柱宽度设计方法

### 4.1 防止煤柱冲击失稳的煤柱宽度设计

由于地层多为沉积岩层，开采时上覆岩层逐层破裂运动，岩层破断产生动载效应对于大煤柱（例如工程背景煤柱宽度超过 200 m）整体而言，动载效应对煤柱的静态应力影响非常小，能够忽略不计。当煤柱两侧煤体采出后，形成的“孤岛”煤柱煤体平均支承压力增加，如果煤柱煤体平均支承压力达到了冲击煤体综合抗压强度的  $I_c$ （冲击失稳临界值）倍时，即认为工作面煤体整体冲击失稳，冲击失稳系数  $I_c$  为

$$I_c = \frac{\bar{\sigma}}{\lambda \sigma_c}, \quad (5)$$

式中， $\bar{\sigma}$  为煤柱煤体平均支承压力， $\sigma_c$  为煤体单轴抗压强度， $\lambda$  为煤体平均综合抗压系数。

工程实践证明，冲击煤体发生冲击失稳的应力比  $I_c \geq 1.5$  [12]，所以，煤柱满足不冲击失稳的要求为

$$\bar{\sigma} < 1.5 \lambda \sigma_c. \quad (6)$$

通常情况下，煤柱综合抗压系数与煤（岩）体围压大致呈线性关系 [13]，三向抗压强度约为单向抗压强度的 3~5 倍，最大值  $\lambda_{\max} = (3 \sim 5)$ （三轴应力状态条件），在煤柱塑性区或者采掘空间边界煤（岩）体视为单向受力状态取最小值  $\lambda_{\min} = 1$ 。假设煤柱由弹性区和塑性区（或者破碎区）组成，设其煤柱内布置的大巷平均半径为  $r$ ，最大塑性半径可以达到  $5r$ （包括巷道本身宽度），同时煤柱边缘的塑性范围  $0 \sim L$ ，则煤柱平均综合抗压系数  $\lambda$  表示为

$$\lambda = \frac{2n \cdot 5r + 2L}{d} \cdot \lambda_{\min} + \frac{d - (2n \cdot 5r + 2L)}{d} \cdot \lambda_{\max}, \quad (7)$$

式中， $n$  为煤柱断面内布置的巷道个数。

### 4.2 防止煤体长时强度降低而造成煤柱破坏的宽度设计

一般情况下，当外界载荷达到岩石瞬时强度（通常为岩石的单轴抗压强度  $\sigma_c$ ）时，岩石发生破坏，当外界载荷低于其瞬时强度，如果持续较长时间，最终也能够发生长期（流变）变形破坏。

长期强度即为发生不稳定流变的临界应力值，流变过程的长期强度曲线采用指数形式 [14] 表达为

$$\sigma_t = \sigma_s + (\sigma_c - \sigma_s) e^{-ut}, \quad (8)$$

式中， $\sigma_t$  为任意时刻煤（岩）强度，当  $t=0$  时， $\sigma_c$  即为煤（岩）的瞬时强度，当  $t \rightarrow +\infty$  时，煤（岩）强度接近于长期强度  $\sigma_s$ ， $u$  为流变过程的经验常数。

为了方便煤柱稳定状态评估，采用强度折减的方法替代煤柱长期流变效应，在恒定载荷长期作用下，同一种煤（岩）的长期强度与瞬时强度之比为常数  $w$ ，即  $\sigma_s / \sigma_c = w$ ，要使煤柱不发生长期变形，煤柱整体长期强度大于煤柱煤体平均支承压力，即满足

$$\bar{\sigma} < \lambda \sigma_s \text{ 或 } \bar{\sigma} < \lambda w \sigma_c. \quad (9)$$

研究 [15] 表明，硬煤煤柱在长期应力作用下，煤体长期强度约为瞬时强度的 2/3 倍，满足煤柱不长期变形的煤柱宽度设计要求为

$$\bar{\sigma} < 2 \lambda \sigma_c / 3. \quad (10)$$

综合以上研究结果，煤柱不发生冲击失稳的临界应力高于煤柱不发生长期变形的临界应力，说明满足式(6)情况下，在高应力长期作用下，煤柱仍有可能发生长期变形破坏，因此，走向方向煤柱不发生失稳破坏的宽度设计要求： $\bar{\sigma} < 2 \lambda \sigma_c / 3$ 。

### 4.3 倾斜方向煤柱保持均匀变形条件的宽度设计

煤柱不均匀变形结果能够不同程度的反演到地面引起地面差异沉降，如果地面沉降差异明显或者地表变形量超过建筑（构）物允许范围，就会对地面建筑（构）物产生一定破坏。研究表明，煤柱在倾斜方向的不均匀变形通常表现为地面建筑建筑（构）物的拉伸破坏 [16-17]。

煤柱变形与煤柱煤体应力有关，根据式(4)表明，相同的开采环境下，煤柱煤体平均应力与采深  $H$ 、煤柱宽度  $d$  密切相关，如果在煤柱倾斜方向煤体应力差异很大，容易造成煤柱在竖直方向上变形不协调，煤柱煤体平均支承压差，是造成不均匀变形的原因。

所以，保证倾斜方向煤柱保持均匀变形，采深  $H$  与煤柱宽度  $d$  二者的协调关系是关键，如图 5 所示，假设同一煤柱的变形量参数：弹性模量  $E$ 、煤厚  $M$  相同，如果能够保证不同煤柱深度的煤体应力保持相等，就能理论上满足倾斜方向煤柱保持均匀变形，可以简单描述成煤柱受“等应力”作用：



$$\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_2 = \dots = \bar{\sigma}_n = \bar{\sigma}_0 \quad (11)$$

式中,  $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \dots, \bar{\sigma}_n$  为煤柱倾斜方向煤体平均静态应力, 为了防止煤柱发生整体冲击失稳或者长期变形, 同时必须满足  $\bar{\sigma}_0 < 2\lambda\sigma_c/3$ 。

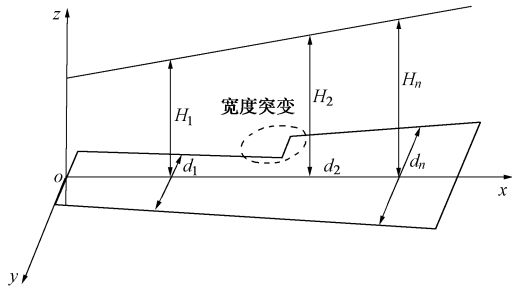


图 5 煤柱空间模型

Fig. 5 Spatial model for coal pillar

考虑煤柱长期稳定性因素, 取冲击煤层失稳安全系数  $n$  ( $n > 1.0$ ), 则煤柱安全的承载应力为

$$\bar{\sigma}_0 = 2\lambda\sigma_c / 3n \quad (12)$$

将式 (12) 带入式 (4), 得到煤柱保持均匀变形的宽度  $d$  为

$$d = \frac{(\cot \alpha - \cot \beta)}{2\left(\frac{2\lambda\sigma_c}{3n} - \gamma H\right)} \gamma H^2 \quad (n > 1.0) \quad (13)$$

#### 4.4 避免冲击煤层煤柱变形破坏的开采防治对策

根据控制长期高应力作用下冲击煤层煤柱变形的原则, 提出避免煤柱变形破坏的开采防治对策如下:

##### (1) 优化开采顺序

合理的开采接续顺序能够避免煤柱长期处于高应力状态, 例如可以采用单翼开采, 改变煤柱应力环境, 减小开采引起煤柱附加应力, 增加煤柱承载能力。

##### (2) 避免不规则煤柱

一般情况下, 煤柱宽度越大承载能力越强、覆岩对煤柱的平均载荷越小, 在煤柱宽度突然由小变大的区域应力差最明显, 实际煤柱留设时避免产生直角或者宽度“突变”, 可以采用弧形过渡。

##### (3) 调整停采位置

多煤层重复采动时, 如果停采位置选择不合理, 既能引起原先稳定的顶板岩层造成重复运动, 又会造成停采边界煤岩塑性范围增加, 能够影响煤柱整体支撑强度与稳定性, 如图 6 数值模拟揭示重复采动顶板运动和煤岩塑性变化特征。根据数值分析研究, 多煤层重复采动时合理停采线位置选择至关重要, 以  $3_{上}$  煤采空后  $3_{下}$  煤柱留设为例分析, 相关研究表明, 重复采动时能够导致覆岩移动角减小  $10^\circ \sim 15^\circ$  [18], 如图 7 所示, 停采线位置位置需要根据重复采动岩层移动规律 (移动角从  $\beta_1$  减小至  $\beta_2$ ) 和应力传递规律 (应力传

递角为  $\theta$ ) 综合确定留设煤柱宽度,  $3_{下}$  停采位置距离  $3_{上}$  停采线合理错距  $l = \max\{l_1; l_2\}$ 。

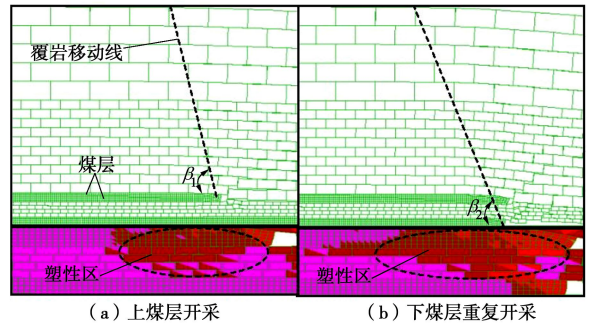


图 6 数值模拟揭示重复采动顶板运动和煤岩塑性变化特征

Fig. 6 Characteristics of roof motion and plastic change of coal and rock due to repeated mining revealed by numerical simulation

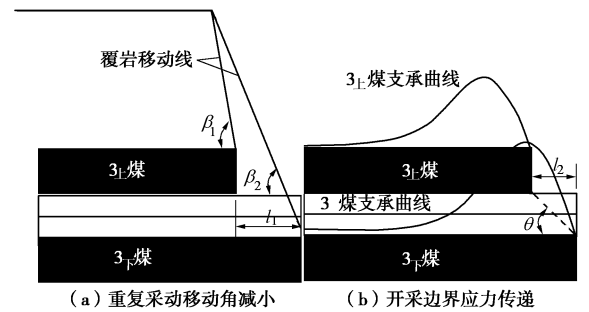


图 7 停采位置确定方法

Fig. 7 Determination method for positioning of stopping line

##### (4) 合理巷道布置

煤柱内巷道布置方式以及巷道间距对煤柱整体承载能力与产生变形速率影响较大。尽量选择全岩巷道或者半煤岩巷道, 避免巷道防冲卸压及塑性圈扩展融合, 同时增加巷道之间距离, 提高巷道围岩的整体稳定性。

##### (5) 有效监测与支护

类似“南水北调”工程留设的大巷煤柱使用年限很长, 需要对煤柱内硐群区域、或者薄弱区域应力和位移等进行长期观测, 找到应力对煤柱内围岩介质“腐蚀”规律和煤柱变形特征, 掌握好冲击煤层卸压、巷道翻修及二次支护最佳时机。

## 5 工程实例分析

### 5.1 下山煤柱状态分析

针对本文的案例, 假设煤柱上覆岩层未离层, 岩层之间不存在间隙, 忽略其沉降影响, 煤柱有多层煤岩层组成, 每一层煤(岩)厚度和强度分别为  $h_i$  和  $[\sigma_i]$ 。煤柱组成的煤岩结构体强度为

$$[\sigma_c] = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i} [\sigma_i] \quad (14)$$

根据相似矿井工程经验类比<sup>[19]</sup>以及本矿微地震监测结果, 综合分析取本矿采场上覆岩层的移动角 $\beta \approx 82^\circ$ 、触矸角 $\alpha \approx 65^\circ$ , 同时取岩层平均重度 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ , 3<sub>上</sub>煤、层间泥岩以及3<sub>下</sub>煤组成的煤柱厚度之和 $h = h_{上} + h_{泥} + h_{下} = 17 \text{ m}$ , 单轴抗压实验得到各煤(岩)单轴强度 $\sigma_{上} = 18.5 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_{泥} = 11.4 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_{下} = 9.3 \text{ MPa}$ 。

组成煤柱煤(岩)体系系统综合单轴抗压强度为 $\sigma_c = 12.5 \text{ MPa}$ 。

则煤柱煤(岩)体系系统的长期强度估算为 $\sigma_s = 8.3 \text{ MPa}$ 。

实际煤柱内大巷平均半径 $r = 2.5 \text{ m}$ , 煤柱边缘塑性范围 $L = 0 \sim 10 \text{ m}$ , 综合抗压系数 $\lambda_{min} = 1.0$ , 综和煤层开采深度、煤柱强度等因素 $\lambda_{max} = 3.0$ 。

(1) 宽度为200 m的煤柱长期稳定状态分析

$\lambda_1 = 1.8$ , 煤柱冲击失稳和长期变形临界应力值分别为 $1.5\lambda_1\sigma_c = 33.8 \text{ MPa}$ ,  $2\lambda_1\sigma_c/3 = 15 \text{ MPa}$ 。

根据式(4)计算得到煤柱静态应力: $\bar{\sigma}_1 = 9.3 \sim 14.5 \text{ MPa}$ 。

所以,  $\bar{\sigma}_1 < 2\lambda\sigma_c/3$ , 表明0~555 m段煤柱(宽度为200 m)不会发生失稳破坏, 但是 $\bar{\sigma}_1$ 为不等应力, 煤柱在长期应力作用下会不均匀变形, 地面建筑建筑(构)物具有拉伸破坏的可能性。

(2) 宽度为350 m的煤柱长期稳定状态分析

$\lambda_2 = 1.46$ 。煤柱冲击失稳和长期变形临界应力值分别为 $1.5\lambda_2\sigma_c = 27.4 \text{ MPa}$ ,  $2\lambda_2\sigma_c = 12.1 \text{ MPa}$ 。 $\bar{\sigma}_2 = 12.8 \sim 15.4 \text{ MPa}$ 。

所以,  $2\lambda\sigma_c/3 < \bar{\sigma}_2 < 1.5\lambda\sigma_c/3$ , 表明556~1000 m段煤柱(宽度约350 m)达到了长期变形的应力条件, 同时 $\bar{\sigma}_2$ 为不等应力, 煤柱在长期应力作用下会发生长期(流变)变形破坏和不均匀变形, 对地面建筑建筑(构)物破坏的可能性较大。煤柱倾斜方向的煤体应力变化曲线如图8所示。

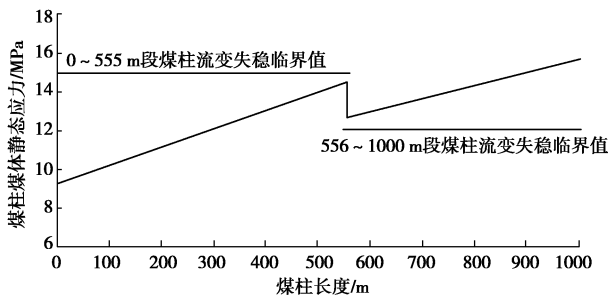


图8 煤柱不同段静态应力曲线

Fig. 8 Stress curves in different periods of coal pillar

在煤柱宽度增加的区域(556~1000 m段)由于巷道硐室集中布置, 煤柱埋深相对增加, 造成该段煤

柱整体的平均静态应力大于其长期强度, 这也是造成案例“当3<sub>下</sub>1101工作面和3<sub>下</sub>1102工作面开采完毕经充分沉降后, 556~1000 m段煤柱保护区(地面引水渠附近河道)开始出现裂纹和坍塌现象”的力学原因。

通过上述两段不同煤柱应力与稳定状态分析, 验证了煤柱变形(可能性)及原因(破坏方式)。

### 5.2 未采区域煤柱宽度设计

设1000~1500 m段煤柱宽度为 $d_3$ , 该矿煤层属于硬煤, 取煤柱安全系数 $n = 1.11$ <sup>[20]</sup>, 则满足煤柱长期稳定性的应力条件为

$$d_3 = \frac{(\cot 65^\circ - \cot 82^\circ) \times 0.025 \times (500 \sim 580)^2}{2 \left[ \frac{2 \times 0.9 \times 18.5 \times \lambda_3}{3} - 0.025 \times (500 \sim 580) \right]}, \quad (15)$$

$$\lambda_3 = \frac{120}{d_3} \times 1 + \frac{d_3 - 120}{d_3} \times 3.$$

计算得到 $d_3 = 288 \sim 401 \text{ m}$ , 且煤柱宽度随采深增加而增加。考虑地面引水渠位置, 综合岩层移动(角)最终设计煤柱宽度 $d_3 = 350 \sim 600 \text{ m}$ , 井下设计停采位置示意图如图9所示。

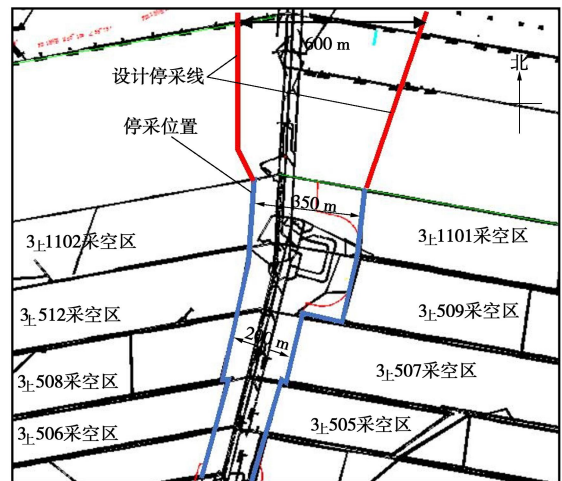


图9 井下工作面停采线平面位置

Fig. 9 Stop picking line of underground working face

## 6 结论

(1) 冲击煤层煤柱在长期应力作用下, 地面(构)建筑物能够产生3种典型的变形破坏方式: ①走向方向煤柱冲击失稳破坏; ②煤体长时强度降低, 走向方向煤柱失稳破坏; ③倾斜方向煤柱不均匀变形, 引起地面拉伸破坏。

(2) 根据充分采动覆岩结构分布规律和应力传递规律, 建立了煤柱应力估算模型, 得到覆岩触矸角 $\alpha < \text{移动角} \beta$ 是煤柱煤体应力增加的主要原因。

(3) 依据控制长期高应力作用下煤柱变形的原则, 提出了保持煤柱长期稳定及地面建筑安全的煤柱

设计方法以及避免煤柱变形破坏的开采防治对策。

(4) 研究成果可以为“南水北调”等重大工程的保护煤柱宽度设计提供一种新方法,但其长期可靠性仍需进一步监测与研究。

#### 参考文献:

- [1] 熊传治, 徐大威. 水平煤层群保安煤柱的合理尺寸研究[J]. 煤炭学报, 1990, **15**(4): 15 - 22. (XIONG Chuan-zhi, XU Da-wei. Optimal size of safety coal pillars for a group of horizontal coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 1990, **15**(4): 15 - 22. (in Chinese))
- [2] 刘宝琛, 沈惠群. 留设建筑物保护煤柱最佳尺寸的数学模型及求解[J]. 煤炭学报, 1988, **3**(3): 18 - 25. (LIU Bao-chen, SHEN Hui-qun. The mathematical model and solution for optimization of coal pillar for preventing building[J]. Journal of China Coal Society, 1988, **3**(3): 18 - 25. (in Chinese))
- [3] 郭广礼. 老采空区上方建筑地基变形机制及其控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001. (GUO Guang-li. Build-ingfoundation deformation mechanics and control above old goaf[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [4] 魏峰远, 陈俊杰, 邹友峰. 垂直剖面法保护煤柱设计的解析模型[J]. 煤炭学报, 2008, **33**(3): 256 - 258. (WEI Feng-yuan, CHEN Jun-jie, ZOU You-feng. Anaiytical model of protective coal pillar design for vertical section method[J]. Journal of China Coal Society, 2008, **33**(3): 256 - 258. (in Chinese))
- [5] 宋义敏, 姜耀东, 马少鹏, 等. 岩石变形破坏全过程的变形场和能量演化研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(5): 1352 - 1356. (SONG Yi-min, JIANG Yao-dong, MA Shao-peng, et al. Evolution of deformation fields and energy in whole process of rock failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(5): 1352 - 1356. (in Chinese))
- [6] 史红, 王存文, 孔令海, 等. “S”型覆岩空间结构煤柱导致冲击失稳的力学机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊2): 3508 - 3513. (SHI Hong, WANG Cun-wen, KONG Ling-hai, et al. Mechanism discussion on rock bursting caused by coal pillar of S-shaped overlying multi-strata spatial structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S2): 3508 - 3513. (in Chinese))
- [7] 陈绍杰, 周辉, 郭惟嘉, 等. 条带煤柱长期受力变形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, **29**(3): 376 - 380. (CHEN Shao-jie, ZHOU Hui, GUO Wei-jia, et al. Study on long-term stress and deformation characteristics of strip pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, **29**(3): 376 - 380. (in Chinese))
- [8] 王连国, 缪协兴, 王学知, 等. 条带开采煤柱破坏宽度计算分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(6): 767 - 769. (WANG Lian-guo, MIAO Xie-xing, WANG Xue-zhi, et al. Analysis on damaged width of coal pillar in strip extraction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **28**(6): 767 - 769. (in Chinese))
- [9] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000. (QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, XU Jia-lin, et al. Key strata theory[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [10] 姜福兴, XUN Luo, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(1): 23 - 25. (JIANG Fu-xing, XUN Luo, YANG Shu-hua. Study on microseismic monitoring for spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 23 - 25. (in Chinese))
- [11] 蒋金泉, 张培鹏, 聂礼生, 等. 高位硬厚岩层破断规律及其动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(7): 1366 - 1374. (JIANG Jin-quan, ZHANG Pei-peng, NIE Lis-heng, et al. Fracturing and dynamic response of high and thick stratas of hard rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(7): 1366 - 1374. (in Chinese))
- [12] 姜福兴, 王存文, 叶根喜, 等. 采煤工作面冲击地压发生的可能性评价方法研究[C]// 2008 全国冲击地压研讨会论文集. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 91 - 96. (JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen, YE Genxi, et al. Study on possibility evaluation method of coal outburst in longwall face[C]// National Symposium of the 2008 Rock Burst Seminar. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008: 91 - 96. (in Chinese))
- [13] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [14] 尤明庆. 围压对岩石试样强度的影响及离散[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 929 - 937. (YOU Ming-qing. Effect of confining pressure on strength scattering of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2014, **33**(5): 929 - 937. (in Chinese))
- [15] 陈绍杰, 郭惟嘉, 王亚博, 等. 深部条带煤柱长期稳定性基础实验研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010. (CHEN Shao-jie, GUO Wei-jia, WANG Ya-bo, et al. Basic experimental study on long-term stability of deep trip coal pillar[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2010. (in Chinese))
- [16] 王存文, 姜福兴, 王平, 等. 煤柱诱发冲击地压的微震事件分布特征与力学机理[J]. 煤炭学报, 2009, **34**(9): 1169 - 1173. (WANG Cun-wen, JIANG Fu-xing, WANG Ping, et al. Microseismic events distribution characteristics and Mechanisms of rock bursting induced by a coal pillar[J]. Journal of China Coal Society, 2009, **34**(9): 1169 - 1173. (in Chinese))
- [17] 王学滨, 潘一山, 宋维源. 岩石试件尺寸效应的塑性剪切应变梯度模型[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(6): 711 - 713. (WANG Xue-bin, PAN Yi-shan, SONG Wei-yuan. The model of plastic shear strain gradient on size effect in uniaxial compression of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **23**(6): 711 - 713. (in Chinese))
- [18] 姚邦华, 周海峰, 陈龙. 重复采动下覆岩裂隙发育规律模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, **27**(3): 443 - 447. (YAO Bang-hua, ZHOU Hai-feng, CHEN Long. Numerical simulation about fracture development in overlying rocks under repeated mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, **27**(3): 443 - 447. (in Chinese))
- [19] 魏全德. 巨厚砾岩下特厚煤层冲击地压发生机理及防治研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015. (WEI Quan-de. Mechanism and prevention and control of rockburst in extra thick coal seams under super thick conglomerate stratum[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015. (in Chinese))
- [20] 王春秋, 高立群, 陈绍杰, 等. 条带煤柱长期承载能力实测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, **30**(6): 779 - 804. (WANG Chun-qiu, GAO Li-qun, CHEN Shao-jie, et al. Field research on long-term bearing capacity of strip pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, **30**(6): 779 - 804. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 封2 北京筑信达工程咨询有限公司  
 封3 北京理正软件股份有限公司  
 封4 上海分元土木工程科技有限公司  
 后插1 济南普业机电技术有限公司  
 后插2 西安力创材料检测技术有限公司