



近水平复合煤层露天矿非工作帮高位煤层回采方案研究

曹博 李青怡 汪帅 赵波 吕明家 刘光伟

引用本文：

曹博, 李青怡, 汪帅, 等. 近水平复合煤层露天矿非工作帮高位煤层回采方案研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 47–57.
CAO Bo, LI Qingyi, WANG Shuai. Research on mining plan of non-working high-level coal seam in open-pit mine with near-horizontal composite coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 47–57.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-0675>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

近水平煤层露天矿中间搭桥高度研究

Study on height of pit-middle bridge in open-pit mine with flat seam deposit
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 45–52 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ce53f11c-c2d3-4626-b52b-f5e12f7028ce>

倾斜煤层露天矿横采内排采区合理宽度研究

Study on reasonable width of horizontal mining and internal drainage area in inclined coal seam open-pit mine
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 38–44 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9f260b8f-027c-4936-8a10-8e795aa90d4b>

胜利东二露天矿南帮滑坡区压煤回采边坡稳定性研究

Research on slope stability of coal recovery on landslide area underlying southern slope in Shengli No.2 East Open-pit Mine
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9410f81f-35a9-47fa-a2a5-108e7d798ff7>

旺格维利式开采采峒间煤柱合理宽度留设研究

Research on reasonable width of coal pillars between caverns of Wongawilli mining
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 69–77 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/832d6f8b-a2d0-45fd-91e8-38a2abfb3667>

房柱式采空区影响下露天端帮煤开采安全控制技术

Safety control technology of open-pit end wall coal mining under influence of room pillar gob
煤炭科学技术. 2020, 48(8): 76–81 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/25300e86-4af6-42f6-be01-a6f989bdfa0a>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

曹 博, 李青怡, 汪 帅, 等. 近水平复合煤层露天矿非工作帮高位煤层回采方案研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 47-57.

CAO Bo, LI Qingyi, WANG Shuai, et al. Research on mining plan of non-working high-level coal seam in open-pit mine with near-horizontal composite coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 47-57.

近水平复合煤层露天矿非工作帮高位煤层回采方案研究

曹 博, 李青怡, 汪 帅, 赵 波, 吕明家, 刘光伟

(辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 在我国近水平复合煤层露天煤矿开采建设过程中, 边帮压煤问题普遍存在, 但通常只针对下部煤层回采问题进行研究。基于如何进行非工作帮高位煤层回采的问题, 利用初步形成的内排土场为作业平台, 考虑边帮边坡稳定性对回采模式的影响, 提出了在边坡稳定的前提下沿边帮依次形成“敞口”、“斜坡道”并分阶段回采的模式。结合露天矿实际生产中需满足一定边坡角以确保边帮整体稳定的要求, 以经济效益最优为判断准则, 将分阶段回采模式分为回收阶段间煤柱和保留阶段间煤柱两种回采方式, 并通过定量分析分别给出2者经济可行性的理论判据, 随之讨论了2种回采方式所取得的净收益值与煤层厚度的关系。研究表明: 不同回采方式的净收益值与煤层厚度大小正相关, 因此可借助分析煤层厚度与净收益值的关系来选择较优回采方式, 具体应用过程中回采方式的经济合理性需结合现场实际进行验算。以某露天矿为工程实例: ①确定回收阶段间煤柱回采方式更经济, 其净收益为6385.320万元, 非工作帮残煤回采剥采比为0.758; ②可通过降低煤柱高度、增大采场和排土场所对应帮坡角的方式对保留阶段间煤柱回采方式进行改进以提高经济效益。成果可应用于类似露天矿, 通过减少煤炭资源浪费, 提升矿山企业整体经济效益的同时保证矿山安全、绿色、高效开采。

关键词: 近水平复合煤层; 露天矿; 高位煤层回采; 回收阶段间煤柱; 保留阶段间煤柱

中图分类号: TD824

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)08-0047-11

Research on mining plan of non-working high-level coal seam in open-pit mine with near-horizontal composite coal seam

CAO Bo, LI Qingyi, WANG Shuai, ZHAO Bo, LYU Mingjia, LIU Guangwei

(Institute of Mining Technology, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In the extraction of subhorizontal multiple coal seams using open-pit mining in China, the problem of coal seam in the high wall is commonly existed, but studies usually focus on the lower coal seam mining problem only. Based on the problem of implementing the mining of upper coal seams in non-working step, the initially formed inner refuse dump is used as the working platform, and the influence of the stability of the slope stability on the mining mode is also considered. It is proposed, in the premise of stable slope to form a pattern of “openings” and “ramps” stage by stage. In the actual production of open pit mines, combined with the requirement to meet the specific slope angle to ensure the overall stability of the highwall, making the maximum of economic benefit as the judgment criterion, the staged mining mode is divided into two types: recover coal pillars between the stages and retain coal pillars between the stages. By means of quantitative analysis, the theoretical criteria for the economic feasibility of the two are given, respectively, and the relationship between the net income obtained by the two mining methods and the thickness of the coal seam is discussed. The results shows that the net profit value (NPV) of different mining methods is positively correlated with the thickness of the coal seam, so the optimal mining method can be selected by analyzing the relationship between the thickness of the coal seam and the NPVs. The economic rationality of the mining method in the specific application should be checked according to the actual situation on site. Taking an open-pit mine as the engineering example:

收稿日期: 2022-05-08 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0675

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

通讯作者: 李青怡(1997—), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生。E-mail: 17796749748@163.com

① It is determined that the recovering coal pillar between stages is more economical, the net income is 63.853 million yuan, and extraction and stripping ratio of remnant coal in the non-working side is 0.758; ② By reducing the height of the coal pillar and increasing the corresponding slope angle of the stope and dump, economic benefit can be increased using the retaining coal pillar between stages. The results can be applied to similar open-pit mines. By reducing the waste of coal resources, the overall economic benefits of mining enterprises are improved while ensuring safe, green and efficient mining.

Key words: subhorizontal multiple coal seams; open-pit mine; upper coal seam mining; recovery of coal pillar between stages; retain coal pillar between stages

0 引言

作为世界上最大的能源生产国、消费国,我国的能源格局呈现“富煤、贫油、少气”的典型特征。伴随风能、核能等清洁能源的发展,社会经济发展对于煤炭的依赖程度逐渐降低,但煤炭依旧占据能源结构的主体地位,截止2021年煤炭生产量仍为40.7亿t。相关预测显示,未来很长一段时间煤炭仍将是我国经济发展的重要能源支撑,因此煤炭的高效开发利用技术依旧是能源领域的研究重点。

露天开采作为一种重要的煤炭开采方式,对于我国煤炭资源利用具有重要意义。新疆、内蒙古等煤炭基地天然适合开发效率高、产能大的大型露天煤矿。在保证露天矿山安全、高效生产的同时,尽可能减少煤炭资源的浪费,对于露天矿降本增效具有重要意义。

通常在露天煤矿制定煤炭开采方案时,只考虑生产接续问题,出于对经济、安全问题的考虑,一般对煤炭二次回收的问题研究较少。为提高资源回采率,露天开采领域提出了“陡帮开采”的概念、原理及开采方法^[1-2],即通过端帮帮坡角变陡,剥采比减小,开采范围内的资源量增加或剥离量减少,从而促使露天矿的经济效益增加^[3-5]。陡帮开采的研究重点是如何提高端帮回采率,针对边帮压煤问题、特别是边帮高位煤层回采的研究相对较少^[6-8]。

首先,针对高位煤层回采关注较少的原因是缺少合理的回采方案,无法保证露天矿整体的经济性^[9-10]。倘若针对边帮高位煤层回采制定相应回采方案,不仅可减少煤炭资源的浪费,还可释放一定的内排空间^[11-12];但整个回采方案的实施是否具有经济性,还是根据经验确定,缺乏理论依据^[13-17]。我国大型露天矿多为近水平的复合煤层露天矿,但一般只回采边帮下部煤层,缺乏回采高位煤层方案及相应理论依据^[18-20],因此,研究确定经济合理的高位煤层回采方案对于高效生产具有实用价值和指导意义。

笔者拟通过研究近水平复合煤层露天矿非工作帮高位煤层的回采方式及过程,以经济效益最优为

判断准则,建立高位煤层回采模型,进而确定安全经济合理的非工作帮高位煤层回采方案。

1 高位煤层回采过程提出

1.1 回采基本原理

对于复合煤层露天矿而言,为回采非工作帮压煤,通常利用坑底空间回收下部煤层,之后排土场按照原有排土程序跟进,则非工作帮高位煤层将被排弃物料覆盖,无法将高位煤层及时采出,若再次回收高位煤层将产生大量的2次剥离。因此,提出利用已形成的内排土台阶作为作业空间,将高位煤层以及水平间的夹矸一并采出。回采高位煤层平面和剖面如图1、图2所示,为简化说明过程,取从左向右的方向为非工作帮回采推进方向,实际开采过程中,按照现场要求确定推进方向。

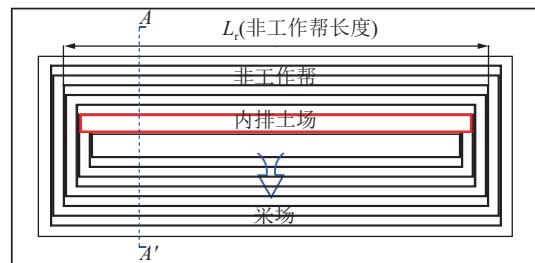


图1 近水平露天矿利用内排空间回采高位煤层平面示意
Fig.1 Plane schematic diagram of near-horizontal open pit mining high-level coal seam with inner discharge space

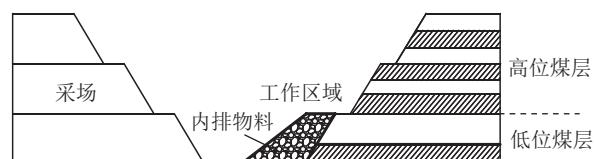


图2 利用内排土场空间回收高位煤层A—A'位置剖面示意
Fig.2 Schematic diagram of the position of A—A' of high coal seam recovered by using the space of the inner dump

回采原理:图2为A—A'剖面图,假设非工作帮下部煤层已通过靠帮回采的方式回收完成,并初步形成了内排土场,内排土场高度与高位煤层底板处于同一水平状态,此时,即可利用内排土场形成作业空间,分层回采高位煤层。

1.2 回采基本过程

由于在回采过程中,需考虑非工作帮边坡的稳定性,所以要根据现场实际情况对边帮回采的方式进行研究。可以确定的是:初始回采阶段,首先必须形成一个“敞口”,其次才可以根据现场煤层赋存状况、台阶高度、帮坡角、岩质类型等采取后续的回采措施。如下图3为敞口距离 L 与非工作帮边坡稳定性系数 F_s 的关系示意,假设敞口距离为 L ,且 L 的取值范围为 $b_{\min} \leq L \leq L_r$,其中 b_{\min} 为最小工作平盘宽度, L_r 为非工作帮的总长度。

当 $L = b_{\min}$ 时,所对应的边坡稳定性系数为 $F_{s,\max}$;当 $L = L_r$ 时,所对应的边坡稳定性系数为 $F_{s,\min}$;可看出 F_s 与敞口距离 L 的大小成反比例关系,且一般取 $F_s=1.3$ 为判定边坡稳定的临界值,由图可知:

1) 当 $F_s = 1.3 > F_{s,\max}$ 时,与曲线相交与点 $O_1(L_1, F_{1.3})$,此时 $L_1 < b_{\min}$,即不满足基本开采条件,故边帮不可进行开采;

2) 当 $F_{s,\min} < F_s = 1.3 < F_{s,\max}$ 时,与曲线相交于点 $O_2(L_2, F_{1.3})$,此时 $b_{\min} < L_2 \leq L_r$,则可用开挖“敞口”并后续进行回填的开采模式进行;

3) 当 $F_s = 1.3 < F_{s,\min}$ 时,与曲线相交于点 $O_3(L_3, F_{1.3})$,此时 $L_3 > L_r$,则说明可进行整条边帮揭露开采,该种情况与常规呆滞煤回采方式相近,在此

不再赘述。

综上所述,由于1)、3)类情况较常规,故只针对2)类情况做详细研究,具体回采过程如下所述。

回采过程:考虑到上部边坡稳定性的影响,所以采取分阶段回采的模式,从西向东开始依次形成“敞口”,并建立每个敞口所对应的排土“斜坡道”,以此缩短运距,节省运输成本。待上一阶段回采完成并回填后,进行下一阶段“敞口”、排土“斜坡道”的建立,过程如步骤图4a-4f所示。以此类推,直至回采整个非工作帮高位煤层,具体回采过程模型如图4所示,在此不再赘述。

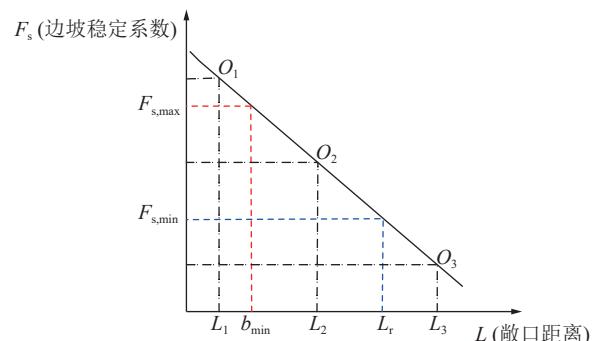


图3 “敞口”距离 L 与非工作帮边坡稳定性系数 F_s 的关系示意

Fig.3 Schematic diagram of the relationship between the “open area” distance L and the non-working slope stability factor F_s

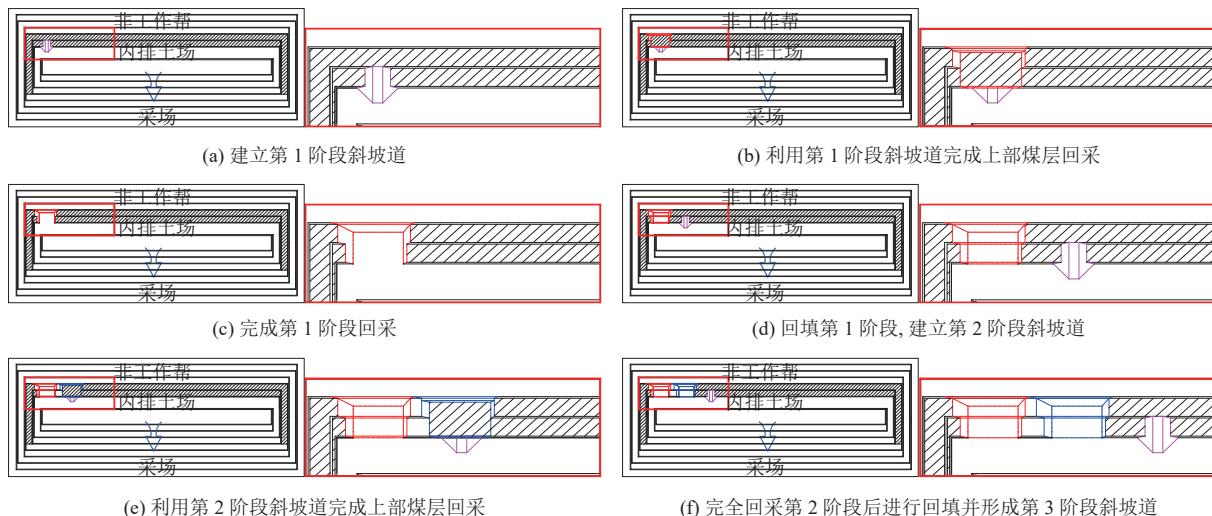


图4 非工作帮回采高位煤层过程模拟示意

Fig.4 Schematic diagram of simulation process of non-working side mining high-level coal seam

2 高位煤层回采过程分析

由于需要在回采过程中保证工作区域的稳定性,故在整个回采过程中采用分阶段回采的方式,为尽可能减少回采的次数,敞口的宽度要尽可能大,具体的长度需根据边坡的稳定性进行确定。同时,推进方向上若保留部分煤柱,回收此部分煤柱将会产生

2次剥离量,因此回收高位煤层作业可分为回收阶段间煤柱和保留阶段间煤柱2种方式,实际实施过程中需要根据现场实际条件来验算回采煤柱的经济合理性。回采高位煤层同样会导致设备使用情况紧张,采场方向推进度降低等,具体的经济效益仍需进一步量化。

回采高位煤层时需要同时开采煤层间的夹矸，当煤层总厚度小于夹矸厚度时，回采煤层所产生的经济效益不足弥补作业期间所增加的运输、作业费用，此时高位煤层不具备回采条件。以复合煤层回采过程模型为例，通过分析其回采的过程及方式，给出回采高位煤层的判断依据。

2.1 回采过程解析

2.1.1 “敞口”形态解析

对于近水平复合煤层露天矿而言，为保障生产接续的稳定，排土场单台阶高度一般取采场单台阶高度的2倍，假设非工作帮该工作区域标高处工作线长度为 L_r ，m；采场单台阶高度为 H ，m；煤层以A,B煤层为例，其中A煤层厚度为 m_1 ，m；B煤层厚度为 m_2 ，m；采场方向台阶坡面角为 α ，(°)；所形成的的“敞口”坑底长度为 L ，m；单台阶可回收的煤层宽度为 D ，m；纵向剖面图和横向剖面图如图5b—5c所示。

结合图5计算该阶段回采长度为 L 时，在该阶段内回采的高位煤层煤岩总工程量为

$$Q_1 = 2HD \left(L + \frac{H}{\tan \beta} + \frac{H}{\tan \alpha} \right) \quad (1)$$

式中， β 为排土场单台阶稳定坡面角，(°)。

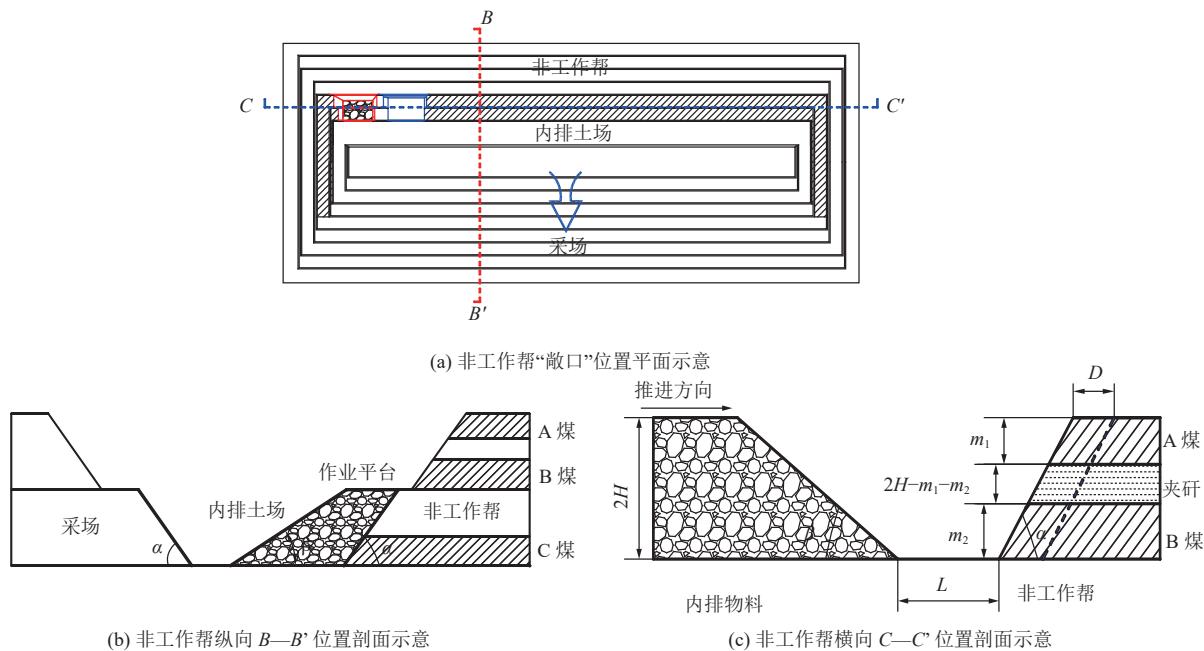


图5 非工作帮示意
Fig.5 Schematic diagram of non-work help

2.1.2 “斜坡道”形态解析

修建斜坡道的主要作用为运输煤岩，发挥缩短运距、节省成本的作用，且坡道的高度随分层开采的阶段进行变化，直至第1阶段的煤岩回采结束，坡道

假设挖掘机生产能力为 Q_{W1} ，则一个开采阶段回采高位煤层时间为

$$T_1 = \frac{2HD}{Q_{W1}} \left(L + \frac{H}{\tan \alpha} + \frac{H}{\tan \beta} \right) \quad (2)$$

由于煤层中间存在夹矸，所以必须进行分层回采，当第1阶段回采结束后，为不影响上部边坡的稳定性，需对该“敞口”进行回填，考虑回填作业时松散物料稳定边坡角需要由原边坡角 α 降低为松散物料自然安息角 γ 的特性，计算后续回填作业所需的回填物料总量为

$$Q_2 = 2HD \left(L + \frac{H}{\tan \beta} + \frac{H}{\tan \gamma} \right) + 2H^2 L \left(\frac{1}{\tan \gamma} + \frac{1}{\tan \alpha} \right) \quad (3)$$

式中， Q_2 为回填作业所需回填的物料总量； H 为采场单台阶高度，m； D 为单台阶可回收的煤层宽度，m； L 为所形成的“敞口”坑底长度，m； β 为排土场单台阶坡面角，(°)； γ 为松散物料自然安息角，(°)。

假设回填第1阶段“敞口”所用挖掘机的生产能力为 Q_{W2} ，则回填该阶段所用时间为

$$T_2 = \frac{2HD}{Q_{W2}} \left(L + \frac{H}{\tan \beta} + \frac{H}{\tan \gamma} \right) + \frac{2H^2 L}{Q_{W2}} \left(\frac{1}{\tan \gamma} + \frac{1}{\tan \alpha} \right) \quad (4)$$

完全拆除，由于从初始阶段斜坡道的修建到该阶段煤岩被完全采出后斜坡道拆除，均需挖机进行作业，因此需要对挖机的作业时间进行计算。图6为斜坡道的三维解析图。

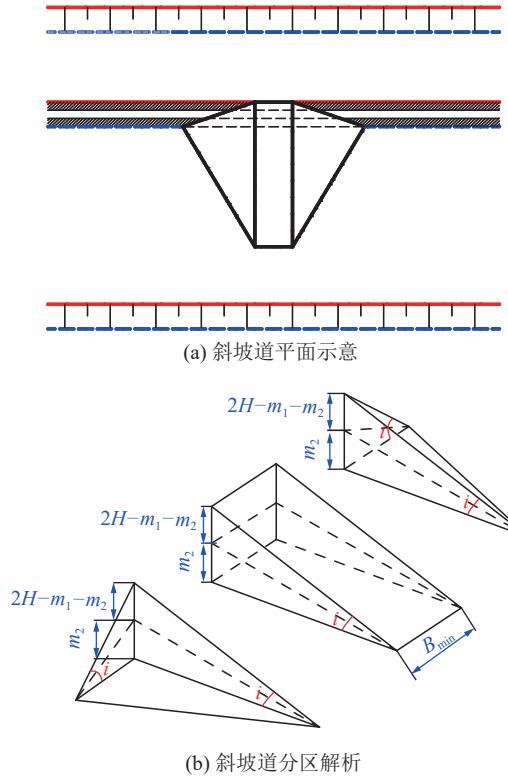


图 6 斜坡道三维解析

Fig.6 The 3D analysis diagram of the connecting ramp

假设斜坡道最大爬坡角度为 i (一般为 8%), 修建斜坡道时稳定边坡角为松散物料自然安息角 γ , 回采该阶段时挖机的作业量为

$$Q_3 = \frac{(2H - m_1)^2}{\tan i} \left(\frac{B_{\min}}{2} + \frac{1}{\tan \gamma} \right) \quad (5)$$

式中, B_{\min} 为斜坡道的最小宽度, m 。

假设挖机能力为 Q_{W3} , 则回采一个阶段, 建立和拆除一个斜坡道所用的时间为

$$T_3 = \frac{(2H - m_1)^2}{Q_{W3} \tan i} \left(\frac{B_{\min}}{2} + \frac{1}{\tan \gamma} \right) \quad (6)$$

2.2 回采方式选优

由于复合煤层中存在夹矸, 同时为了保证整体边帮的边坡稳定性需保留一定的稳定边坡角, 故非工作帮推进方向上回采高位煤层方式可分为回收阶段间煤柱、保留阶段间煤柱 2 种方式, 以下将针对两种开采方式进行进一步分析。

2.2.1 回收阶段间煤柱回采方式

采用回收阶段间煤柱作业方式时, 非工作帮推进方向上阶段作业方式示意如图 7 所示:

由于回采过程为分层开采, 当第 1 阶段开采完成后, 为保证非工作帮边坡稳定性, 需要将整个“敞口”进行回填。采用回收阶段间煤柱开采方式时, 为将下一阶段的煤层全部回收, 当开采下一阶段时, 需

要对部分“敞口”进行 2 次剥离。相邻 2 个开采阶段间 2 次剥离量可结合图 7 计算:

2 次剥离物体积为

$$V_1 = 2H^2 D \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right)$$

假设挖机能力为 Q_{W4} , 则回采一个阶段, 2 次剥离所用的时间为

$$T_4 = \frac{2H^2 D}{Q_{W4}} \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (7)$$

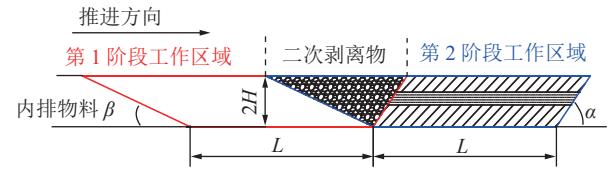


图 7 推进方向上回收阶段间煤柱回采方式作业

Fig.7 Operation diagram of coal pillar recovery mode between recovery stages in the advancing direction

利用成本补偿法计算确定回采高位煤层的合理性, 即利用整个非工作帮可回采煤层的总收益来补偿因保持边帮稳定而对“敞口”进行回填以及修建斜坡道所产生的费用。假设整个非工作帮可采长度为 L_r , 每个阶段“敞口”的坑底宽度为 L , 则共有 $n = L_r/L$ 个回采阶段, 进行 $n-1$ 次 2 次剥离, 则回采过程中:

1) 整个回采过程中, 采用回收阶段间煤柱开采方式所能采出的非工作帮总煤量为

$$V_1' = n(2H - m_1 - m_2) \times D \left(L + \frac{2H - m_1 - m_2}{2\tan \beta} + \frac{2H - m_1 - m_2}{2\tan \alpha} \right)$$

则可回收煤量的总收益为

$$M_1 = nkC_m(2H - m_1 - m_2)D \times \left(L + \frac{2H - m_1 - m_2}{2\tan \beta} + \frac{2H - m_1 - m_2}{2\tan \alpha} \right) \quad (8)$$

式中, C_m 为单位煤价, 元/t; k 为原煤密度, t/m^3 。

2) 回采高位煤层过程中, 采剥总费用为

$$W_{C1} = nC_b \frac{2HD}{Q_{W1}} \left(L + \frac{H}{\tan \alpha} + \frac{H}{\tan \beta} \right) \quad (9)$$

式中, C_b 为单位采剥成本, 元/($m^3 \cdot h$)。

3) 回填所有“敞口”的总费用为

$$W_{C2} = nC_b \left[\frac{2HD}{Q_{W2}} \left(L + \frac{H}{\tan \beta} + \frac{H}{\tan \gamma} \right) + \frac{2H^2 L}{Q_{W2}} \left(\frac{1}{\tan \gamma} + \frac{1}{\tan \alpha} \right) \right] \quad (10)$$

4) 修建以及拆除 n 个阶段斜坡道的总费用为

$$W_{C3} = nC_b \frac{(2H - m_1)^2}{Q_{W3} \tan i} \left(\frac{B_{\min}}{2} + \frac{1}{\tan \gamma} \right) \quad (11)$$

5) $n-1$ 个阶段间 2 次剥离总费用为

$$W_{C4} = (n-1)C_b \frac{2H^2D}{Q_{W4}} \left(\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta} \right) \quad (12)$$

式中, C_b 为单位采剥成本, 元/($m^3 \cdot h$)。

6) 由于对高位煤层的回采, 释放了一定的内排空间, 将该空间转换为所节省的外排运距 L_w 后, 得所节省的运费为

$$W_{C5} = C_k L_w V'_1 \quad (13)$$

式中, C_k 为单位运距成本, 元/($m^3 \cdot km$)。

$$M_1 + W_{C5} \geq W_{C1} + W_{C2} + W_{C3} + W_{C4} \quad (14)$$

则当式(14)成立时, 认为回采高位煤层是合理的。并将其作为回采高位煤层过程中采用回收阶段间煤柱方法是否具备经济可行性的判断依据。

2.2.2 保留阶段间煤柱回采方式

采用保留阶段间煤柱作业方式时, 非工作帮推进方向上阶段作业示意如图 8 所示。

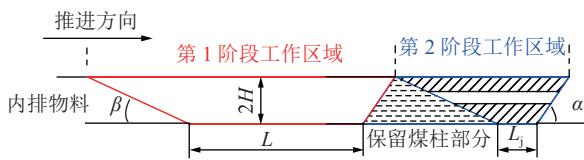


图 8 推进方向上保留阶段间煤柱回采方式作业示意

Fig.8 Schematic diagram of coal pillar recovery mode operation between retention stages in the advancing direction

当一个阶段回采完成后, 需将整个“敞口”进行回填以满足整个非工作帮的边坡稳定性。当第 1 阶段回采完毕后, 继续回采第 2 阶段, 倘若不进行 2 次剥离, 则需保留一部分煤柱以保证边坡角的稳定, 由于煤柱的存在, 从第 2 阶段开始推进方向上可回采煤层的长度将减小。减小后的推进方向上阶段单位工作线长度为

$$L_j = L - 2H \left(\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta} \right) \quad (15)$$

式中, L_j 为推进方向上减小后的阶段工作线长度, m ; 且 $L_j \geq b_{min}$ (b_{min} 为最小平盘宽度), 若不满足该条件, 即可排除保留阶段间煤柱回采方式。

相邻两个阶段间所留的煤柱的煤岩总体积为

$$V_2 = 2HD \left[L - 2H \left(\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta} \right) \right] + \frac{2H^2D}{\tan\alpha} + \frac{2H^2D}{\tan\alpha}$$

采用保留阶段间煤柱回采方式时整个非工作帮的煤岩总量为

$$Q'_1 = 2HD \left(L + \frac{H}{\tan\beta} + \frac{H}{\tan\alpha} \right) + (n-1) \left\{ 2HD \left[L - 2H \left(\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta} \right) \right] + \frac{2H^2D}{\tan\alpha} + \frac{2H^2D}{\tan\alpha} \right\} \quad (16)$$

假设挖掘机生产能力为 Q'_{W1} , 则整个回采阶段回采高位煤层所用的时间为

$$T'_1 = \frac{2HD}{Q'_{W1}} \left(L + \frac{H}{\tan\beta} + \frac{H}{\tan\alpha} \right) + \frac{(n-1)}{Q'_{W1}} \left\{ 2HD \left[L - 2H \left(\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta} \right) \right] + \frac{2H^2D}{\tan\alpha} + \frac{2H^2D}{\tan\beta} \right\} \quad (17)$$

采用保留阶段间煤柱回采方式时, 回填整个工作帮所有阶段的回填物料总量为

$$Q'_2 = 2HD \left(L + \frac{H}{\tan\beta} + \frac{H}{\tan\gamma} \right) + \left(\frac{2H^2L}{\tan\gamma} + \frac{2H^2L}{\tan\alpha} \right) + (n-1) \times \left\{ 2HD \left[L - 2H \left(\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta} \right) \right] + \frac{2H^2D}{\tan\alpha} + \frac{2H^2D}{\tan\alpha} \right\} + (n-1)H \left(\frac{2H}{\tan\gamma} - \frac{2H}{\tan\alpha} \right) L_j \quad (18)$$

假设挖掘机生产能力为 Q'_{W2} , 回填整个工作帮所有的阶段“敞口”所用时间为

$$T'_2 = \frac{2HD}{Q'_{W2}} \left(L + \frac{H}{\tan\beta} + \frac{H}{\tan\gamma} \right) + \frac{(n-1)}{Q'_{W2}} \left\{ 2HDL_j + \frac{2H^2D}{\tan\alpha} + \frac{2H^2D}{\tan\alpha} \right\} + \frac{(n-1)}{Q'_{W2}} 2H^2 \left(\frac{1}{\tan\gamma} - \frac{1}{\tan\alpha} \right) L_j + \frac{2H^2L}{Q'_{W2}} \left(\frac{1}{\tan\gamma} + \frac{1}{\tan\alpha} \right) \quad (19)$$

第 2 至 n 个阶段每个阶段的回采煤量为

$$V_3 = \left[L - 2H \left(\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta} \right) \right] (m_1 + m_2) - \frac{D(2H - m_1 - m_2)^2}{2} \left(\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta} \right) + 2H^2D \left(\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta} \right)$$

除初始第 1 阶段外, 其余 $n-1$ 个阶段工作区域大小相近, 并将非工作帮范围内可采煤层作为整体考虑。即除第 1 阶段外, 其余阶段开采前均保留一定尺寸的煤柱, 煤柱的长度与推进方向上单位回收煤层长度 L_j 之和为第 1 阶段回采“敞口”的推进度 L 。则采用保留阶段间煤柱方式回采时:

1) 整个回采过程中, 能采出的非工作帮上的总煤量为

$$V'_2 = D \left(L + \frac{(2H - m_1 - m_2)^2 (\tan\alpha + \tan\beta)}{2\tan\alpha\tan\beta} \right) + L_j(n-1)(m_1 + m_2) + (n-1) \left(\frac{2H^2D}{\tan\alpha} + \frac{2H^2D}{\tan\beta} \right) - \frac{D(2H - m_1 - m_2)^2}{2} \left(\frac{n-1}{\tan\alpha} + \frac{n-1}{\tan\beta} \right)$$

则可回收煤量的总收益为

$$M'_1 = C_m k D \left[L + \frac{(2H - m_1 - m_2)^2 (\tan \alpha + \tan \beta)}{2 \tan \alpha \tan \beta} \right] + \\ C_m k (n-1) L_j (m_1 + m_2) - C_m (n-1) k \frac{D(2H - m_1 - m_2)^2}{2} \times \\ \left(\frac{\tan \alpha + \tan \beta}{\tan \alpha \tan \beta} \right) + 2H^2 D C_m k (n-1) \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (20)$$

式中, C_m 为单位煤价, 元/t; k 为原煤容重, t/m^3 。

2)回采高位煤层过程中, 采剥总费用为

$$W'_{C1} = \frac{2C_b HD}{Q'_{W1}} \left(L + \frac{H}{\tan \beta} + \frac{H}{\tan \alpha} \right) + \\ \frac{C_b (n-1)}{Q'_{W1}} \left\{ 2HDL_j + \frac{2H^2 D}{\tan \alpha} + \frac{2H^2 D}{\tan \beta} \right\} \quad (21)$$

3)回填所有“敞口”的总费用为

$$W'_{C2} = \frac{2HDC_b}{Q'_{W2}} \left(L + \frac{H}{\tan \beta} + \frac{H}{\tan \gamma} \right) + \\ \frac{(n-1)C_b}{Q'_{W2}} \left\{ 2HDL_j + \frac{2H^2 D}{\tan \alpha} + \frac{2H^2 D}{\tan \beta} \right\} + \\ \frac{(n-1)C_b}{Q'_{W2}} 2H^2 \left(\frac{1}{\tan \gamma} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) L_j + \\ \frac{2H^2 LC_b}{Q'_{W2}} \left(\frac{1}{\tan \gamma} + \frac{1}{\tan \alpha} \right) \quad (22)$$

4)修建以及拆除 n 个斜坡道的总费用为

$$W'_{C3} = nC_b \frac{(2H - m_1)^2}{Q_{W3} \tan i} \left(\frac{B_{\min}}{2} + \frac{1}{\tan \gamma} \right) \quad (23)$$

5)将释放的内排空间转换为所节省的外排运距 L'_w , 所节省的运费为

$$W'_{C4} = C_k L'_w V'_2 \quad (24)$$

式中, C_k 为单位运距成本, 元/($m^3 \cdot km$)。

$$M'_1 + W'_{C4} \geq W'_{C1} + W'_{C2} + W'_{C3} \quad (25)$$

则当式(25)成立时, 认为回采高位煤层是合理的。并将其作为回采高位煤层过程中采用保留阶段间煤柱方法是否具备经济可行性的判断依据。

2.2.3 不同回采方式讨论

若上述两种回采方式均满足经济可行性要求时, 通过比较两者的净收益值大小进行较优方式选择。为简化讨论过程, 将煤层和夹矸总厚度 $2H$ 表示为 M (为定值); 夹矸总厚度 $2H - m_1 - m_2$ 表示为 h ; 煤层总厚度 $m_1 + m_2$ 表示为 $x = M - h$ (且 $0 < x \leq M$), 将两种回采方式的净收益表示为与 x 相关的计算式, 分别为

1)回收阶段间煤柱方案的净收益为

$$f(x) = (M_1 + W_{C5}) - (W_{C1} + W_{C2} + W_{C3} + W_{C4}) \quad (26)$$

2)保留阶段间煤柱方案的净收益为

$$g(x) = (M'_1 + W'_{C4}) - (W'_{C1} + W'_{C2} + W'_{C3}) \quad (27)$$

其中, 式(26)、(27)均可表示为关于 x 的二次函数, 进行求导, 得:

$$\frac{df(x)}{dx} = 2xnD \left[\frac{\ln D}{h} + \frac{nD(\tan \alpha + \tan \beta)}{2 \tan \alpha \tan \beta} \right] (kC_m + C_k L_w) \quad (28)$$

$$\frac{dg(x)}{dx} = 4x \frac{D(n-1)}{2} C_k L'_w \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right) - \\ M \left(\frac{L}{M} - \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{\tan \alpha \tan \beta} \right) (n-1) \times \\ [(kC_m + 1) - C_k L'_w D] + D(kC_m + C_k L) \quad (29)$$

当 $0 < x \leq M$ 时, $f(x)' > 0$, 即 $f(x)$ 在 $0 < x \leq M$ 时单调递增; 同理, 当 $0 < x \leq M$ 时, $g(x)' > 0$, 即 $g(x)$ 在 $0 < x \leq M$ 时单调递增, 绘制 $f(x)$ 、 $g(x)$ 的函数图像, 如图9所示。

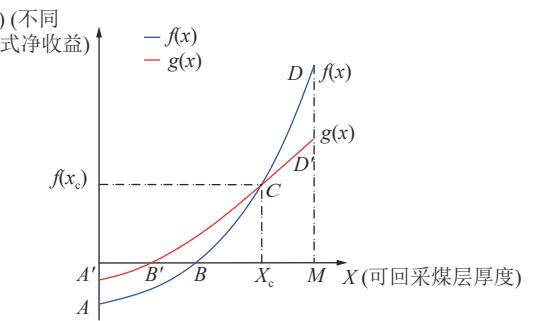


图 9 x 与 $f(x)$ 、 $g(x)$ 的关系曲线
Fig.9 The relationship between x and $f(x)$, $g(x)$

由图9可知, 两种回采方式的净收益值 $f(x)$ 、 $g(x)$ 与煤层厚度 x 成正相关的关系, 即回收阶段间煤柱回采方式的净收益值 $f(x)$ 和保留阶段间煤柱回采方式净收益值 $g(x)$ 随煤层厚度 x 的增大而增大。

其中, AB 段为回收阶段间煤柱回采方式的负收益阶段, BD 段为正收益阶段; $A'B'$ 段为保留阶段间煤柱回采方式的负收益阶段, $B'D'$ 段为正收益阶段, 点 $C(x_c, f(x_c))$ 为 2 个函数 $f(x)$ 、 $g(x)$ 的交点, 表示在同等煤厚条件下两种回采方式取得相同的净收益, 简称同等收益点(具体位置根据实际参数进行确定)。根据函数图像: 当 $x \in (0, x_c)$ 时, $g(x)$ 图像位于 $f(x)$ 图像上方, 表示煤层厚度 $0 < x < x_c$ 时, 保留阶段间煤柱回采方式更经济, 但净收益值相对较小; 当 $x \in (x_c, M)$ 时, $f(x)$ 图像位于 $g(x)$ 图像上方, 表示煤层厚度 $0 < x < x_c$ 时, 回收阶段间煤柱回采方式更经济, 且净收益值较大。

综上:回采高位煤层所取得的净收益大小,与煤层厚度正相关,与夹矸厚度负相关;煤层厚度占比越大,净收益值越大;具体的回采方式选择以及净收益大小的计算均需现场实际数据进行。

3 工程实例

3.1 工程背景

某露天矿初始建设时期生产能力为3.80 Mt/a,计划扩产至7.60 Mt/a,该露天矿是典型的近水平复合煤层露天矿,其采煤、剥离均采用单斗-车间断式开采工艺,开采方法为:煤层倾斜分层,顶板露天开采。当前采区为首采区,且刚结束基建期,即将进入运维期。

如何在保证边坡安全的前提下提高资源采出率,降低生产成本,实现正常的生产接续是当前该露天矿面临的主要技术问题。为应对该技术问题,以优化深部境界、最大限度安全回收煤炭资源为目标,考

虑该露天矿非工作帮中部煤层还存在大量残煤待回采,所以提出非工作帮高位煤层回采方案。以中部煤层为例,从上至下赋存有1号煤层、夹矸、2号煤层,其中1号煤层平均厚度为5.65 m,夹矸平均厚度为4.0 m,2号煤层平均厚度为20.35 m,属于特厚煤层。当前以追踪压帮的方式初步形成了内排土场,并且排土场最上部台阶与2号煤层底板处于同一水平,为回采高部煤层提供了作业空间,如图10、11所示分别为现状以及非工作帮剖面位置。

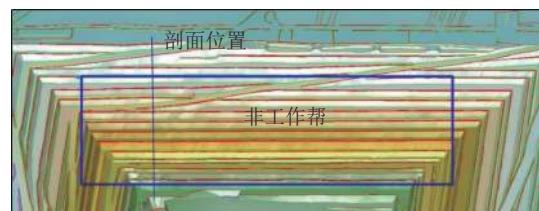


图10 露天矿非工作帮现状

Fig.10 Open pit mine non-working gang status map

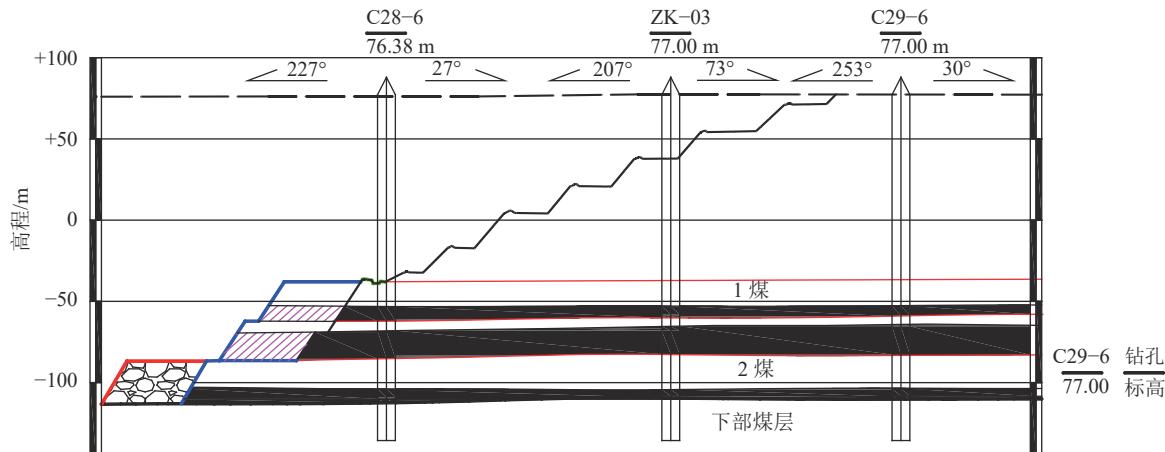


图11 露天矿非工作帮剖面示意

Fig.11 Schematic diagram of the non-working gang profile of the open pit mine

结合图11的内排土场形态及现场工程实际,整个内排土场形成的作业空间距离 L_r 为1140 m,单台阶可回收的煤层宽度 D 为60 m,斜坡道最小宽度 B_{min} 取10 m,采场单台阶高度 H 为15 m。边帮整体的边坡稳定性系数为1.3时取最大“敞口”距离 L 为100 m,则回采阶段数 n 为11;其中采场方向边坡角 α 取55°,内排土场方向帮坡角 β 取33°;回填“敞口”、修建“斜坡道”过程中松散物料安息角 γ 为33°;单位运距成本 C_k 为1.3元/(m³·km),挖机单位时间生产能力 Q_{Wi} 为960 m³/h(假设挖机生产能力均相同),挖机单位采剥成本 C_b 为400元/(m³·h);煤单价 C_m 为150元/t,原煤的容重 k 为1.2 t/m³。

在该露天矿非工作帮残煤回采的生产计划中,回采方案的制定较为固定,回采程序以及具体的回

采方式均由工程技术人员根据经验确定,缺乏理论依据,经济效益难以保证,因此需要制定经济合理的回采方案进行指导生产。

3.2 回采方案确定

下面通过该露天矿的现场实际数据对回采高位煤层方案的合理性进行验证,分别将相关的已知数据代入两个回采方案,判断高位煤层回采方案是否具有经济性,并确定各方案的最终经济效益,为说明对比2种方案的经济合理性,引出非工作帮残煤回采剥采比 n_s 的概念:非工作帮总剥离量与原煤采出量之比。

$$n_s \approx \frac{V_z}{V_h}$$

3.2.1 回收阶段间煤柱方案

将已知的相关数据分别代入式(8)~(13)可得采用回收阶段间煤柱方式后回采1,2号煤层的煤量的总收益 M_1 、采剥总费用 W_{C1} 、回填所有“敞口”的总费用 W_{C2} 、修建及拆除所有“斜坡道”的总费用 W_{C3} 、2次剥离总费用 W_{C4} 、所节省的外排运费 W_{C5} 分别见表1。

表1 回收阶段间煤柱回采方式经济效益

Table 1 Economic benefit of coal pillar recovery mode between recovery stages

分项	计算公式	计算值/万元
回采煤量总收益 M_1	式(8)	6 632.019
采剥总费用 W_{C1}	式(9)	110.221
回填“敞口”总费用 W_{C2}	式(10)	166.813
修建、拆除斜坡道费用 W_{C3}	式(11)	22.582
二次剥离总费用 W_{C4}	式(12)	25.201
节省外排总运费 W_{C5}	式(13)	78.125

由于 $M_1 + W_{C5} > W_{C1} + W_{C2} + W_{C3} + W_{C4}$,说明当“敞口”大小为100 m、采场工作帮边坡角 α 取55°、内排土场工作帮坡角 β 取33°时,采用保留阶段间煤柱的回采方式是经济可行的;且其净收益为 $(M_1 + W_{C5}) - (W_{C1} + W_{C2} + W_{C3} + W_{C4}) = 6 385.320$ 万元,此时非工作帮的残煤回采剥采比为 $n_{s1} = 0.768$ 。

3.2.2 保留阶段间煤柱方案

将已知的相关数据代入式(20)~(24)可得采用保留阶段间煤柱方式回采1,2号煤层的煤量的总收益 M'_1 、采剥总费用 W'_{C1} 、回填所有“敞口”的总费用 W'_{C2} 、修建及拆除所有“斜坡道”的总费用 W'_{C3} 、所节省的外排运费 W'_{C4} 分别如下表2所示为

表2 回收阶段间煤柱回采方式经济效益

Table 2 Economic benefits of coal pillar recovery mode between recovery stages

分项	计算公式	计算值/万元
回采煤量总收益 M'_1	式(20)	2 155.403
采剥总费用 W'_{C1}	式(21)	34.618
回填“敞口”总费用 W'_{C2}	式(22)	70.128
修建、拆除斜坡道费用 W'_{C3}	式(23)	22.582
节省外排总运费 W'_{C4}	式(24)	40.234

由于 $M'_1 + W'_{C4} > W'_{C1} + W'_{C2} + W'_{C3}$,说明采用保留阶段间煤柱的回采方式也是经济可行的;且其净收益为 $(M'_1 + W'_{C4}) - (W'_{C1} + W'_{C2} + W'_{C3}) = 2 068.309$ 万元,

此时非工作帮的残煤回采剥采比为 $n_{s2} = 0.674$ 。

综上所述,相比回收阶段间煤柱的回采方式,保留阶段间煤柱回采方式净收益只有其1/3,所以针对该露天矿高位煤层的回采方式的选择更推荐回收阶段间煤柱的回采方式。

3.3 不同回采方式经济效益分析

根据上述笔者利用实际的露天矿数据确定:

1)回收阶段间煤柱方案的净收益为6 385.320万元,非工作帮残煤回采剥采比为 $n_{s1} = 0.768$;

2)保留阶段间煤柱方案的净收益为2 068.309万元,非工作帮残煤回采剥采比为 $n_{s2} = 0.674$ 。

由上述分析可知,保留阶段间煤柱回采方式净收益只有回收阶段间煤柱方式的1/3左右,显然采用回收阶段间煤柱的回采方式更经济。由于该工程实例中总煤层厚度为24 m,煤层占比达80%,多回收煤量的经济效益远大于产生的2次剥离费用,对应到图8所示 $f(x)$ 、 $g(x)$ 与 x 的关系图中,可看出煤层厚度处于 $x_c < x < M$ 阶段,经济效益 $f(x)$ 、 $g(x)$ 分别位于 $CD, C'D'$ 段间煤柱回采方式经济效益较大阶段,因此选用回收阶段间煤柱的回采方式更为合理。

对于大多数含有特厚煤层的露天矿,采用回收阶段间煤柱的回采方式更经济。但保留阶段间煤柱的回采方式的残煤回采剥采比更小,且该方式“敞口”距离较小,现场应用中安全系数更高。因此2种方式各有利弊,不能以单纯的经济指标最优作为唯一判断准则,需要针对不同的现场情况,结合理论依据选取更经济、合理的回采方式。

若设计阶段存在某些特殊限制(如特殊计价方式等),必须采用保留阶段间煤柱回采方式时,那么如何将该方法改进,在保证回采过程安全的情况下,提高其经济效益,同样具有重要意义。其中影响保留阶段间煤柱回采方式经济效益的主要影响因素是所留的煤柱体积大小,以下为保留煤柱的体积公式:

$$V_m = 2H^2D \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right)$$

式中, D 为单台阶可回收煤层的宽度; H 为单台阶高度; α 为采场工作帮边坡角; β 为内排土场工作帮坡角。 α 、 β 、 H 的大小均会影响保留煤柱的体积大小,进一步影响整个边帮煤层的回采率 η :

$$\eta = \frac{M_1}{M_2} \times 100\%$$

式中, M_1 为回采范围内采出煤量与掘进煤量之和; M_2 为回采范围内采出煤量与损失煤量之和。

为定性讨论上述变量对煤柱大小的影响,采用

单一变量法将影响因素分为2类:煤柱高度和帮坡角。

1)假设在整个保留煤柱中,采场方向帮坡角 α 和排土场稳定帮坡角 β 均保持不变,煤柱的高度 H 在垂直方向上每增加 ΔH ,则对应水平方向上煤柱底部延伸 ΔL ,当:

① $\Delta L/\Delta H > 1$ 时,表示保留煤柱单位体积增大,此时边帮回采率 η 降低;② $\Delta L/\Delta H = 1$ 时,表示保留煤柱单位体积不变,此时边帮回采率 η 保持不变;③ $\Delta L/\Delta H < 1$ 时,表示保留煤柱单位体积减小,此时边帮回采率 η 增大。

2)假设在整个保留煤柱中,煤柱高度 H 保持不

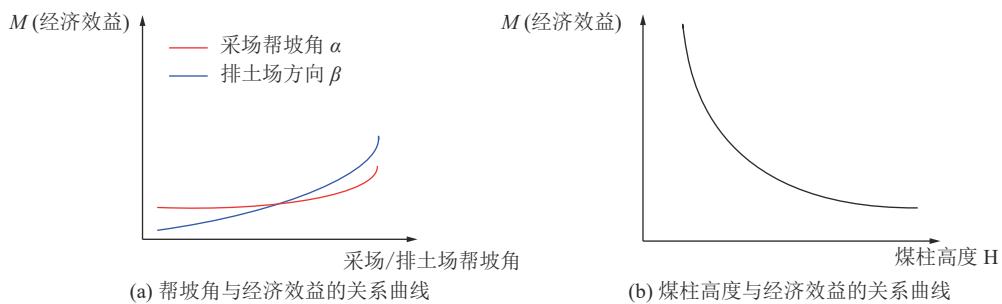


图 12 经济效益与煤柱高度、采场以及排土场帮坡角大小关系曲线

Fig.12 The relationship between economic benefit and coal pillar height, stope and dump slope angle

4 结 论

1)以边帮压煤为基础,利用已形成的内排土场为作业平台,以边坡是否稳定为原则,得出合理“敞口”宽度,确定回采过程为:沿边帮某一方向,采取分阶段回采模式,依次形成“敞口”,并建立每个敞口所对应的“斜坡道”,用于排土运输。

2)在按照所形成的分阶段回采过程中,为保证在回采过程中边坡的稳定性,选择是否在推进方向上保留煤柱,将回采高位煤层的作业过程分为回收阶段间煤柱和保留阶段间煤柱两种方式,并分别对两种回采方式作业过程中所回收的煤量、产生的工作量、收益进行分析求解,最后借助函数图像分析得两种回采方式净收益大小与煤层厚度大小正相关。

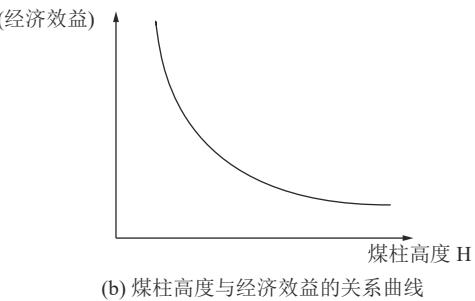
3)在工程实例中验证表明,回收阶段间煤柱的回采方式更经济,最终取得的净收益为6 385.320万元,回收剥采比为0.718;针对保留阶段间煤柱回采方式,可通过降低煤柱高度、增大帮坡角的方式,提升经济效益。

4)传统边帮压煤回采问题只服务下部煤层,存在一定的局限性并造成大量资源的浪费,针对此问题,本文提出了针对非工作帮的高位煤层回采方案,

变, α 、 β 处于变化状态,则:

① α 保持不变时,增大 β ,对应煤柱一侧水平方向上底部长度变小,煤柱体积变小,则对应边帮回采率 η 增大;② β 保持不变时,增大 α ,同理得煤柱体积变小,则对应边帮回采率 η 增大;③ α 、 β 同时增大时,对应煤柱水平方向上底部长度变小,煤柱体积变小,则对应边帮回采率 η 增大。

综上所述,保留阶段间煤柱回采方式的经济效益 M 与煤柱的高度 H 成反比;与采场帮坡角 α 、排土场帮坡角 β 成正比,若想提高保留阶段间煤柱回采方式的经济效益,可采用通过降低煤柱高度 H 、增大帮坡角 α 、 β 的方式,函数示意如图12所示。



从而实现达到提高资源回收率的目的。

参考文献(References):

- [1] 刘勇,车兆学,李志强,等.露天煤矿端帮残煤开采及边坡暴露时间分析[J].中国矿业大学学报,2006(6):727-731.
LIU Yong, CHE Zhaoxue, LI Zhiqiang, et al. Analyses of end slope remnant coal mining and slope exposure[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006(6):727-731.
- [2] 黄月军.陡帮开采在胜利露天煤矿的实施与优化[J].露天采矿技术,2012(4):25-28,31.
HUANG Yuejun. Implementation and optimization of steep-slope mining in Shengli open-pit coal mine[J]. Open-pit Mining Technology, 2012(4):25-28,31.
- [3] 丁鑫品,李凤明,付天光,等.端帮采场覆岩移动破坏规律及边坡稳定控制方法[J].煤炭学报,2021,46(9):2883-2894.
DING Xinpian, LI Fengming, FU Tianguang, et al. Overburden movement and failure law of coalface in end slope and the slope stability control method[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9):2883-2894.
- [4] 白润才,刘闯,薛应东,等.相邻露天矿边帮压煤协调开采技术[J].煤炭学报,2014,39(10):2001-2006.
BAI Runcai, LIU Chuang, XUE Yingdong, et al. Coordinated mining technology for coal underlying the slopes between two adjacent open pits[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10):2001-2006.

- [5] 张志, 刘闯, 薛应东, 等. 相邻露天矿境界重叠区边帮压煤协调开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 91–95.
ZHANG Zhi, LIU Chuang, XUE Yingdong, et al. Coordination mining technology of coal under side slopes in crossed limit area of two adjacent open pits[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(9): 91–95.
- [6] 曹博, 汪帅, 黄云龙, 等. 倾斜煤层露天矿横采内排采区合理宽度研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 38–44.
CAO Bo, WANG Shuai, HUANG Yunlong, et al. Study on reasonable width of horizontal mining and internal drainage area in inclined coal seam open-pit mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(8): 38–44.
- [7] 宋子岭, 范军富, 邱文辉, 等. 露天煤矿绿色开采技术与评价指标体系研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 350–358.
SONG Ziling, FAN Junfu, QI Wenhui, et al. Study on the surface coal mine green mining technology and appraising index system[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 350–358.
- [8] 刘闯, 白润才, 刘光伟, 等. 近水平复合煤层露天矿备采煤量留设位置与保有期优化[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(1): 41–47.
LIU Chuang, BAI Runcai, LIU Guangwei, et al. Optimization of setting location and remaining period of blocked-out coal reserves in flat and multi-coal seams surface mine[J]. *Journal of Chongqing University*, 2017, 40(1): 41–47.
- [9] 曹兰柱, 王珍, 王东, 等. 扎哈淖尔露天煤矿南帮压煤回采边坡稳定性分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 113–118.
CAO Lanzhu, WANG Zhen, WANG Dong, et al. Analysis of the slope stability of the underlying southern slope coal extraction in Zhahanaoer open-pit mine[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(1): 113–118.
- [10] 赵红泽, 曹博. 露天采矿学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2019.
ZHAO Hongze, CAO Bo. Surface Mining[M]. Beijing : Coal Industry Press, 2019.
- [11] 曹兰柱, 黄浩轩, 王东, 等. 胜利东二露天矿南帮滑坡区压煤回采边坡稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 81–87.
CAO Lanzhu, HUANG Haoxuan, WANG Dong, et al. Research on slope stability of coal recovery on landslide area underlying southern slope in Shengli No. 2 East open-pit mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10): 81–87.
- [12] 李崇, 才庆祥, 袁迎菊, 等. 露天煤矿端帮“呆滞煤”回采技术经济评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 263–266, 272.
LI Chong, CAI Qingxiang, YUAN Yingju, et al. Assessment of feasibility of leftover coal mining in end-slope of surface mine[J]. *Chinese Journal of Mining and Safety Engineering*, 2011, 28(2): 263–266, 272.
- [13] 安泰龙, 王栋. 东胜神东矿区露天矿端帮压煤充填回收煤柱稳定性分析[J]. 煤炭技术, 2021, 40(9): 42–46.
AN Tailong, WANG Dong. Analysis on stability of coal pillar during extracting under-slope coal in open-pit mine in Dongsheng Mining Area[J]. *Coal Technology*, 2021, 40(9): 42–46.
- [14] 熊传治, 徐大威. 水平煤层群保安煤柱的合理尺寸研究[J]. 煤炭学报, 1990(4): 15–22.
XIONG Chuanzhi, XU Dawei. Optimal size of safety coal pillars for a group of horizontal coal seams[J]. *Journal of China Coal Society*, 1990(4): 15–22.
- [15] 赵红泽, 邵志奔, 杜海瑞, 等. 露天矿背斜区内排土场边坡基底处理方式优选研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 77–84.
ZHAO Hongze, SHAO Zhiben, DU Hairui, et al. Study on the optimization of treatment methods for inclined basement of inner dump slope in anticline area of open-pit mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(2): 77–84.
- [16] 李岚. 某露天矿边帮压煤回收开采方法选择[J]. 中国矿业, 2021, 30(7): 194–198.
LI Lan. Selection of mining method for recovery of under-slope coal in an open-pit mine[J]. *China Mining Industry*, 2021, 30(7): 194–198.
- [17] 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 coordination of open-pit mine group mining and integration of mining-dumping-reclaiming[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 47–55.
- [18] 马力. 近水平露天煤矿抛掷爆破条件下多煤层开采关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015: 4–9.
MA Li. Key technologies of multi-coal seams mining under condition of adopting blast casting[D]. Xuzhou : China University of Mining and Technology, 2015: 4–9.
- [19] 王康. 特厚煤层综放面区段煤柱宽度及稳定性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019: 15–18.
WANG Kang. A study of the segment coal pillar width and stability of fully mechanized top-coal caving face in extra-thick coal seam [D]. Xi'an : Xi'an University of Science and Technology, 2019: 15–18.
- [20] GB 50197–2015, 煤炭工业露天矿设计规范[S].