



# 季节性剥离露天煤矿工作帮形态动态控制及推进强度优化

刘光伟 黄云龙 曹博 姚勇

## 引用本文:

刘光伟, 黄云龙, 曹博, 等. 季节性剥离露天煤矿工作帮形态动态控制及推进强度优化[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 45–54.

LIU Guangwei, HUANG Yunlong, CAO Bo. Dynamic control of working slope shape and optimization of advance speed in seasonally stripped open-pit coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 45–54.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0621>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 露天煤矿工作帮过断层参数控制方法

Parameter control method of working slope passing fault in open-pit coal mine

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 56–65 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0837>

#### 基于形态与支挡效应的露天矿到界边坡形态优化

Open-pit mine slope optimization with the morphology and spatial support effect

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 66–71 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0781>

#### 高推进强度下黑岱沟露天矿合理产能研究

Study on reasonable production capacity as high advance speed in Heidaigou Open-pit Mine

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/092b5b7b-b737-465c-a31f-d6640ab17210>

#### 复合煤层露天矿软岩边坡参数逐阶段优化方法研究

Study on stage-by-stage optimization method for slope parameters of soft rock open-pit mine in composite coal seam

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/221a3761-ff79-4f03-84ad-f110a2b0c05f>

#### 露天煤矿产能核增影响下采区划分研究

Study on division of mining area under influence of production capacity increasing of open-pit coal mine

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 63–70 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1125>

#### 论露天煤矿智能化建设总体设计

Overall design of intelligent construction in open pit coal mines

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 37–46 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7aab28e5-c0a7-4130-b4fb-100b927e3bbe>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘光伟, 黄云龙, 曹博, 等. 季节性剥离露天煤矿工作帮形态动态控制及推进强度优化[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 45–54.

LIU Guangwei, HUANG Yunlong, CAO Bo, et al. Dynamic control of working slope shape and optimization of advance speed in seasonally stripped open-pit coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 45–54.

# 季节性剥离露天煤矿工作帮形态动态控制及推进强度优化

刘光伟<sup>1</sup>, 黄云龙<sup>1</sup>, 曹博<sup>1</sup>, 姚勇<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 锡林郭勒盟蒙东矿业有限责任公司, 内蒙古 锡林浩特 026000)

**摘要:** 季节性剥离露天煤矿由于剥离工程的不连续性使得工作帮超前推进距离巨大, 为了减小超前剥离、节省剥离运距, 从季节性剥离露天煤矿工作帮形态动态控制、工作帮极限推进强度优化确定进行研究。阐述了季节性剥离露天煤矿工作帮形态及作业程序, 分析了工作帮形态及推进强度影响因素。根据季节性剥离露天煤矿工作帮结构形式和采剥作业方式, 建立了工作帮形态优化工程模型, 论述了工作帮循环推进距离与作业平盘宽度和采场露煤方式的关系; 计算了组合台阶循环推进工程量和分层设备生产能力, 给出了工作帮循环推进时间以及端帮运输系统可靠性计算方法。以最小化剥离物运输功为优化目标、剥采工程时空接续为约束条件建立了季节性剥离露天煤矿工作帮形态优化数学模型并引入序列二次规划算法(SQP)进行非线性规划求解。提出通过确定剥离台阶组合方式和作业平盘宽度实现季节性剥离露天煤矿工作帮形态动态控制的方法、剥离工作帮极限推进度优化确定方法。以胜利西二号露天煤矿为工程背景, 将上述优化控制方法进行应用研究, 通过建立剥离工作帮形态优化模型并将西二露天矿实际参数代入进行计算求解。结果表明: 当组合台阶中台阶数目为5、作业平盘宽度为89 m时, 工作帮推进满足剥采工程时空接续要求, 且剥离物运输功最小。该形态下工作帮极限推进度为320 m/a, 分析确定了台阶组合方式及循环推进距离变化时工作帮极限推进强度变化规律。

**关键词:** 露天煤矿; 季节性剥离; 组合台阶; 工作帮; 序列二次规划 (SQP); 推进度

**中图分类号:** TD824      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2023)10-0045-10

## Dynamic control of working slope shape and optimization of advance speed in seasonally stripped open-pit coal mine

LIU Guangwei<sup>1</sup>, HUANG Yunlong<sup>1</sup>, CAO Bo<sup>1</sup>, YAO Yong<sup>2</sup>

(1. Institute of Mining Technology, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Xilin Gol Mengdong Mining Co., Ltd., Xilinhot 026000, China)

**Abstract:** Due to the discontinuity of the stripping project in seasonal stripping open-pit coal mines, the untimely advance distance of the working slope is huge. In order to reduce the advance stripping and save the stripping distance, research was carried out on dynamic control of the shape of the working slope and optimization of the limit advance speed of the working slope in seasonal stripped open-pit coal mines. This paper explains the shape and operation procedure of the working slope in seasonal stripped open-pit coal mines and analyzes factors that influence working slope shape and advance speed. Based on structural form of working slope and stripping operation mode of seasonally stripped open-pit coal mines, an engineering model for shape optimization of working slope is established. The relationship between circular advance distance of working slope with working bench width and exposed coal mode of stope is discussed. Bench group cycle advance engineering quantity and production capacity of layered equipment, advance time of the working slope cycle and calculation method for reliability of side slope transportation system are given. With optimization goal of minimizing transport work of stripping

收稿日期: 2023-04-27      责任编辑: 朱恩光      DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0621

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974144); 辽宁省揭榜挂帅资助项目(2021JH1/10400011); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-07)

作者简介: 刘光伟(1981—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师。E-mail: liu\_guangwei@yeah.net

通讯作者: 黄云龙(1994—), 男, 山西朔州人, 博士研究生。E-mail: lgdckgchyl@163.com

material and time-space continuity of stripping engineering as constraint condition, mathematical model for shape optimization of working slope in seasonally stripped open-pit coal mine is established. Sequential quadratic programming algorithm (SQP) is introduced to solve nonlinear programming. A method to realize dynamic control of shape of working slope of seasonally stripped open-pit coal mine by determining combination mode of stripping benches and working bench width and a method to optimize limit advance speed of stripped working slope are proposed. Taking Shengli West No.2 Open-pit Coal Mine as an engineering background, above-mentioned optimization control method is applied for research and calculation and solution are carried out by establishing form optimization model of stripping working slope and substituting actual parameters of West No.2 Open-pit Mine. Results show that when the number of benches in bench group is 5 and working bench width is 89 m, advance of working slope meets the requirements of space-time continuity in stripping engineering and transport work of stripped objects is smallest. In this shape, limit advance speed of the working slope is 320 m/a, and change of limit advance speed of the working slope is analyzed and determined when combination of benches and cyclic advance distance is changed.

**Key words:** open-pit coal mine; seasonally stripped; bench group; working slope; sequential quadratic programming (SQP); advancing speed

## 0 引言

煤炭是我国的主体能源和重要原料,长期以来为经济社会发展和国家能源安全稳定供应提供了有力保障<sup>[1-2]</sup>。近年来,我国大力发展新能源技术,但依然没有改变我国以煤电为主的电力结构<sup>[3]</sup>。露天煤炭产量一直保持着良好的增长势头,占全国煤炭总产量的比重稳步升高<sup>[4]</sup>。露天煤矿的降本增效开发是实现煤炭行业高质量发展的重要内容。

我国幅员辽阔,经度、纬度、地面高程跨度很大。寒区面积占我国陆地面积的43.5%<sup>[5-6]</sup>,主要分布于青藏高原、东北地区、内蒙古东北部及新疆部分地区。高寒地区冬季漫长而寒冷,为有效避开冬季恶劣的剥离施工条件,降低生产成本,高寒地区露天煤矿剥离工程多采用季节性作业。将剥离工程集中在气候条件较好的时期,形成超前剥离<sup>[7-8]</sup>,剥离停滞期间采煤作业仍继续进行。我国大部分露天煤矿的剥离工艺为“单斗-卡车”间断工艺,广泛采用剥离工程外包生产模式<sup>[9]</sup>。为了减小超前剥离,节省剥离物内排运距,季节性剥离露天煤矿工作帮常采用组合台阶循环保进作业。工作帮形式、台阶组合方式、采场露煤方式等直接影响剥离工作帮形态。

围绕露天矿工作帮形态及季节性剥离露天煤矿剥采工程优化,周志友<sup>[10]</sup>、孙明亮等<sup>[11]</sup>分别分析了组合台阶开采工艺特点,阐述了组合台阶开采的重要意义以及组合台阶在露天矿实际生产中的应用;刘宇等<sup>[12]</sup>对组合台阶在哈尔乌素露天煤矿应用的具体参数进行了优化确定;白润才等<sup>[13]</sup>根据季节性剥离露天煤矿剥离工程的不连续性,提出了在采场和内排土场之间设置临时排土桥的方式来优化露天煤矿内排开拓运输系统;张周爱等<sup>[7]</sup>分析了季节性剥离露天矿剥离工程外包的特点,以宝日希勒露天煤

矿为工程背景,给出了采场露煤次数及储备煤量的优化方法,提出了合理的采场露煤方案;马忠辉等<sup>[14]</sup>利用露天煤矿边坡岩土强度的季节性差异,提高了冬季开采时端帮靠帮开采边坡角,提高了端帮煤炭资源回收量,增加了经济效益。陆翔<sup>[15]</sup>研究了寒区露天矿泥岩边坡冻融机理,结合时效边坡理论及露天开采原理,提出了近水平煤层露天矿端帮煤层季节性控制开采方法。

笔者基于相关研究成果,围绕季节性剥离露天煤矿工作帮形态动态控制进行研究。分析季节性剥离露天煤矿生产作业特点,将采矿工程问题抽象为相关非线性优化数学模型并引入序列二次规划算法进行求解,提出季节性剥离露天煤矿工作帮形态动态控制方法和工作帮极限推进度优化确定方法。并以胜利西二号露天煤矿为背景进行工程应用研究,确定了最优剥离工作帮形态、工作帮极限推进度。

## 1 季节性剥离露天煤矿工作帮形态及影响因素

### 1.1 季节性剥离露天煤矿工作帮形态

季节性剥离露天煤矿由于其剥离作业集中于气候条件较好的时段,工作帮需要进行超前剥离以揭露足够的可采煤量以及储备煤量。为了推迟剥离、调节生产剥采比,常采用组合台阶作业方式增大工作帮坡角,进而节省运距,降低生产成本。

常见的台阶组合方式为:把若干个相邻的开采台阶人为的划分为1组,在每一组台阶中同一时间内只设一个工作平盘和只在一个台阶进行采剥作业,这一组台阶就称之为组合台阶,如图1所示。图1中所表示组合台阶为H<sub>1</sub>及H<sub>2</sub>两组,每组均由3个开采台阶组成,每组中同时按1、2、3及1'、2'、3'顺序进行采剥,完成一个循环之后形成图中虚线所示状态,之后在新的位置上按同样的方式进行采剥工

作,一直循环到预定的开采位置为准<sup>[16]</sup>。其中组合台阶高度即台阶组合方式以及每次循环推进距离为影响经济效果和技术复杂程度的关键性因素,影响露天矿山生产规模、工作帮年推进度以及工作线长度等。

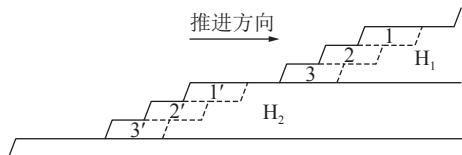


图1 组合台阶构成示意

Fig.1 Schematic diagram of composition of bench group

根据组合台阶作业程序,当各组组合台阶均完成一次作业循环时,工作帮方可向前推进一定距离。因此,组合台阶内台阶数目越多,完成一次循环推进时间越长,剥离作业期内循环作业次数越少,工作帮坡角越大。反之,组合台阶内台阶数目越少,完成一次循环时间越短,剥离作业期内循环作业次数越多,工作帮坡角越小,剥离物端帮运距越大。

## 1.2 工作帮形态及推进度影响因素

1)采场露煤方式。煤矿露天开采的实质是将煤层上部岩石覆盖层剥离掉,使煤层敞露于地表后进行开采的过程,因此煤层的可采程度决定于剥离工程的进行程度。对于全年剥离作业的露天煤矿,开采方式为“随采随露”,工作帮不存在超前剥离,只需留设少量的储备煤量以满足开拓降深工程及剥离准备工作需要。因此,采煤台阶推进速度略小于剥离工作帮推进速度,也即采煤速度略小于露煤速度;季节性剥离露天煤矿由于剥离作业时间短,需要在剥离作业期间揭露大量的可采煤量来保证生产的接续,所以采煤速度远小于露煤速度。

季节性剥离露天矿进行露煤作业时,露煤时长为剥离工作帮推进时长。全年一次露煤时,剥离工作帮沿推进方向完成一次循环推进。需要留设的储备煤量巨大,造成煤层揭露面积过大,不仅增加了煤层自燃的风险,而且大幅提高了剥离物内排运距。全年多次露煤时,可以有效缩短内排运距,降低煤层自燃风险,但剥离工作帮在完成一次循环推进后设备调动频繁,减小了设备实际作业时长,影响了设备能力的发挥。

2)作业平盘宽度。组合台阶作业平盘宽度由循环推进距离和非作业平盘宽度构成。平盘宽度过大,达不到提高帮坡角的目的,平盘过窄,不利于设备作业,造成设备效率下降。

3)剥离台阶组合方式。剥离台阶组合方式即为

一组台阶内台阶数目,台阶数目越多,组合台阶高度越大,工作帮越陡。组合台阶内台阶数目是实行组合台阶推进,提高工作帮坡角的重要依据。

4)运输道路可靠性。实行内排作业的露天煤矿在开采过程中工作帮产生剥离物料一般通过端帮道路运输至内排土场,端帮道路的通过能力应与工作帮剥离量相适应。工作帮循环推进距离过大时,通过端帮运输道路的剥离量过大,会导致端帮运输道路行车密度超过规定最大行车密度值。

5)年剥离作业时间。季节性剥离露天煤矿须在剥离作业期内完成相应的剥离任务,来保证足够的露煤量,满足产能稳定接续的要求。工作帮形态不发生变化时,年剥离作业时间越长,工作帮推进能力越大。

## 2 组合台阶工作帮推进分析

### 2.1 工作帮推进工程模型

为了优化季节性剥离露天煤矿剥离工作帮形态,根据组合台阶作业程序及工作帮形态影响因素分析结果。基于以下前提条件:①工作帮采用组合台阶推进,各组组合台阶内分层参数一致;②采场露煤方式为全年多次露煤;③工作帮形式为纵向工作帮。建立季节性剥离露天矿复合煤层工作帮推进工程模型如图2所示。

假设可采煤层2层,分别为A煤和B煤,煤层近水平赋存。组合台阶作业平盘内划分若干剥离作业区,各作业区布置数组设备,共同完成工作面的剥离任务,各煤层台阶推进速度相同。端帮也为组合台阶,由运输平盘和安全平盘组成,每组台阶内只留设1个运输平盘,其余均为安全平盘。

模型参数定义如下: $B_a$ 为工作帮年推进度,m/a; $h_a$ 为A煤厚度,m; $h_b$ 为B煤厚度,m; $L_a$ 为A煤底板剥离工作线长度,m; $L_b$ 为B煤底板剥离工作线长度,m; $D$ 为端帮运输平盘宽度,m; $d$ 为端帮保安平盘宽度,m; $c$ 为最小剥离作业区长度,m; $h$ 为台阶高度,m; $B$ 为组合台阶一次推进距离,m; $b$ 为组合台阶非作业平盘宽度,m; $B_p$ 为组合台阶作业平盘宽度,m; $n$ 为组合台阶中台阶数目; $\alpha$ 为台阶坡面角,(°); $M$ 为台阶组数。

以下依据建立的工程模型及定义的模型参数进行分析。

### 2.2 循环推进距离及露煤分析

#### 2.2.1 循环推进距离

组合台阶作业的实质为:交替完成将剥离台阶

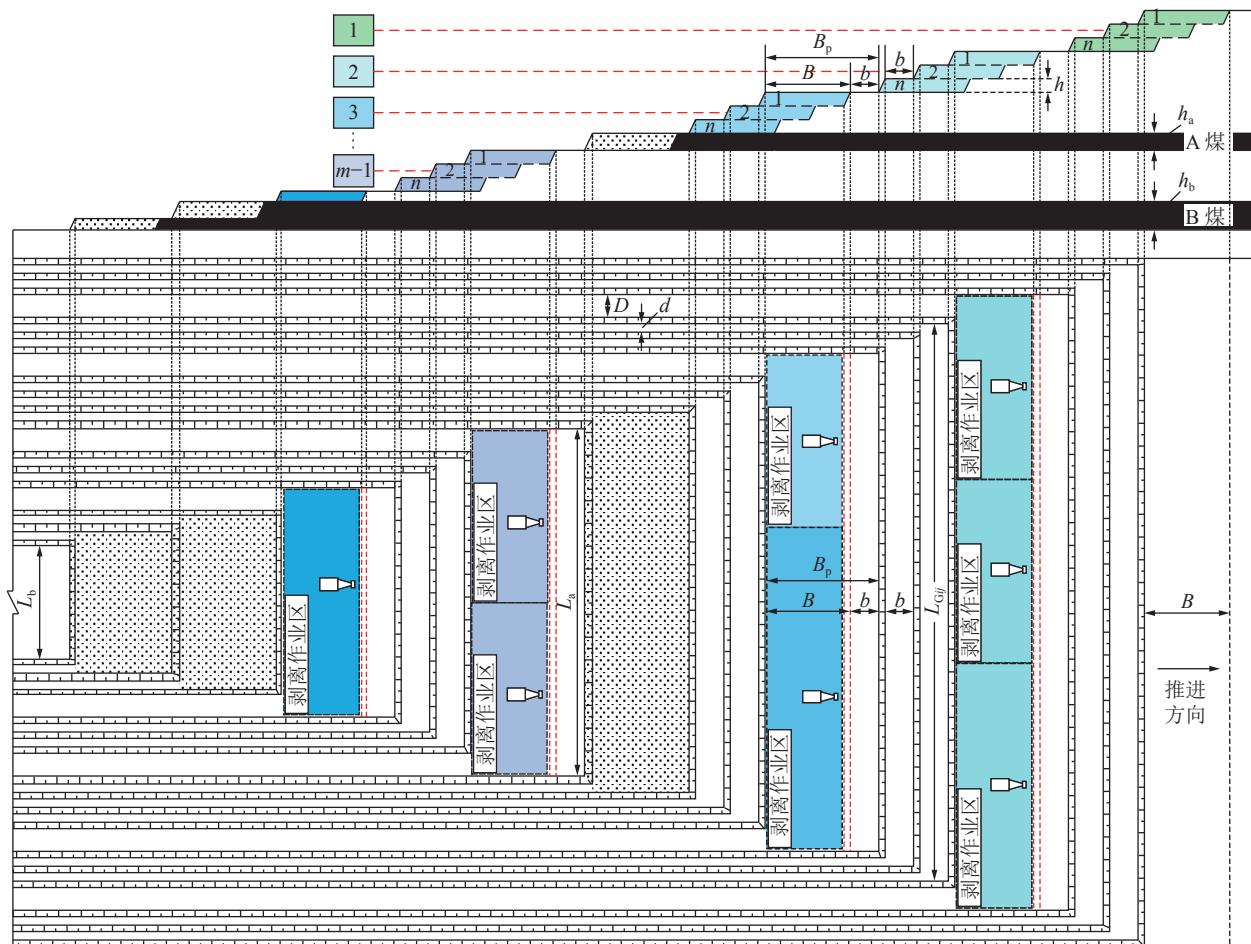


图2 季节性剥离露天煤矿工作帮推进工程模型

Fig.2 Engineering model for advancing the working slope of seasonally stripped open pit coal mines

由工作平盘变换为非工作平盘, 非工作平盘变换为工作平盘的作业过程的循环。在此过程当中平盘宽度是动态变化的, 组合台阶完成一次循环向前推进距离可表示为式(1), 即作业平盘宽度与非作业平盘宽度的差值, 循环推进距离的大小取决于组合台阶中作业平盘宽度。

$$B = B_p - b \quad (1)$$

### 2.2.2 采场露煤方式与循环推进距离关系

采场全年单次露煤时, 工作帮循环推进距离为年推进度。采场全年多次露煤时, 若每次揭露煤量相同, 剥离工作帮每次循环推进距离一致; 若每次揭露煤量不同, 则剥离工作帮循环推进距离与坑内原煤可采时间有关。

设每次揭露煤量为  $M_k$ ,  $k=1, 2, \dots, s$ 。则揭露原煤量与工作帮循环推进距离的关系为

$$M_k = B\gamma\mu(h_aL_{pa} + h_bL_{pb}) \quad (2)$$

式中:  $M_k$  为剥离工作帮向前推进距离  $B$  时采场揭露煤量, t;  $\gamma$  为原煤容重,  $t/m^3$ ;  $\mu$  为原煤采出率;  $L_{pa}$  为 A

煤平均工作线长度, m;  $L_{pb}$  为 B 煤平均工作线长度, m。

露煤可采时间可用式(3)表示, 且应满足式(4)中关系。

$$T_k = \frac{M_k}{q_m N_c} \quad (3)$$

$$T_c = \begin{cases} \sum_{k=1}^s \frac{T_k}{24} & \text{非等量露煤} \\ s \frac{T_k}{24} & \text{等量露煤} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $T_k$  为露煤可采时间, h;  $q_m$  为采煤设备实际生产能力,  $t/(台\cdot h)$ ;  $N_c$  为采煤设备数量, 台;  $T_c$  为年采煤作业时间, d。

季节性剥离露天矿冬季不进行剥离, 坑内可采煤量除正常的接续煤量外, 还应留有剥离停滞期储备煤量。因此在实际生产过程中应当在保证采煤接续的情况下优化储备煤量的留设方式, 从而尽可能减小每次循环推进工作帮超前剥离量, 以实现控制生产剥采比, 减小内排运距的目的。

## 2.3 工作帮循环推进时间

### 2.3.1 循环推进工程量

设工作帮从上至下有多组组合台阶, 分别为  $i=1, 2, \dots, m$ , 每组合台阶内各分层从上至下编号依次为  $j=1, 2, \dots, n$ 。依据建立的组合台阶工作帮推进工程模型, 可计算得出一组组合台阶内单个分层推进一次完成的工程量, 如式(5)所示。

$$Q_{ij} = BhL_{Gij} \quad (5)$$

其中, 当前台阶与下部相邻分层剥离工作线长度关系为

1)当前分层与端帮运输平盘同水平时:

$$L_{Gij} - L_{Gij+1} = 2\left(D + \frac{h}{\tan \alpha}\right) \quad (6)$$

2)当前分层与端帮保安平盘同水平时:

$$L_{Gij} - L_{Gij+1} = 2\left(d + \frac{h}{\tan \alpha}\right) \quad (7)$$

式中:  $Q_{ij}$  为第  $i$  组组合台阶内第  $j$  个分层向前推进距离  $B$  完成的工程量,  $\text{m}^3$ ;  $L_{Gij}$  为第  $i$  组组合台阶内第  $j$  个分层的剥离工作线长度,  $\text{m}$ 。

### 2.3.2 各分层设备生产能力

组合台阶工作帮推进时, 每组合台阶中仅有一个平盘进行采掘作业, 因此生产能力与该平盘设备布置情况有关。已知剥离设备作业区最小长度为  $c$ , 则可以计算出平盘上可以布置的最大设备组数如式(8)所示。

$$N_{s, \max} = \left\lfloor \frac{L_{Gij}}{c} \right\rfloor \quad (8)$$

式中:  $N_s$  为组合台阶作业平盘布置设备组数, 组 ( $N_s \in [1, N_{s, \max}]$ )。

因此组合台阶作业平盘设备生产能力为

$$A_{ij} = q_b N_s \quad (9)$$

式中:  $A_{ij}$  为第  $i$  组组合台阶第  $j$  个作业平盘设备生产能力,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $q_b$  为单组剥离设备实际生产能力,  $\text{m}^3/(\text{组}\cdot\text{h})$ 。

### 2.3.3 循环推进时间

组合台阶整体向前推进距离  $B$  时, 完成一次作业循环, 相应的采掘设备在组合台阶中各分层之间完成一次走行、调配的循环。设每组合台阶完成 1 次循环推进所需时间为  $T_i$ ,  $T_i$  的计算方法如式(10)所示。

$$T_i = T_{i0} + T_{i1} + T_{i2} + T_{i3} \quad (10)$$

式中:  $T_{i0}$  为第  $i$  组组合台阶累计穿爆作业时间,  $\text{h}$ ;  $T_{i1}$  为第  $i$  组组合台阶各平盘累计采剥作业时间,  $\text{h}$ ;  $T_{i2}$  为第  $i$  组组合台阶采掘设备在相邻平盘之间走行以

及完成一次扩帮作业后回到初始作业水平的时间,  $\text{h}$ ;  $T_{i3}$  为设备停滞时间,  $\text{h}$ 。

为了给采掘设备提供有利的工作条件, 提高作业效率, 需要对坚硬岩石和煤层进行爆破作业。实行爆破作业的露天煤矿, 该过程包括 2 个作业环节, 即穿孔和爆破。因而穿爆时间可用式(11)表示。

$$T_{i0} = \frac{l_z}{q_z N_z} + t_0 \quad (11)$$

式中:  $l_z$  为累计炮孔深度,  $\text{m}$ ;  $q_z$  为钻机生产能力,  $\text{m}/(\text{台}\cdot\text{h})$ ;  $N_z$  为钻机数量, 台;  $t_0$  为爆破作业时间, 包括装药及爆破时间,  $\text{h}$ 。

依据开采参数, 可以计算出组合台阶进行一次作业循环所完成的工程量, 进而得出各平盘设备采剥作业总时间如式(12)所示。

$$T_{i1} = \sum_{j=1}^n \frac{Q_{ij}}{A_{ij}} \quad (12)$$

设备在当前台阶完成作业任务后需要移动到下部相邻平盘进行剥离作业, 完成一次循环推进后又回到初始作业平盘。因此走行、调配时间可按式(13)计算。

$$T_{i2} = N_s(t_1 + t_2) \quad (13)$$

$$t_1 = \frac{h(n-1)(v_0 + v_1)}{1000 D_e v_0 v_1} \quad (14)$$

$$t_2 = \frac{2 \left[ (n-1) \left( B + b + \frac{h}{\tan \alpha} \right) + \sum_{j=1}^n \frac{L_{Gij}}{4n_r} k_1 \right]}{1000 v_2} \quad (15)$$

式中:  $t_1$  为设备走行移动坑线所需时间,  $\text{h}$ ;  $D_e$  为移动坑线坡度, 8%;  $v_0$  为采掘设备在移动坑线中向上走行速度,  $\text{km/h}$ ;  $v_1$  为采掘设备在移动坑线中向下走行速度,  $\text{km/h}$ ;  $t_2$  为设备平盘走行时间,  $\text{h}$ ;  $v_2$  为采掘设备在工作平盘上平均走行速度,  $\text{km/h}$ ;  $k_1$  为路线增长系数;  $n_r$  为台阶布置坡道数目。

为了保证露天煤矿采掘设备能够正常、高效的运转, 满足采掘设备的完好率和出动率要求, 剥离设备的停机维修和保养至关重要。考虑到设备检修制度和机修设施等因素, 设备停滞时间由设备的维修周期和工期决定。

$$T_{i3} = \frac{T_{i1} + T_{i2}}{30T_x} t_3 + \frac{T_{i1} + T_{i2}}{30T_y} t_4 \quad (16)$$

式中:  $T_x$  为设备小修周期, 月;  $t_3$  为设备小修工期,  $\text{d}$ ;  $T_y$  为设备月检周期, 月;  $t_4$  为设备月检工期,  $\text{d}$ ;

整理式(16)得 1 组台阶完成 1 次循环推进所需时间为:

$$T_i = \frac{l_z}{q_z N_z} + t_0 + \sum_{j=1}^n \frac{B h L_{Gij}}{q_b N_s} + N_s \left\{ \frac{(n-1)(v_0 + v_1)}{1000 D_e v_0 v_1} + \frac{2 \left[ (n-1) \left( B + b + \frac{h}{\tan \alpha} \right) + \sum_{j=1}^n \frac{L_{Gij}}{4 n_r} k_1 \right]}{1000 v_2} \right\} + \frac{T_{i1} + T_{i2}}{30 T_x} t_3 + \frac{T_{i1} + T_{i2}}{30 T_y} t_4 \quad (17)$$

工作帮各组组合台阶均完成1次循环推进后,工作帮方可整体向前推进距离B,以实现采场露煤。因此工作帮完成一次循环推进时间为各组组合台阶完成一次循环推进时间的最大值。即:

$$T = \max(T_1, T_2, \dots, T_m) \quad (18)$$

式中:T为工作帮完成一次循环推进所需时间,h。

综上所述,作业平盘布置设备数量越多时,平盘推进时间越短。此外,组合台阶中台阶数目越多时,采掘设备在平盘及移动坑线中走行时间越长,间接的降低了设备的作业效率。因此,需要尽量减小设备非剥离作业时间在一次循环推进时间中的占比。

## 2.4 端帮运输道路可靠性

煤矿露天开采时,考虑到端帮资源回收、运输系统布置以及边坡稳定性等因素,端帮台阶也常采用组合台阶且与工作帮台阶组合方式不一定相同。因此,工作帮部分平盘产生的剥离物料并不能够通过同水平端帮运输平盘进入内排土场。假设剥离物在工作帮运输过程不存在向下运输,且只经由该平盘上部首个端帮运输平盘运输至内排土场,则通过端帮运输平盘的剥离量由端帮台阶组合方式和工作帮循环推进距离决定。

设端帮组合台阶内台阶数目为n<sub>d</sub>,端帮道路行车密度计算如式(19):

$$N_d = \frac{\eta B h K_3}{T' G K_1 K_2} \left[ n_d L_{Gr^*} - 2(n_d - 1) \left( D + \frac{h}{\tan \alpha} \right) - 2(n_d - 2) \left( d + \frac{h}{\tan \alpha} \right) \right] \quad (19)$$

式中:N<sub>d</sub>为道路行车密度,辆/h;η为剥离物比重,t/m<sup>3</sup>;L<sub>Gr\*</sub>为当前端帮运输平盘同水平剥离工作线长度,m;T'为各组组合台阶完成一次循环推进时间的最小值,h;G为汽车载重,t/辆;K<sub>1</sub>为时间利用系数,采用三班工作制时为0.75;K<sub>2</sub>为汽车载重利用系数,不低于0.9;K<sub>3</sub>为运输不均衡系数,取1.1~1.15。

组合台阶循环推进距离增加时,通过端帮运输平盘的剥离量增加,端帮运输道路行车密度加大。为了保证运输道路可靠性,降低汽车运输安全风险,端帮运输道路行车密度不应超过该道路等级规定的

最大值。

## 3 工作帮形态优化

高寒地区季节性剥离露天煤矿冬季不进行剥离作业活动,需要在剥离作业期完成超前剥离任务来保证足够的露煤量以满足采煤接续的要求,与全年均衡剥离作业露天煤矿相比,剥离物端帮运输距离更大。通过优化剥离工作帮形态来实现采剥接续、减小剥离物端帮运距、降低剥离物运输功的目标。

### 3.1 优化模型建立

#### 3.1.1 决策变量选取

优化季节性剥离露天煤矿工作帮形态实际上就是优化工作帮台阶组合方式及一次循环作业推进距离,而循环推进距离又取决于作业平盘宽度。确定季节性剥离露天煤矿工作帮形态优化的决策变量为n、B<sub>p</sub>。此外工作帮形态还由采掘设备规格、工作面设备布置情况、以及年剥离作业时间等参数共同决定。

#### 3.1.2 目标函数建立

通过优化季节性剥离露天煤矿工作帮形态来达到在保证产能接续、运输系统稳定可靠的基础上剥离物运输功最小的目的。建立目标函数如下:

$$\min W = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \eta \omega g h L_{Gij} (B_p - b) \left[ \frac{L_{Gij} + L_{Pij}}{K} + (L_d + B_p - b - B_n) + \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{D_e} \right] \quad (20)$$

式中:W为剥离物运输功,N·m;ω为加权道路滚动阻力系数;L<sub>Pij</sub>为对应内排平盘工作线长度,m;K为系数,采用单环内排时,K=2;采用双环内排时,K=4;L<sub>d</sub>为工作帮循环推进前,当前台阶剥离物端帮运距,m;B<sub>n</sub>为循环推进后内排土场跟进距离,m;ΔH<sub>1</sub>为当前工作台阶与上部首个端帮运输平盘之间高差,m;ΔH<sub>2</sub>为端帮运输平盘与内排土场排土平盘之间高差,m。

#### 3.1.3 约束条件整理

1)工作帮循环推进距离:由组合台阶作业方式可知,剥离工作帮循环推进距离应满足

$$B \geq B_{p,\min} - b \quad (21)$$

2)剥采工程接续:剥离开工时坑内原煤可采时间应与循环推进时间匹配。

$$T_{k-1} \geq T \quad (22)$$

3)工作平盘设备布置数量不应超过可布置的最大值

$$1 \leq N_s \leq N_{s,\max} \quad (23)$$

4)端帮运输道路行车密度应小于其道路等级规

定的最大行车密度

$$N_d \leq N \quad (24)$$

式中： $B_{p,\min}$  为最小工作平盘宽度，m； $N$  为最大行车密度，辆/h；

5) 其他约束：

$$L_{Gij}, L_d, L_{Pij} > 0 \quad (25)$$

分析工作帮形态优化模型目标函数可知， $W$  为关于  $n$  和  $B_p$  的非线性函数。通过进行非线性规划求解进而得出设备规格、工作面设备布置情况及年剥离作业时间等参数确定时满足剥采工程时空接续要求且剥离物运输功最小的剥离工作帮台阶组合参数  $n$ 、 $B_p$ 。

### 3.2 序列二次规划

序列二次规划法(SQP)是求解非线性约束优化问题最有效的算法之一<sup>[17]</sup>。序列二次规划通过将非线性约束问题转化为简单的二次规划(QP)问题，在每一步迭代中通过求解一个二次规划子问题来确定下一次迭代进行方向，采用线搜索算法确定步长，重复这些步骤直到得到原问题的解<sup>[18-19]</sup>。

非线性约束数学规划问题的一般形式可以通过式(26)进行表示<sup>[20]</sup>：

$$\begin{aligned} & \min f(\mathbf{X}) \\ & \text{s.t. } g_u(\mathbf{X}) \leq 0, u = 1, 2, \dots, l \\ & \quad h_v(\mathbf{X}) = 0, v = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (26)$$

式中： $\mathbf{X}$  为变量； $f(\mathbf{X})$  为目标函数； $g_u(\mathbf{X})$  为不等式约束函数； $h_v(\mathbf{X})$  为等式约束函数； $u$  为不等式约束函数个数； $v$  为等式约束函数个数。

利用泰勒展开将式(26)中的目标函数转化为二次函数，将约束函数转化为线性函数后得到简单的二次规划问题。

二次规划子问题表示如下：

$$\begin{aligned} & \min f(\mathbf{X}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{d}_k + \nabla f(\mathbf{X})^T \mathbf{d}_k \\ & \text{s.t. } \begin{cases} \nabla g_u(\mathbf{X})^T \mathbf{d}_k + g_u(\mathbf{X}) & u = 1, 2, \dots, l \\ \nabla h_v(\mathbf{X})^T \mathbf{d}_k + h_v(\mathbf{X}) & v = 1, 2, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (27)$$

式中： $\mathbf{d}_k$  为二次规划子问题的最优解，也是迭代进行方向； $\nabla f(\mathbf{X})$  为  $f(\mathbf{X})$  的梯度函数； $\nabla g_u(\mathbf{X})$ 、 $\nabla h_v(\mathbf{X})$  分别为约束函数的雅各比矩阵； $\mathbf{H}_k$  为拉格朗日函数的 Hesse 矩阵。

原问题的拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{X}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{X}) + \boldsymbol{\mu} g_u(\mathbf{X}) + \boldsymbol{\lambda} h_v(\mathbf{X}) \quad (28)$$

式中： $\boldsymbol{\mu}$  和  $\boldsymbol{\lambda}$  分别为不等式约束与等式约束的乘子。

通过一维搜索进行迭代步长确定，步长满足以下条件，

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + a \mathbf{d}_k \quad (29)$$

式中： $\mathbf{X}_k$  为第  $k$  次迭代值； $a$  为步长。

采用拟牛顿法中 BFGS 公式进行拉格朗日函数 Hesse 矩阵计算<sup>[21]</sup>，BFGS 公式描述如下。

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \left( 1 + \frac{\mathbf{y}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{y}_k}{\mathbf{S}_k^T \mathbf{y}_k} \right) \frac{\mathbf{S}_k \mathbf{S}_k^T}{\mathbf{S}_k^T \mathbf{y}_k} - \frac{\mathbf{S}_k \mathbf{y}_k^T \mathbf{H}_k + \mathbf{H}_k \mathbf{y}_k \mathbf{S}_k^T}{\mathbf{S}_k^T \mathbf{y}_k} \quad (30)$$

其中： $\mathbf{S}_k = \mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k$ ； $\mathbf{y}_k = \nabla L(\mathbf{X}_{k+1}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) - \nabla L(\mathbf{X}_k, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda})$ 。

序列二次规划法算法求解流程如图 3 所示。

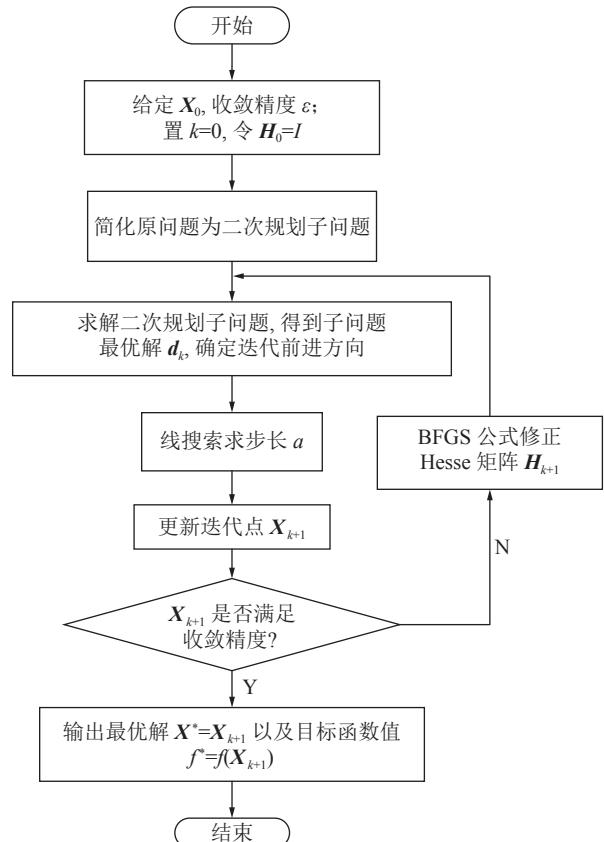


图 3 序列二次规划算法流程

Fig.3 sequence quadratic programming algorithm flow chart

### 3.3 模型求解

实际生产中，为了便于开采设计和工程实现，开采参数常常取整数。因此  $n$  和  $B_p$  为离散变量。对于离散变量的最优化问题，目前直接的求解算法还不够成熟，通常的处理方法是先将离散变量当作连续变量，用连续变量最优化算法求出连续最优解之后，再作适当的离散化处理，如某种方式的圆整或者取标准值等<sup>[18]</sup>。

通过给定迭代初值  $B_p^0 = B_{p,\min}$ 、 $n^0 = 2$ 。根据序列二次规划求解流程对式(20)表述问题进行迭代求解。确定满足约束条件的最优解，将最优解进行取整处

理并比较  $W$ , 最终确定最优工作帮形态参数  $n$ 、 $B_p$ 。

#### 4 工作帮极限推进强度分析

露天煤矿正常开采过程中, 工作帮各年推进度基本稳定, 当采剥工作线缩短、产能增加、煤层赋存条件发生变化或者推进至大型地质构造区域时需增大推进度以保证产能的稳定接续。随着当前采掘设备的发展, 设备性能大幅提升; 采掘设备的小型化, 使得采掘设备作业方式更加灵活。在露天煤矿的实际生产中, 工作帮可达到的推进度已突破开采设计规范中所建议的推进速度参考值<sup>[22]</sup>。特别是对于高寒地区露天煤矿剥离工程非全年进行的情况, 确定其在剥离作业期内工作帮可以实现的极限推进度是有必要的。

季节性剥离露天煤矿工作帮推进强度受工作帮形态、采掘设备生产能力、工作面设备布置情况以及年剥离作业时间影响。当工作面布置设备数量增加、设备生产能力加大或者年剥离作业时间增加时, 工作帮循环推进时间减小, 工作帮在剥离作业期内循环推进次数增加, 相应的工作帮推进强度加大。工作帮极限推进强度计算如式(31):

$$B_{a, \max} = B \left\lfloor \frac{T_{a, \max}}{T_{\min}} \right\rfloor \quad (31)$$

式中:  $B_{a, \max}$  为当前形态下工作帮极限推进度, m/a;  $T_{a, \max}$  为露天煤矿最大年剥离作业时间, h;  $T_{\min}$  为当前工作帮形态下采掘设备生产能力最大时工作帮循环推进时间, h。

#### 5 工程实例

胜利西二号露天煤矿位于内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特市西北部宝力根(胜利)苏木境内, 设计规模 10 Mt/a。采煤工艺为: 单斗-卡车-地面半固定破碎站半连续工艺, 剥离为单斗-卡车间断工艺。该矿为典型的季节性剥离露天煤矿, 剥离作业期在每年的 4 月初至 11 月末。剥离台阶水平划分, 剥离模式为外包作业, 采用液压反铲直接挖掘的方式进行剥离, 沿工作线布置方向水平划分 2 个工程标段, 每个工作台阶布置 2 个坡道。剥离物经北端帮运输至内排土场排弃, 为单环运输。端帮边坡由运输平盘与安全平盘构成, 每隔 1 个运输平盘留设 1 个安全平盘。端帮运输道路为运输支线, 属于二级道路。开采境界内 6 号煤层为主采煤层, 呈近水平赋存。首采区煤层顶板平均标高+940 m, 地表平均标高+1 096 m。采场全年露煤 5 次, 每次露煤量 200 万 t,

具体指标参数如下:

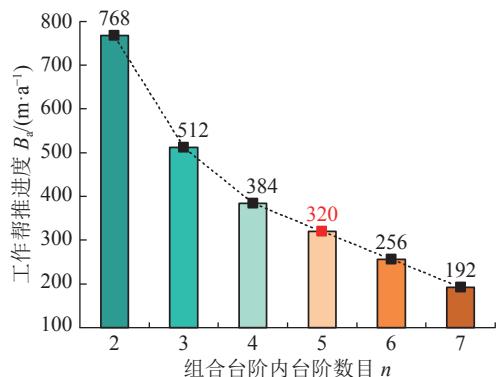
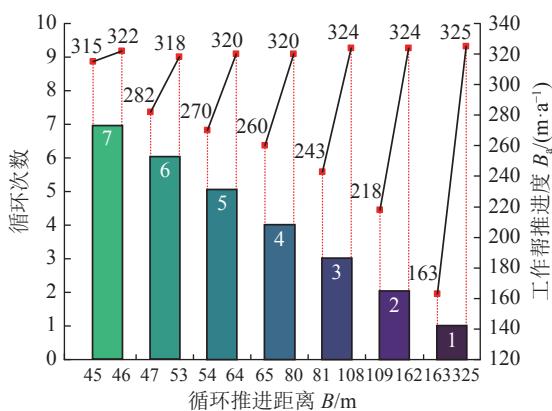
端帮运输平盘宽度 $D/m$	40
端帮保安平盘宽度 $d/m$	5
剥离工作帮非作业平盘宽度 $b/m$	25
剥离台阶高度 $h/m$	12
剥离台阶坡面角 $\alpha/(^\circ)$	65
最小剥离作业区宽度 $c/m$	250
煤层厚度 $h_0/m$	19.25
原煤视密度 $(t \cdot m^{-3})$	1.23
煤层底板工作线长度 $L_s/m$	1 300
运岩卡车载重 $G/t$	80
剥离物比重 $\eta/(t \cdot m^{-3})$	2.65
采掘设备向上走行移动坑线速度 $v_u/(km \cdot h^{-1})$	2.4
采掘设备向下走行移动坑线速度 $v_l/(km \cdot h^{-1})$	3.5
采掘设备平盘移动速度 $v_2/(km \cdot h^{-1})$	3
年剥离作业时间 $T_a/d$	240
年采煤作业时间 $T_c/d$	330
剥离设备实际生产能力 $q_u/(万 m^3 \cdot 台^{-1} \cdot d^{-1})$	2.2
采煤设备实际生产能力 $q_m/(万 m^3 \cdot 台^{-1} \cdot d^{-1})$	0.76
采煤设备数量 $N_c/台$	4
内排追踪距离 $l_p/m$	50
设备小修周期 $T_x/d$	10
设备小修工期 $t_x/h$	1
设备月检周期 $T_y/d$	20
设备月检工期 $t_y/h$	5

工作面剥离设备按最大数量布置时, 将上述所列参数代入优化模型中进行求解。结果显示: 组合台阶内台阶数目为 5, 组合台阶中作业平盘宽度为 89 m 时, 剥离物运输功最小且满足剥采工程时空接续要求。该形态下工作帮循环推进时间为 47.5 d, 循环推进距离为 64 m。端帮运输道路行车密度为 141 辆/h, 小于《厂矿道路设计规范》中规定二级道路最大行车密度(170 辆/h)<sup>[23]</sup>, 计算得工作帮年推进度为 320 m/a。

工作帮台阶组合方式及循环推进距离变化时, 对应极限推进度计算结果分别如图 4、图 5 所示。

循环推进距离不变时, 组合台阶内台阶数目越多, 循环推进时间越长。工作帮在剥离作业期内循环推进次数越少, 工作帮年推进度越小。

循环推进距离大于 325 m 时, 工作帮在剥离作业期内无法完成一次循环推进。从图 5 中可以看出, 单次循环推进时, 工作帮极限推进度最大。多次循环推进时, 工作帮极限推进度随循环推进距离的加

图4  $B=64\text{ m}$ 时不同形态工作帮推进度变化Fig.4 Variation diagram of advancing distance of different shapes of working slope when  $B=64\text{ m}$ 图5  $n=5$ 时循环推进距离与循环次数和工作帮年推进度关系Fig.5 Relationship between cycle advance distance and number of cycles and annual advance distance of working slope when  $n=5$ 

大呈线性增加趋势。

采场全年多次等量露煤时，工作帮年循环推进次数随循环推进距离的增加呈周期性递减；非等量露煤时，工作帮年推进度为各次循环推进距离的累计值。

季节性剥离露天矿实际生产中应根据产能规划和原煤需求以及通过调节工作面设备布置情况等手段综合确定采场露煤方式和循环推进距离，动态控制剥离工作帮形态，优化确定工作帮推进度。

## 6 结 论

1) 将露天煤矿工作帮形态控制优化工程问题抽象为非线性规划数学模型，引入序列二次规划算法计算求解决定工作帮形态的关键参数  $n$ 、 $B_p$ ，实现季节性剥离露天煤矿剥离工作帮形态动态控制。

2) 季节性剥离露天矿采场全年单次露煤时，工作帮极限推进度为循环推进距离。全年多次等量露

煤时，工作帮极限推进度随着循环推进距离的变化呈周期性线性变化。

3) 应用文中提出方法计算确定了胜利西二号露天煤矿满足剥采工程时空接续要求且剥离物运输功最小的组合台阶内台阶数目  $n$  为 5，作业平盘宽度  $B_p$  为 89 m，该形态下工作帮极限推进度为 320 m/a。

## 参考文献(References):

- [1] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1–15.  
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1–15.
- [2] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1–15.  
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1–15.
- [3] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197–2211.  
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197–2211.
- [4] 中国煤炭工业协会煤炭工业技术委员会. 中国露天煤炭事业百年发展报告[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2015.
- [5] 陈仁升, 康尔泗, 吴立宗, 等. 中国寒区分布探讨[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 469–475.  
CHEN Rensheng, KANG Ersi, WU Lizong, et al. Cold regions in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(4): 469–475.
- [6] JIN R, LI X, CHE T. A decision tree algorithm for surface soil freeze/thaw classification over China using SSM/I brightness temperature[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(12): 2651–2660.
- [7] 张周爱, 黄玉凯. 季节性剥离露天矿采场露煤方案优化研究[C]//中国煤炭学会. 第十届全国煤炭工业生产一线青年技术创新文集. 中国煤炭学会, 2016: 7.  
ZHANG Zhouai, HUANG Yukai. Research on optimization of coal exposed scheme for seasonal stripping open pit mines[C]/China Coal Society. 10th National Coal Industry Production Frontline Youth Technical Innovation Collection. China Coal Society, 2016: 7.
- [8] 刘闯. 大型复合煤层露天矿综合开采工艺关键技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.  
LIU Chuang. Key technology research of combined mining system in large multiple coal seams surface mines[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016.
- [9] 赵浩, 毛开江, 曲业明, 等. 我国露天煤矿无人驾驶及新能源卡

- 车发展现状与关键技术[J].中国煤炭,2021,47(4):45–50.  
ZHAO Hao, MAO Kaijiang, QU Yeming, et al. Development status and key technology of driverless and new energy trucks in open-pit coal mine in China[J]. China Coal, 2021, 47(4): 45–50.
- [10] 周志友.组合台阶开采技术在露天矿开采中的研究与应用[J].煤矿现代化,2022,31(4):67–69, 73.  
ZHOU Zhiyou. Research and application of combined bench mining technology in open pit mining[J]. Coal Mine Modernization, 2022, 31(4): 67–69, 73.
- [11] 孙明亮,郭 章.组合台阶陡帮开采在山西某露天铁矿的应用研究[J].现代矿业,2021,37(8):68–72.  
SUN Mingliang, GUO Zhang. Study on the application of combined step steep slope mining in an open-pit iron mine in shanxi[J]. Modern Mining, 2021, 37(8): 68–72.
- [12] 刘 宇,林 旭.组合台阶开采工艺在哈尔乌素露天煤矿的应用[J].露天采矿技术,2016,31(8):5–8.  
LIU Yu, LIN Xu. Application of combined bench mining technology in Ha'erwusu open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(8): 5–8.
- [13] 白润才,刘 阖,刘光伟,等.季节性剥离露天煤矿内排开拓运输系统优化[J].重庆大学学报,2014,37(8):99–104.  
BAI Runcai, LIU Chuang, LIU Guangwei, et al. Optimization of in-pit haulage system development during internal dumping in seasonal stripping surface coal mine[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(8): 99–104.
- [14] 马忠辉,黄玉凯,陈树召,等.季节性岩土强度差异下的靠帮开采及效益分析[J].煤矿安全,2021,52(4):231–236.  
MA Zhonghui, HUANG Yukai, CHEN Shuzhao, et al. Analysis of steep mining and benefit based on seasonal difference of rock and soil strength[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52( 4) : 231–236.
- [15] 陆 翔.寒区露天矿泥岩边坡冻融损伤机理与季节性控制开采研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.  
LU Xiang. Research on freeze-thaw damage mechanism of mud-stone slope and seasonal control mining method in open-pit mines of cold regions[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [16] 中国矿业大学.露天采矿手册(第五册)[M].北京:煤炭工业出版社,1987.
- [17] 马昌凤.最优化方法及其Matlab程序设计[M].北京:科学出版社,2010.
- [18] 李元科.工程最优化设计[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [19] 唐 承,郭书祥,莫延彧,等.应用粒子群-序列二次规划算法的结构可靠性优化[J].空军工程大学学报(自然科学版),2016,17(2):107–111.  
TANG Cheng, GUO Shuxiang, MO Yanyu, et al. An optimal design of structural reliability based on particle swarm optimization-sequential quadratic programming algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science edition), 2016, 17(2): 107–111.
- [20] MASAO Fukushima, 福岛雅夫,林贵华.非线性最优化基础[M].北京:科学出版社,2011.
- [21] 赛恒浩,石鹏飞,王敏文,等.基于改进序列二次规划的非线性控制分配[J].兵工自动化,2022,41(8):74–80.  
QIAN Henghao, SHI Pengfei, WANG Minwen, et al. Nonlinear control allocation based on improved sequential quadratic programming[J]. Ordnance Industry Automation, 2022, 41(8): 74–80.
- [22] 中国煤炭建设协会勘察设计委员会,中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司.煤炭工业露天矿设计规范:GB50197—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [23] 交通部公路规划设计院.厂矿道路设计规范:GBJ22—87[S].北京:中国计划出版社,1987.