

分区内排露天煤矿压帮留沟模式及参数优化

马力¹, 王恒荣¹, 罗科², 李瑞行¹, 靳新宇¹, 常治国³

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 山西焦煤集团 山煤国际河曲露天煤业有限公司, 山西 忻州 036500; 3. 新疆工程学院 安全科学与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 大型露天煤田安全高效集约化开发是露天煤炭开发的发展趋势, 以分区开采为主要开发模式的大型露天煤田具有安全高效、回采率高、投资回收期短的显著优势, 同时可以利用开采形成的采空区回填剥离物料形成内排土场, 并降低剥离物料对土地的压占及破坏。针对大型露天煤矿分区开采衍生出相邻采区间二次剥离量大的问题, 在考虑压帮内排留沟模式影响基础上, 结合外排空间受限条件, 以内排加高分析不同压帮留沟模式对剥采与运输系统的影响, 建立全压帮及半压帮内排总费用模型, 并对半压帮倒三角和倒梯形留沟模式进行对比分析。基于费用补偿法, 以全压帮内排为参照, 在剥离物料不外排的条件下, 综合考虑内排容量, 构建压帮内排倒三角留沟模式与倒梯形留沟模式的留沟高度优化模型以及内排搭桥移设步距优化模型。对山西河曲露天煤矿首采区与二采区间留沟高度及运输系统进行综合优化。结果表明: 半压帮内排经济效益显著, 压帮内排倒三角留沟总费用随着留沟高度的增加先增大后减小, 总经济效益先减小后增大, 最佳留沟高度为 110 m, 内排搭桥最佳移设步距为 104 m, 相对全压帮内排节约 10 080 万元; 压帮内排倒梯形留沟总费用随着留沟深度的增加先减小后增大, 总收益先增大后减小, 最佳留沟高度为 67 m, 内排搭桥最佳移设步距为 264 m, 相对全压帮内排节约 24 540 万元。留沟面积相等的条件下, 倒三角留沟模式留沟深度较大, 对单侧剥离物料运输系统影响较大, 内排土场工作线长度较长, 一般适用于内排空间紧张的露天煤矿; 倒梯形留沟模式留沟深度较小, 内排容量受到一定限制, 一般适用于内排空间较大的露天煤矿。

关键词: 全留沟内排; 全压帮内排; 倒三角留沟; 倒梯形留沟; 内排搭桥

中图分类号: TD804 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)04-1834-11

Optimization of the remaining ditch mode and parameters for end-wall covered of open pit coal mine with partition and inner dumping

MA Li¹, WANG Hengrong¹, LUO Ke², LI Ruihang¹, JIN Xinyu¹, CHANG Zhiguo³

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shanxi Coal International Hequ Open-pit Coal Industry Co., Ltd., Shanxi Coking Coal Group, Xinzhou 036500, China; 3. School of Safety Science and Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830000, China)

Abstract: The development of large open-pit coal fields with high safety and efficiency is the trend of open-pit coal development. With partitioned mining as the main development mode, the large open-pit coal field has the significant advantages of safety and efficiency, high recovery rate and short investment payback period. At the same time, it is possible to use the backfilling of stripped materials in the mined area to form an inner dumping field and reduce the pressure and dam-

收稿日期: 2023-03-07 修回日期: 2023-06-02 责任编辑: 钱小静 DOI: [10.13225/j.cnki.jccs.2023.0307](https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0307)

基金项目: 陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2024JC-YBMS-364)

作者简介: 马力(1986—), 男, 黑龙江集贤人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: mali217@xust.edu.cn

通讯作者: 王恒荣(1997—), 男, 陕西靖边人, 硕士研究生。E-mail: 2110098328@qq.com

引用格式: 马力, 王恒荣, 罗科, 等. 分区内排露天煤矿压帮留沟模式及参数优化[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4):

1834-1844.

MA Li, WANG Hengrong, LUO Ke, et al. Optimization of the remaining ditch mode and parameters for end-wall covered of open pit coal mine with partition and inner dumping[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1834-1844.



移动阅读

age of stripped materials on the land. To address the problem of large surface coal mines with large secondary stripping volume between adjacent mining areas derived from partitioned mining, the impact of different remaining ditch mode for end-wall covered on stripping and transportation systems is analyzed by adding height to the inner dumping on the basis of considering the impact of inner dumping remaining ditch mode for end-wall covered, combined with the restricted space conditions for outer dumping. The total cost model of inner dumping with end-wall fully covered and inner dumping with end-wall semi-covered is established, and the inverted triangular and inverted trapezoidal retention ditch patterns of the end-wall semi-covered are compared and analyzed. Based on the expense compensation method, a model for optimizing the ditch height of the inverted triangular ditching mode and the inverted trapezoidal ditching mode, as well as a model for optimizing the distance of the internal ditching bridges, was constructed based on the cost-least method, taking the full internal ditching of the inner dumping covering as a reference, and taking into account the capacity of the internal ditching under the condition that the stripped material would not be discharged. The optimization of the ditch height and transportation system between the first and second mining areas of Hequ open-pit coal mine was carried out. The results show that: the economic benefits of half inner dumping covering are significant, the total cost of inverted triangular retention ditch increases and then decreases with the increase of the height of retention ditch, and the total economic benefit decreases and then increases. The best trench height is 110 m, and the best distance to move the inner row bridge is 104 m, which saves 100.8 million yuan relative to the inner dumping covering; the total cost of the inner dumping covering inverted trapezoidal retention ditch first decreases and then increases with the increase of the retention ditch depth, and the total benefit first increases and then decreases, the best retention ditch height is 67 m, and the best displacement step of the inner drainage ditch is 264 m, which saves 245.4 million yuan compared with the full inner dumping covering. Under the condition of equal retention ditch area, the inverted triangular retention ditch mode has a greater retention ditch depth, which has a greater impact on the single-side stripping material transportation system. The long length of the working line of the inter-row field is generally applicable to open coal mines with tight inter-row space; the inverted trapezoidal retention ditch mode has a smaller retention ditch depth and the row capacity is somewhat restricted, which is generally applicable to open coal mines with larger inter-row space.

Key words: full ditch inner row; inner dumping with end-wall fully covered; remaining ditch of inverted triangle; remaining ditch of inverted trapezoidal; inner row bridge

大型露天煤田通常划分为若干个采区依次开采,但同时衍生出一系列问题,如相邻采区间二次剥离量大是露天煤矿分区开采过程中面临的主要问题^[1-2]。目前露天矿山主要通过留沟过渡减少二次剥离量^[3],常见的留沟模式有全压帮内排、全留沟内排以及半压帮内排。全压帮内排因不影响内排空间及端帮运输距离,对当前采区生产及成本影响较小,但引起相邻采区开采过程中的二次剥离问题^[4];而全留沟内排使当前采区内排空间被压缩,影响采排关系及内排运输系统与成本^[5]。半压帮内排则兼具2种模式的优缺点,最佳的压帮内排高度使其对生产及成本影响最小^[5-6]。

针对分区露天煤矿内排压帮留沟模式与留沟高度方面的研究,赵俊等^[7]分析了全压帮、半压帮以及全留沟内排的特点,建立了基于留沟深度的经济效益模型;常治国等^[8]提出了端帮倒三角留沟、排土场倒三角留沟等内排方案,建立关于内排留沟高度的函数关系;威华等^[9]分析了在生产成本和近期煤炭价格约束下二次剥离成本与煤炭损失利润,确定了端帮煤回收时的重复剥离采深方案;王炜等^[10]、张丁等^[11]以黑岱沟与哈尔乌素两矿综合费用最低为原则,构建了压

帮高度优化模型;赵彦合等^[12]通过定义三角煤剥采比,建立了三角煤最佳采深的计算模型,确定平朔东露天矿全压帮内排条件下三角煤回收的最佳采深;顾正洪等^[13]分析了压帮高度与工作线长度、重复剥离端帮角和重复剥离时间的相互关系,得出了不同条件下最佳压帮高度的取值范围;周伟等^[14]分析了影响内排压帮高度因素,建立了压帮高度计算模型,确定了开采深度、坑底宽度和端帮边坡角对最佳压帮高度影响最大;刘光伟等^[15]采用费用补偿法建立了基于运距特点的内排压帮高度优化模型。笔者等^[16-18]分析了相邻采区间内排压帮关系,提出内排压帮高度的综合优化模型及基于费用补偿法的内排搭桥移设步距优化模型。

以上研究均以增大外排空间补偿留沟造成内排空间降低为原则,适用于可提高外排空间的矿山,而对矿区外排征地紧张的矿山不具有实用性。考虑在留沟内排条件下增大内排土场高度以控制外排量,是影响留沟模式及参数优化的重要关键因素之一。笔者在综合考虑内排容量及剥离物不外排条件下,优化压帮内排留沟模式及参数。

1 压帮内排模式的费用关系模型

1.1 全压帮内排费用关系模型

根据图1所示全压帮内排关系,有

$$\begin{cases} S_1 = \frac{H^2(\cot \alpha + \cot \beta)}{2} \\ V_1 = \frac{H^2(\cot \alpha + \cot \beta)L}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_1 为全压帮内排二次剥离影响面积, m^2 ; H 为露天煤矿开采深度, m ; α 为内排土场最终边坡角, ($^\circ$); β 为端帮最终边坡角, ($^\circ$); V_1 为全压帮内排二次剥离量, m^3 ; L 为相邻采区留沟长度, m 。

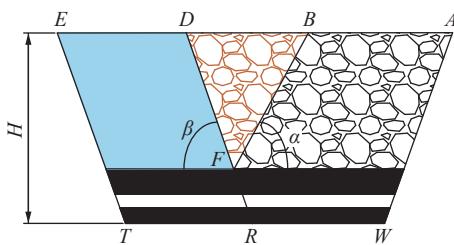


图1 相邻采区全压帮内排示意

Fig.1 Schematic diagram of the end-wall covered with inner dumping of the adjacent mining area

(1) 全压帮内排二次剥离物料的剥离费用模型。全压帮内排二次剥离费用与开采深度、边坡角、留沟长度以及单位二次剥离费用有关, 即

$$C_1 = \frac{H^2(\cot \alpha + \cot \beta)L}{2} \quad (2)$$

式中, C_1 为全压帮内排二次剥离费用, 元; A 为单位二次剥离费用, 元/ m^3 。

(2) 全压帮内排二次剥离物料的运输费用模型。全压帮内排二次剥离物料采用双环运输(图2, 其中, L_a 和 L_b 分别为不同开采水平对应工作帮和端帮工作线长度, m ; L_c 为不同开采水平对应内排土场工作线长度, m), 以工作帮及内排土场工作帮1/4位置为装载点及排卸点, 以露天煤矿开采深度一半水平位置对应的剥离物运距作为双环运输平均运距。

$$L_{w1} = \frac{1}{4}L_{a1} + L_{b1} + \frac{1}{4}L_{c1} = \frac{1}{2}L_m + L_n + \frac{1}{2}H(\cot \alpha_1 + \cot \beta_1 + \cot \beta) \quad (3)$$

式中, L_{w1} 为全压帮内排剥离物料端帮双环运输系统平均运距, m ; L_{a1} 和 L_{b1} 分别为工作帮、参考工作线平均长度, m ; L_{c1} 为内排土场工作线平均长度, m ; L_m 为露天开采煤层顶板工作线长度, m ; L_n 为露天矿山坑底宽度, m ; α_1 为露天煤矿内排土场工作帮边坡角, ($^\circ$); β_1 为露天煤矿采场工作帮边坡角, ($^\circ$)。

全压帮内排二次剥离物料的运输费用与运距、单

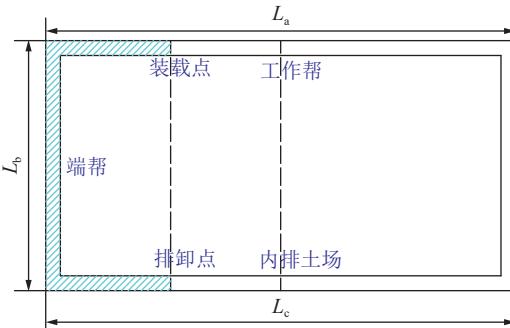


图2 全压帮内排端帮双环运输系统示意

Fig.2 Schematic diagram of the double-ring transportation system of the full pressure gang inner row end gang

位运输费用、运输物料量等有关, 即

$$C_2 = \frac{H^2(\cot \alpha + \cot \beta)LB_2}{2000} \times \left[\frac{1}{2}L_m + L_n + \frac{1}{2}H(\cot \alpha_1 + \cot \beta_1 + \cot \beta) \right] \quad (4)$$

式中, C_2 为全压帮内排二次剥离物料运输费用, 元; B_2 为二次剥离物料单位运输费用, 元/ m^3 。

(3) 全压帮内排二次剥离总费用模型。全压帮内排对开采系统的影响主要体现在下一采区二次剥离物料的剥离与运输费用, 分析建立全压帮内排二次剥离总费用模型:

$$G_1 = \frac{H^2(\cot \alpha + \cot \beta)L}{2000} \left\{ 1000A + B_2 \left[\frac{1}{2}L_m + L_n + \frac{1}{2}H(\cot \alpha_1 + \cot \beta_1 + \cot \beta) \right] \right\} \quad (5)$$

式中, G_1 为全压帮内排二次剥离总费用, 元。

1.2 半压帮内排费用关系模型

半压帮内排留沟位置以下采用双环运输, 可减少留沟对运输系统的影响, 但增加了压帮部分物料的二次剥离费用及留沟上部单侧剥离物料的转排费用。

1.2.1 倒三角留沟总费用模型

(1) 倒三角留沟二次剥离费用模型。根据半压帮内排倒三角留沟示意(图3中, L_x 为倒三角留沟模式二次剥离区域地表宽度, m ; L_k 为全留沟内排模式留沟区域地表宽度, m ; L_y 为倒三角留沟模式留沟区域地表宽度, m ; L_f 为全留沟内排模式单侧地表剩余宽度, m), 有

$$\begin{cases} S_2 = \frac{h_1^2(\cot \alpha + \cot \beta)}{2} \\ S_3 = \frac{(H^2 - h_1^2)(\cot \alpha + \cot \beta)}{2} \\ V_3 = \frac{(H^2 - h_1^2)(\cot \alpha + \cot \beta)L}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式中, S_2 、 S_3 分别为压帮内排倒三角留沟模式留沟区域

面积与二次剥离区域面积, m^2 ; h_1 为倒三角留沟深度, m ; V_3 为压帮内排倒三角留沟二次剥离物料量, m^3 。

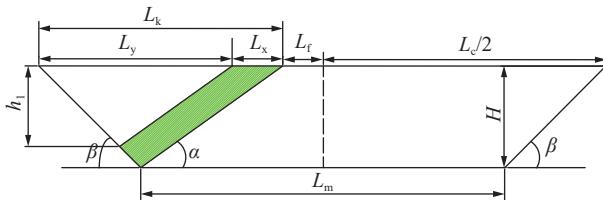


图3 倒三角留沟示意

Fig.3 Schematic diagram of the inverted triangle ditch

倒三角留沟条件下, 二次剥离部分物料靠近二采区一侧端帮, 运输距离近似等于双环运输距离, 得到其剥离费用与运输费用为

$$\left\{ \begin{array}{l} C_3 = \frac{(H^2 - h_1^2)(\cot \alpha + \cot \beta)LA}{2} \\ C_4 = \frac{(H^2 - h_1^2)(\cot \alpha + \cot \beta)LB_2}{2000} \times [0.5L_m + L_n + 0.5H(\cot \alpha_1 + \cot \beta_1 + \cot \beta)] \end{array} \right. \quad (7)$$

式中, C_3 、 C_4 分别为压帮内排倒三角留沟二次剥离物料的剥离费用与运输费用, 元。

(2) 倒三角留沟上部物料单环运输费用模型。将工作帮留沟上部单侧剥离物料分为留沟区域 C 和非留沟区域 D 两部分(图4, 其中, L_v 为倒三角留沟模式 D 部分剥离物料顶部宽度, m ; L_u 为倒三角留沟模式 D 部分剥离物料底部宽度, m), 有

$$\left\{ \begin{array}{l} V_C = \frac{h_1^2(\cot \alpha + \cot \beta)L}{2} \\ V_D = \frac{[L_m + 2H\cot \beta - h_1(2\cot \beta + \cot \alpha)]h_1L}{2} \end{array} \right. \quad (8)$$

式中, V_C 、 V_D 分别为 C 与 D 两部分剥离物料量, m^3 。

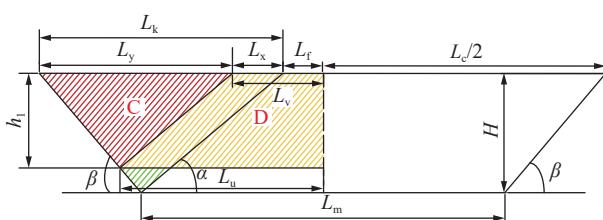


图4 倒三角留沟模式留沟上部单侧物料关系示意

Fig.4 Schematic diagram of the unilateral material relationship between the upper part of the inverted triangle ditch retention mode

其中, 留沟的影响增加了留沟上部物料的运距(图5), 得到 C、D 两部分剥离物单环运输的平均运距为

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{WC} = \frac{5}{4}L_m + L_n + \left(H - \frac{1}{2}h_1\right)\left(\frac{3}{2}\cot \beta + \cot \beta_1 + \cot \alpha_1\right) + \frac{1}{2}H(\cot \beta - \cot \alpha) \\ L_{WD} = \frac{3}{2}L_m + L_n + \left(H - \frac{1}{2}h_1\right)\left(\frac{5}{2}\cot \beta + \cot \alpha_1 + \cot \beta_1\right) + \frac{1}{2}(H - h_1)\cot \beta - \frac{1}{4}h_1\cot \alpha \end{array} \right. \quad (9)$$

相对双环运输 2 部分剥离物料增加的运输距离为

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta L_{WC} = \frac{3}{4}L_m + H\left(\cot \beta - \frac{1}{2}\cot \alpha\right) - \frac{1}{4}h_1\cot \beta \\ \Delta L_{WD} = L_m + \left(2H - \frac{5}{4}h_1\right)\cot \beta - \frac{1}{4}h_1\cot \alpha \end{array} \right. \quad (10)$$

式中, L_{WC} 为 C 部分剥离物料单环运输平均运距, m ; L_{WD} 为 D 部分剥离物料单环运输平均运距, m 。 ΔL_{WC} 为 C 部分剥离物料增加的平均运距, m ; ΔL_{WD} 为 D 部分剥离物料增加的平均运距, m 。

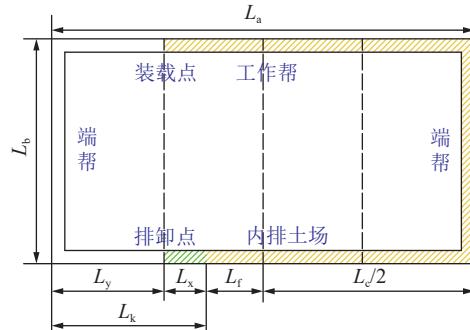


图5 倒三角留沟单环运输示意

Fig.5 Schematic diagram of inverted triangle ditch single ring transportation

建立 2 部分剥离物料增加的运输费用模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} C_5 = \frac{h_1^2(\cot \alpha + \cot \beta)LB_1}{2000} \left[\frac{3}{4}L_m + H\left(\cot \beta - \frac{1}{2}\cot \alpha\right) - \frac{1}{4}h_1\cot \beta \right] \\ C_6 = \frac{[L_m + 2H(\cot \beta + \cot \alpha)]h_1LB_1}{2000} [L_m + \left(2H - \frac{5}{4}h_1\right)\cot \beta - \frac{1}{4}h_1\cot \alpha] \end{array} \right. \quad (11)$$

式中, C_5 、 C_6 分别为压帮内排倒三角留沟模式留沟上部单侧剥离物料留沟区域与非留沟区域剥离物料增加的运输费用, 元; B_1 为一次剥离物料单位运输费用, 元/($m^3 \cdot km$)。

建立半压帮内排倒三角留沟总费用模型:

$$\begin{aligned}
 G_2 &= I_1 h_1^3 + I_2 h_1^2 + I_3 h_1 + I_4 \\
 \left\{ \begin{array}{l} I_1 = \frac{LB_1(6\cot\alpha\cot\beta + 9\cot^2\beta + \cot^2\alpha)}{8000} \\ I_2 = \frac{(\cot\alpha + \cot\beta)LB_2[0.25L_m - L_n + 0.5H(\cot\beta - \cot\alpha_1 - \cot\beta_1 - \cot\alpha)]}{2000} \\ \text{s.t.} \quad \frac{1000LA(\cot\alpha + \cot\beta) + LB_2(L_m + 2H\cot\beta)\left(\frac{13}{4}\cot\beta + \frac{5}{4}\cot\alpha\right)}{2000} \\ I_3 = \frac{LB_1(L_m^2 + 4HL_m\cot\beta + 4H^2\cot^2\beta)}{2000} \\ I_4 = \frac{H^2(\cot\alpha + \cot\beta)L\left\{1000A + B_2\left[\frac{1}{2}L_m + L_n + \frac{1}{2}H(\cot\alpha_1 + \cot\beta_1 + \cot\beta)\right]\right\}}{2000} \end{array} \right. \quad (12)
 \end{aligned}$$

式中, G_2 为半压帮内排倒三角留沟总费用, 元。

1.2.2 倒梯形留沟总费用模型

(1) 倒梯形留沟二次剥离费用模型。根据倒梯形留沟示意(图 6), 有

$$\left\{ \begin{array}{l} S_4 = \frac{(H-h_2)^2(\cot\alpha + \cot\beta)}{2} \\ V_4 = \frac{(H-h_2)^2(\cot\alpha + \cot\beta)L}{2} \end{array} \right. \quad (13)$$

式中, S_4 为倒梯形留沟二次剥离区域面积, m^2 ; V_4 为倒梯形留沟二次剥离量, m^3 。

建立倒梯形留沟二次剥离物料的剥离费用模型:

$$C_7 = V_4 A = \frac{(H-h_2)^2(\cot\alpha + \cot\beta)LA}{2} \quad (14)$$

式中, C_7 为倒梯形留沟二次剥离费用, 元。

取压帮深度一半位置水平的运输距离为倒梯形

$$C_8 = \frac{(H-h_2)^2(\cot\alpha + \cot\beta)LB_2[L_m + 2L_n + (H-h_2)(\cot\beta + \cot\alpha_1 + \cot\beta_1)]}{4000} \quad (16)$$

式中, C_8 为倒梯形留沟二次剥离物料运输费用, 元。

(2) 倒梯形留沟水平上部工作帮单侧剥离物料增加的运输费用模型。将留沟水平上部工作帮单侧剥离物料分为留沟区域 E 和非留沟区域 F 两部分(图 7), 其中, L_j 为倒梯形留沟 E 部分剥离物料底部宽度, m , 有

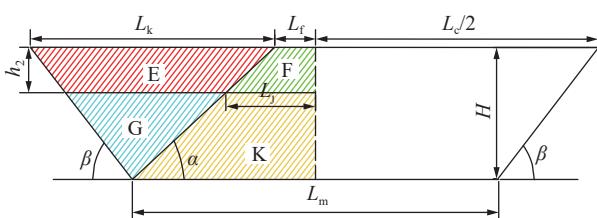


图 7 倒梯形留沟模式留沟上部单侧物料关系示意

Fig.7 Schematic diagram of the single-sided material relationship between the upper part of the inverted trapezoidal trench retention mode

留沟二次剥离物料的平均运距。

$$L_{w2} = \frac{L_m + 2L_n + (H-h_2)(\cot\beta + \cot\alpha_1 + \cot\beta_1)}{2} \quad (15)$$

式中, h_2 为倒梯形留沟模式的留沟深度, m ; L_{w2} 为倒梯形留沟二次剥离物料平均运距, m 。

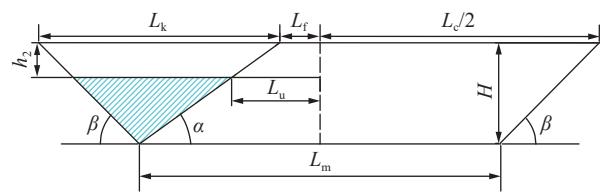


图 6 倒梯形留沟二次剥离区域示意

Fig.6 Schematic diagram of the secondary peeling area of the inverted trapezoidal groove

建立倒梯形留沟二次剥离物料的运输费用模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_E = \frac{h_2(2H-h_2)(\cot\alpha + \cot\beta)L}{2} \\ V_F = \frac{[L_m - (2H-h_2)\cot\alpha]h_2L}{2} \end{array} \right. \quad (17)$$

式中, V_E 、 V_F 分别为 E 与 F 两部分剥离物料量, m^3 。

倒梯形留沟水平上部剥离物料采用如图 8 所示

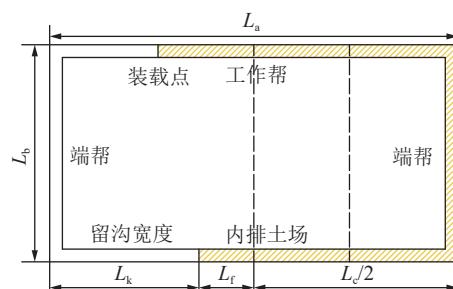


图 8 倒梯形留沟单环运输示意

Fig.8 Schematic diagram of inverted trapezoidal trench single-ring transportation

的单环运输系统。

分析得到 E 与 F 两部分剥离物料单环平均运距为

$$\begin{cases} L_{WE} = \left(H - \frac{1}{2}h_2\right) \left(\frac{3}{2}\cot\beta + \cot\beta_1 + \cot\alpha_1\right) + \\ \quad \frac{1}{2}H(\cot\beta - \cot\alpha) + \frac{5}{4}L_m + L_n \\ L_{WF} = \left(H - \frac{1}{2}h_2\right) \left(\frac{5}{2}\cot\beta - \frac{1}{2}\cot\alpha + \cot\alpha_1 + \cot\beta_1\right) + \\ \quad \frac{3}{2}L_m + L_n \end{cases} \quad (18)$$

两部分剥离物料相对双环运输增加的平均运输距离为

$$\begin{cases} \Delta L_{WE} = \frac{3}{4}L_m + H\left(\cot\beta - \frac{1}{2}\cot\alpha\right) - \frac{1}{4}h_2\cot\beta \\ \Delta L_{WF} = L_m + \left(H - \frac{1}{2}h_2\right)\left(\frac{3}{2}\cot\beta - \frac{1}{2}\cot\alpha\right) \end{cases} \quad (19)$$

式中, L_{WE} 为 E 部分剥离物料单环运输平均运距, m; L_{WF} 为 F 部分剥离物料单环运输平均运距, m; ΔL_{WE} 为 E 部分剥离物料增加的平均运距, m; ΔL_{WF} 为 F 部分剥离物料增加的平均运距, m。

得到 2 部分剥离物料增加的运输费用为

$$\begin{cases} C_9 = \frac{h_2(2H - h_2)(\cot\alpha + \cot\beta)LB_1 \left[\frac{3}{4}L_m + H\left(\cot\beta - \frac{1}{2}\cot\alpha\right) - \frac{1}{4}h_2\cot\beta \right]}{2000} \\ C_{10} = \frac{[L_m - (2H - h_2)\cot\alpha]h_2LB_1 \left[L_m + \left(H - \frac{1}{2}h_2\right)\left(\frac{3}{2}\cot\beta - \frac{1}{2}\cot\alpha\right) \right]}{2000} \end{cases} \quad (20)$$

式中, C_9 、 C_{10} 分别为 E、F 两部分剥离物料增加的运输费用, 元。

建立半压帮内排倒梯形留沟总费用模型为

$$\begin{aligned} G_3 &= I_5h_2^3 + I_6h_2^2 + I_7h_2 + I_8 \\ I_5 &= \frac{LB_1[\cot\alpha(\cot\alpha - 3\cot\beta) - (\cot\alpha + \cot\beta)(\cot\beta + 2\cot\alpha_1 + 2\cot\beta_1)]}{8000} \\ I_6 &= \frac{(\cot\alpha + \cot\beta)B_2L[2L_n - 0.5L_m + H(3\cot\alpha_1 + 3\cot\beta_1 + \cot\alpha)] + 2000(\cot\alpha + \cot\beta)AL}{4000} - \\ &\quad \frac{LB_2[2L_m\cot\alpha + (3\cot\beta - \cot\alpha)(2H\cot\alpha - 0.5L_m)]}{4000} \\ I_7 &= \frac{(\cot\alpha + \cot\beta)HB_1L[0.5L_m - 2L_n + 0.5H(\cot\beta - 2\cot\alpha - 3\cot\alpha_1 - 3\cot\beta_1)]}{2000} + \\ &\quad \frac{B_1L(L_m - 2H\cot\alpha)[L_m + H(1.5\cot\beta - 0.5\cot\alpha)] - 2000HLA(\cot\alpha + \cot\beta)}{2000} \\ I_8 &= H^2(\cot\alpha + \cot\beta)L \left\{ 1000A + B_2 \left[\frac{1}{2}L_m + L_n + \frac{1}{2}H(\cot\alpha_1 + \cot\beta_1 + \cot\beta) \right] \right\} / 2000 \end{aligned} \quad (21)$$

式中, G_3 为半压帮内排倒梯形留沟总费用, 元。

2 压帮内排留沟高度费用补偿法模型

2.1 内排空间分析

在不增加外排空间的条件下, 2 种留沟模式中留沟区域剥离物料主要通过加高内排土场高度排弃。留沟面积相等情况, 倒三角留沟 (图 9(a), 其中, L_g 为采区单侧地表工作线长度, m) 的留沟深度较大, 相对留沟宽度在内排土场工作线长度占比较小, 在内排土场高度一定时, 内排容量较大。该留沟模式前期一定程度上缓解了内排压力, 但在开采留沟区域相邻采区时增加了二次剥离量。倒梯形留沟 (图 9(b)) 的深度小, 但留沟宽度在内排土场工作线长度中占比较大,

内排空间受到一定限制。

考虑内排加高后增加的排弃空间不小于留沟区域剥离物料量, 即: $V_t \geq V_C$, $V_t \geq V_E$ 。

$$\begin{cases} V_t = (L_m + H\cot\beta - H\cot\alpha - X_1 - H_p\cot\alpha)H_pL \\ V_C = \frac{h_1^2(\cot\alpha + \cot\beta)L}{2} \\ V_E = \frac{h_2(2H - h_2)(\cot\alpha + \cot\beta)L}{2} \end{cases} \quad (22)$$

式中, V_t 为内排加高后的排弃空间, m^3 ; V_C 为倒三角留沟区域剥离物料体积, m^3 ; V_E 为倒梯形留沟区域剥离物料体积, m^3 ; H_p 为内排土场增加高度, m; X_1 为平盘安全距离。

通过分析确定 2 种留沟模式最大留沟深度分别为

$$\begin{cases} h_{1\max} \leq \sqrt{\frac{2(L_m + H \cot \beta - H \cot \alpha - X_1 - H_p \cot \alpha) H_p L}{(\cot \alpha + \cot \beta)L}} \\ h_{2\max} \leq H - \sqrt{\frac{H^2 (\cot \alpha + \cot \beta)L - 2(L_m + H \cot \beta - H \cot \alpha - X_1 - H_p \cot \alpha) H_p L}{(\cot \alpha + \cot \beta)L}} \end{cases} \quad (23)$$

式中, $h_{1\max}$ 、 $h_{2\max}$ 分别为倒三角、倒梯形最大留沟深度, m。

2.2 倒三角留沟高度优化模型

以全压帮内排开采为参照, 构建倒三角留沟高度的费用补偿法关系模型为

$$\begin{aligned} Y_1 &= -I_1 h_1^3 - I_2 h_1^2 - I_3 h_1 \\ \text{s.t. } I_1 &= \frac{LB_1(6 \cot \alpha \cot \beta + 9 \cot^2 \beta + \cot^2 \alpha)}{8000} \\ I_2 &= \frac{(\cot \alpha + \cot \beta) LB_2 [0.25 L_m - L_n + 0.5H(\cot \beta - \cot \alpha_1 - \cot \beta_1 - \cot \alpha)]}{2000} \\ &\quad \frac{1000LA(\cot \alpha + \cot \beta) + LB_2(L_m + 2H \cot \beta) \left(\frac{13}{4} \cot \beta + \frac{5}{4} \cot \alpha \right)}{2000} \\ I_3 &= \frac{LB_1(L_m^2 + 4HL_m \cot \beta + 4H^2 \cot^2 \beta)}{2000} \end{aligned} \quad (24)$$

式中, Y_1 为倒三角留沟高度优化模型。

对 Y_1 求导, 并令其导数为 0, 可得

$$h_1 = \frac{2I_2 \pm \sqrt{4I_2^2 - 12I_1 I_3}}{-6I_1} \quad (25)$$

根据式 (25) 确定方程的 2 个解 $h_{11} < h_{12}$, 且由于

$I_1 > 0$, 显然函数在 $(-\infty, h_{11})$ 内单调递减, 在 (h_{11}, h_{12}) 内单调递增, 在 $(h_{12}, +\infty)$ 单调递减, 并考虑 $h_1 \in [0, H]$, 综合确定使补偿费用最大的留沟高度。

2.3 倒梯形留沟高度优化模型

以全压帮内排开采为对比, 构建倒梯形留沟高度的费用补偿法关系模型为

$$\begin{aligned} Y_2 &= -I_5 h_2^3 - I_6 h_2^2 - I_7 h_2 \\ \text{s.t. } I_5 &= \frac{LB_1[\cot \alpha(\cot \alpha - 3 \cot \beta) - (\cot \alpha + \cot \beta)(\cot \beta + 2 \cot \alpha_1 + 2 \cot \beta_1)]}{8000} \\ I_6 &= \frac{(\cot \alpha + \cot \beta) B_2 L [2L_n - 0.5L_m + H(3 \cot \alpha_1 + 3 \cot \beta_1 + \cot \alpha)] + 2000(\cot \alpha + \cot \beta) AL}{4000} \\ &\quad \frac{LB_2[2L_m \cot \alpha + (3 \cot \beta - \cot \alpha)(2H \cot \alpha - 0.5L_m)]}{4000} \\ I_7 &= \frac{(\cot \alpha + \cot \beta) HB_1 L [0.5L_m - 2L_n + 0.5H(\cot \beta - 2 \cot \alpha - 3 \cot \alpha_1 - 3 \cot \beta_1)]}{2000} + \\ &\quad \frac{B_1 L(L_m - 2H \cot \alpha)[L_m + H(1.5 \cot \beta - 0.5 \cot \alpha)] - 2000 HLA(\cot \alpha + \cot \beta)}{2000} \end{aligned} \quad (26)$$

式中, Y_2 为倒三角留沟高度优化模型。

对 Y_2 求导, 并令其导数为 0, 可得式 (26) 根为

$$h_2 = \frac{2I_6 \pm \sqrt{4I_6^2 - 12I_5 I_7}}{-6I_5} \quad (27)$$

结合式 (25) 确定函数增减性方法及 $h_2 \in [0, H]$, 综合确定使补偿费用最大的倒梯形留沟的最佳留沟高度。

3 压帮内排搭桥移设步距优化

为降低留沟对运输系统的影响, 在留沟区域通过内排搭桥的方式连通内排土场与端帮, 建立双环运输

系统, 如图 10 所示。其中桥体的移设步距是影响搭桥经济效益的主要因素。移设步距越大, 搭桥次数越少, 搭桥和重复剥离所需费用越低。但是剥离物被运送至排弃地点的过程中, 汽车在端帮和排土场增加的行走距离也会越大, 运输费用会增加^[19-20]。

为确定内排搭桥的合理移设步距, 定义卡车单环运输增加的运距等于留沟搭桥内排时上下坡所增加的运距加上桥移设步距产生的运距为当量单环运距^[21]:

$$L_d = 2 \frac{H(i)}{R} C_q + D \quad (28)$$

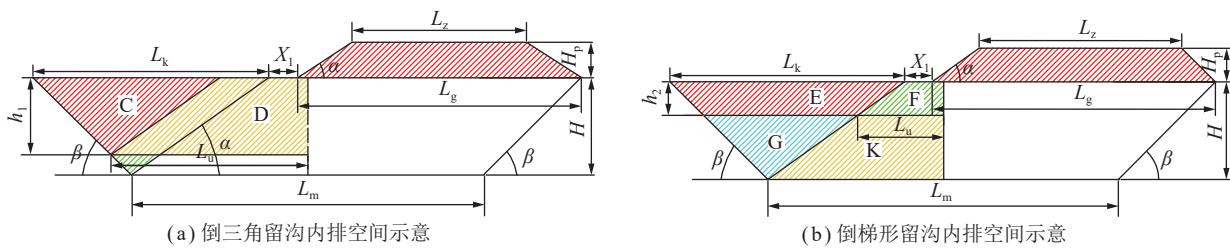
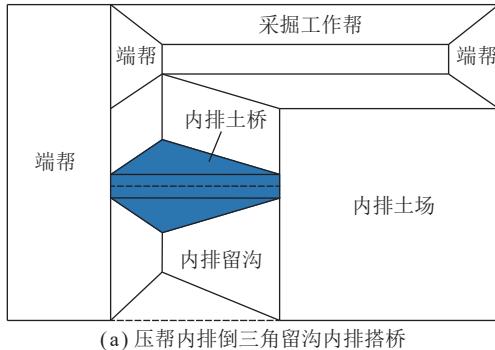


图 9 半压帮内排模式内排空间示意

Fig.9 Schematic diagram of the inner row space in the half-pressure gang inner row mode



(a) 压帮内排倒三角留沟内排搭桥

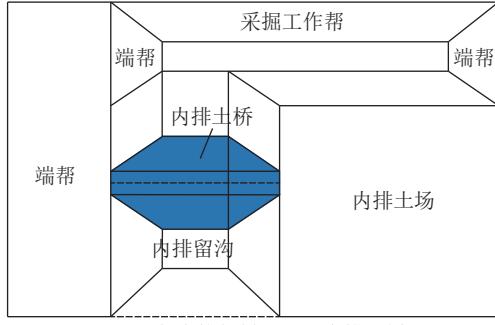


图 10 半压帮内排模式内排搭桥示意

Fig.10 Schematic diagram of the half-pressure gang inner row mode inner row bridge

式中, L_d 为当量单环运距, m; $H(i)$ 为第 i 个台阶重心与桥面水平的高差, m; R 为道路限制坡度, 取 8%~10%; C_q 为道路展线系数, 取 1.1; D 为搭桥移设步距, m。

为确定合理的移设步距, 提出移设步距准则:

准则 1: 当量单环运距应不大于卡车单环运输增加的运距。

准则 2: 搭桥节省的运输费用应不小于桥体重复剥离及运输费用。

3.1 倒三角留沟内排搭桥移设步距优化模型

根据准则 1, 当量单环运距应不大于卡车单环运输增加的运距, 以图 11 中 D 部分剥离物料的运距变化作为单侧剥离物料运输距离变化标准。

$$D_1 \leq L_m + \left(2H - \frac{5}{4}h_1\right) \cot \beta - \frac{1}{4}h_1 \cot \alpha - 2 \frac{H(i)}{R} C_q \quad (29)$$

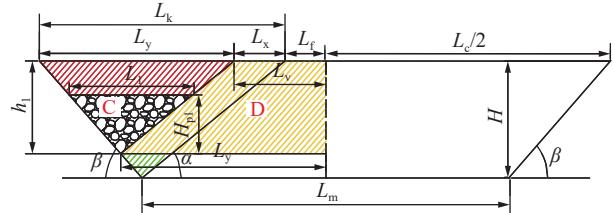
 H_{p1} 为倒三角留沟模式下内排搭桥的桥体高度。

图 11 倒三角留沟模式内排搭桥断面示意

Fig.11 Schematic diagram of the inner row bypass bridge section of the inverted triangle trench retention mode

式中, D_1 为倒三角留沟内排搭桥桥体移设步距, m。

根据准则 2, 搭桥节省的运输费用应不小于搭桥重复剥离及运输费用。

$$\frac{V_{n1}B_1 \left(\Delta L_{WD} - 2 \frac{H(i)}{R} C_q - D_1 \right)}{1000} \geq \frac{V_{p1}AL}{D_1} + \frac{V_{p1}B_2 LL_{w1}}{1000 D_1} \quad (30)$$

式中, V_{n1} 为内排搭桥服务的桥面水平上部以及下部剥离物料量, m^3 ; V_{p1} 为倒三角留沟内排搭桥体积, m^3 。

建立移设步距经济效益函数关系为

$$F(D_1) =$$

$$\frac{V_{n1}B_2 \left(\Delta L_{WD} - \frac{2H(i)}{R} C_q - D_1 \right)}{1000} - \frac{V_{p1}(B_2 LL_{w1} + 1000AL)}{1000 D_1} \quad (31)$$

对式 (31) 求导, 并令导数 $F'(D_1) = 0$, 得

$$D_1 = \sqrt{\frac{V_{p1}(B_2 LL_{w1} + 1000AL)}{V_{n1}B_1}} \quad (32)$$

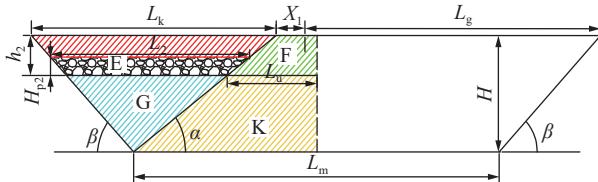
依据 $D_1 > 0$ 及满足准则 1 的取值要求, 结合 $F(D_1)$ 在区间 $(0, D_1)$ 和区间 $(D_1, +\infty)$ 的增减性, 确定 D_1 为最佳移设步距。

3.2 倒梯形留沟内排搭桥移设步距优化模型

结合倒梯形留沟内排搭桥断面关系 (图 12), 根据准则 1, 当量单环运距应不大于卡车单环运输增加的运距, 以 F 部分剥离物料的运距作为单侧剥离物料运输距离标准, 有

$$D_2 \leq L_m + H \left(\frac{5}{4} \cot \beta - \frac{1}{2} \cot \alpha \right) - \frac{1}{2} h_2 \cot \beta - 2 \frac{H(i)}{R} C_q \quad (33)$$

式中, D_2 为倒梯形留沟内排搭桥桥体移设步距, m。



注: H_p2 为倒梯形留沟模式下内排搭桥的桥体高度。

图 12 倒梯形留沟模式内排搭桥断面示意

Fig.12 Schematic diagram of the inner row bridge section of the inverted trapezoidal trench retention mode

根据准则 2, 搭桥节省的运输费用应不小于搭桥重复剥离及运输费用, 有:

$$\frac{V_{n2}B_1 \left(\Delta L_{WF} - 2 \frac{H(i)}{R} C_q - D_2 \right)}{1000} \geq \frac{V_{p2}AL}{D_2} + \frac{V_{p2}B_2 LL_{w1}}{1000 D_2} \quad (34)$$

式中, V_{n2} 为内排搭桥服务的桥面水平上部以及下部剥离物料量, m^3 ; V_{p2} 为倒梯形留沟内排搭桥体积, m^3 。

得到移设移设步距经济效益函数关系为

$$F(D_2) = \frac{V_{n2}B_1 \left(\Delta L_{WF} - 2 \frac{H(i)}{R} C_q - D_2 \right)}{1000} - \frac{V_{p2}(B_2 LL_{w1} + 1000 AL)}{1000 D_2} \quad (35)$$

对式 (35) 求导, 并令导数 $F'(D_2) = 0$, 得

$$D_2 = \sqrt{\frac{V_{p2}(B_2 LL_{w1} + 1000 AL)}{V_{n2}B_1}} \quad (36)$$

同理, 确定 D_2 为最佳移设步距。

4 实 例

4.1 问题的提出

河曲露天煤矿首采区临近终了并转向进入二采区(图 13)。在首采区西端帮邻近二采区位置预留深度达 150 m 深沟。该沟的预留可以有效的减少首采区内排土场压帮对二采区开采的二次剥离影响, 节省二次剥离成本。但却致使首采区的内排空间不能完全释放, 增加了首采区内排土场的负担以及剥离物料转排成本协调首采区与二采区间留沟模式与最佳留沟高度, 对河曲露天煤矿开采成本控制具有重要意义。

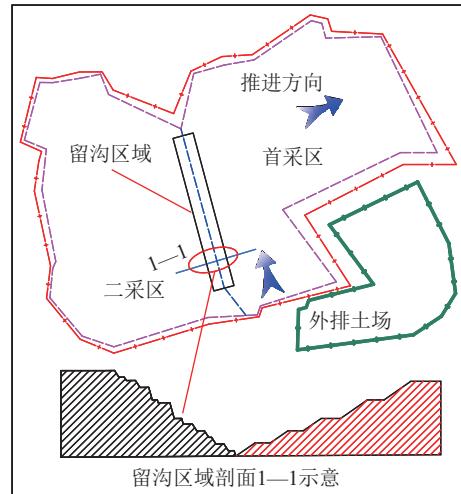


图 13 河曲露天煤矿首采区与二采区位置关系示意

Fig.13 Location relationship between the first mining area and the second mining area of Hequ open-pit Coal Mine

4.2 留沟高度综合确定

根据上述留沟高度优化模型及矿山开采设计技术参数, 见表 1。在平均开采深度 H 为 150 m, 沟高度的取值为 (0, 150)。首采区转向至二采区, 若采用半压帮内排倒三角留沟模式开采, Y_1 在 (0, 62.5) 上单调递减, 在 (62.5, 150) 单调递增, 综合考虑内排空间, 留沟高度的最大值为 110 m; 若采用半压帮内排倒梯形留沟模式开采, Y_2 在 (0, 104) 上单调递增, 在 (104, 150) 上单调递减, 综合考虑内排空间, 留沟高度的最大值为 67 m。

表 1 河曲露天煤矿开采经济与技术参数

Table 1 Economic and technical parameters of Hequ open-pit Coal Mine

参数	取值
$\alpha/(^\circ)$	19
$\alpha_1/(^\circ)$	15
$\beta/(^\circ)$	34
$\beta_1/(^\circ)$	8
H/m	150
L_n/m	80
L_m/m	936
L/m	1450
$B_1/(\text{元} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{km})^{-1})$	2.5
$B_2/(\text{元} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{km})^{-1})$	3.0
$A/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	2.9

以全压帮内排总费用为基准, 建立压帮内排倒三角留沟与倒梯形留沟经济收益模型, 确定倒三角留沟与倒梯形留沟模式总收益关系如图 14 所示。倒三角留沟总费用随着留沟高度的增加先增大后减小, 总经

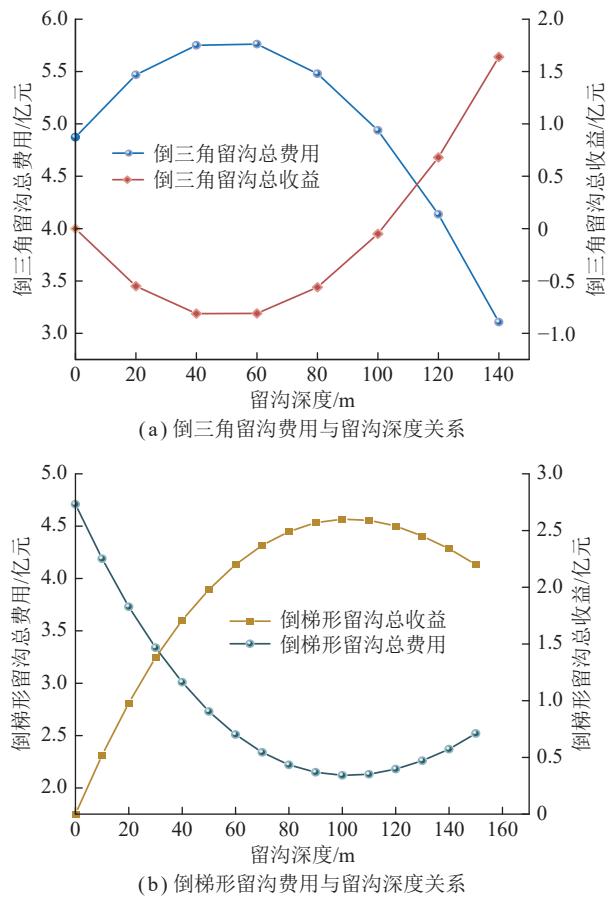


图 14 留沟费用与留沟深度关系曲线

Fig.14 Relation curves between the ditching cost and the ditching depth

济效益先减小后增大; 倒梯形留沟总费用随着留沟深度的增加先减小后增大, 总收益先增大后减小。

采用半压帮内排倒三角留沟模式, 当留沟深度为 110 m 时, 经济效益最佳为 4 580 万元; 采用半压帮内排倒梯形留沟模式, 当留沟深度为 67 m 时, 经济效益最佳为 22 400 万元。

4.3 内排搭桥移设步距确定

根据露天煤矿开采经验, 内排搭桥一般服务 2 个台阶, 结合河曲露天煤矿的开采参数, 台阶重心与桥面水平高差是平均值取 12 m。依据压帮内排经济效益函数关系, 得到内排搭桥移设步距经济效益与移设步距关系如图 15 所示。

半压帮内排倒三角留沟的最佳留沟深度 110 m, 依据移设步距确定准则 1, 移设步距需小于 756 m, 依据准则 2 最佳的移设步距为 104 m, 产生的经济效益为 5 500 万元; 半压帮内排倒梯形留沟最佳留沟深度为 67 m, 依据移设步距确定准则 1, 移设步距需小于 585 m, 依据准则 2 最佳的移设步距为 264 m, 产生的经济效益为 2 140 万元, 上述最佳移设步距均满足准则 1 的要求。

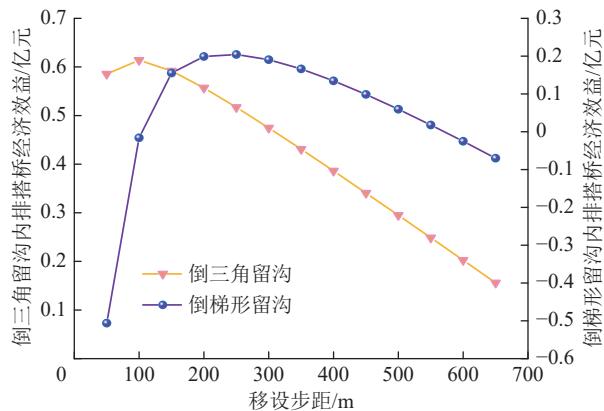


图 15 内排搭桥移设步距经济效益关系曲线

Fig.15 Relation curves of the economic benefits of the inner row bridge shift distance

5 结论

(1) 压帮内排倒三角留沟总费用随着留沟高度的增加先增大后减小, 总经济效益先减小后增大; 压帮内排倒梯形留沟总费用随着留沟深度的增加先减小后增大, 总收益先增大后减小。

(2) 倒三角留沟模式与倒梯形留沟模式端帮内排搭桥经济效益随移设步距的增大呈先增大后减小的趋势, 倒梯形留沟内排搭桥的桥体量大, 其经济效益受移设步距的影响较大。

(3) 河曲露天煤矿倒三角最佳留沟高度为 110 m, 内排搭桥最佳移设步距为 104 m, 相对全压帮内排节约 10 080 万元; 倒梯形留沟最佳留沟高度为 67 m, 内排搭桥最佳移设步距为 264 m, 相对全压帮内排节约 24 540 万元。

参考文献(References):

- [1] 马力, 李瑞行, 刘福明, 等. 露天煤矿产能核增影响下采区划分研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 63–70.
MA Li, LI Ruihang, LIU Fuming, et al. Research on the division of mining area under the influence of capacity increase of open-pit coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 63–70.
- [2] 马力, 刘晨东, 罗强, 等. 相邻露天煤矿边帮煤开采内排留沟高度优化[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 997–1004.
MA Li, LIU Chendong, LUO Qiang, et al. Optimization of inner dumping ditch height for end-wall coal mining in adjacent open-pit coalmines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(5): 997–1004.
- [3] 李胤达, 韩流, 尚涛, 等. 近水平煤层露天矿中间搭桥高度研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 45–52.
LI Yinda, HAN Liu, SHANG Tao, et al. Study on height of pit middle bridge in open-pit mine with flat seam deposit[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 45–52.
- [4] 潘飞亚. 岩石半固定破碎站半连续工艺在近水平露天矿中的应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.

- PAN Feiya. Study on the application of semi-continuous process of rock semi-fixed crushing station in near-horizontal surface mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [5] 白润才, 郭伟强, 刘光伟, 等. 露天矿相邻采区间先压帮后留沟内排方式研究[J]. 露天采矿技术, 2020, 35(6): 16–20.
- BAI Runcai, GUO Weiqiang, LIU Guangwei, et al. Study on inner dumping methods of first pressing slop and ditch in the adjacent mining areas of the open-pit coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2020, 35(6): 16–20.
- [6] 刘桐. 霍林河一号露天矿采区划分及过渡优化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- LIU Tong Optimization research on mining section dividing and transition for Huolin River No.1 Open-pit Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [7] 赵俊, 尚涛, 刘记鹏, 等. 近水平露天矿内排重复剥离量及留沟深度[J]. 金属矿山, 2012(2): 54–56.
- ZHAO Jun, SHANG Tao, LIU Jipeng, et al. Inner dumping re-stripping volume and groove depth in near horizontal surface mine[J]. Metal Mine, 2012(2): 54–56.
- [8] 常治国, 陈亚军, 段鲲鹏, 等. 并行露天煤矿压帮内排回采三角煤留沟深度研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(3): 15–17.
- CHANG Zhiguo, CHEN Yajun, DUAN Kumpeng, et al. Research on ditch depth for triangle-coal mining in end slopecovering inner dumping parallel open-pit mine[J]. Coal Engineering, 2016, 48(3): 15–17.
- [9] 威华, 武成权, 郭帅. 安家岭露天矿二采区北帮重复剥离采深优化[J]. 露天采矿技术, 2021, 36(5): 86–89.
- WEI Hua, WU Chengquan, GUO Shuai. Optimization of repeated stripping mining depth in north slope of the second mining area of Anjialing Open-pit Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2021, 36(5): 86–89.
- [10] 王炜, 姚建华, 王桂林, 等. 相邻露天煤矿协调开采合理压帮高度确定[J]. 露天采矿技术, 2016, 31(S1): 22–27.
- WANG Wei, YAO Jianhua, WANG Guilin, et al. Determination of reasonable pressure slope height in coordinated mining of adjacent open-pit[J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(S1): 22–27.
- [11] 张丁, 罗怀廷, 刘宇, 等. 相邻露天煤矿采区间留沟高度经济性分析[J]. 露天采矿技术, 2016, 31(6): 41–45.
- ZHANG Ding, LUO Huaiting, LIU Yu, et al. Economic analysis of leaving ditch height between mining areas in adjacent open-pit mines[J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(6): 41–45.
- [12] 赵彦合, 刘维玉, 陈杰, 等. 平朔东露天矿相邻采区重复剥离采深优化[J]. 露天采矿技术, 2012(S1): 59–60.
- ZHAO Yanhe, LIAO Weiye, CHEN Jie, et al. Repeated stripping mining depth optimization of adjacent mining areas in Pingsheng East Open-pit Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2012(S1): 59–60.
- [13] 顾正洪, 查振高. 近水平矿床内排重要技术参数的确定[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(3): 38–42.
- GU Zhenghong, ZHA Zhengao. Determination of important technical parameters of the inner row of the near horizontal deposit[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1996, 25(3): 38–42.
- [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.
- [15] 刘光伟, 李鹏, 李成盛, 等. 露天矿相邻采区间内排压帮高度及重复剥离深度的综合优化[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(6): 23–30.
- LIU Guangwei, LI Peng, LI Chengsheng, et al. Inner dumping covering height and repeated stripping depth of adjacent mining area in surface coal mines[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(6): 23–30.
- [16] 马力, 肖双双, 常治国, 等. 基于压帮内排的露天煤矿采区间留沟高度优化[C]//第八届露天开采专业科技学术研讨会论文集. 北京: 中国煤炭学会, 2019: 150–159.
- MA Li, CHANG Zhiguo, LI Kemin. Optimization of inner dumping uncovered height with partially covered end wall in adjacent surface coal mining districts[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018. Doi: [10.1155/2018/5404835](https://doi.org/10.1155/2018/5404835).
- [17] MA Li, CHANG Zhiguo, LI Kemin. Optimization of inner dumping uncovered height with partially covered end wall in adjacent surface coal mining districts[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018. Doi: [10.1155/2018/5404835](https://doi.org/10.1155/2018/5404835).
- [18] MA Li, LI Kemin, XIAO Shuangshuang, et al. Optimisation study on ordinated mining model of coal reserves buried between adjacent surface mines[J]. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 2017, 16(3): 283–297.
- [19] 罗科, 吕贵龙, 段裕勤. 端帮靠帮开采与搭桥内排相结合开采技术的应用[J]. 煤炭技术, 2020, 39(1): 50–52.
- LUO Ke, LÜ Guilong, DUAN Yuqin. Combined application of steep end-slope mining and pit-middle bridging in open pit mining[J]. Coal Technology, 2020, 39(1): 50–52.
- [20] 赵红泽, 郭锦桦, 刘元旭, 等. 再论露天矿群开采-采排复一体化协同采矿技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 47–55.
- ZHAO Hongze, GUO Jinhua, LIU Yuanxu, et al. Discussion on co-ordination of open-dit mine group mining and integration of mining-dumping- reclaiming[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 47–55.
- [21] 常治国, 陈亚军, 马力, 等. 并行露天矿追踪式开采端帮留沟搭桥内排方案研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(1): 16–18.
- CHANG Zhiguo, CHEN Yajun, MA Li, et al. Research of inner dumping by building end slope bridge inthe tracing parallel open pit mine[J]. Coal Engineering, 2018, 50(1): 16–18.