



移动扫码阅读

曹 博,陶亚彬,韩 勇.烧变岩侵蚀条件下倾斜煤层露天矿分区境界优化[J].煤炭科学技术,2020,48(6): 228-235. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.06.030

CAO Bo,TAO Yabin,HAN Yong,et al.Division boundary optimization of inclined coal seam in open-pit mine under eroded burnt rock [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (6): 228 - 235. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.06.030

烧变岩侵蚀条件下倾斜煤层露天矿分区境界优化

曹 博¹,陶亚彬¹,韩 勇²,张子光²,白文政¹,刘志龙³

(1.辽宁工程技术大学 矿业学院,辽宁 阜新 123000; 2.神华新疆能源有限责任公司 红沙泉露天煤矿,新疆 乌鲁木齐 838100;3.鞍钢集团关宝山矿业有限公司,辽宁 鞍山 114000)

摘 要:为了优化烧变岩侵蚀条件下倾斜煤层露天矿分区境界,分析了新疆煤田烧变岩赋存特点,以及煤、岩层赋存情况的随机性,以神华新疆能源有限责任公司黑山露天煤矿为例,通过构建模拟开采境界,揭示了境界剥采比与平均剥采比随分区境界外扩的变化规律,确定了烧变岩侵蚀露天矿分区境界圈定的原则及适用条件;通过 SMCAD 软件构建了黑山露天煤矿三维仿真境界;提出了通过建立煤、岩层层状属性块体模型,用块量反验方式校验三维境界的方法。研究结果表明:黑山露天煤矿经济合理剥采比 n_j 为 $8.06 \text{ m}^3/\text{t}$,满足了境界剥采比 $n_0 = 4.4 \text{ m}^3/\text{t} \leq n_j$ 条件,即存在以“境界剥采比小于或等于经济合理剥采比”为原则确定的合理境界;采用块量反验方法得到其块量里收境界剥采比与块量外扩境界剥采比,从三维角度实现了反验设计境界的合理性,由块量反验可知块量外扩分区境界剥采比 $n_{k,i}^+ = 8.05 \text{ m}^3/\text{t} \leq n_j$,合理确定了外扩境界,从而实现了烧变岩侵蚀条件下露天矿经济效益的最大化。

关键词:烧变岩;露天矿;境界剥采比;平均剥采比;块量反验

中图分类号:TD824

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)06-0228-08

Division boundary optimization of inclined coal seam in open-pit mine under eroded burnt rock

CAO Bo¹,TAO Yabin¹,HAN Yong²,ZHANG Ziguang²,BAI Wenzheng¹,LIU Zhilong³

(1.College of Mining,Liaoning Technical University,Fuxin 123000,China; 2.Hongshaquan Open-pit Coal Mine,Shenhua Xinjiang Energy Limited Liability Company,Urumqi 838100,China;3.Anshan Iron and Steel Group Guanbaoshan Mining Co.,Ltd., Anshan 114000,China)

Abstract:In order to optimize the division boundary optimization of inclined coal seam in open-pit mine under the erosion condition of burnt rock,the characteristics of burnt rock occurrence and the randomness of coal and rock occurrence in Xinjiang coalfield were analyzed.Taking Heishan Open-Pit Coal Mine of Shenhua Xinjiang Energy Co.,Ltd.as the background,by constructing the simulated mining boundary,the variation rule of boundary stripping ratio and average stripping ratio with the expansion of the partition boundary was revealed,and the principles and applicable conditions for the division boundary of the burnt rock erosion in open-pit mines were determined.The SMCAD software were used to construct the 3D simulation boundary of the Heishan Open-Pit Coal Mine.The method of verifying the three-dimensional state by the block inverse method was established by establishing the block model of coal and rock layered attributes.This research results have been applied in the mining practice of the Heishan Open-Pit Coal Mine.The research results show that the economic reasonable stripping ratio of Heishan Open-Pit Coal Mine is $8.06 \text{ m}^3/\text{t}$,which meets n_0 (boundary stripping ratio) is $4.4 \text{ m}^3/\text{t} \leq n_j$ (economic reasonable stripping ratio).That is,there is a reasonable state determined based on the principle that the "state stripping ratio is less than or equal to the economically reasonable stripping ratio"; The block amount reverse test was used to obtain the block stripping ratio and the block size outward expansion level stripping ratio,which realizes the rationality of the reverse tests design realm from the 3D perspective,with the block amount reverse tests to determine division boundary ratio $n_{k,i}^+ = 8.05 \text{ m}^3/\text{t} \leq n_j$,and the reasonable boundary and maximize the economic benefit of the open pit mine under the condition of burnt rock erosion.

Key words:burnt rock;open-pit mine; boundary stripping ratio; average stripping ratio; block amount reverse tests

收稿日期:2020-01-22;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974144)

作者简介:曹 博(1984—),男,辽宁辽阳人,副教授,硕士生导师,博士。E-mail:caobo0418@163.com

0 引 言

露天矿境界是判定矿山资源储量及服务年限的依据,是矿山生产设计规划的基础。随着国内外露天矿山的发展,露天境界的圈定原则与方法不断丰富,主要方法包括:传统手工法、动锥法、LG 图论法、网络流法、境界动态优化法等,目前在我国的露天矿开采设计中,广泛采用 $n_0 \leq n_j$ 的原则确定境界^[1],即以境界剥采比不大于经济合理剥采比为原则。传统的手工方法是按照统一的经济合理剥采比,采用边帮线段比法圈定境界^[2-3],因其方便、快捷、易于掌握的特点被广泛采用^[4];动锥法是一种用系统模拟技术来解决露天矿开采境界的方法^[5],基本出发点是采用相互交错或者相互重叠的锥体来模拟最终开采境界^[6],圆锥体密集程度决定模拟露天矿的真实度,具有主观操作性;LG 图论法是指将露天矿的各个方块视作节点,方块之间的开采关系用有向弧表示,利用图论搜索最大开采闭包,在有向网络图中求出盈利最大的开采境界,是具有严格数学逻辑的最终境界优化方法^[7],但存在着方法复杂、计算耗时长、处理复杂边坡角困难等缺点^[8];网络流法是在建立矿床经济模型的基础上,根据露天开采的几何约束条件,形成矿岩网络,应用最大流原理和标号算法,从网络中找出经济效益最佳的矿岩块段组合,作为最优露天开采境界^[9];境界动态优化法是指通过编排进度计划等方式将时间属性植入矿床块体模型^[10],构建集经济时间序列预测、矿岩时间属性赋值和动态经济指标计算为一体的境界全动态优化方法^[11]。通过分析可知,上述方法的核心目的都是相同的,即:最大程度地实现露天开采矿山经济效益最大化。

对于倾斜煤层烧变岩侵蚀露天矿,为了充分发挥露天开采优势,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^[12],即对露天矿进行分区开采,以下境界指分区境界。新疆属典型的大陆性温带荒漠气候,气候干燥,煤层赋存较浅^[13],干旱、半干旱区岩层和裸露的煤层经风化大量吸热,当内存温度达到一定高温时(80℃以上)就可以引起煤本身增温燃烧;高山隆升使岩体煤层裸露,煤系地层受到剥蚀煤层出露受到干热氧化作用形成火烧区^[14]。由于新疆特殊的地质及气候条件,导致该地区煤田的火烧区点多面广,燃烧速度快,煤炭储量损失多,经济损失严重。火烧岩主要受煤层烘烤以及大地构造的影响^[15],一般垂向上是下部裂隙发育较强,上部岩体裂隙较

弱^[16],且倾角大,烧变岩的存在对边坡稳定性产生影响,在矿山开采过程中,为了保证边坡稳定,需将其全部清掉,这样便大幅增加了开采剥离量,使得境界内平均剥采比变大,甚至导致平均剥采比大于经济合理剥采比,致使按境界剥采比小于或等于经济合理剥采比原则圈定的境界不合理。因此,对于烧变岩侵蚀露天矿,不能简单地按照境界剥采比小于或等于经济合理剥采比的原则圈定境界,应综合考虑平均剥采比的变化来圈定其最优境界。

笔者分析了新疆煤田烧变岩赋存特点,并以神新能源黑山露天煤矿为背景,分析烧变岩的侵蚀对露天矿境界圈定的影响;通过构建模拟境界位置,分析境界剥采比与平均剥采比随分区境界外扩的变化规律,确定倾斜煤层烧变岩侵蚀露天矿境界圈定的原则及适用条件;以边帮线段比法为依据,采用拥有自主知识产权 SMCAD 软件构建了黑山露天煤矿三维仿真境界;在真三维的情况下,在圈定的仿真境界内填充煤、岩层属性块体,采用块量反验的方式校验境界位置的合理性,确定黑山露天煤矿的最优境界。

1 黑山露天煤矿烧变岩边帮稳定性分析

黑山露天煤矿位于天山中段以北的山间谷地,地势北高南低,西高东低。勘探区内发育的可采煤层包括:9 煤、11 煤、13-2 煤;其中,9 煤平均厚度为 9.70 m,密度 1.31 t/m³、11 煤平均厚度为 9.55 m,密度 1.32 t/m³、13-2 煤平均厚度为 29.95 m,密度 1.34 t/m³,煤层稳定赋存倾角为 12°。烧变岩是地表附近的厚煤层在地质历史时期自燃,使围岩受到烘烤或烧烤而形成的特殊类型的岩体^[17],黑山露天煤矿露头处围岩历经 13-2 煤自燃区的烧烤蚀变作用,形成了一条近东西向的烧变岩带,地表出露的烧变岩主要由 13-2 号煤层自燃后形成,宽 200~1 200 m,长约 18 km,垂深为 60~240 m,呈带状横贯全区,是典型的倾斜煤层烧变岩侵蚀露天矿。

通过分析可知:黑山露天矿采场北帮烧变岩边帮构造形态为一宽缓的 NE 向不对称背斜,倾角(13°~17°),是典型顺倾边坡;且烧变岩底板存在软弱夹层,由于弱层的抗剪强度较低,极大地降低了岩土体的抗滑稳定性,使得黑山露天矿北帮边坡滑坡风险加大,对于这种底板含有软弱夹层的松散均质顺倾边坡,其滑坡模式应由弱层和圆弧面组合控制,由此可以确定,黑山露天矿采场北帮边坡的潜在滑坡模式主要为切层-顺层滑动,即边坡可能发生沿着以圆弧或以弱层为底界面的切层-顺层滑动^[18]。

为了确保北帮烧变岩边坡稳定性,黑山露天矿北帮烧变岩侵蚀边坡安全储备系数取 1.2。依据 Mohr-Coulomb 准则,同时考虑剪切破坏和拉伸破坏,选取典型滑面借助 FLAC^{3D} 3.0 对北帮烧变岩进行边坡稳定性分析,基于强度折减原理,循环折减岩体强度直到边坡刚好达到临界失稳状态^[19-20],以此获得边坡的稳定系数 F_s ,如图 1 所示、表 1 所示。其中,烧变岩容重 24.7 kN/m³,黏聚力 0.01 MPa,内摩擦角 11°。

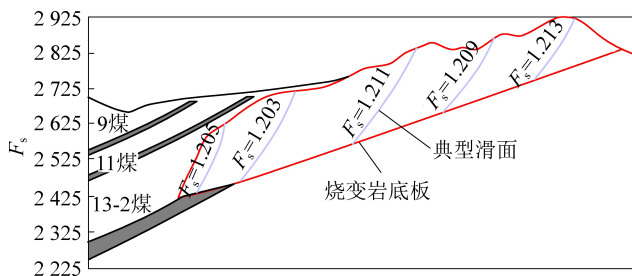


图 1 北帮烧变岩边坡稳定性分析

Fig.1 Stability analysis of north slope burnt rock slope

表 1 北帮烧变岩典型滑面稳定性分析

Table 1 Stability analysis of typical sliding surface of burnt rock in north slope

典型滑面	滑面 1	滑面 2	滑面 3	滑面 4	滑面 5
稳定系数	1.205	1.203	1.211	1.209	1.213

分析图 1、表 1 并结合边坡稳定性分析可知,黑山露天矿在开采 13-2 煤的同时为了保证北帮边坡稳定,必须将火烧岩全部清除,并对烧变岩底板的软弱岩层进行处理,然后再以烧变岩底板作为北帮开采境界。

2 倾斜煤层烧变岩侵蚀露天矿境界优化分析

2.1 问题的提出

露天矿圈定境界的原则包括:①境界剥采比 n_k 小于或等于经济合理剥采比 n_j ;②平均剥采比等于经济合理剥采比;③生产剥采比等于经济合理剥采比。由于原则①是从全矿床或全露天矿成本及盈利等指标最优为基础得出的,而且此原则在露天矿设计过程中具有较强的可操作性^[21];因此,各露天矿在圈定开采境界时,以原则①为依据设计露天开采境界。

由于黑山露天矿北帮已确定以烧变岩底板为界,端帮境界一帮依据矿权界决定;因此,顶帮境界位置是影响其境界大小的关键。当顶帮境界位置满足原则①,即 $n_k \leq n_j$ 时为确定的合理顶帮境界;由图 2 剖面信息可知,13-2 煤层露头处存在大量烧变岩,在开采 13-2 煤的同时须将其全部清除,使得此

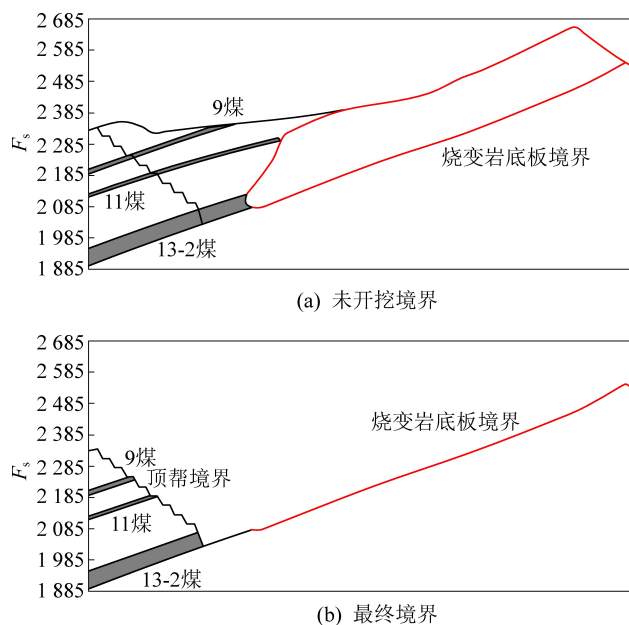


图 2 顶帮境界模拟位置

Fig.2 Simulation drawing of top slope boundary

境界的剥离负荷量大大增加,平均剥采比 n_p 满足: $n_p > n_k$ 且 $n_p > n_j$;所以该顶帮境界位置不能作为合理的境界位置。因此,对于受烧变岩侵蚀严重的露天矿,不可简单按照原则①圈定境界,应当综合考虑平均剥采比的变化来确定最优境界。

2.2 烧变岩侵蚀露天矿分区境界圈定原则优化

为了确定倾斜煤层烧变岩侵蚀露天矿顶帮分区境界外扩过程中,根据境界剥采比与平均剥采比的变化规律,得出倾斜煤层烧变岩侵蚀露天矿境界圈定原则,依照黑山露天矿到界边帮参数构建模拟最终帮,不断模拟降深单位深度 Δh (即一个台阶高度),外扩水平距离为 x 构建模拟境界位置,如图 3 所示,计算不同境界位置 i 处的境界剥采比 $n_{k,i}$ 与平均剥采比 $n_{p,i}$ 满足以下条件:

$$\Delta x = \frac{\Delta h}{\tan \theta} \quad (1)$$

$$n_{k,i} = \frac{\int_0^{L_{ij}} \int_0^{\Delta x} \sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^f l_{ij} dx dy}{\int_0^{M_{ij}} \int_0^{\Delta x} \sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^f m_{ij} \gamma dx dy} \quad (2)$$

$$n_{p,i} = \frac{V_i}{M_i \gamma} = \frac{\int_0^{L_{ij}} \int_0^{x_{ij}} \sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^f l_{ij} dx dy}{\int_0^{M_{ij}} \int_0^{x_{ij}} \sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^f m_{ij} \gamma dx dy} \quad (3)$$

式中: θ 为煤层倾角, (°); e 为总境界数; f 为总水平数; V_i 为境界位置 i 剥离总量, m³; M_i 为境界位置 i 可采煤量, m³; L_{ij} 为第 i 个境界位置第 j 水平岩两端帮之间的距离, m; M_{ij} 为第 i 个境界位置第 j 水平煤

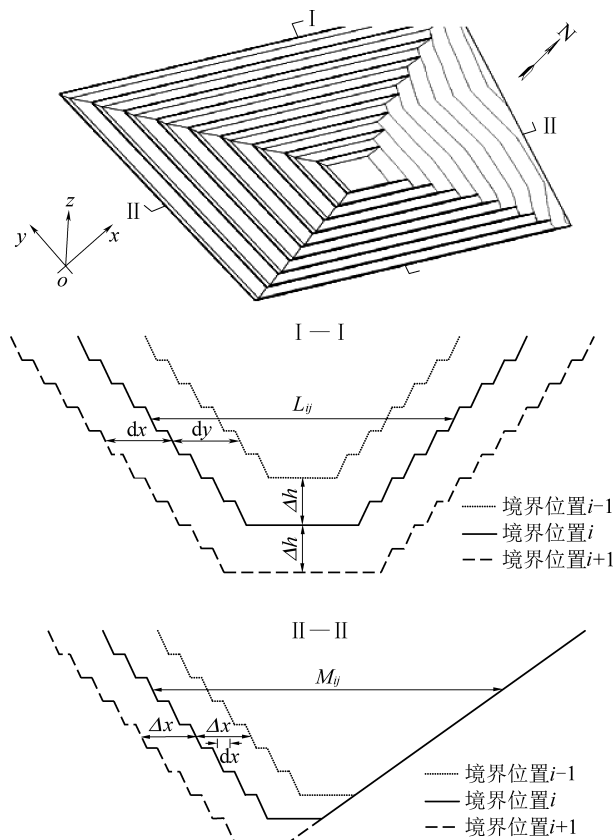


图 3 烧变岩侵蚀露天矿模拟境界位置

Fig.3 Simulation boundary location of open-pit mine by eroded burnt rock

表 2 境界剥采比与平均剥采比变化量

Table 2 Change scale of boundary stripping ratio and the average stripping ratio

参数	模拟境界位置											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
境界剥采比/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	0.00	0.32	0.82	1.61	3.54	5.16	6.23	7.86	9.53	10.36	11.20	12.43
平均剥采比/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	无穷大	9.54	7.04	6.09	4.85	3.95	3.41	3.06	2.93	2.03	1.45	1.29

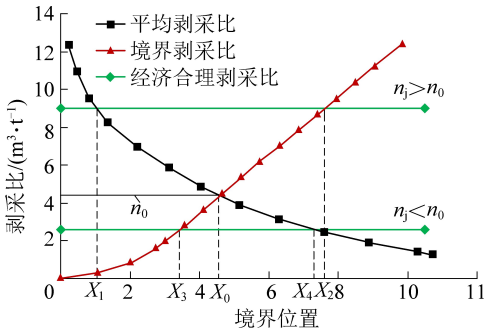


图 4 境界剥采比与平均剥采比变化曲线

Fig.4 Change curves of boundary stripping ratio and average stripping ratio

分析图 4 可知:随着顶帮境界不断外扩,使得境界剥采比 n_k 不断加大,平均剥采比 n_p 逐渐减小。在境界位置 x_0 处,有 n_0 为 $4.4 \text{ m}^3/\text{t}$,使得 $n_k = n_p = n_0$ 成立。给定未知经济合理剥采比 n_j ,该评价模型必

距端帮的距离, m ; x_{ij} 为第 i 个境界位置第 j 水平顶底帮之间的距离, m ; l_{ij} 为第 i 个境界位置第 j 水平岩边帮厚度, m ; m_{ij} 为第 i 个境界位置第 j 水平煤边帮厚度, m ; γ 为煤容重, kN/m^3 。

黑山露天矿设计台阶高度 Δh 为 10 m ,将其代入式(1),可知:外扩水平距离 Δx 为 47 m 。依照上述方法,构建模拟境界位置,由式(2)、式(3)计算境界剥采比 $n_{k,i}$ 与平均剥采比 $n_{p,i}$,见表 2。

鉴于表 2 中模拟境界位置与境界剥采比 $n_{k,i}$ 、平均剥采比 $n_{p,i}$ 为连续函数关系,通过回归分析,确保境界位置与境界剥采比 $n_{k,i}$ 、平均剥采比 $n_{p,i}$ 近似符合多项式分布,即 $n_{k,i}$ 满足式(4), $n_{p,i}$ 满足式(5),得

$$n_k(x) = -1.381 \times 10^{-4} + 1.039x - 1.543x^2 + 1.097x^3 - 0.334x^4 + 0.055x^5 - 0.055x^6 \quad (4)$$

$$n_p(x) = 10.778 - 2.019x - 0.457/x + 0.162x^2 + 0.652x^2 - 0.005x^3 - 0.101x^3 \quad (5)$$

其中,式(4)、式(5)的相关性系数 R^2 都达到 0.99,趋于 1,可知本回归分析可靠度满足要求。为了确定烧变岩侵蚀露天矿境界圈定的原则,以 $n_k(x)$ 、 $n_p(x)$ 为基础,通过绘制境界剥采比与平均剥采比随境界位置变化关系曲线,建立经济合理剥采比评价模型,如图 4 所示。

然存在以下 3 种假设:

1)假设一: $n_j > n_0$,曲线有 2 个交点,存在境界位置 X_1 、 X_2 二个评价位置。①在境界位置 X_1 处,有 $n_k \leq n_j$ 且 $n_p = n_j$,但是在境界位置 X_1 之后,平均剥采比还在不断减小,且仍满足 $n_k \leq n_j$ 且 $n_p \leq n_j$;因此,境界位置 X_1 不能作为合理境界位置;②在境界位置 X_2 处,有 $n_k = n_j$ 且 $n_p \leq n_j$,在境界位置 X_2 之前,满足 $n_k < n_j$ 且 $n_p < n_j$;在境界位置 X_2 之后,满足: $n_k > n_j$ 且 $n_p < n_j$;因此,境界位置 X_2 是合理境界位置。

2)假设二: $n_j = n_0$,曲线有且仅有一个交点,存在境界位置 X_0 一个评价位置。在境界位置 X_0 处,有 $n_k = n_p = n_j$,并且在境界位置 X_0 之前,有 $n_p > n_j$,在境界位置 X_0 之后,有 $n_k > n_j$;因此,境界位置 X_0 是合理境界位置。

3) 假设三: $n_j < n_0$, 曲线有 2 个交点, 存在境界位置 X_3 、 X_4 2 个评价位置。①在境界位置 X_3 处, 虽有 $n_k = n_j$; 但是使得 $n_p > n_j$ 成立; 因此, 境界位置 B_1 不能作为合理境界位置。②在境界位置 X_4 处, 虽有 $n_p = n_j$; 但是使得 $n_k > n_j$ 成立; 因此, 境界位置 X_4 不能作为合理境界位置。

综上所述, 只有当经济合理剥采比 n_j 满足: $n_j \geq n_0$ 时, 烧变岩侵蚀露天矿存在以境界剥采比小于或等于经济合理剥采比的原则圈定的合理境界; 当经济合理剥采比满足: $n_j < n_0$ 时, 烧变岩侵蚀露天矿不存在经济合理境界。

3 露天煤矿合理境界圈定

3.1 露天矿经济合理剥采比分析

经济合理剥采比的确定方法基本上可分 2 类: ①是成本相等法; ②是价格法。前者适用于露天和地下开采的贫化损失相同或近似, 矿石资源丰富且不很贵重时, 但从实际生产看, 露天开采和地下开采在贫化损失方面相差很大, 露天开采采出率可达 90% 以上, 而地下开采回采率仅为 50% 左右^[18]。因此, 各露天矿在圈定开采境界时, 以市场条件为依托, 采用后者计算经济合理剥采比, 即

$$n_j = \frac{d_1 - a}{b} \quad (6)$$

式中: d_1 为原煤售价, 元/t; a 为纯采煤成本, 元/t; b 为纯剥离成本, 元/m³。

3.2 黑山露天矿经济合理剥采比分析

通过市场调研及成本预算可知: 黑山露天煤矿 2019 年一季度煤炭售价 d_1 为: 132.61 元; 采煤成本 a 为 12.52 元/t; 剥离成本 b 为: 14.90 元/m³。将其代入式(6), 得黑山露天煤矿经济合理剥采比 n_j 为 8.06 m³/t。

综上可知, 黑山露天矿经济合理剥采比 n_j 满足: $n_j > n_0 = 4.4$ m³/t, 可以按照原则①圈定境界。依据黑山露天煤矿提供的勘探线地质剖面图, 选取典型剖面采用边帮线段比法确定剖面最优边帮位置, 按照黑山露天矿到界边帮参数绘制虚拟最终帮; 根据煤、岩层层位信息通过三维坐标转换将剖面对应到真实的三维空间地理位置; 在真三维空间背景下, 将所绘制的各剖面虚拟最终帮按照标高信息通过空间位置关系赋值依次拼接起来, 构建依附实际的黑山露天煤矿三维仿真境界, 如图 5 所示。但是, 由于煤层赋存情况有时会出现发育不稳甚至出现尖灭, 三维仿真顶帮境界只能保证剖面位置满足 $n_k \leq n_j$, 对于整个顶帮境界而言是不确定的; 因此, 需要对三

维仿真顶帮境界的最优性进行校验。

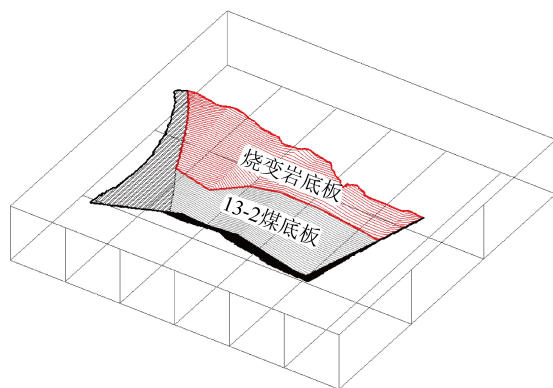


图 5 黑山露天矿三维模拟境界

Fig.5 3D simulation boundary of Heishan Open-pit Coal Mine

4 露天矿境界块量反验

4.1 露天矿境界块体反验原理

将露天矿三维模拟境界以地表界为边界约束条件生成 DTM 面模型, 这样所圈定的仿真境界相当于是一个内空的盒子, 以盒子边界为约束采用块体填充整个开采境界, 并建立矿岩属性数据库(包括: 岩性、容重等); 将建立好的各煤层顶底板面模型约束块体, 以块体质心坐标 (x_{gh} 、 y_{gh} 、 z_{gh}) 为约束标准, 假如块体质心划入块体约束条件之内, 块体计入算量, 反之剔除块体, 将矿岩属性数据赋予层状块体模型, 构建层状属性块体地质模型, 如式(6)、式(7)、图 6。境界内的块体总量相当于就是整个采区要开采的矿岩总量, 煤层底板与煤层顶板之间块量相当于煤量, 剩余量为岩量, 如式(8)、式(9)。假定储量计算过程母块尺寸大小为: $L \times W \times H$ (长×宽×高), 子块大小为: $uL \times vW \times wH$, u 、 v 、 w 为块体缩放比例; 块体的大小直接影响储量计算快慢, 块体越大计算速度越快, 块体越小计算速度越慢, 但是块体越小精度越高, 通常母块大小为 $5 \times 5 \times 2$, 缩放比例取 0.5^[22-24]。

$$b_{ij}(x_{gh}, y_{gh}, z_{gh}) = L_{gh} \times W_{gh} \times H_{gh} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} = \begin{cases} x_{g, \min} \leq x_{gh} \leq x_{g, \max} \\ y_{g, \min} \leq y_{gh} \leq y_{g, \max} \\ z_{g, \min} \leq z_{gh} \leq z_{g, \max} \end{cases} \quad (7)$$

$$V_r = \sum_{i=1}^m b_{gh} \quad (8)$$

$$P_c = \sum_{i=1}^n b_{gh} \gamma \quad (9)$$

式中: $x_{g, \min}$ 第 g 水平 x 方向约束条件最小值; $x_{g, \max}$ 第 g 水平 x 方向约束条件最大值; x_{gh} 第 g 水平第 h 个块体 x 方向坐标; $y_{g, \min}$ 第 g 水平 y 方向约束条件

最小值; $y_{g,max}$ 第 g 水平 y 方向约束条件最大值; y_{gh} 第 g 水平第 h 个块体 y 方向坐标; $z_{g,min}$ 第 g 水平 z 方向约束条件最小值; $z_{g,max}$ 第 g 水平 z 方向约束条件最大值; z_{gh} 第 g 水平第 h 个块体 z 方向坐标。 V_r 为境界内总岩量, m^3 ; m 为岩块体数量, 个; b_g 为第 g 水平第 h 个块体体积, m^3 ; P_c 为境界内总煤量, t ; n 为煤块体个数, 个; L_{gh} 为第 g 水平第 h 个块体长度, m ; W_{gh} 为第 g 水平第 h 个块体宽度, m ; H_{gh} 为第 g 水平第 h 个块体高度, m 。

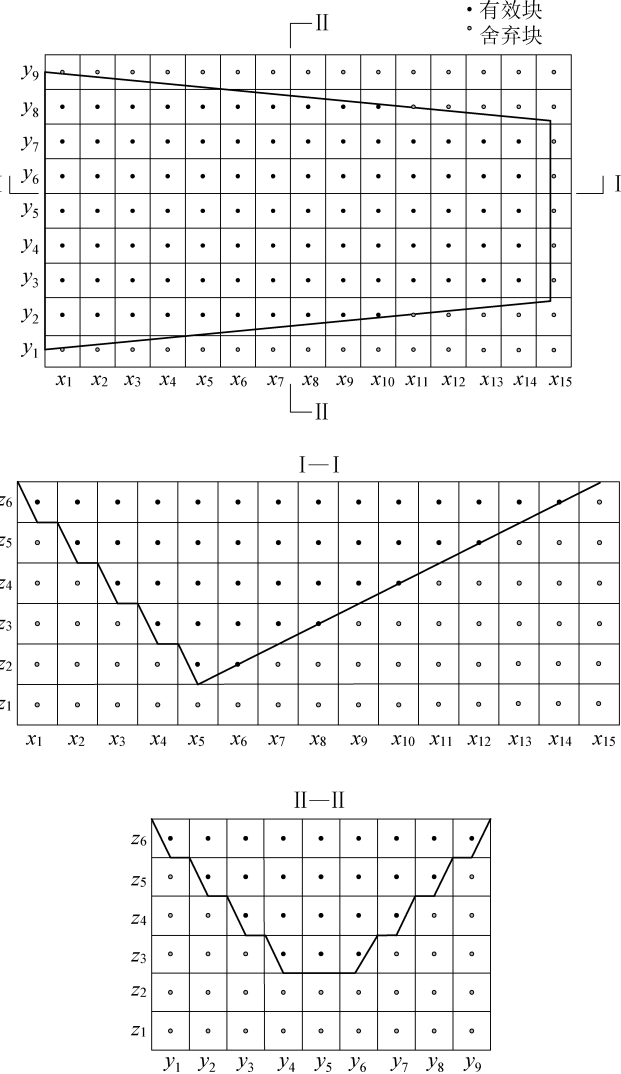


图 6 开采境界块量约束示意

Fig.6 Constraints schematic of mining boundary block quantity

针对三维仿真顶帮境界位置的模糊不确定性, 笔者提出以块量反验的方法校验顶帮境界的合理性。依据境界剥采比的定义: 下降单位深度(或一个台阶高度增加)的岩矿量之比。将得到的顶帮境界里缩水平距离 Δx , 依照内缩顶帮与原顶帮之间的矿岩量之比得到块量里收境界剥采比为 $n_{k,i}^-$; 同样, 将得到的顶帮外扩水平距 Δx , 依照外扩顶帮与原顶帮之间的矿岩量得到块量外扩境界剥采比的

$n_{k,i}^+$; 如果有 $n_{ki}^- \leq n_j \leq n_{k,i}^+$, 则说明所圈定的顶帮位置合理的; 如果有 $n_{ki}^- \geq n_j$, 则说明所圈定的顶帮位置过大; 如果有 $n_{k,i}^+ \leq n_j$, 则说明所圈定的顶帮位置过小。其中, $n_{k,i}^-$ 为第 i 个里收境界的块量境界剥采比; $n_{k,i}^+$ 为第 i 个外扩境界的块量境界剥采比。

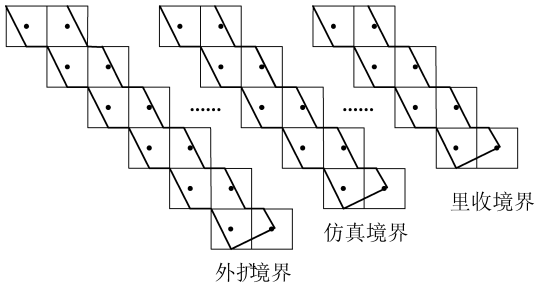


图 7 块量境界剥采比约束示意

Fig.7 Constraints schematic of block quantity boundary stripping ratio

4.2 黑山露天矿境界块体反验

依据上述方法, 得到黑山露天煤矿煤岩层层状块体模型, 如图 8 所示。

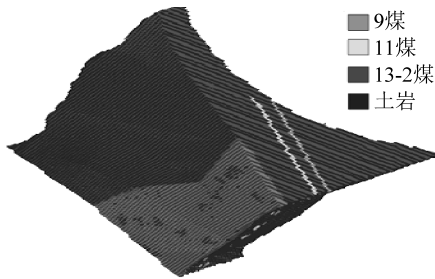


图 8 黑山露天煤矿煤岩层层状块体模型

Fig.8 Coal rock layer block model of Heishan Open-pit Coal Mine

将黑山露天矿圈定的顶帮境界不断里收水平距离 Δx 为 47 m, 得到其块量里收境界剥采比 $n_{k,i}^-$; 同样, 将圈定的顶帮分区境界外扩水平距离 47m, 得到其外块量扩境界剥采比 $n_{k,i}^+$; 可知: 黑山露天矿顶帮块量境界剥采比变化规律, 见表 3 和如图 9 所示。

表 3 块量境界剥采比变化

Table 3 Blockquantity boundary stripping ratio change

境界位置	煤量/ 万 t	剥离量/ 万 m ³	境界剥采比/ (m ³ · t ⁻¹)
里收 3	1 115.13	6 208.09	5.57
里收 2	1 047.03	6 994.37	6.68
里收 1	1 040.95	7 255.83	6.97
设计	1 058.03	7 787.88	7.36
外扩 1	1 117.74	8 994.83	8.05
外扩 2	1 093.48	10 077.58	9.22
外扩 3	1 051.13	11 363.38	10.81

分析表 3、图 9 可知: 外扩境界 1 块量外扩境界

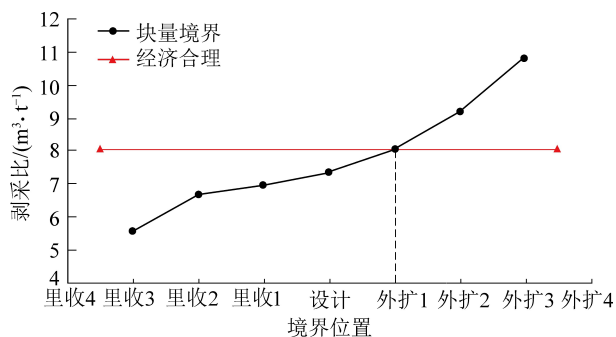


图9 块量境界剥采比变化曲线

Fig.9 Curves of block quantity boundary stripping ratio

剥采比满足: $n_{k,i}^+ = 8.05 \text{ m}^3/\text{t} \leq n_j = 8.06 \text{ m}^3/\text{t}$, 说明通过剖面边帮线段比法圈定的黑山露天矿仿真境界变小, 外扩境界1才是最为合理的境界位置。

4 结 论

1) 倾斜煤层烧变岩侵蚀露天矿, 随着境界的扩大, 满足: 境界剥采比逐渐增加, 平均剥采比逐渐变小; 只有当经济合理剥采比满足: $n_j \geq n_0$ 时, 存在以境界剥采比小于或等于经济合理剥采比的原则圈定合理境界; 当 $n_j < n_0$ 时, 烧变岩侵蚀露天矿不存在合理境界, 该原则同样适用新疆地区普遍存在的火烧岩侵蚀露天矿。

2) 针对新疆煤田火烧区特点, 以及煤、岩层赋存情况的随机性, 使得采用剖面边帮线段比法通过三维坐标转换确定的仿真境界具有模糊不确定性; 通过构建煤岩层层状属性块体模型, 采用块量反验方法得到其块量里收境界剥采比与块量外扩境界剥采比, 能够从三维角度实现反验设计境界合理性的目的。

3) 通过分析可知, 黑山露天煤矿经济合理剥采比为 $8.06 \text{ m}^3/\text{t}$, 满足: $n_0 = 4.4 \text{ m}^3/\text{t} \leq n_j$, 即存在以境界剥采比小于或等于经济合理剥采比原则圈定的合理境界; 由块量反验可知, $n_{k,i}^+ = 8.05 \text{ m}^3/\text{t} \leq n_j$; 因此, 外扩境界1是黑山露天煤矿的最优境界。

参考文献 (References):

- [1] 赵文斌, 李小武. 谈谈用传统方法确定露天境界[J]. 有色金属设计, 2009, 36(4): 37-41.
ZHAO Wenbin, LI Xiaowu. Talking about determining the open pit-limit by traditional method[J]. Nonferrous Metals Design, 2009, 36(4): 37-41.
- [2] 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, 12(8): 201-207.
- [3] HERNER B. Neutral sizing system allows fast easy conversion for

- acid machine[J]. Pulp and Paper, 2001, 64(1): 154-163.
- [4] 刘 闯, 白润才, 刘光伟, 等. 复合煤层露天矿下部煤层开采境界优化[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2085-2090.
LIU Chuang, BAI Runcai, LIU Guangwei, et al. Optimization of mining limits of deep-seated coal seams in multi-seams surface coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2085-2090.
- [5] 贾海波. 基于实体模型的露天矿境界圈定动锥法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008: 32-34.
- [6] 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: 54-67.
- [7] 张彤伟. 基于图论学的露天开采境界优化算法研究及程序设计[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 44-52.
- [8] 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.
- [9] 陈孝华. 用网络最大流标号算法进行露天开采境界的优化设计[J]. 云南冶金, 1982(3): 3-6.
CHEN Xiaohua. Network maximal flow for optimal design of open-pit mining limits[J]. Yunnan Metallurgy, 1982(3): 3-6.
- [10] 杨 彪, 罗周全, 廖江南, 等. 露天矿山开采境界动态优化圈定[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 368-372.
YANG Biao, LUO Zhouquan, LIAO Jiangnan, et al. Dynamic optimization for open pit mining limit[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 368-372.
- [11] 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.
- [12] 曹 博, 陶亚彬, 白润才, 等. 倾斜煤层窄长露天矿分区开采分期境界优化[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(4): 101-110.
CAO Bo, TAO Yabin, BAI Runcai, et al. Block system optimization by stages for inclined seam long narrow open-pit mine[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(4): 101-110.
- [13] 田 军, 李海洲, 夏 冬. 新疆白砾滩露天煤矿烧变岩特征及边坡稳定性分析[J]. 煤矿安全, 2013, 44(7): 223-225.
TIAN Jun, LI Haizhou, XIA Dong. Burnt rock characteristics and slope stability analysis in Xinjiang Bailitan open pit mine[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(7): 223-225.
- [14] 张秀山. 新疆煤田火烧区特征及防治对策[J]. 新疆地质, 2001(2): 150-152.
ZHANG Xiushan. Characteristics of coal burning area in Xinjiang coalfield and its prevention and control measures[J]. Xinjiang Geology, 2001(2): 150-152.
- [15] 刘 侃. 新疆淮南煤田某煤矿火烧区的水文地质特征[J]. 内蒙古煤炭经济, 2017(19): 141-144.
LIU Kan. Hydrogeological characteristics of a coal mine burning area in Zhunnan Coalfield Xinjiang[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2017(19): 141-144.

- [16] 范立民, 仵 拔, 向茂西, 等. 我国西部保水采煤区受保护烧变岩含水层研究[J]. 煤炭科技, 2016, 44(8): 1-6.
FAN Limin, WU Bo, XIANG Moxi, *et al.* Study on protective burnt rock aquifer in water preserved coal mining area of western China [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 1-6.
- [17] 贾文凯, 梁小山, 张 萌. 李家沟煤矿烧变岩的分布规律研究及其水文地质意义[J]. 科学技术创新, 2018(10): 13-14.
JIA Wenkai, LIANG Xiaoshan, ZHANG Meng. Study on distribution law of burnt rocks in Lijiagou coal mine and its hydro-geological significance [J]. Scientific and Technological Innovation, 2018(10): 13-14.
- [18] 曹兰柱, 白继元, 王 东, 等. 含顺倾弱层软岩边坡三维稳定性影响因素分析[J]. 金属矿山, 2017(1): 174-178.
CAO Lanzhu, BAI Jiyuan, WANG Dong, *et al.* Analysis on three dimensional stability influence factors of soft rock slope with dip weak layer[J]. Metal Mine, 2017(1): 174-178.
- [19] 陈建平. 边坡强度折减法判据及点安全系数研究及工程应用[D]. 赣州: 江西理工大学, 2012: 56-63.
- [20] 袁 灿. 基于强度折减法的浅变质岩风化层边坡稳定性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008: 30-56.
- [21] 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, 31(12): 83-85.
- WANG Yan, WANG Weiju. Open-pit mining boundary and economic stripping ratio is certain [J]. Modern Mining, 2011, 31(12): 83-85.
- [22] 黄俊歆, 王李管, 毕 林, 等. 改进的露天境界优化几何约束模型及其应用[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(12): 78-83.
HUANG Junxin, WANG Liguang, BI Lin, *et al.* The improved geometrical constraint model of open-pit mine boundary optimum and its application[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(12): 78-83.
- [23] 陈三明, 何玉州, 罗文敏, 等. 基于地质三维模拟的攀枝花铁矿块体模型储量估算[J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33(4): 610-615.
CHEN Sanming, HE Yuzhou, LUO Wenmin, *et al.* Based on geological 3D simulation of Panzhihua iron ore reserve estimation block model [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2013, 33(4): 610-615.
- [24] 王洪江, 杨柳华, 吴爱祥, 等. 基于块体模型的储量估算方法[J]. 有色金属, 2014, 66(6): 87-91.
WANG Hongjiang, YANG Liuhua, WU Aixiang, *et al.* Application of reserves estimation method based on block model [J]. Non-ferrous Metal, 2014, 66(6): 87-91.