

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.251

宝日希勒露天矿端帮高位煤层靠帮回采技术研究

刘光伟¹, 张靖¹, 白润才², 李红毅³, 王强⁴

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁省高等学校矿产资源开发利用技术及装备研究院, 辽宁阜新 123000; 3. 中安国泰(北京)科技发展有限公司, 北京 100101; 4. 赤峰市防灾救灾中心, 内蒙古赤峰 024000)

摘要:现阶段近水平复合煤层露天矿端帮靠帮回采建设过程中, 仍然存在局限, 只是研究了下部煤层的回采, 对于高位煤层的回采难度较大, 研究较少, 因此, 为了能在近水平复合煤层中进行高位煤层的回采, 通过分析宝日希勒露天矿边坡工程地质情况和地层赋存特点, 利用 FLAC^{3D} 构建端帮三维数值模拟模型, 计算了借助内排土场平盘靠帮回采高位煤层 1-2 煤时换填步距与边坡稳定性的关系, 设计确定了靠帮回采高位煤层 1-2 煤边坡稳定性控制技术及其相应的靠帮回采方案。研究结果表明: 端帮 1-2 煤高位煤层靠帮回采换填步距不超过 80 m, 端帮 1-2 高位煤层靠帮回采时, 借助于发展到 1-2 煤台阶底板上的内排土场平盘布置设备进行靠帮回采, 回采方式为分层捣运、内排追踪回填。全区靠帮回采可多回收 1-2 煤 2.260×10^7 t, 取得 49.72 亿元的经济效益。

关键词:露天矿; 近水平复合煤层; 高位煤层; 靠帮回采; FLAC^{3D}

中图分类号: TD824

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)08-056-12

End slope mining technology of top coal seam in Baorixile open-pit mine

LIU Guangwei¹, ZHANG Jing¹, BAI Runcai², LI Hongyi³, WANG Qiang⁴

(1. School of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, P. R. China;

2. Liaoning University Mineral Resources Development and Utilization Technology and Equipment Research Institute, Fuxin, Liaoning 123000, P. R. China; 3. Cathay Safety Technology Co., Ltd., Beijing 100101, P. R. China; 4. Chifeng Disaster Prevention and Relief Center, Chifeng,

Inner Mongolia 024000, P. R. China)

Abstract: At present, there are limitations in the mining and construction process of the end slope of near-horizontal composite coal seam open-pit mines. Existing studies mainly focus on mining the lower coal seam,

收稿日期: 2022-10-15 网络出版日期: 2023-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974144); 辽宁省“揭榜挂帅”科技攻关专项资助项目(2021JH1/10400011); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-07)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51974144), Liaoning Province's Science and Technology Research Special Funding Project (2021JH1/10400011), and Liaoning Technical University Discipline Innovation Team Funding Project (LNTU20TD-07).

作者简介: 刘光伟(1981—), 男, 辽宁工程技术大学教授, 工学博士, 博士研究生导师, 主要研究方向露天开采理论与技术, (E-mail) liuguangwei@lntu.edu.cn。

通信作者: 张靖(1996—), 男, 辽宁工程技术大学博士研究生, 主要研究方向露天开采理论与技术, (E-mail) 1191171681@qq.com。

while mining the top coal seam is more difficult and has received less attention. Therefore, to address the mining of the top coal seam in the near-horizontal composite coal seams, this study analyzes the engineering geological conditions and strata occurrence characteristics of the Baorixile open-pit mine slope. A three-dimensional numerical simulation model of the end slope is constructed using FLAC^{3D}, and the relationship between the filling step distance and the slope stability is calculated when mining the top coal seam 1-2 with the help of the inner dump plate. The slope stability control technology and corresponding mining scheme of 1-2 coal seam in top coal seam are determined. The research findings show that the replacement step distance of the top-level coal seam in the end-slope 1-2 coal seam should not exceed 80 m. When mining the top-level coal seam in the end-slope 1-2 coal seam, the equipment is arranged on the flat plate of the inner dump extended to the bottom plate of the 1-2 coal seam. The mining method involves layered tamping and inner row tracking backfilling. By employing end slope mining, the whole region can recover 2.260×10^7 t coal from the 1-2 seam, resulting in an income of 4.972 billion yuan.

Keywords: open-pit mine; near-horizontal composite coal seam; top coal seam; mining by side; FLAC^{3D}

近年来,在“碳中和”背景下梳理分析能源供需变化等情况,发现中国对能源需求量仍在上升,并没有下降趋势。煤炭在中国工业生产、发电以及供暖等方面,一直以来都是最主要的能源之一,且在未来很长一段时间煤炭仍会占据工业生产以及发电产业的主导地位,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。

宝日希勒露天矿为弱层较发育的典型软岩露天矿^[1-3],均为近水平煤层,全区可采煤层从上到下为B煤,1-2煤,2-1煤,3-1煤,本论文只研究1-2煤高位煤层。由于是软岩露天矿使得露天矿边坡稳定性下降,易造成滑坡,同时弱层也是边坡稳定性下降的主要因素之一^[4-6],因此端帮靠帮回采难度很大。宝日希勒露天矿现已对端帮煤层进行靠帮回采,但只是局限于下部煤层,针对近水平复合煤层中的高位煤层尚没有安全可靠的回采方案,且这方面研究较少,因此,对于近水平复合煤层中的高位煤层,如何在保证边坡稳定的前提下,选择合适的回采方式对高位煤层进行靠帮回采,提高经济效益,是露天矿靠帮回采函待解决的关键问题之一。

目前,许多学者开展了相关的研究。有限元^[7]方法最早在20世纪70年代就应用在边坡稳定性分析方面,并且随着人们对数值模拟更加细致的研究及与岩土工程更加深入的结合,解决了很多复杂且困难的工程实际问题,逐步成为岩土工程方面的主要方法之一^[8-10]。

针对边坡稳定性分析方面:Hu等^[11]基于随机极限平衡法(RLEM),提出了一种考虑土性参数三维空间变异性的边坡稳定性概率评价方法;白润才等^[12]针对白音华一号露天煤矿采场北帮复合顺倾边坡的工程实际问题,基于刚体极限平衡分析方法,应用FLAC^{3D}软件对边坡的应力应变和位移变化进行了数值模拟分析;Ning等^[13]采用残余推力法,通过分析得到了滑坡过程中稳定系数的变化曲线,并提出了边坡滑坡控制措施;韩流等^[14]基于边坡时效稳定分析的理论模型,边坡结构及应力发展规律,认为软岩的流变特性直接影响着软岩边坡或软岩结构面控制的边坡的整体稳定性;徐鼎平^[15]实现强度折减法与Rosenblueth方法耦合确定总体可靠度,提出基于三维数值模拟的“数值模拟-极限平衡分析-可靠度分析”边坡稳定性整合分析方法。针对端帮靠帮开采方面:Wang等^[16]对边坡的垂直应力、水平应力、最大剪应变增量等数据进行了分析,得出垂直应力和稳定系数在整个开采阶段均呈减小趋势,水平应力在开挖降深和陡帮开采中呈现先增大后减小的规律;刘利杰等^[17]优化露天矿山端帮靠帮开采道路宽度,提出端帮靠帮开采方案并进行边坡稳定性模拟分析方法;马婧佳等^[18]综合运用数值模拟等手段方法,分析横采内排、追踪压帮对边坡稳定性的改善作用,提出合理的靠帮开采方案;吴多晋等^[19]提出采用“横采内排-尾随压脚”的开采程序方案,提高了资源回收量及减少运距和提升经济效益;才庆祥等^[20]推导出了在近水平露天煤矿实施端帮靠帮开采,可以降低剥采比,提高煤炭资源回收率 and 经济效益。针对内排压帮方面:周伟等^[21]通过FLAC^{3D}软件对露天矿端帮边坡进行三维模拟,指出压帮内排能提供反向不平衡应力,对不平衡应力起到很好的收敛作用,同时增强边坡稳定系数;吕金

星^[22]基于时效边坡理论和内排压帮的原理,通过数值分析手段,研究了内排土场存在与否时端帮上点的移动距离和稳定系数的变化情况,得出采用内排及时跟进可减少端帮的暴露时间,提高端帮的稳定系数,并能创造可观的经济效益。针对近水平复合煤层中的高位煤层靠帮回采方面:曹博等^[23]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,以经济效益为判断准则,认为不同回采方式的净收益值与煤层厚度大小正相关,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。目前,近水平复合煤层露天矿中,端帮下部煤层的靠帮回采技术已趋于成熟,但端帮高位煤层靠帮回采技术暂处萌芽阶段。

笔者基于宝日希勒露天矿,分析边坡工程地质情况和地层赋存特点,利用FLAC^{3D}构建端帮三维数值模拟模型,计算了借助内排土场平盘靠帮回采高位煤层1-2煤时换填步距(即靠帮回采,沿着端帮向前开采时,在1-2煤底板上的内排土场坡底线与1-2煤向前开采结束时的坡底线之间的距离)与边坡稳定性的关系,设计确定了靠帮回采1-2煤时控制边坡稳定的技术及相应的靠帮回采方案,解决了端帮高位煤层靠帮回采的技术难题。

1 工程地质概况

宝日希勒露天矿地形平坦,是典型的软岩露天矿,且岩石易软化、膨胀和崩解。露天矿采用单斗-卡车间断工艺进行剥离,单斗-汽车-地面半固定破碎站的半连续生产工艺进行采煤,现在采剥工程已进入三采区,实现完全内排,且内排压覆端帮,保证软岩边坡稳定,宝日希勒露天矿境界及采区划分图如图1所示。自上而下主要有第四系砂土层、粘土层和煤系地层组成。主采煤层1-2煤层的顶板岩石主要由砂砾岩组成,3-1煤层的顶板岩石主要由砂岩组成。其中含有2个关键弱层,第1个关键弱层位于1-2煤顶板以下11 m处位置,第2个关键弱层为3-1煤顶板,具体位置如图2所示。煤层近水平分布,赋存稳定,典型地质剖面如图3所示。根据宝日希勒露天矿实际的岩体裂隙发育情况和断层、结构面切割情况,并参照初设的分析计算数据,综合分析露天矿边坡稳定指标,确定宝日希勒露天矿岩土体物理学参数,如表1所示。

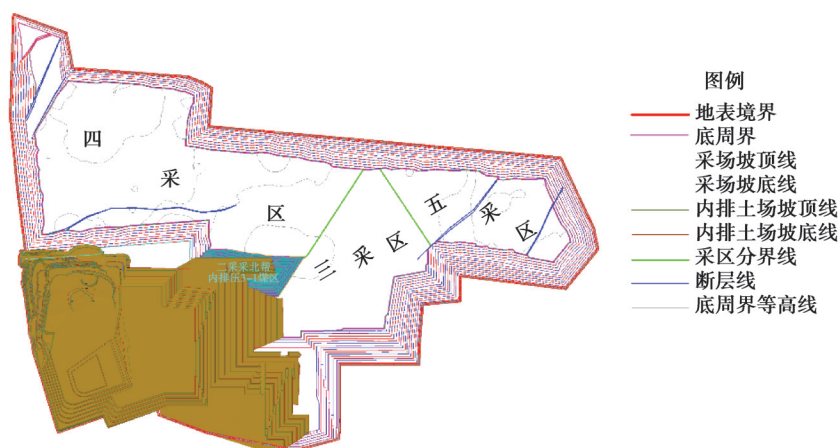


图1 宝日希勒露天矿境界及采区划分图

Fig. 1 Boundary and division map of Baorixile open-pit coal mine

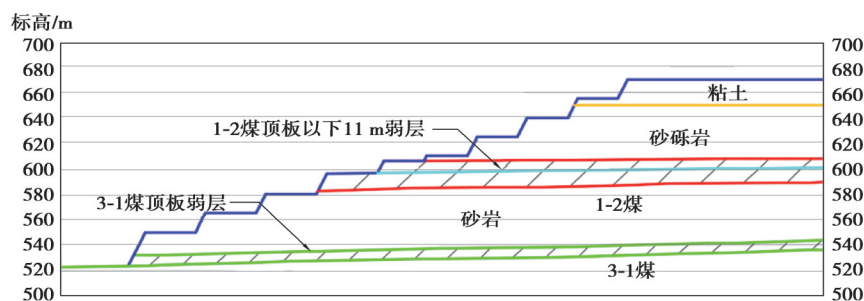


图2 宝日希勒露天矿弱层位置赋存图

Fig. 2 Occurrence map of weak layers in Baorixile open-pit coal mine

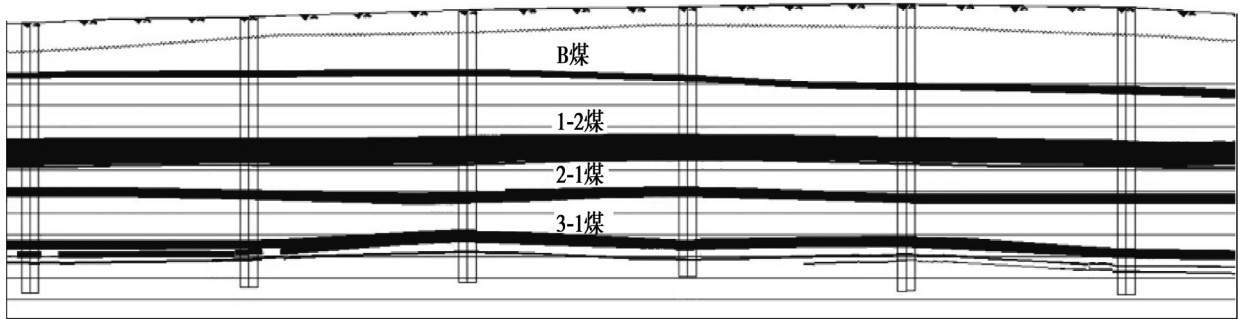


图 3 典型地质剖面

Fig. 3 Typical geological section

表 1 岩土体物理学参数

Table 1 Geophysical parameters

地层	C/kPa	$\varphi/(\circ)$	E/MPa	μ	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$
粘土	2.63	15.50			19.3
砂砾岩	28	26.55	272	0.418	19.5
煤	227	39.64	179	0.290	13.2
砂岩	26	24.19			19.4
弱层	2.77	8.79			

2 1-2 煤高位煤层边坡稳定性数值模拟分析

中国《煤炭法》第三十一条规定,“煤炭生产应当依法在批准的开采范围内进行,不得超越批准的开采范围越界、越层开采”。受矿权界的制约,宝日希勒露天矿靠帮回采方式为上部境界不动,下部境界向外推进,可以增加露天矿煤炭采出量,降低生产剥采比,提高经济效益和煤炭资源回收率。

在宝日希勒露天矿内排压帮基础上,笔者提出了在内排向前推进压帮前的端帮高位煤层靠帮回采方式,并利用内排土场对端帮的支撑效应,提高端帮稳定性,有助于提高回采煤量,1-2煤高位煤层回采方式是分层捣运,通过台阶并段(即将1-2煤采出,使得煤台阶与上一层端帮剥离台阶合并成一个台阶),内排土场追踪压帮,替代原有的煤台阶以保持边坡稳定,回采方式示意图如图4所示,所研究的1-2煤所在煤层的位置为中间煤层,1-2煤回采区域如图5所示。

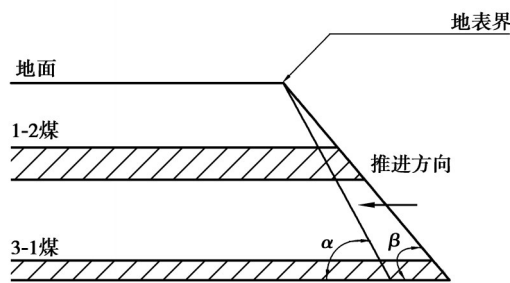


图 4 1-2 煤高位煤层靠帮回采方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the top coal seam side mining method of 1-2 coal seam

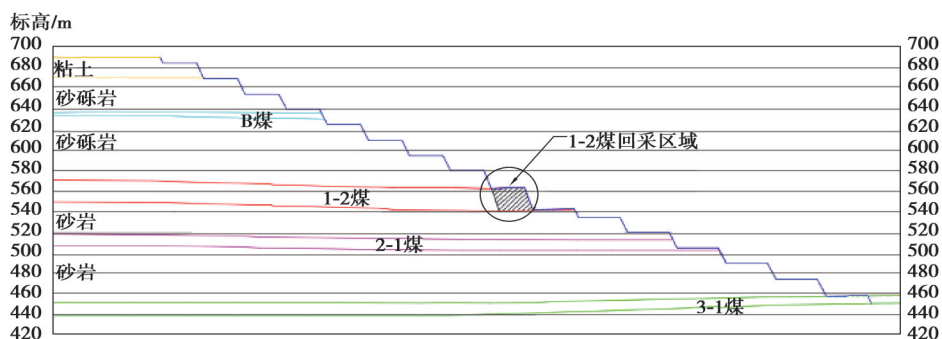


图5 1-2煤高位煤层靠帮回采煤层位置图

Fig. 5 Location map of 1-2 top coal seam near the side of the coal seam mining coal seam

2.1 边坡稳定性数值模拟方法确定

数值分析法主要应用于求解岩土体的应力、应变分布特征及其发展过程。目前应用最广泛的数值分析方法为有限单元法和有限差分法。与有限元方法相比,有限差分法可以更好地考虑岩土体的不连续性,更直观地了解边坡大变形特征,求解速度较快,可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形,其中最具代表性的软件是FLAC^{3D},因此,采用FLAC^{3D}对端帮边坡稳定性进行数值模拟。

2.2 边坡稳定性数值模拟模型构建

根据水文地质、气候条件、排弃物料的物理力学性质,设备类型、排弃方式、整形绿化以及地形地物等因素,运用极限平衡分析法确定出端帮和内排土场参数,如表2所示。综合考虑边坡类型、服务年限和重要程度以及物理力学指标的精度等因素,端帮服务年限均较短,为临时边坡,且已实现内排,选取安全储备系数为1.15。

为设计宝日希勒露天矿高位煤层靠帮回采方案,结合开采现状,根据端帮和内排土场参数建立内排土场和端帮的FLAC^{3D}三维模型(如图6所示),模型中包含基底、端帮、内排土场3个部分。

表2 端帮及内排土场参数表

Table 2 Parameters of end slope and internal dumping site

	台阶坡面角/(°)	台阶高度/m	平盘宽度/m
端帮	65	15	37.5
内排土场	33	15	50.0

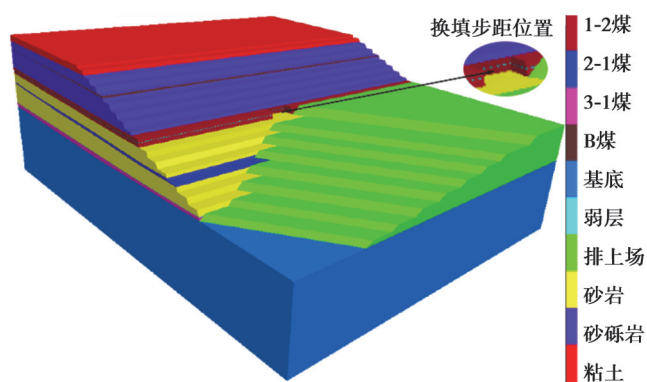


图6 1-2煤高位煤层数值模拟模型图

Fig. 6 Numerical simulation model of 1-2 top coal seam

2.3 边坡稳定性数值模拟及分析

根据内排土场对端帮边坡提供的抗滑力即为内排土场对端帮边坡的三维支挡效应。在一定内排压帮追踪范围内,边坡存在明显的三维力学效应。为了探究在三维支挡效应的作用条件下高位煤层靠帮回采换填步距对边坡稳定性的影响,根据《煤炭安全规程》,内排土场距离下部煤层采煤工作线的追踪距离不小

于 50 m,由于下部煤层 3-1 煤靠帮回采时的追踪距离最小取 50 m,依次是 50 的倍数,且考虑到内排土场整体向前推进,因此,1-2 煤高位煤层靠帮回采时的换填步距取值最小不超过 50 m;露天矿使用现有设备进行采运排,由于 WK-35、WK-10B 电铲最小工作平盘宽度不小于 40 m,220 t 级、110 t 级卡车运输道路最小转弯半径为 40 m,因此,换填步距控制在 40~50 m 之间,同时考虑安全因素,使最小换填步距尽量小,综合分析,1-2 煤高位煤层靠帮回采时的换填步距最小取 40 m,依次是 40 的倍数,分别建立 40、80、120、160、200 m 换填步距下的 FLAC^{3D} 三维模拟模型,结果如图 7~11 所示。

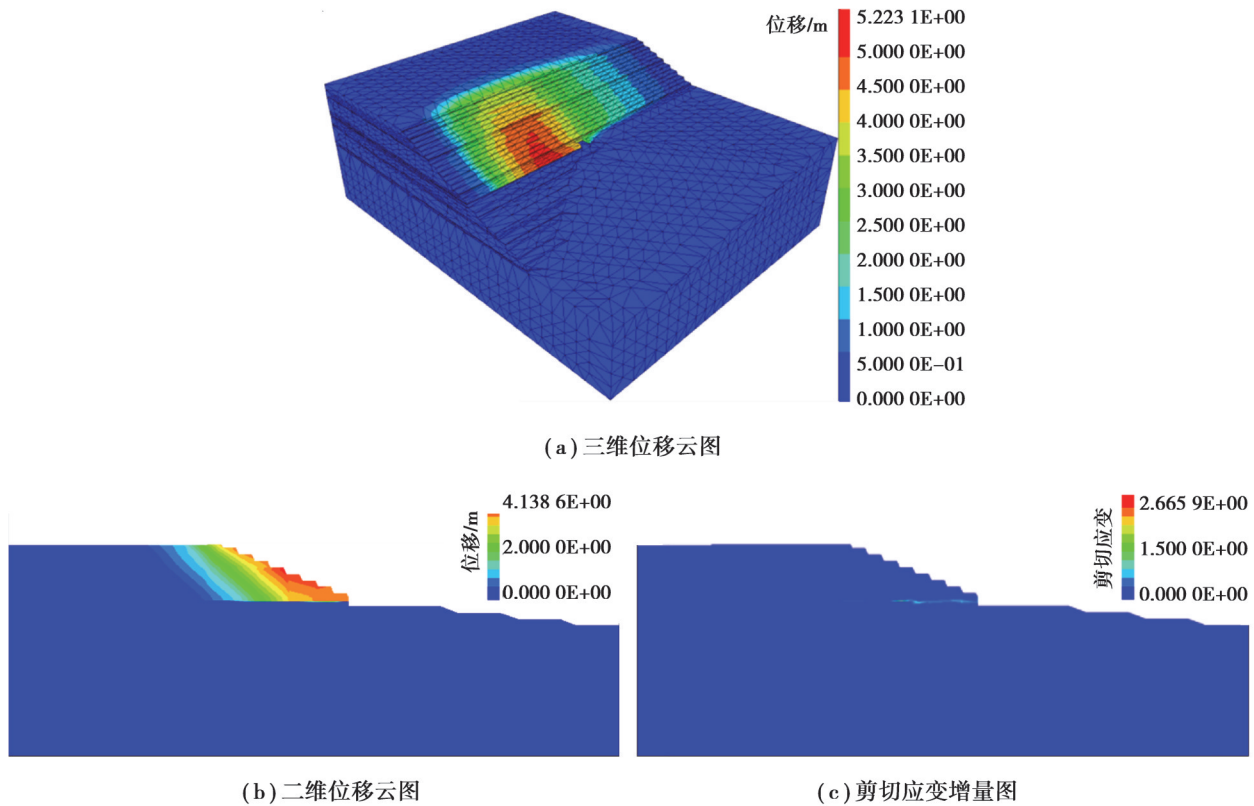


图 7 40 m 换填步距时边坡三维模拟图

Fig. 7 Three-dimensional simulation of slope at 40 m replacement step

图 7~11 为临界破坏时的最大位移云图,换填步距在 80~160 m 时边坡位移最大的区域为边坡的中上部,在 1-2 煤台阶下部没有明显位移,说明此时内排压帮产生的边坡支挡效应作用明显;换填步距为 200 m 时端帮边坡下部产生位移,说明此时内排压帮控制回采技术对边坡支挡作用减弱。当换填步距超过 120 m 时,边坡稳定系数低于安全储备系数 1.15,如表 3 所示。随着换填步距的增加,安全系数 F_s 呈线性递减的趋势,且换填步距 80~120 m 之间递减幅度相比其他范围变化显著,说明边坡稳定性下降趋势明显,如图 12 所示。

计算结果表明,合适的换填步距应在 0~120 m,在此范围内支挡效应明显,边坡稳定性高;但是换填步距为 120 m 时的边坡稳定性系数为 1.16,临近于安全储备系数 1.15,采煤过程中设备作业及爆破引起的振动会暂时影响边坡稳定性,使边坡稳定性降低 10% 以上;且换填步距 80~120 m 之间边坡稳定性下降趋势明显,极不稳定;同时,考虑到不影响内排的跟进及布置设备需要的空间;综合分析,高位煤层靠帮回采换填步距不超过 80 m。

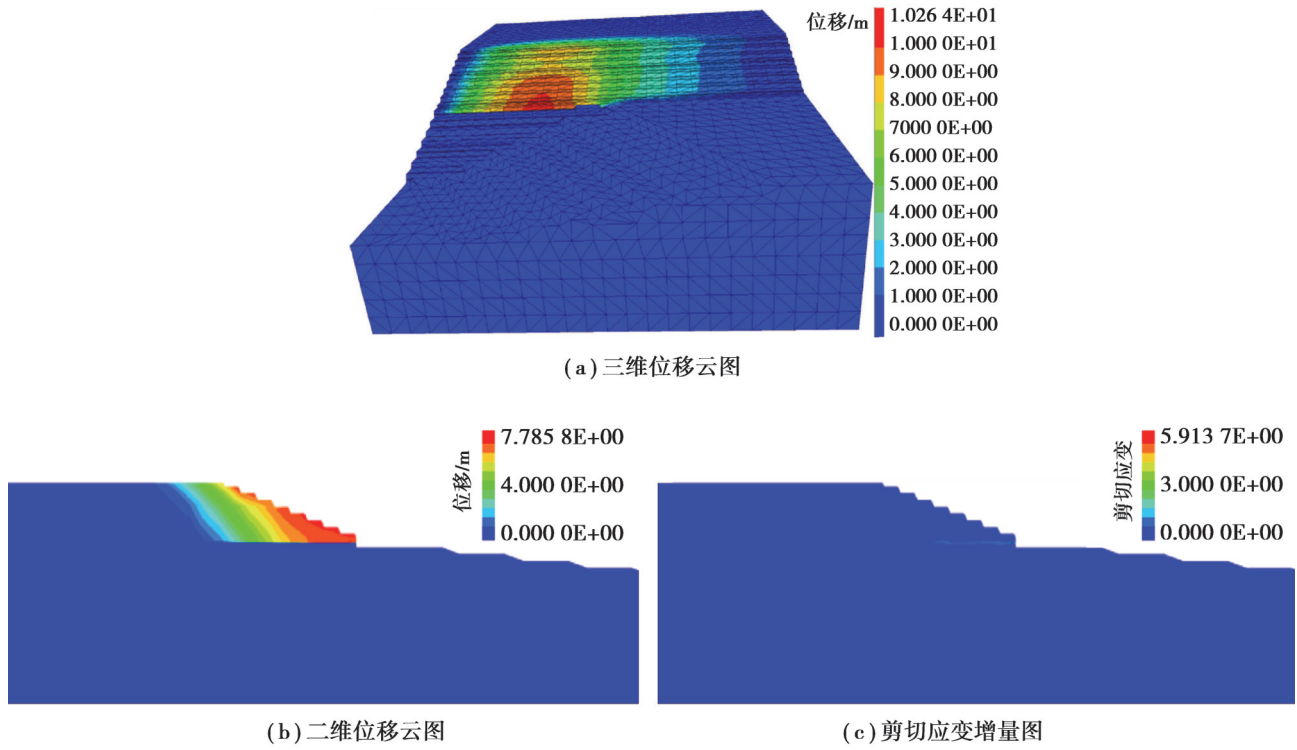


图8 80 m换填步距时边坡三维模拟图

Fig. 8 Three-dimensional simulation of slope at 80 m replacement step

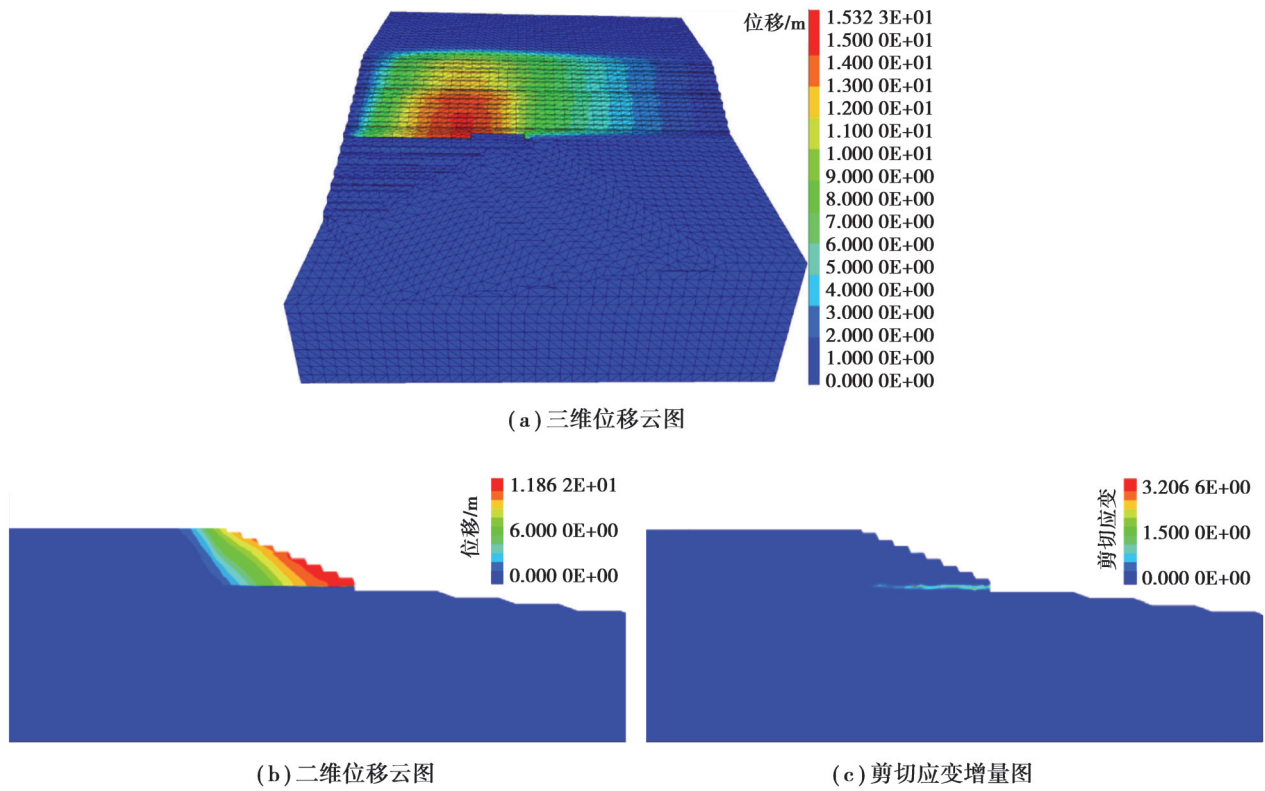


图9 120 m换填步距时边坡三维模拟图

Fig. 9 Three-dimensional simulation of slope at 120 m replacement step

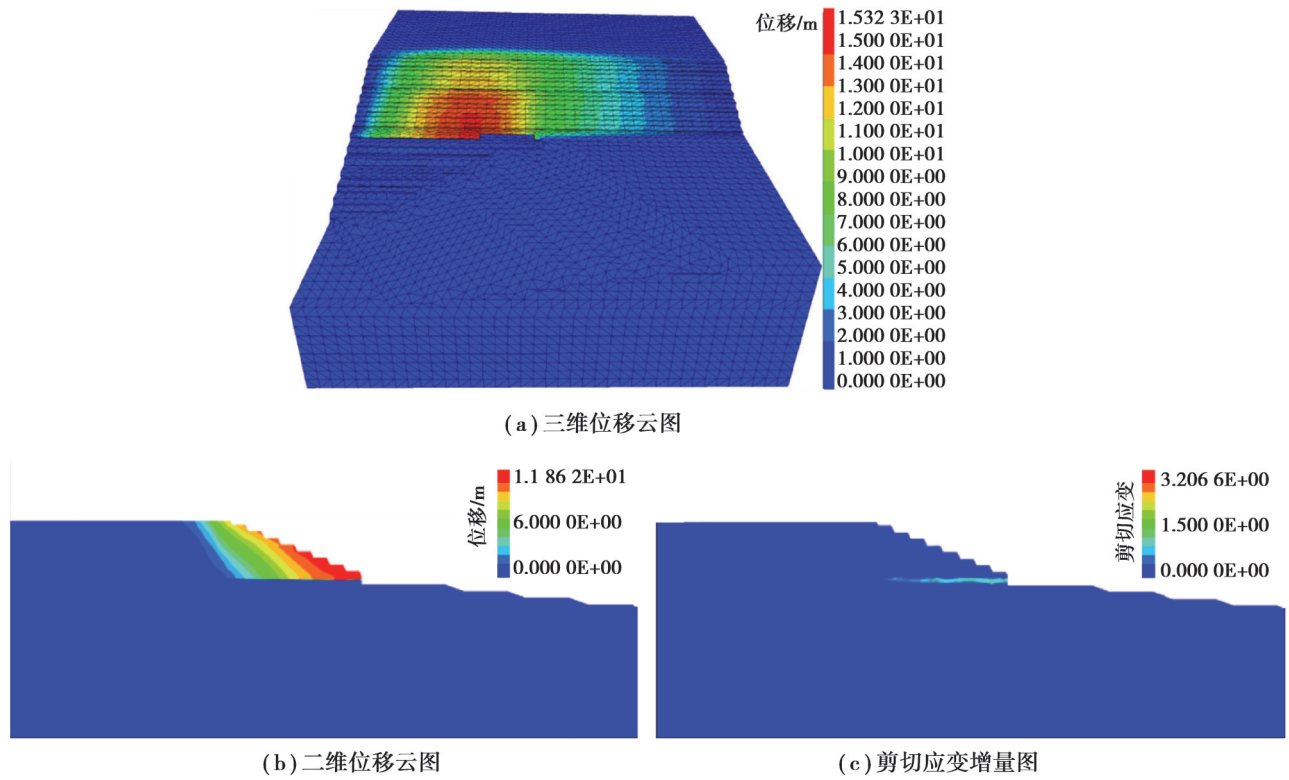


图 10 160 m 换填步距时边坡三维模拟图

Fig. 10 Three-dimensional simulation of slope at 160 m replacement step

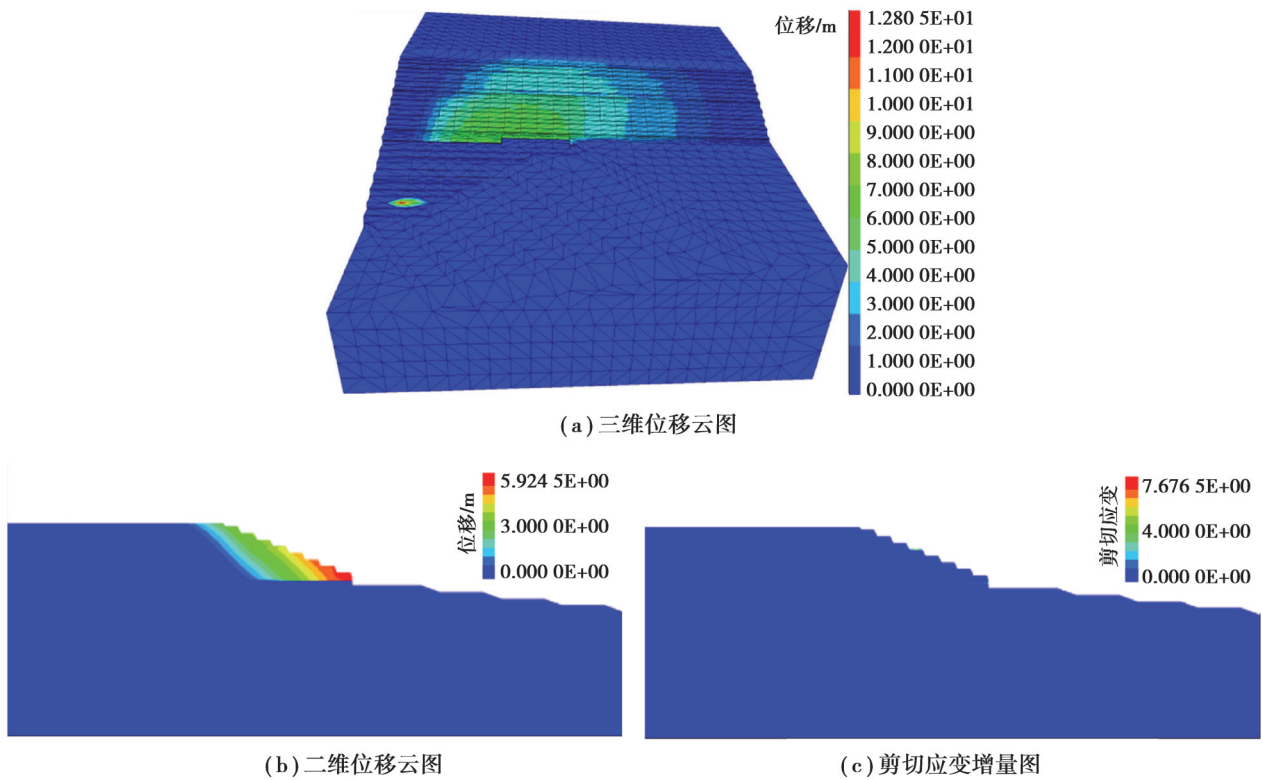


图 11 200 m 换填步距时边坡三维模拟图

Fig. 11 Three-dimensional simulation of slope at 200 m replacement step

表3 高位煤层数值模拟稳定性分析结果

换填步距/m	稳定系数	换填步距/m	稳定系数
40	1.38	160	1.09
80	1.35	200	1.02
120	1.16		

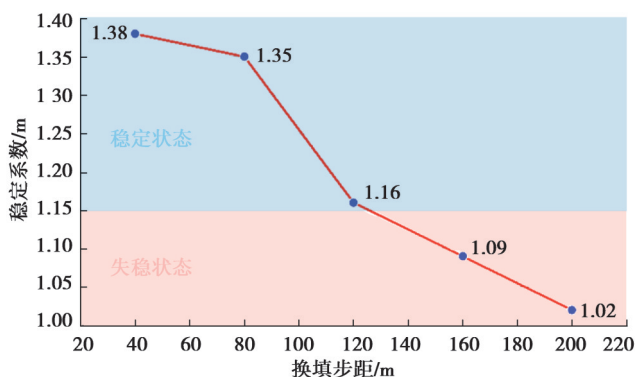


图12 换填步距与稳定系数关系图

Fig. 12 Relationship between replacement step distance and stability coefficient

3 1-2煤高位煤层靠帮回采方案应用分析

高位煤层1-2煤位于端帮中部,根据初设中边坡稳定性分析确定的端帮平盘宽度为37.5 m。煤层厚度大,平均厚度19.08 m,靠帮开采时将煤层上下划分为两层进行作业,第一分层厚度为10 m,剩下的划为第二分层,组合形成一个75 m左右宽,10 m高的回采台阶,此时端帮平台宽度明显不足,要借助于发展到煤台阶底板上的内排土平盘布置设备分步距进行靠帮回采,上下分层的煤均由排土场平盘运出去,进行分层捣运,即煤台阶底板的上一个排土平盘布置道路和捣(利用设备将煤层破碎成小块)、推(利用设备将破碎后的煤推到1-2煤下分层底板上)设备,将1-2煤上分层捣、推至下分层平盘上,在1-2煤底板上的排土平盘布置采装、运输设备进行采运。考虑到边坡安全、不影响内排的跟进及布置设备需要的空间,1-2煤底板上的排土平盘宽度控制在110 m左右,其中30 m为预留的最小运输宽度,0~80 m为高位煤层靠帮换开采填步距宽度,若1-2煤底板上的排土平盘宽度超过110 m,会影响露天矿后续排土平盘的跟进。综上所述,设计的靠帮回采方案确定如下:

1)内排已压帮至1-2煤顶板,在1-2煤底板上的排土平盘宽度设置为110 m,即将原工作帮及内排土场继续向前推进,确保排土平盘宽度满足要求,如图13所示;

2)在煤台阶底板的上一个排土平盘布置道路和捣、推设备,将1-2煤上分层捣、推至下分层平盘上,形成一个100 m左右长、75 m左右宽、10 m高的1-2煤回采台阶,如图14所示;

3)在1-2煤底板上的排土平盘布置采装、运输设备,将1-2煤运输到储煤场,第一阶段1-2煤采完后,此时的1-2煤台阶和相邻上一剥离台阶形成一个煤岩台阶,如图15所示;

4)内排台阶快速跟进回填压帮,压覆已采的1-2煤区域,按上述捣推、回采、回填程序循环往复直至靠帮回采1-2煤工程结束,如图16所示。

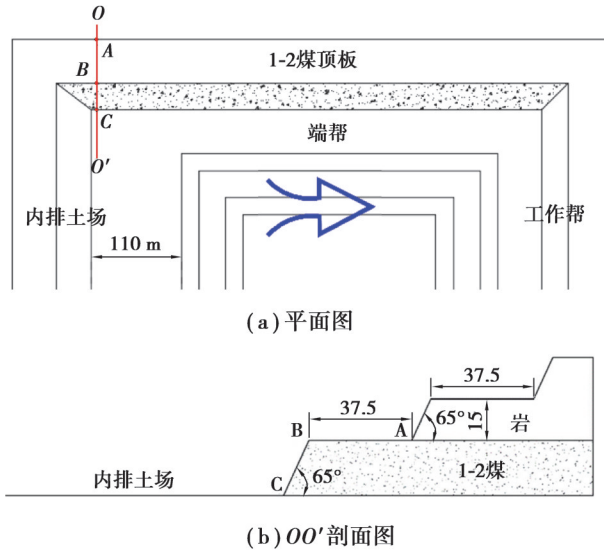


图 13 初始形态示意图

Fig. 13 Schematic diagram of initial shape

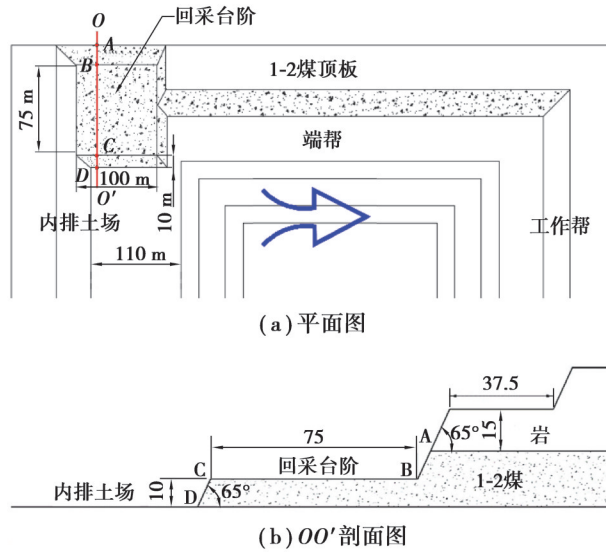


图 14 1-2 煤高位煤层分层捣推形成回采台阶示意图

Fig. 14 Schematic diagram of stopping step formed by layered tamping in 1-2 top coal seam

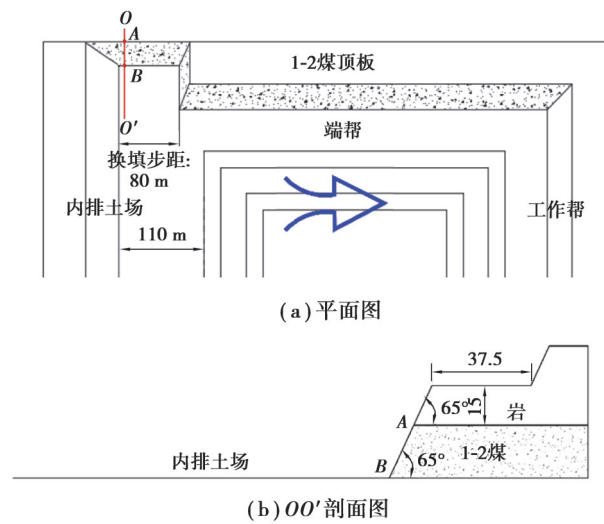


图 15 1-2 煤高位煤层采出后示意图

Fig. 15 Schematic diagram of 1-2 top coal seam after mining

宝日希勒露天矿 1-2 煤端帮长 30.8 km,采用此研究方案进行快速靠帮回采,全区靠帮回采可多回收 1-2 煤 2.260×10^7 t,取得 49.72 亿元的经济效益,经济效益显著,端帮高位煤层靠帮回采方案可行。

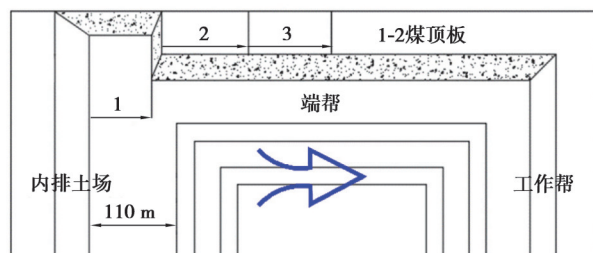


图 16 1-2 煤高位煤层靠帮回采推进示意图

Fig. 16 Schematic diagram of advancing mining of 1-2 top coal seam

4 结 论

1)以宝日希勒露天矿已形成的内排土场压帮为基础,通过利用 FLAC^{3D} 软件对端帮及内排土场建立 40、80、120、160、200 m 换填步距下三维模型数值模拟,确定高位煤层靠帮回采换填步距不超过 80 m,确保边坡稳定。

2)1-2 煤高位煤层靠帮回采方案:内排已压帮至 1-2 煤顶板,将位于 1-2 煤底板上的排土平盘宽度设置为 110 m,在 1-2 煤台阶底板的上一个排土平盘布置道路和捣、推设备,将 1-2 煤上分层捣、推至下分层平盘上,1-2 煤底板的排土平盘上布置采装、运输设备,将 1-2 煤回采台阶的煤炭采运,最后内排台阶快速跟进回填压帮。

3)通过分析靠帮回采高位煤层时的换填步距与边坡稳定性的关系,确定了边坡稳定性控制技术,提出了近水平复合煤层端帮高位煤层靠帮回采方案,该方案全区靠帮回采可多回收 1-2 煤 2.260×10^7 t,取得 49.72 亿元的经济效益。该研究可推广至类似的近水平复合煤层露天矿进行端帮高位煤层靠帮回采。

参考文献

- [1] Luo J L, Zhu W T, Xiao C B, et al. Detection of a weak structural stratum and stability analysis of the slope in an intensely weathered open-pit mine[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, 861(2): 022044.
- [2] 田树昆. 宝日希勒露天煤矿软岩边坡稳定性研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.
Tian S K. Research on the stability of soft rock slope in baorixile open pit mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011. (in Chinese)
- [3] 张咸恭, 王思敬, 张悼元, 等. 中国工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 36-59.
Zhang X G, Wang S J, Zhang Z Y, et al. China engineering geology[M]. Beijing: Science Press, 2000: 36-59.(in Chinese)
- [4] Zhong S H, Miao Y J. Research on the influence of weak interlayer in open-pit slope on stability[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(9): 1-9.
- [5] 杨巨文, 白润才, 于永江, 等. 含弱层岩质边坡自振周期反演试验及数值验证[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 69-75.
Yang J W, Bai R C, Yu Y J, et al. Inversion test and numerical verification on natural period of rock slope with weak layers[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 69-75.(in Chinese)
- [6] He M C. Latest progress of soft rock mechanics and engineering in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(3): 165-179.
- [7] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 39-61, 112.
Zheng Y R, Zhao S Y, Deng C J, et al. Development of finite element limit analysis method and its applications in geotechnical engineering[J]. Engineering Science, 2006, 8(12): 39-61, 112.(in Chinese)
- [8] Wijesinghe D R, Dyson A, You G, et al. Simultaneous slope design optimisation and stability assessment using a genetic algorithm and a fully automatic image-based analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2022, 46(15): 2868-2892.

- [9] Peidong, Su, . Stability prediction and optimal angle of high slope in open-pit mine based on two-dimension limit equilibrium method and three-dimension numerical simulation[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2022, 127: 103151.
- [10] 曹兰柱, 赵立春, 王东, 等. 含多弱层复合边坡滑坡治理三维数值分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(6): 102-107.
Cao L Z, Zhao L C, Wang D, et al. Three-dimensional numerical analysis on landslide control of composite slope with multiple weak layers[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(6): 102-107.(in Chinese)
- [11] Hu L H, Takahashi A, Kasama K. Effect of spatial variability on stability and failure mechanisms of 3D slope using random limit equilibrium method[J]. *Soils and Foundations*, 2022, 62(6): 101225.
- [12] 白润才, 杜涵, 王东, 等. 白音华1号露天矿北帮边坡稳定性分析[J]. *金属矿山*, 2017(8): 170-174.
Bai R C, Du H, Wang D, et al. Stability analysis of the north slope of baiyinhua No.1 open-pit mine[J]. *Metal Mine*, 2017(8): 170-174.(in Chinese)
- [13] Ning F, Ji C S, Garmondyu E. et al. Stability analysis of the sliding process of the west slope in Buzhaoba Open-Pit Mine[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 26(5): 869-875.
- [14] 韩流. 露天矿时效边坡稳定性分析理论与实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
Han L. Theory analysis and experimental research for time-dependent slope stability of surface mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015. (in Chinese)
- [15] 徐鼎平. 基于三维数值模拟的边坡稳定性分析的整合方法研究[D]. 马鞍山: 马鞍山矿山研究院, 2007.
Xu D P. Study on integration method of slope stability analysis based on three-dimensional numerical simulation[D]. Maanshan: SINOSTeel Maanshan Institute of Mining Research Co., Ltd., 2007. (in Chinese)
- [16] Wang Z L, Tian Y, Zhou W, et al. Steep end-slope mining and slope stability of extremely thick inclined coal seam open-pit mine[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022(4): 1-9.
- [17] 刘利杰, 刘智超, 聂忠叶. 基于 Vissim 仿真模拟的露天煤矿靠帮开采方案优化[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(S1): 114-120.
Liu L J, Liu Z C, Nie Z Y. Optimization of steep-end slope mining plan in open-pit coal mines based on Vissim simulation[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(S1): 114-120. (in Chinese)
- [18] 马婧佳, 王勇, 黄浩轩, 等. 宝日希勒露天煤矿南帮边坡靠帮开采方案[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(11): 240-244.
Ma J J, Wang Y, Huang H X, et al. Mining plan for south slope of Baorixile Open-pit Coal Mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(11): 240-244.(in Chinese)
- [19] 吴多晋, 赵红泽. 高大软岩边坡下开采程序研究[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(3): 26-30.
Wu D J, Zhao H Z. Study on mining sequence under high soft rock slope[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(3): 26-30. (in Chinese)
- [20] 才庆祥, 周伟, 车兆学, 等. 近水平露天煤矿端帮靠帮开采方式与剥采比研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2007, 36(6): 743-747.
Cai Q X, Zhou W, Che Z X, et al. Research on the mining method and stripping ratio of steep end-slope mining in surface coal mines with flat coal deposit[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(6): 743-747.(in Chinese)
- [21] 周伟, 韩流, 才庆祥. 内排土场对端帮边坡稳定性影响研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(4): 671-676.
Zhou W, Han L, Cai Q X. Influence of inner dump on end-slope stability[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2015, 32(4): 671-676.(in Chinese)
- [22] 吕金星, 舒继森, 韩流, 等. 内排土场对露天矿端帮稳定性的影响[J]. *金属矿山*, 2012(3): 45-47.
Lu J X, Shu J S, Han L, et al. Influence of internal dumping on stability of end-slope in open-pits[J]. *Metal Mine*, 2012(3): 45-47.(in Chinese)
- [23] 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/OL]. *煤炭科学技术*(2022-08-29)[2022-09-03]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCdPD64qs7f09ap5B7mleO6jGO2Sh31SgevYLwSxXji0ddeUMtgXPNTXtp6A&uniplatform=NZKPT>. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0675.
Cao B, Li Q Y, Wang S, et al. Study on mining scheme of non-working side high coal seam in near horizontal composite coal seam open-pit mine [J/OL]. *Coal Science and Technology*(2022-08-29)[2022-09-03]. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0675.(in Chinese)