

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.04.012

# 倾斜煤层窄长露天矿分区开采分期境界优化

曹 博<sup>a</sup>, 陶亚彬<sup>a</sup>, 白润才<sup>a,b</sup>, 白文政<sup>a</sup>, 刘光伟<sup>a,b</sup>

(辽宁工程技术大学 a.矿业学院; b.煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**针对倾斜煤层窄长露天矿,经常采用纵采转横采内排的开采程序,基于其剥离物流向流量的变化对经济合理剥采比大小的影响,提出一种分区、分时期的优化开采境界方法。该方法依据首采区位置的不同可分为 A 模式(即首采区位于矿权一侧)和 B 模式(即首采区位于矿权中部)两种开采模式。此外,按照露天剥采工程发展过程中剥离物流向流量变化的情况,将其露天矿山开采过程归结为三个时期:全部外排期、部分内排期和全部内排期。通过构建剥、采、排工程位置模型,系统地研究了两种开采模式分时期境界优化的原则和适用条件,并提出境界优化模型。研究成果在准东露天煤矿开采实践中得到应用,结果表明:准东露天矿的经济合理剥采与其开采境界优化前相比,由原来的 1.50 m<sup>3</sup>/t 增加至 1.62 m<sup>3</sup>/t,其经济合理开采深度增加了 24.7 m,顶帮外扩距离增加了 45.65 m,经济可采储量增加了 85.27 Mt。实现了露天开采经济效益的最大化。

**关键词:**倾斜煤层露天矿;纵采转横采;经济合理剥采比;分区开采;分期境界优化

中图分类号:TD824

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)04-101-10

## Block system optimization by stages for inclined seam long narrow open-pit mine

CAO Bo<sup>a</sup>, TAO Yabin<sup>a</sup>, BAI Runcai<sup>a,b</sup>, BAI Wenzheng<sup>a</sup>, LIU Guangwei<sup>a,b</sup>

(a. Institute of Mining Technology; b. Research Center for Safe Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** In the narrow and long open-pit mine of inclined coal seam, the mining procedure of vertical mining and horizontal mining are often adopted. In view of the influence of the change of the distribution of logistics on the economic reasonable stripping ratio, the block system optimization by stages was proposed, which involved two patterns, namely A pattern (the first mining area was located in the right side of the mining right) and B pattern (the first mining area was located in the middle of the mining right). In addition, the process of mining was divided into three periods according to the change of the separation of logistics to the flow: all external drainage, partial internal drainage and total internal drainage. By constructing the location model of stripping, mining and drainage, the paper systematically studied the

收稿日期:2018-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51504128);辽宁省教育厅基金资助项目(LJYL038);辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心开放基金资助项目(LNTU16KF07)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51504128), Project Fund of Education Department of Liaoning Province (LJYL038) and the Open Projects of Research Center of Coal Resources Safe Mining and Clean Utilization, Liaoning(LNTU16KF07).

作者简介:曹博(1984—),男,辽宁工程技术大学,副教授,硕士生导师,主要从事露天开采系统工程和露天矿边坡工程等方面的研究,(E-mail)caobo0418@163.com。

principle and the conditions applicable to the state optimization of two mining modes, and put forward the model of state optimization. The research was applied in the practice of the Zhundong surface coal mining and the results show that the economic stripping ratio has increased from 1.50 m<sup>3</sup>/t to 1.62 m<sup>3</sup>/t, the economic mining depth by 24.7 m, the overtopping distance by 45.65 m and the economically recoverable reserves by 85.27 Mt, realizing the economic interest maximization of open-pit mining.

**Keywords:** inclined seam open-pit mine; longitudinal pick by turn to cross; economic stripping ratio; block system; optimization by stages

露天矿开采境界是衡量矿山资源储量、矿山发展规模及矿山服务年限的基础,露天矿境界优化则是对开采境界进行优化选择的过程。随着国内外露天矿山开采经验的不断丰富,露天矿境界优化方法日新月异,目前主要包括:传统手工圈定法<sup>[1]</sup>、网络流法<sup>[2]</sup>、境界动态优化法<sup>[3]</sup>、动锥法<sup>[4]</sup>、LG 图论法<sup>[5]</sup>等。通过分析可知,以上方法的主旨都是相同的,即:以最大限度地回收矿体资源为原则,充分实现露天开采经济效益的最大化。对于具有特殊条件的露天矿,如果依旧采用传统的方法就有可能出现与我们的目标相悖的结果,所以进行必要的优化设计就尤为重要。选用传统的方法即手工法来圈定窄长露天矿开采境界,其核心是:把市场煤炭的经济条件作为前提,然后选用价格法来确定露天矿的经济合理剥采比;同时又以境界剥采比不大于经济合理剥采比为原则,按照统一的经济合理剥采比,采用边帮线段比法圈定境界<sup>[6-7]</sup>。对于倾斜煤层窄长露天矿而言,一般有 3 种开采程序可供选择:分区内排纵采开采程序、横采内排开采程序和纵采转横采内排开采程序。由于纵采转横采内排开采程序既具有纵采初期剥采比小、基建工程量少的特点,又具有横采后期运距短、生产剥采比均匀的优势,使其成为倾斜煤层窄长露天矿的设计首选程序。按照露天剥采工程发展过程中剥离物流向流量变化的情况,将其露天矿山开采过程归结为 3 个时期:全部外排期、部分内排期和全部内排期<sup>[8]</sup>。各时期剥离物流向流量的变化,必将导致其矿岩运距发生较大的差异,使得占露天开采成本 60% 左右的运输费用必然发生较大的变化,从而直接影响到生产成本的大小。经济合理剥采比作为露天矿开采境界圈定的依据,其值随生产成本的降低而增大,使得各时期生产成本发生变化,经济合理开采深度也随之发生变化<sup>[8-11]</sup>。因此,设计采用纵采转横采内排开采程序的倾斜煤层窄长露天矿,不能简单地按照统一的经济合理剥采比圈界,而是需要在其矿权范围内对其开采境界进行分期优化。

笔者依据倾斜煤层窄长露天矿的特点,结合纵采转横采内排开采程序的时空演变规律,分析不同开采时期经济合理剥采比的变化规律;通过各个时期剥、采、排时空位置模型,通过研究经济合理剥采比与内排工作线推进度的关系,最终可以得到对于倾斜煤层窄长露天矿采用不同开采模式的分期境界优化原则与优化原理。并以准东露天煤矿为例进行优化分析。

## 1 倾斜煤层窄长露天矿纵采转横采内排开采程序分析

对于倾斜煤层窄长露天矿而言,若采用纵采转横采内排开采程序,矿山工程的发展可以简要概括为:拟定首采区位置、确定横采推进方向、靠帮开采实现超前降深、将纵采程序转为横采程序、剥离物追踪采煤台阶内排采空区。然而,为了充分发挥纵采优势,尽可能实现矿山初期经济效益最大化,首采区通常选在煤层埋藏较浅、煤层赋存稳定的地段。因此,依据首采区拟定位置的不同,可将其划分为两种开采模式。

### 1.1 A 模式(即首采区位于矿权一侧)

对于 A 模式而言,首先需依照煤层赋存条件将其矿权范围划分为两个采区:首采区和二采区。假使首采区位于矿权东侧,那么矿权西侧则为二采区,如图 1。首采区初期纵采,后续东帮实行靠帮开采完成超前降深,使得东帮先于西帮开采至最终境界。然后将工作线转为沿倾向布置,贯通二采区形成横采开采程序。当横采深部工作帮与首采区到界东帮的距离满足初始内排长度后,实行压帮内排<sup>[12-13]</sup>。

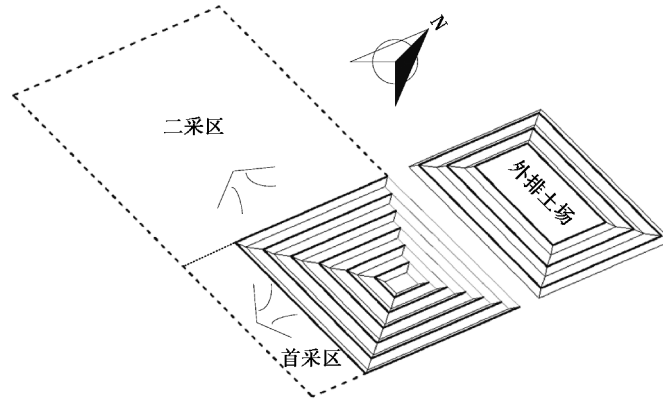


图 1 A 模式开采示意图

Fig. 1 Schematic diagram of A pattern mining

适用条件:单向横采能够满足矿山产能要求,沿煤层走向矿权一侧地形较低或中部地形较高时;矿权一侧煤层赋存较浅且发育稳定,中部煤层埋藏较深、发育不稳,甚至出现煤层局部缺失时;地势平坦、煤层赋存稳定时,A 模式为首选。

1.2 B 模式(即首采区位于矿权中部)

对于 B 模式而言,首先需依照煤层赋存条件将其矿权范围划分为 3 个采区:首采区、二采区和三采区。首采区位于矿权中部,先行横采分区为二采区(假使先行横采西区,则:西区为二采区,东区为三采区),如图 2。同理,初期首采区纵采,后续东帮实行靠帮开采完成超前降深,使得东帮先于西帮开采至最终境界。然后将工作线转为沿倾向布置,贯通二采区形成横采开采程序。由于二采区开采完毕后还需对三采区进行开采,为了不影响后期三采区开采,二采区内排时需要留沟。当横采深部工作帮与首采区东帮的距离达到初始内排长度后,实行留沟内排<sup>[14]</sup>。

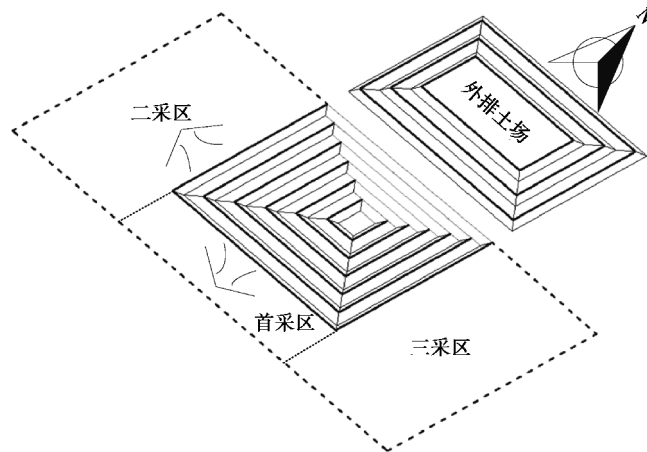


图 2 B 模式开采示意图

Fig. 2 Schematic diagram of B pattern mining

适用条件:单向横采能够满足矿山产能要求,沿煤层走向矿权中部地形较低、两侧较高时;矿权中部煤层赋存较浅且发育稳定,两侧煤层埋藏较深、发育不稳,甚至出现煤层局部缺失时;单向横采不能满足产能要求时,只可采用 B 模式进行双向横采。

## 2 倾斜煤层窄长露天矿分期境界优化分析

### 2.1 倾斜煤层窄长露天经济合理剥采比优化分析

经济合理剥采比对于露天矿境界的圈定起着重要的影响,其值的大小将直接影响露天矿剥采工程规模、综合经济效益、生产长远规划等要素。国内大部分露天矿在圈定开采境界时,均采用传统价格法计算经济合理剥采比<sup>[7]</sup>,即依据境界剥采比( $n_k$ )不大于经济合理剥采比( $n_j$ )的原则圈定露天矿境界,即:

$$n_k \leq n_j = \frac{d_L - a}{b} \quad (1)$$

式中: $n_k$ 为境界剥采比, $\text{m}^3/\text{t}$ ; $n_j$ 为经济合理剥采比, $\text{m}^3/\text{t}$ ; $d_L$ 为原煤售价,元/ $\text{t}$ ; $a$ 为纯采煤成本,元/ $\text{t}$ ; $b$ 为纯剥离成本,元/ $\text{m}^3$ 。

通过式(1)可知,在原煤售价与采煤成本不变的前提下,剥离成本  $b$  与经济合理剥采比  $n_j$  成反比例关系:剥离成本  $b$  越大,经济合理剥采比  $n_j$  越小;反之,剥离成本  $b$  越小,经济合理剥采比  $n_j$  越大。然而,运输费用对于露天矿剥离成本  $b$  起着至关重要的作用,运输费用由剥离物规模、运输加权运距及加权提升高度决定,即由剥离物的流向流量决定。综合分析可知,经济合理剥采比  $n_j$  会受剥离物的流向流量影响。

对于采用纵采转横采内排开采程序的倾斜煤层窄长露天矿而言,生产初期工作线沿走向布置倾向推进,剥离物全部外排。随着开采深度的增加,剥离物提升高度增加,运距加大,纵采生产成本加大。后续首采区靠帮开采实现超前降深,将工作线转为沿倾向布置走向推进。随着工作帮的逐渐推进,坑下煤层底板揭露距离增大,满足内排实现条件,剥离物开始内排;当内排空间可容下全部剥离量时,露天矿便实现全部内排。按照纵采转横采内排开采程序的时空演变规律,现按剥离物的流量流向的变化,可以将采矿工程划分为 3 个时期,即:全部外排期、部分内排期和全部内排期。由于 3 个时期的剥离物流量流向存在差异,这必将导致其矿岩运距发生较大的变化,使得露天矿剥离成本  $b$  的大小也随之变化,表现为:剥离运距逐期变小、剥离成本  $b$  逐期降低、经济合理剥采比逐期变大<sup>[8]</sup>。由于露天矿境界的大小随经济合理剥采比  $n_j$  的变化而变化,必然使得露天矿境界的大小随剥离成本  $b$  的变化而改变。因此,对于倾斜煤层窄长露天矿而言,可以得到以下结论即:若采用纵采转横采内排开采程序,在对其圈定开采境界时,需要考虑各个生产时期剥离成本  $b$  的变化来对其开采境界进行分期优化。

### 2.2 倾斜煤层窄长露天矿纵采转横采境界优化

为了确定倾斜煤层窄长露天矿纵采转横采内排开采过程中,经济合理剥采比随剥离物流向流量的变化规律,以含有  $n$  个主采煤层( $n \geq 1$ )露天矿为例,构建其各时期剥、采、排工程位置模型,采用三维空间与二维剖面相结合的方式对其进行分析。假定该露天矿矿权走向长度为  $L$ ,原设计剥离物外排成本与内排成本分别为  $b_w$ 、 $b_n$ ,采场工作帮坡角与非工作帮坡角分别为  $\theta$ 、 $\alpha$ ,开采深度为  $H$ ,采场深部煤层底板沿走向揭露长度为  $L_b$ 。约定先行横采方向的揭露长度  $L_b$  为正,反之揭露长度  $L_b$  为负。

#### 2.2.1 全部外排期

该生产时期发生在矿山开采的初期,矿山工程尚未由纵采转为横采或者超前降深没完成,还未形成初始内排坑,采场深部煤层底板沿走向揭露长度  $L_b$  小于初始内排长度  $L_{\min}$ ,不具备内排条件,剥离物全部排至外排土场。对于其两种开采模式而言,该时期剥、采、排工程的发展基本相同,即先纵采→后续靠帮开采实现超前降深→将纵采过渡为横采。该时期剥离成本  $b$  由外排成本  $b_w$  决定,即: $b = b_w$ 。经济合理剥采比  $n_{j1}$  满足: $n_{j1} = (d_L - a) / b_w$ 。

#### 2.2.2 部分内排期

随着剥采工程的发展,工作线已转为倾向布置,采场深部煤层底板沿走向揭露长度  $L_b$  超过了初始内排长度  $L_{\min}$ ,具备了初始内排条件,可以将剥离物排至采空区。但是,该时期内排空间不足以满足排弃所有剥离物,所以剩余剥离物仍需要进行外排,即仍有剥离物占用外排土场空间,此时的剥离运输成本将发生变化,如图 3、图 4 所示。该时期剥离成本  $b$  取决于外排成本  $b_w$  与内排成本  $b_n$ ,即:

$$b = \mu b_n + (1 - \mu) b_w, \quad (2)$$

式中  $\mu$  值受两种开采模式的影响,即部分内排期剥、采、排工程发展空间关系的不同,将导致  $\mu$  值的大小产生

差异。现具体分述如下。

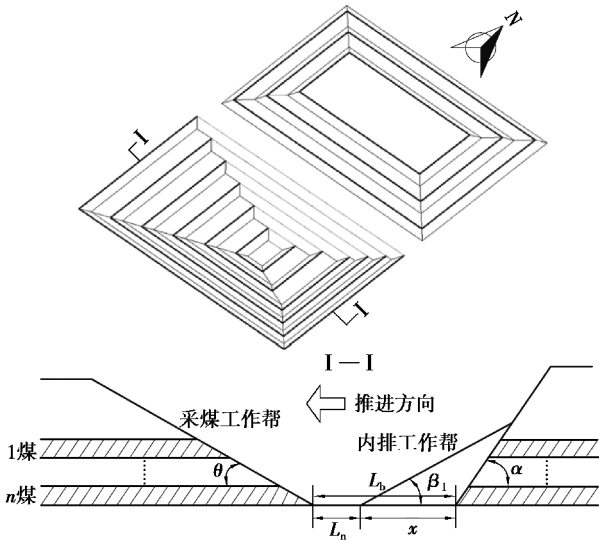


图 3 A 模式部分内排工程位置纵剖面图

Fig. 3 Longitudinal profile of A pattern part of inner dump engineering

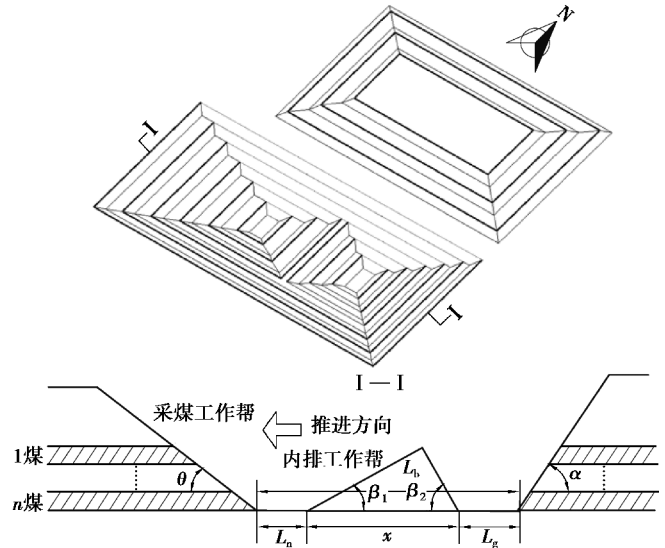


图 4 B 模式部分内排工程位置纵剖面图

Fig. 4 Longitudinal profile of B pattern part of inner dump engineering

1) A 模式(即首采区位于矿权一侧)

$$x = L_b - L_{\min}, \tag{3}$$

$$L_{\min} = L_n, \tag{4}$$

$$V_n = \frac{1}{2} x^2 \sin \beta_1 \left( \frac{\cos \beta_1 + \sin \beta_1}{\tan(\theta - \beta_1)} \right) L_p, \tag{5}$$

$$V_b = \left( H - \sum_{i=1}^n m_i \right) x L_c \gamma, \tag{6}$$

$$\mu = \frac{dV_n/dx}{dV_b/dx} = \frac{(\sin(2\beta_1) + 2 \sin^2 \beta_1 / \tan(\theta - \beta_1)) L_p}{2 \left( H - \sum_{i=1}^n m_i \right) L_c \gamma} x. \tag{7}$$

2) B 模式(即首采区位于矿权中部)

$$L_{\min} = L_n + L_g, \tag{8}$$

$$V_n = 1/2 x^2 \tan \beta_1 \tan \beta_2 (\tan \beta_1 + \tan \beta_2) L_p, \tag{9}$$

$$\mu = \frac{dV_n/dx}{dV_b/dx} = \frac{\tan \beta_1 \tan \beta_2 (\tan \beta_1 + \tan \beta_2) L_p}{\left( H - \sum_{i=1}^n m_i \right) L_c \gamma} x, \tag{10}$$

式(2)~(10)中: $\mu$ 为剥离物内排量占比,%; $x$ 为内排工作线推进度,m; $L_n$ 为内排安全距离,m; $L_g$ 为深部沟底宽度,m; $V_n$ 为部分内排期内排空间, $m^3$ ; $V_b$ 为部分内排期剥离物总体积, $m^3$ ; $m_i$ 为第*i*层煤的赋存厚度,m; $H$ 为开采深度,m; $L_p$ 为排土工作线长度,m; $L_c$ 为采煤工作线长度,m; $\beta_1$ 为内排土场工作帮坡角,(°); $\beta_2$ 为内排土场到界帮坡角,(°); $\gamma$ 为松散系数。

令  $K_a = \frac{(\sin(2\beta_1) + 2 \sin^2 \beta_1 / \tan(\theta - \beta_1)) L_p}{2 \left( H - \sum_{i=1}^n m_i \right) L_c \gamma}$ , 则有: $\mu = K_a x$ 。综上所述,A 模式部分内排期剥离成本

$b$  与内排工作线推进度  $x$  的关系可由式(13)表示:

$$b = K_a x b_n + (1 - K_a x) b_w, \tag{11}$$

$$b = b_w + (K_a b_n - K_a b_w) x, \tag{12}$$

$$n_{j2} = \frac{d_L - a}{b_w + (K_a b_n - K_a b_w) x}. \tag{13}$$

通过式(13),绘制其经济合理剥采比  $n_{j2}$  与内排工作线推进度  $x$  的关系曲线(图 5),其中:A 点坐标为  $(0, (d_L - a) / b_w)$ , B 点坐标为  $(b_w / (K_a b_n - K_a b_w) - K_a b_n, 0)$ 。

经分析图 5 可以得到以下结论:采用 A 模式(即首采区位于矿权一侧)其部分内排期的经济合理剥采比  $n_j$  与内排工作线推进度  $x$  的关系为正相关,内排工作线推进度  $x$  增大,经济合理剥采比  $n_j$  也随之增大。

同理,令  $K_b = \frac{\tan \beta_1 \tan \beta_2 (\tan \beta_1 + \tan \beta_2) L_p}{(H - \sum_{i=1}^n m_i) L_c \gamma}$ , 则有:  $\mu = K_b x$ 。B 模式部分内排期剥离成本  $b$  与内排

工作线推进度  $x$  的关系可由式(14)表示:

$$n_{j2} = \frac{d_L - a}{b_w + (K_b b_n - K_b b_w) x} \quad (14)$$

对于 B 模式而言,二采区与三采区两个横采方向都存在部分内排期。假定煤、岩赋存成对称分布,矿山工程发展规模相同,则 B 模式部分内排期经济合理剥采比  $n_j$  与内排工作线推进度  $x$  的关系曲线(图 6),其中: $A_1$  点坐标为  $(0, (d_L - a)/b_w)$ ,  $B_1$  点坐标为  $(b_w / (K_b b_w - K_b b_n), 0)$ ,  $A_2$  点坐标为  $(-L_g, (d_L - a)/b_w)$ ,  $B_2$  点坐标为  $(-b_w / (K_b b_w - K_b b_n), 0)$ 。

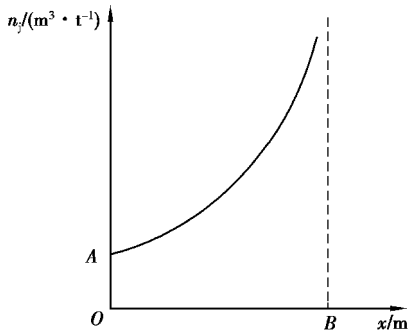


图 5 A 模式部分内排期  $n_j$  与  $x$  关系曲线

Fig. 5 The relation curve between  $n_j$  and  $x$  in

A pattern part of inner dump period

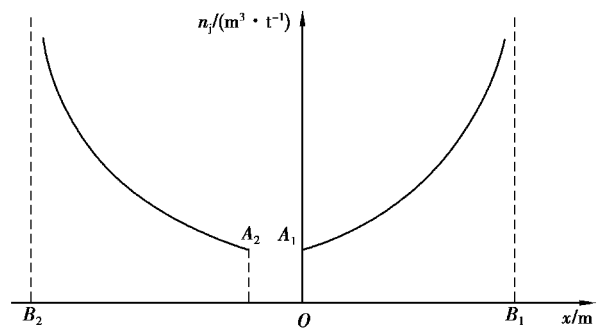


图 6 B 模式部分内排期  $n_j$  与  $x$  关系曲线

Fig. 6 The relation curve between  $n_j$  and  $x$  in

B pattern part of inner dump period

经分析图 6 可以得到以下结论:B 模式(即首采区位于矿权中部)其部分内排期经济合理剥采的比  $n_{j2}$  与内排工作线推进度  $x$  的关系也是正相关,内排工作线推进度  $x$  增大,经济合理剥采比  $n_{j2}$  也随之增大。

综上所述,对于倾斜煤层窄长露天矿两种开采模式而言,部分内排期的经济合理剥采比  $n_{j2}$  随内排工作线推进度  $x$  的变化规律是相同的:经济合理剥采比  $n_{j2}$  随内排工作线推进度  $x$  的增大而增大,内排工作线推进度  $x$  越大,经济合理剥采比  $n_{j2}$  越高。

### 2.2.3 全部内排期

随着采煤工作帮的逐渐推进,内排工作帮也不断跟进,内排工作线推进度  $x$  也逐渐增大,内排空间也被逐渐释放。依据微积分原理,内排工作线推进度  $x$  产生增量  $\Delta x$  时,内排增量  $\Delta V_n$  不小于增加的剥离增量  $\Delta V_b$  时,可认为露天矿正处于实现完全内排阶段时期<sup>[15]</sup>。内排成本  $b_n$  决定全部内排期的剥离成本,即:  $b = b_n$ , 经分析可知该时期的经济合理剥采比  $n_{j3}$  满足以下条件:  $n_{j3} = (d_L - a)/b_n$ 。同理,依据导函数定义,将  $V_n$ 、 $V_b$  对  $x$  求偏导,二者导函数  $f(x)$ 、 $g(x)$  交点的横坐标便是露天矿实现完全内排的初始位置  $x_{min}$ , 如图 7、图 8 所示。

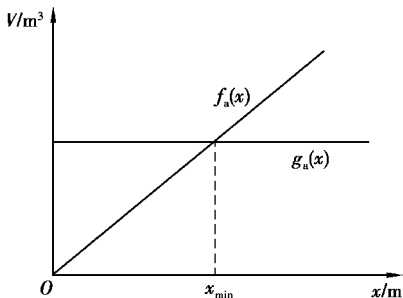


图 7 A 模式  $V_n$ 、 $V_b$  与  $x$  关系曲线

Fig. 7 The relation curve among  $V_n$ ,  $V_b$  and  $x$  in A pattern

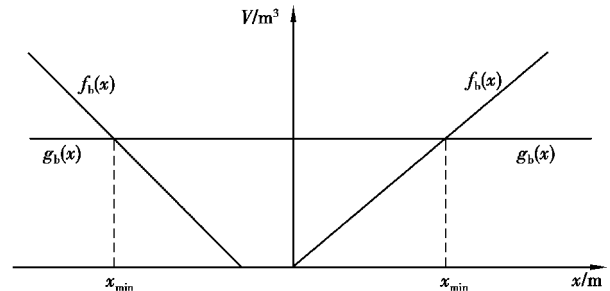


图 8 B 模式  $V_n$ 、 $V_b$  与  $x$  关系曲线

Fig. 8 The relation curve among  $V_n$ ,  $V_b$  and  $x$  in B pattern

1) A 模式(即首采区位于矿权一侧)

$$f_a(x) = \frac{dV_n}{dx} = \frac{1}{2} \left( \sin(2\beta_1) + \frac{2 \sin^2 \beta_1}{\tan(\theta - \beta_1)} \right) L_p x, \quad (15)$$

$$g_a(x) = \frac{dV_b}{dx} = (H - \sum_{i=1}^n m_i) L_c \gamma, \quad (16)$$

$$x_{amin} = \frac{2(H - \sum_{i=1}^n m_i) L_c \gamma}{(\sin(2\beta_1) + 2 \sin^2 \beta_1 / \tan(\theta - \beta_1)) L_p} \circ \quad (17)$$

2) B 模式(即首采区位于矿权中部)

$$f_b(x) = \frac{dV_n}{dx} = \tan \beta_1 \tan \beta_2 (\tan \beta_1 + \tan \beta_2) L_p x, \quad (18)$$

$$g_b(x) = \frac{dV_b}{dx} = (H - \sum_{i=1}^n m_i) L_c \gamma, \quad (19)$$

$$x_{bmin} = \frac{(H - \sum_{i=1}^n m_i) L_c \gamma}{\tan \beta_1 \tan \beta_2 (\tan \beta_1 + \tan \beta_2) L_p} \circ \quad (20)$$

依据 2 种开采模式经济合理剥采比  $n_j$  随内排工作线推进度  $x$  的逐期变化规律,绘制其全期  $n_j-x$  曲线。此外,根据经济合理剥采比  $n_j$  增大,经济合理开采深度也随着增大的特点,为了使研究更加深入,现对其建立最终境界平面优化模型。

A 模式全期  $n_j-x$  曲线如图 9 所示,最终境界平面优化模型如图 10 所示。其中,A 点坐标为  $(-L_n, n_{j1})$ , B 点坐标为  $(0, n_{j1})$ , C 点坐标为  $(x_{amin}, n_{j3})$ , D 点坐标为  $(L, n_{j3})$ 。A—B 段为完全外排期, B—C 段为部分内排期, C—D 为完全内排期。

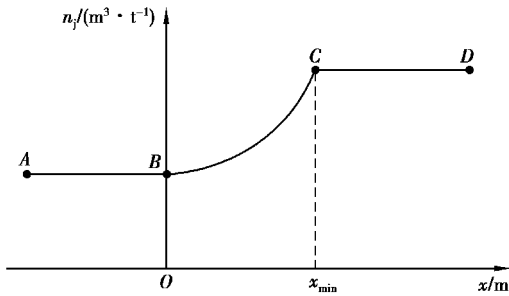


图 9 A 模式经济合理剥采比逐期变化曲线  
Fig. 9 Economic stripping ratio every period changes curve of A pattern

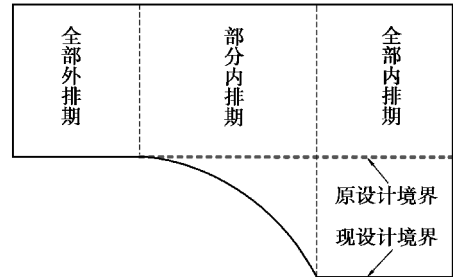


图 10 A 模式分期境界优化模型  
Fig. 10 A pattern of staging limit surface mining the optimization model

B 模式全期  $n_j-x$  曲线如图 11 所示,最终境界平面优化模型如图 12 所示。其中,  $B_1$  点坐标为  $(0, n_{j1})$ ,  $B_2$  点坐标为  $(-L_g, n_{j1})$ ,  $C_1$  点坐标为  $(x_{bmin}, n_{j3})$ ,  $C_2$  点坐标为  $(-x_{bmin}, n_{j3})$ ,  $D_1$  点坐标为  $(L/2, n_{j3})$ ,  $D_2$  点坐标为  $(-L/2, n_{j3})$ 。  $B_1-B_2$  为全部外排期,  $B_1-C_1$  与  $B_2-C_2$  为部分内排期,  $C_1-D_1$  与  $C_2-D_2$  为全部内排期。

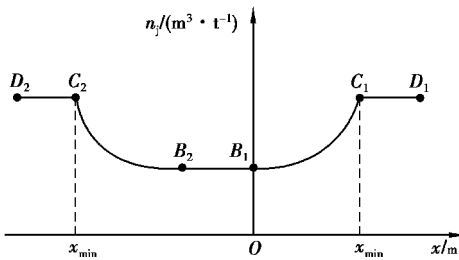


图 11 B 模式经济合理剥采比逐期变化曲线  
Fig. 11 Economic stripping ratio every period changes curve of B pattern

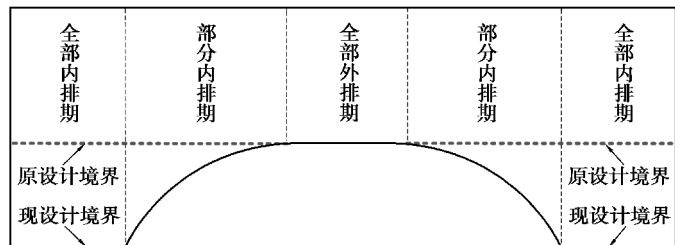


图 12 B 模式分期境界优化模型  
Fig. 12 B pattern of staging limit surface mining the optimization model

综上所述,设计采用纵采转横采内排开采程序的倾斜煤层窄长露天矿,在其全期开采过程中满足以下规律:经济合理剥采比逐期增大,经济合理开采深度也逐期增加;A 模式分期境界优化模型为“刀”形,B 模式分期境界优化模型为“凹”形;分期优化境界较原设计境界加大,经济可采储量增加。但是,由于部分内排期与全部内排期优化境界的扩大,必然使其工作线长度增加,反过来会影响生产成本的大小。据专家统计,工作线长度每增加 100 m,生产成本约增加 0.1 元,因此可忽略其影响。

### 3 实例分析

神华集团神新公司准东露天煤矿位于准东煤田西部矿区的东部,该矿田储量丰富、资源可靠,地层为一单斜构造,沿走向和倾向产状变化不大,无断层破坏。露天矿地表境界东西宽 2.72 km,南北长 8.58 km,面积 24.49 km<sup>2</sup>,开采深度可达 380 m。矿权范围内赋存的主采煤层为单一巨厚煤层 BM 煤层,平均可采厚度 69.43 m,煤层倾角为 8°~20°,表现为浅部陡、深部缓,是一个典型的倾斜煤层窄长形露天矿。初步设计开采程序选用纵采转横采内排开采程序。准东露天矿主要开采参数分别为:煤炭售价  $d_L$  为 75 元,运营成本 26.4 元;采煤成本  $a$  为 18.36 元/t,采煤工作线长度  $L_c$  为 1 000 m,工作帮坡角为  $\alpha$  为 12°,非工作帮坡角  $\theta$  为 35°;剥离物外排成本  $b_w$  为 20.16 元/m<sup>3</sup>,外排土场帮坡角  $\varphi$  为 22°,剥离物松散系数  $\gamma$  为 1.25;内排成本为 18.65 元/m<sup>3</sup>,内排土场工作帮坡角  $\beta_1$  为 13°,内排工作线长度  $L_p$  为 1 000 m,内排安全距离  $L_{\min}$  为 67 m。准东露天煤矿按照经济合理剥采比 1.50 m<sup>3</sup>/t,并采用传统手工法圈定开采境界。设计境界范围内可采煤量为 743.35 Mt(采出率为 0.97),平均剥采比为 1.15 m<sup>3</sup>/t。此外,准东露天煤矿初步计境界倾向宽度与矿权范围倾向宽度差 67 m 距离。

采用分期境界优化原理对准东露天煤矿分析可知:单向横采能够满足准东露天煤矿产能规划要求,煤层赋存情况适合采用 A 模式进行优化,故选取地势较低、煤层赋存较浅的矿权北部作为准东露天煤矿首采区。生产初期首采区实行纵采开采程序,随着剥、采工程的发展,首采区西帮逐步实行靠帮开采,待超前降深工程完成后,开始将纵采开采程序逐步过渡为横采开采程序,并开始进行压帮内排。通过 A 模式原理分析计算,最终得到准东露天煤矿 3 个时期的经济合理剥采比:全部外排期  $n_{j1} = 1.50 \text{ m}^3/\text{t}$ ,部分内排期  $n_{j2} = 30.24/(20.16 - 0.001 \cdot 3x)$ ,以及全部内排期  $n_{j3} = 1.62 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

在准东露天煤矿矿权范围内选取典型剖面,并采用横剖面边帮线段比法来确定其 3 个时期的经济合理开采深度,分别为:全部外排期经济合理开采深度为 378.8 m,部分内排期经济合理开采深度由 378.8 m 逐步扩大至 403.5 m,全部内排期的经济合理开采深度为 403.5 m,全部内排期外扩距离较全部外排期增加了 45.65 m < 67 m(未超出矿权范围),且有全部内排的初始位置  $x_{\min}$  为 1 161.54 m。综上分析可知,准东露天煤矿分期境界优化后,经济合理剥采比  $n_j$  随内排工作线推进度  $x$  的变化规律可由图 13 曲线表示。

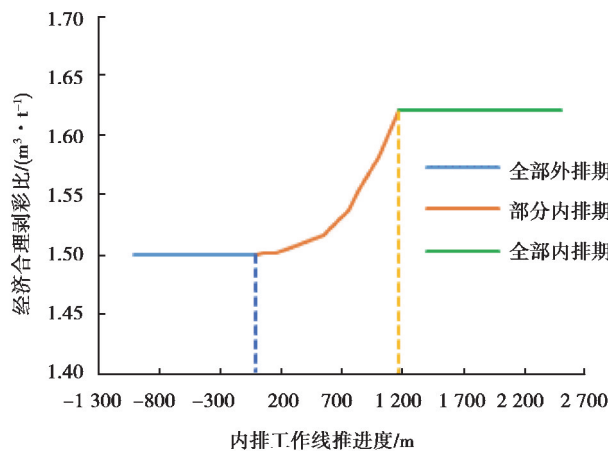


图 13 准东露天煤矿  $n_j$  与  $x$  关系曲线

Fig. 13 The relation curve between  $n_j$  and  $x$  in Zhundong surface coal mine



按照确定的准东露天煤矿各时期剖面边帮位置,并联系已确定的到界边帮参数,进行绘制虚拟最终帮。然后通过已给出的煤岩层层位信息利用三维坐标转换的方法将剖面反映到真实的三维空间地理位置。最后,在其真三维空间背景下,将所绘制的各剖面虚拟最终帮按照真实的标高信息按照顺序拼接起来,最终完成东露天煤矿的三维模拟境界构建。此外,依据圈定的准东露天煤矿三维模拟境界,构建三维仿真开采境界 DTM 模型,如图 14。这样所圈定的仿真境界相当于是一个内空的盒子,在盒子内建立块体模型,相当于采用块体填满整个开采境界。此外,依照煤岩层层位信息建立矿岩属性数据库(包括:岩性,容重等),将矿岩属性数据赋予块体模型,得到准东露天矿层状块体地质模型<sup>[15-16]</sup>,如图 15 所示。

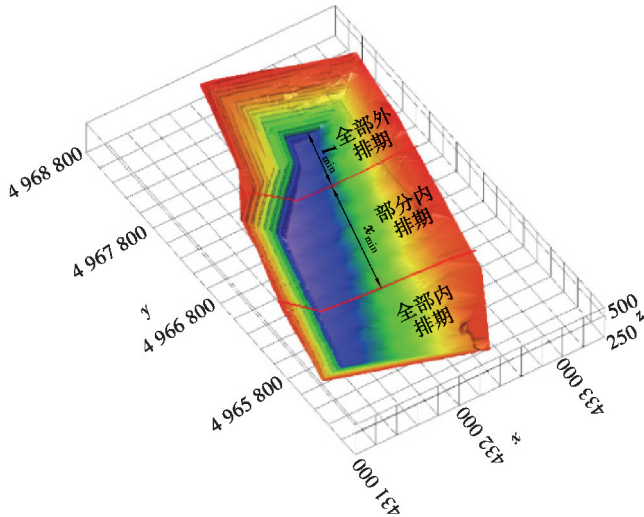


图 14 准东露天煤矿优化设计境界

Fig. 14 The optimization limit of Zhundong surface coal mine

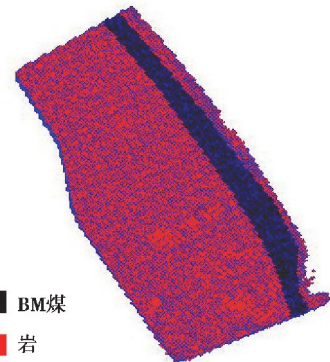


图 15 准东露天矿层状块体地质模型

Fig. 15 Layered block geological model of Zhundong surface coal mine

三维仿真开采境界内的块体总量相当于准东露天矿整个矿区要开采的矿岩总量,煤层顶板与煤层底板之间的块量为煤量,剩余量为岩量。对准东露天煤矿分期优化境界进行属性块体报量,结果为:分期优化境界内的可采煤量为 828.62 Mt,同初步设计境界相比经济可采储量增加了 85.27 Mt,平均剥采比变为 $1.21 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

表 1 准东露天矿优化境界量表

Table 1 The optimizing limits of Zhundong surface coal mine

分期名称	煤量/Mt	岩量/ $\text{Mm}^3$	平均剥采比/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$
全部外排期	123.56	133.44	1.08
部分内排期	216.35	244.47	1.13
全部内排期	488.71	625.55	1.28
全期合计	828.62	1 003.47	1.21

## 4 结 论

1) 设计采用纵采转横采内排开采程序的倾斜煤层窄长露天矿,依据首采区位置的不同,可划分为 A 模式(即首采区位于矿权一侧)和 B 模式(即首采区位于矿权中部)两种开采模式。

2) 随着剥采工程的发展,两种开采模式都遵循以下规律:经济合理剥采比逐期增大、经济合理开采深度逐期增加、顶帮外扩距离逐期增加。

3) 倾斜煤层窄长露天矿两种开采模式的分期优化境界满足以下规律:A 模式境界优化模型为“刀”形,B 模式境界优化模型为“凹”形;分期优化境界较原设计境界加大,经济可采储量增加。

4) 依照神华集团神新公司准东露天矿产能要求及矿石赋存条件, 选用 A 模式对其开采境界进行了分时期优化分析, 研究结果验证了上述结论: 准东露天矿的经济合理剥采与其开采境界优化前相比, 由原来的  $1.50 \text{ m}^3/\text{t}$  增加至  $1.62 \text{ m}^3/\text{t}$ , 其经济合理开采深度增加了 24.7 m, 顶帮外扩距离增加了 45.65 m, 经济可采储量增加了 85.27 Mt。

#### 参考文献:

- [1] Goodwin G C, Seron M M, Mayne D Q. Optimization opportunities in mining, metal and mineral processing[J]. Annual Reviews in Control, 2008, 32(1): 17-32.
- [2] 杨彪, 罗周全, 陆广, 等. 基于经济时间序列预测的露天矿开采境界动态优化[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 29-33.  
YANG Biao, LUO Zhouquan, LU Guang, et al. Open pit mining limit dynamic optimization based on economic time series forecasting[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 29-33. (in Chinese)
- [3] 马帅. 基于浮动圆锥法的三道庄露天矿境界优化[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.  
MA Shuai. Limit optimization of the Sandaozhuang Mo-W deposit based on floating cone algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [4] 张延凯, 李克庆, 胡乃联, 等. 露天矿境界优化 LG 算法初始有向图生成研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S2): 367-373.  
ZHANG Yankai, LI Keqing, HU Nailian, et al. A study of generating the initial directed graph for LG algorithm of open pit optimization[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 367-373. (in Chinese)
- [5] Wright E A. The use of dynamic programming for open pit mine design: Some practical implications[J]. Mining Science and Technology, 1987, 4(2): 97-104.
- [6] Alford C G, Whittle J. Application of Lerchs-Grossman pit optimization to the design of open pit mines[J]. Symposia Series-Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1986, 5(4): 201-207.
- [7] Herner B. Neutral sizing system allows fast, easy conversion for acid machine[J]. Pulp and Paper, 2001, 64(1): 154-163.
- [8] 白润才, 白文政, 刘光伟, 等. 倾斜煤层窄长形露天矿横采内排分期境界优化[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2601-2608.  
BAI Runcai, BAI Wenzheng, LIU Guangwei, et al. Installment boundary optimization of cross exploitation and inner dumping in the inclined coal seam narrow elongated open-pit mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2601-2608. (in Chinese)
- [9] 王岩, 王为举. 露天煤矿开采境界与经济剥采比确定[J]. 现代矿业, 2011, 27(12): 83-85.  
WANG Yan, WANG Weiju. Determination of state and economic stripping ratio of open-pit mines [J]. Express Information of Mining Industry, 2011, 27(12): 83-85. (in Chinese)
- [10] Giannini L M. Optimum design of open pit mines[D]. Perth: Curtin University of Technology, 1990.
- [11] Erarslan K, Celebi N. A simulative model for optimum open pit design[J]. CIM Bulletin, 2001, 94(1055): 59-68.
- [12] 母传伟, 王先锋, 杨维菁, 等. 矿山汽车运输经济合理运距研究[J]. 金属矿山, 2015(7): 48-51.  
MU Chuanwei, WANG Xianfeng, YANG Weijing, et al. Research on cost-effective distance of automobile transport in open-pit mines[J]. Metal Mine, 2015(7): 48-51. (in Chinese)
- [13] Giannini C L. Generation of minimum search patterns in the optimum design of open pit mines[J]. Aus IMM Bulletin and Proceedings, 1998, 293(5): 57-61.
- [14] 周伟, 才庆祥, 李玉鹏, 等. 大型近水平露天煤矿内排压帮高度研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(1): 53-55.  
ZHOU Wei, CAI Qingxiang, LI Yupeng, et al. Study on inner dumping covering height in large near horizontal surface Mine[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(1): 53-55. (in Chinese)
- [15] 白润才, 付恩三, 刘光伟, 等. 露天煤矿过无煤区留“岛”搭桥开采方案优化[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(9): 128-135.  
BAI Runcai, FU Ensan, LIU Guangwei, et al. Optimization research on leaving an “island” and building a bridge through non-coal-zone in surface coal mine[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(9): 128-135. (in Chinese)
- [16] Armstrong A, Champigny N. A study on kriging small block[J]. Canadian Institute of Mining Bulletin, 1989, 3: 128-133.