

黄华, 苗凯军, 屠世浩, 等. 特厚煤层分叉合并区放煤方式适用性分析与优选[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(3): 033528.
HUANG Hua, MIAO Kaijun, TU Shihao, et al. Applicability analysis and optimization of top coal caving methods in bifurcation and merged extra-thick coal seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(3): 033528.

特厚煤层分叉合并区放煤方式适用性分析与优选

黄华^{1,3}, 苗凯军², 屠世浩², 李研², 王大鹏^{2,3}, 魏跃东³, 苗涛⁴, 刘学文³

(1. 山西省晋神能源有限公司, 山西 忻州 036500; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 山西晋神沙坪煤业有限公司, 山西 忻州 036500; 4. 国家能源集团神东补连塔煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017209)

摘要:针对复杂结构特厚煤层分叉合并区域放煤方式选择困难的问题,通过顶煤厚度探测、GDEM数值仿真分析和工作面实测综放开采指标,得到特厚煤层分叉区和合并区的2个煤层赋存地质模型,建立颗粒动力学数值模型,实测不同放煤方式的顶煤放出率。研究表明:不同放煤方式条件下的含矸率相差较小,但是顶煤放出率差异较大;顶煤厚度不大于5 m时单轮间隔1架的放煤效果最优,顶煤放出率为63.5%,较其他2种放煤方式高2.2%;顶煤厚度大于5 m时多轮顺序放煤效果最优,顶煤放出率为74.9%,较其他2种放煤方式分别高5.0%和1.4%;现场试验中多轮顺序放煤较多轮间隔放煤的顶煤放出率高约7%,数值模拟和工程试验的结果一致性较好。优化后的放煤方式提高了顶煤放出率,为沙坪矿后续综放工作面 and 周边矿井提供了放煤方式优化模型。

关键词:综放开采;煤层分叉合并;顶煤厚度探测;放煤方式;GDEM

中图分类号:TD823

文献标志码:A

文章编号:2096-7187(2023)03-3528-08

Applicability analysis and optimization of top coal caving methods in bifurcation and merged extra-thick coal seam

HUANG Hua^{1,3}, MIAO Kaijun², TU Shihao², LI Yan², WANG Dapeng^{2,3}, WEI Yuedong³, MIAO Tao⁴, LIU Xuewen³

(1. Shanxi Jinshen Energy Co., Ltd., Xinzhou 036500, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Shanxi Jinshen Shaping Coal Mining Co., Ltd., Xinzhou 036500, China; 4. Bulianta Coal Mine, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017209, China)

Abstract: This study addresses the challenge of selecting coal caving methods (CCM) in complex structures and extra-thick coal seams, particularly in bifurcation and merging areas. The objective is to enhance the economic benefits of longwall top coal caving (LTCC) working faces. To achieve this, the study employs borehole detection of top coal thickness, GDEM numerical simulation analysis, and on-site measurement of LTCC mining indicators. Two geological models representing coal seam occurrence in bifurcation and merging areas are established, along with a numerical model of particle dynamics to measure the recovery rate of top coal using different CCM. The findings indicate that while the difference in gangue content among various CCM is minimal, the disparity in top coal recovery rate is substantial. When the top coal thickness is below 5 m, single-round coal caving with one-support intervals yields the best results, achieving a top coal recovery rate of 63.5%, which is 2.2% higher than the other two CCM methods. Conversely, for top coal thicknesses exceeding 5 m, the optimal approach is multi-round sequential coal caving, resulting in a top

收稿日期:2022-09-02

修回日期:2022-10-24

责任编辑:施红霞

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51874281)

作者简介:黄华(1974—),男,山西翼城人,高级工程师,主要从事煤矿安全生产与技术管理等方面的工作。E-mail:HH123456HH@163.com

通信作者:屠世浩(1963—),男,浙江嵊州人,教授,主要从事开采方法与岩层控制技术等方面的研究工作。E-mail:tsh-cumt@163.com

coal recovery rate of 74.9%, which is 5.0% and 1.4% higher compared to the other two methods. Field tests corroborate these findings, showing a 7% higher top coal recovery rate for multi-round sequential coal caving compared to multi-round coal caving at intervals. The results obtained from numerical simulations and engineering tests exhibit good agreement. The optimized coal caving method improves top coal recovery rates and provides an optimization model for future fully mechanized caving working faces and surrounding mines at Shaping Coal Mine.

Key words: fully-mechanized top coal caving technology; coal seams merge after bifurcation; top coal thickness detection; coal caving method; GDEM

我国煤炭储量以厚煤层赋存为主,随着开采技术和装备水平的提高,近年来特厚煤层综放开采矿井的数量逐渐增多^[1-3]。综放工作面低采出率和高含矸率不仅影响经济效益,也造成了严重的矸石固废排放污染。学者们对顶煤的破碎机理和冒放规律进行了系统的研究,期望在采出率和含矸率这一对矛盾指标中找出科学的平衡点^[4]。

在生产实际中顶煤结构复杂,煤层厚度变化显著,合理地选择放煤方式对于减少采空区遗煤和降低原煤含矸率具有重要意义。由于放煤方式与生产地质条件具有复杂的时空关系,当前主要采用数值模拟和相似模拟的方法^[5-8]。其中,数值模拟由于具有参数可控、可重复性好和成本低等优点,应用最广。块体离散元常用来分析裂隙演化和覆岩运移特征^[9],利用PFC数值仿真可对比不同覆岩条件、放煤步距、放煤方式及不同采放比的采出率,实现放煤工艺参数的优化^[10-11]。模拟和实践结果均表明在煤层厚度较大时,多轮放煤可以使煤岩分界线均匀下沉,减少采空区遗煤。白庆升^[12]分析复杂结构顶煤的破碎特征;霍昱名^[13]建立了“有限-离散元耦合模型”,展现了顶煤渐进破碎的过程;张锦旺^[14]等基于BBR研究体系对特厚煤层提出了分段大间隔放煤方式,减少了架间残煤量;刘长友^[15]等通过研究“煤-矸-岩”放落流动的时序规律,提出了“煤-矸-岩”自动识别的主要参数和识别方法。此外,LIANG Minfu^[16]等采用神经网络优化了放煤参数。综上所述,在顶煤破碎机理和煤矸流动规律等方面已经进行了大量研究,但对于特厚煤层分叉合并且含有较厚夹矸条件的放煤方式优选鲜有相关研究。

笔者以山西晋神沙坪煤业有限公司(下文简称沙坪矿)13103综放首采工作面为工程背景,为提高复杂结构特厚煤层放顶煤工作面的经济效益,提升工作面采出率,同时降低原煤含矸率,基于该矿的

生产地质情况建立了两类典型放顶煤条件的数值模型,对不同放煤方式下顶煤放出率进行研究,通过顶煤放出率及含矸率的对比,获得合理的放煤方式。经现场实践证明,随煤厚变化及时调整放煤方式可显著提高顶煤放出率,提升经济效益。

1 工程概况

沙坪矿位于山西省河曲县东南,属河东煤田的河保偏矿区。一盘区13号煤为特厚煤层,煤层厚8~17 m。由于13号煤层厚度变化较大,双巷沿13号煤层底板布置。两巷探测的煤厚表明,首采13103工作面大部分区域分叉为13号上和13号煤层,中间夹层为平均厚度8.0 m的中砂岩;合并区煤层综合柱状特征表明13号煤层厚约15.2 m,其中中部含有2层0.6 m的夹矸。13103工作面长1 674 m,宽240 m,平均倾角3°,埋深约200 m。综放采用了北京煤机厂ZFY13600/27/45D型放顶煤支架和MG650/1620-WD型采煤机,机采高度为2.9~4.3 m。设计机采高度为4.0 m,剩余顶煤通过支架后部放煤口放出。工作面煤层分叉前后的综合柱状和煤层分叉合并情况如图1所示。

2 顶煤结构特征分析

地质探测是工作面安全高效开采的先导工作,顶煤厚度探测是综放开采的重要工作环节。井下工作环境复杂,物理信息探测容易受到干扰,如地质探测装备中的探地雷达,不仅探测顶煤厚度范围较小(一般不大于5 m),而且误差较大^[17-18]。为获得13103工作面的顶煤结构特征,在工作面形成后的双巷内每间隔50 m对顶煤进行垂直钻孔探测。据13103工作面探测结果,分叉区下分层13号煤层的顶煤煤层厚度为3.7~4.4 m,平均厚度为4.0 m;中位夹矸厚0.9 m。合并区13号煤层顶煤厚度为8.2~11.9 m,平均厚度为10.0 m;中位夹矸累计厚度1.2 m。

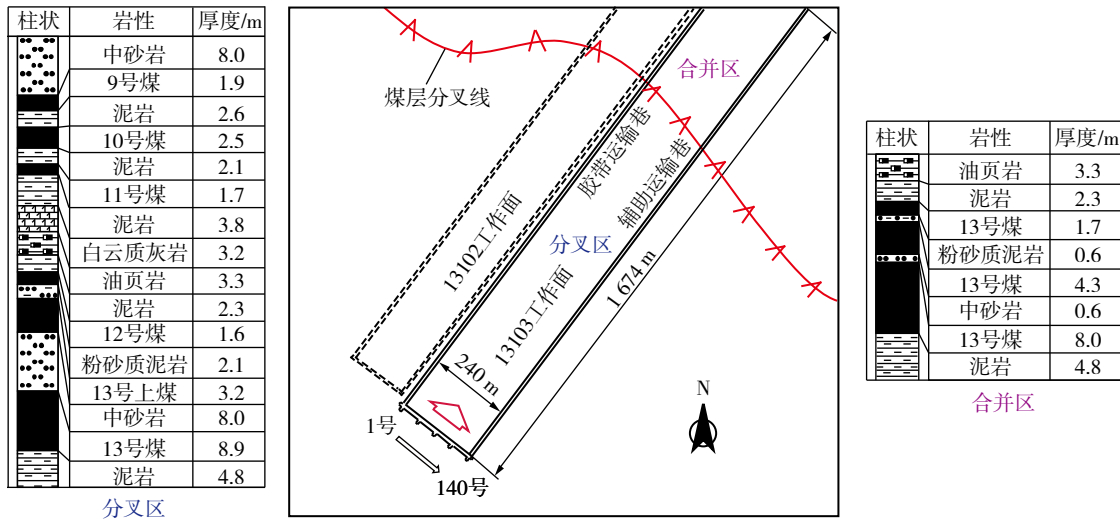


图1 13103工作面布置及地质概况

Fig. 1 Layout and geological overview of 13103 working face

采煤期间工作面顶板向上施工钻孔观测,原则上探顶煤步距根据当前顶煤厚度(h)确定:当 $h < 5$ m时,探顶煤步距 ≤ 30 m;当 $5 \text{ m} \leq h \leq 8$ m时,探顶煤步距 ≤ 25 m;当 $h > 8$ m时,探顶煤步距 ≤ 20 m。13103工作面实际采煤每周推进24 ~ 30 m,因此确定探顶煤周期为7 d。

工作面探顶煤钻孔间距根据相邻2个探孔的顶煤厚度差值(Δh)确定,其中第1个钻孔距巷道内帮不超过20个支架宽度,第2个钻孔距第1个钻孔不超过20个支架宽度,此后下一个孔的位置可根据前2个钻孔探测的煤厚差值确定,具体为:当 $\Delta h < 0.5$ m时,探顶煤间距为20个支架宽度;当 $0.5 \text{ m} \leq \Delta h \leq 1.0$ m时,探顶煤间距为15个支架宽度;当 $\Delta h > 1.0$ m时,探顶煤间距为10个支架宽度。实际探测过程中,为方便钻孔施工定位,每20个支架施工1个探孔,并根据探测结果进行补探。

3 放煤方式适用性分析

由于不同放煤方式下顶煤的运移规律不同,可能会造成顶煤放出率产生明显差异。放煤方式根据放煤轮数可分为单轮放煤和多轮放煤;根据支架开启顺序可分为顺序放煤和间隔放煤。单轮放煤方式操作流程较为简洁,用时较少,有利于提高放煤效率,但若顶煤较厚,尤其当顶煤中包含夹矸而不易冒放时,单轮放煤方式不利于顶煤放出,且由于顶煤与顶板无法平缓下沉,顶煤放出后可能会混入大量矸石。多轮放煤方式则可以保证冒落的顶煤和冒落的直接顶的煤岩分界线平缓地下降,以减

少混矸,同时可以给冒落破碎不充分的顶煤二次冒落破碎的时间,以保证较高的顶煤放出率^[6]。

沙坪矿13103工作面分叉区与合并区煤厚相差较大,顶煤平均厚度分别为4.9 m和11.2 m。因此,针对顶煤破碎冒落后如何高效放出的问题,笔者采用GDEM数值模拟软件对不同放煤方式下顶煤放出率进行研究,通过顶煤放出率以及含矸率的对比,优化放煤方式,提高综放面的经济效益。

3.1 GDEM数值模型

矿山压力作用下,顶煤发生破碎并堆叠在支架后上方,经历损伤体→破碎块体→散体碎块的转变过程,最终以近似颗粒散体形式由放煤口放出,如图2所示^[8]。



图2 放顶煤工艺示意剖面(修改后^[8])

Fig. 2 Schematic section of top coal caving process (after modification^[8])

为简化顶煤运移数值模拟计算过程,假设支架上方的煤体在矿山压力和支架反复支撑扰动下破碎为散体颗粒,颗粒只受重力和颗粒间摩擦力的影响。

颗粒动力学仿真系统(GDEM-PDyna)是基于连续和非连续单元方法,以颗粒离散元为主包含多种

计算模块,计算效率较高,具有强大的重启动分析和参量监测功能^[19]。采用GDEM数值模拟软件模拟

不同放煤方式下顶煤放出率及含矸率的主要流程如图3所示。

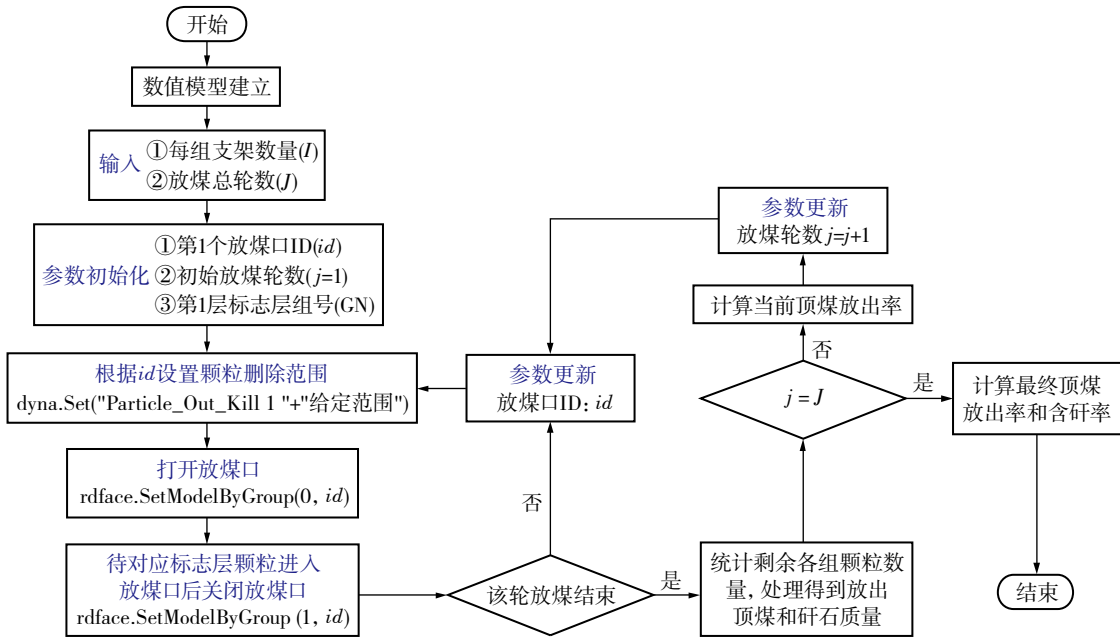


图3 不同放煤方式的GDEM模拟程序

Fig. 3 GDEM simulation program for different coal caving methods

由于13103工作面煤层为近水平煤层,为便于各组颗粒的生成,选取模型整体角度为0°。为了优化模型计算效率,同时又能够保证模拟分组间隔试验中完整的组内放煤形态,放煤支架数量设置为10架;实际揭露煤层结构较复杂,夹矸0~3层,为简化模拟过程,将夹矸简化为1层,中位厚夹矸对顶煤破碎影响最大,因此模型中将简化后的夹矸层位设置为中位,厚度根据探测结果分别设置为0.9 m和1.2 m。当综放工作面煤层厚度较薄时采用单轮放煤方式,当煤层厚度较厚时采用多轮放煤方式,分别建立数值模型,如图4所示。

由图4可知,模型由下至上分别为顶煤1、夹矸、顶煤2及直接顶,采用二维圆形颗粒模拟破碎后的顶煤、夹矸与直接顶,颗粒半径依次为0.2, 0.3, 0.4 m。模型左右两侧设置边界影响长度为6.0 m,以避免模型边界影响放煤漏斗的形成,模型长度共计32.0 m,并采用刚性板作为位移约束,限制颗粒移动范围。底部边界采用速度约束,初始状态下速度、位移均为0。分叉区模型中,顶煤1和顶煤2的厚度均为2.0 m,夹矸厚度为0.9 m,直接顶厚度为2.0 m,将直接顶设置为标志层,便于实现见矸关门。合并区模型中,顶煤1和顶煤2的厚度均为5.0 m,夹矸厚度为1.2 m,直接顶厚度为2.4 m,将夹

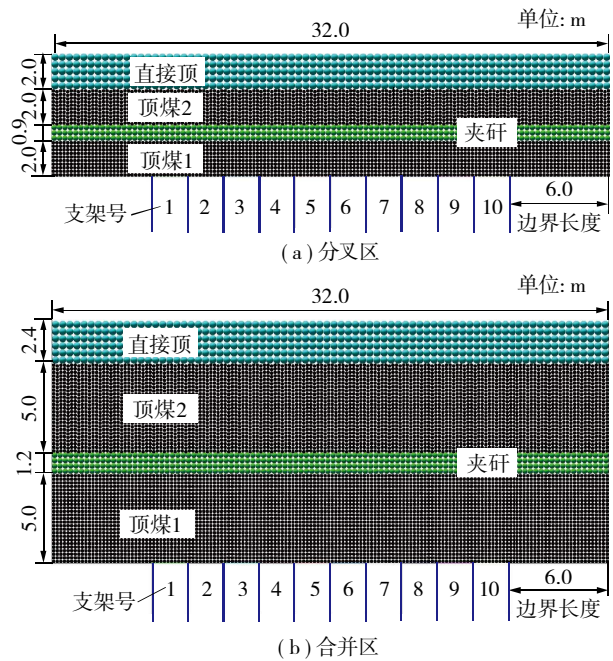


图4 不同煤厚区域数值模型

Fig. 4 Numerical model of different coal thickness regions

矸和直接顶分别设置为2组标志层,便于作为多轮放煤LOOP循环语句的判别条件。

结合沙坪矿13103工作面实测的煤岩体物理力学参数,考虑在放顶煤过程中,将放出煤岩体视为破碎后的较为松散颗粒,密度、泊松比、内摩擦角不变,模拟参数见表1。

表1 煤层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of coal strata

岩性	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	抗拉强 度/MPa	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/(°)
顶煤	1 400	2	0.27	0.01	0.01	32
岩石	2 500	10	0.10	0.06	0.01	31

3.2 放煤方式试验

3.2.1 单轮放煤方式

共设计3种单轮放煤方式:①单轮顺序放煤,按液压支架编号,放煤顺序依次为1→2→3→4→5→6→7→8→9→10,从第1架支架开始放煤,一次性放出顶煤,以见矸关门为放煤结束条件,放煤结束后进行下一架放煤,直至所有支架放煤结束;②单轮间隔1架放煤,放煤顺序依次为1→3→5→7→9→2→4→6→8→10,放煤结束条件同①;③单轮间隔2架放煤,放煤顺序依次为1→4→7→10→2→5→8→3→6→9,放煤结束条件同①。

3.2.2 多轮放煤方式

由于模型中只存在一层厚夹矸,因此多轮放煤即为3轮放煤。第1轮将顶煤1放出,放煤口出现矸石即关门;第2轮将夹矸放出,放煤口出现顶煤2即关门;第3轮将顶煤2放出,放煤口出现直接顶即关门。

共设计3种多轮放煤方式:①多轮顺序放煤,放煤顺序依次为1→2→3→4→5→6→7→8→9→10,共进行3轮;②多轮间隔1架放煤,放煤顺序依次为1→3→5→7→9→2→4→6→8→10,共进行3轮;③多轮间隔2架放煤,放煤顺序依次为1→4→7→10→2→5→8→3→6→9,共进行3轮。每轮放煤结束后,统计顶煤放出率和含矸率。

3.3 结果分析

3.3.1 单轮放煤方式

对模型采用单轮顺序放煤、单轮间隔1架放煤及单轮间隔2架放煤,得到放煤后的结果如图5所示,顶煤放出率和含矸率的统计结果见表2。由图5(a)可知,单轮顺序放煤结束后,支架正上方夹矸基本全部放出,而每一架支架上方都堆积有一小部分顶煤未放出,经统计,单轮顺序放煤的顶煤放出率为61.3%,含矸率为10.6%,排除放煤方式的因素,由放煤结果可以看出,放煤率较低是因为两侧所留的边界长度太长导致顶煤颗粒总数较多。由图5(b)可知,单轮间隔1架放煤结束后,支架正上方夹矸也基

本全部放出,但与单轮顺序放煤不同的是,残留的顶煤颗粒数量较少,且顶煤在支架上方的分布不均匀,出现间隔分布,单轮间隔1架放煤的顶煤放出率为63.5%,含矸率为10.2%。由图5(c)可知,单轮间隔2架放煤结束后,支架正上方夹矸有一部分未放出,这减少了放出的矸石量,但支架上方残留的顶煤较多,间隔分布更为明显,单轮间隔2架放煤的顶煤放出率为61.2%,含矸率为10.0%。

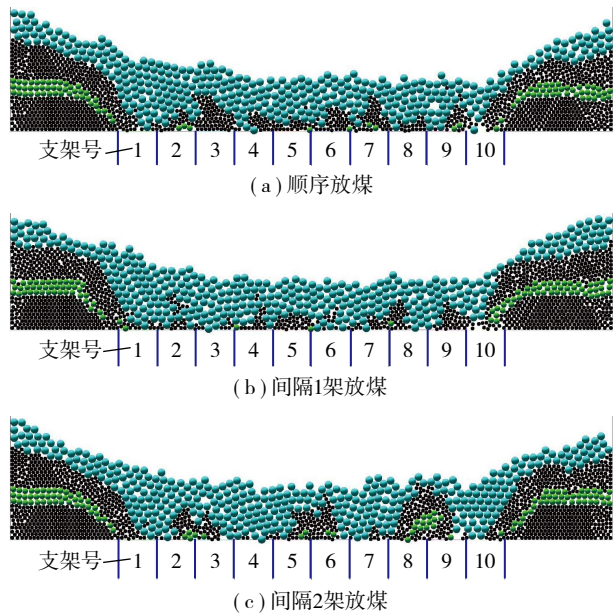


图 5 分叉区单轮不同放煤方式下放煤结果

Fig. 5 Results of single round of coal caving in different ways in the bifurcation area

表2 单轮不同放煤方式顶煤放出率及含矸率统计

Table 2 Statistics of top coal recovery rate and gangue content of single-round coal caving method

放煤方式	顶煤放出率/%	含矸率/%
单轮顺序	61.3	10.6
单轮间隔1架	63.5	10.2
单轮间隔2架	61.2	10.0

综上所述可知,当顶煤厚度≤5 m采用单轮放煤方式时,单轮间隔1架放煤的顶煤放出率最高,虽然含矸率较单轮间隔2架放煤更高,但综合顶煤放出率和含矸率,建议选择单轮间隔1架放煤。

3.3.2 多轮放煤方式

对模型采用多轮顺序放煤、多轮间隔1架放煤及多轮间隔2架放煤,得到3轮放煤后的结果如图6~8所示,顶煤放出率和含矸率的统计结果见表3。由图6可知,第1轮放煤结束后,顺序放煤、间隔1架放煤、间隔2架放煤的顶煤放出率依次为30.3%,

32.1%, 32.7%, 顶煤放出率依次增大, 说明间隔2架放煤方式的第1轮放煤效果较好, 最右侧夹矸下的顶煤放出情况导致了这一差异。由图7可知, 第2轮放煤(放矸)结束后, 顺序放煤、间隔1架放煤、间隔2架放煤的顶煤放出率依次为35.1%, 36.1%, 37.0%, 第1层顶煤进一步被放出, 使得顶煤放出率增大; 但由于第1轮放煤结束后间隔1架放煤和间隔2架放煤下夹矸分布较为均匀, 所以此时夹矸的放出量较多。由图8可知, 第3轮(即最后1轮)放煤结束后, 顺序放煤、间隔1架放煤、间隔2架放煤的顶煤放出率依次为74.9%, 69.9%, 73.5%, 含矸率依次为5.6%, 5.9%, 5.6%。间隔1架放煤的顶煤放出率最小, 第2层顶煤出现了明显的间隔聚集分布, 严重影响了顶煤的放出; 第1, 2轮放煤结束后, 顺序放煤的顶煤放出率皆小于其余2种放煤方式, 但此时其顶煤放出率最高, 说明其对第2层顶煤的放出效果较好; 3种放煤方式的含矸率相差不大, 说明支架正上方的夹矸被放出后, 模型两侧剩余的夹矸放出情况相近, 因此放煤方式对中位夹矸的放出情况影响不大。

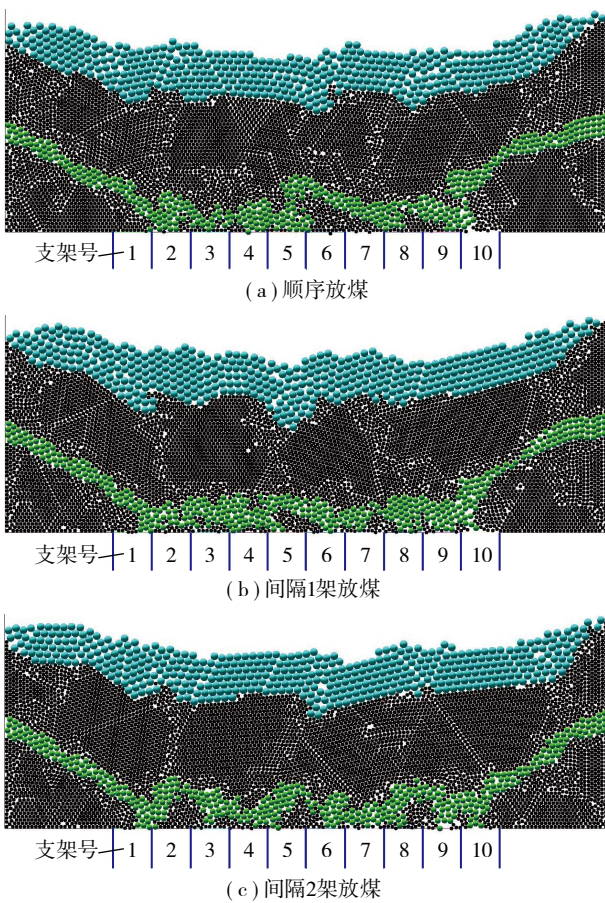


图6 多轮不同放煤方式下第1轮放煤结果
Fig. 6 Results of the first round of coal caving under different multi-round coal caving methods

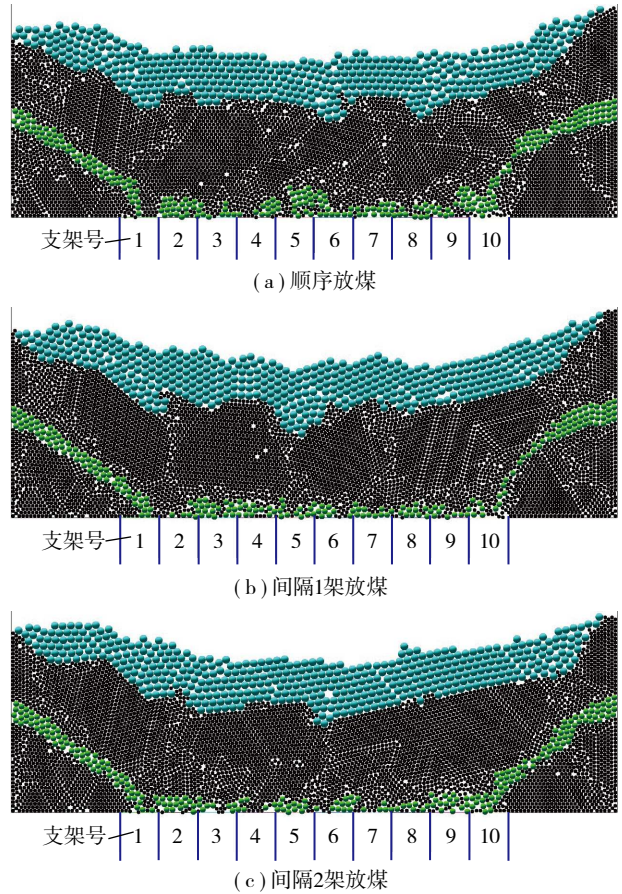


图7 多轮不同放煤方式下第2轮放煤结果
Fig. 7 Results of the second round of coal caving under different multi-round coal caving methods

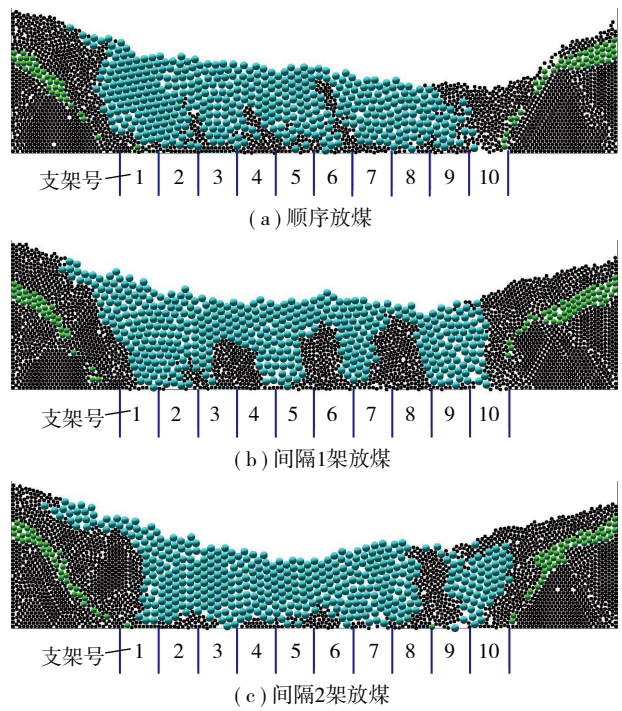


图8 多轮不同放煤方式下第3轮放煤结果
Fig. 8 Results of the third round of coal caving under different multi-round coal caving methods

表3 多轮放煤方式下各轮顶煤放出率及含矸率统计
Table 3 Statistics of top coal recovery rate and gangue content of each round of multi-round coal caving method

放煤状态	指标	顺序	间隔1架	间隔2架
第1轮	顶煤放出率/%	30.3	32.1	32.7
第2轮		35.1	36.1	37.0
第3轮		74.9	69.9	73.5
放煤结束	含矸率/%	5.6	5.9	5.6

综上可知,当顶煤厚度 >5 m时,在多轮放煤方式下,由于多轮顺序放煤的顶煤放出率最大,且各方法含矸率相差不大,因此建议选择多轮顺序放煤。

4 工作面放煤试验

由于沙坪矿初次采用综放开采,2021年1月6日

开始工作面采煤,受上覆局部火区影响,为避免垮落带贯通引发CO气体下泄灾害,初采40 m不放顶煤,初次来压后正常放顶煤生产,放煤期间采用单轮顺序放煤。

2021年2月至5月顶煤厚度均不大于5 m,2月初试验单轮间隔1架放煤至3月底,顶煤放出率提高显著;4月试验单轮间隔2架放煤,顶煤放出率又小幅降低;后持续采用单轮间隔1架放煤。

至2021年12月,顶煤厚度达9.9 m,初期采用了多轮顺序放煤,顶煤放出率为87%;到2022年1月顶煤厚度略有增大,试验了多轮间隔1架放煤,顶煤放出率下降;2月恢复采用多轮顺序放煤,顶煤放出率升高至85%。

现场统计各月探顶、放煤方式和顶煤放出率情况见表4。

表4 工作面生产情况统计
Table 4 Statistics of working face production

项目	2021年						2022年	
	1月	2月	3月	4月	5月	12月	1月	2月
顶煤厚度/m	4.0	3.4	4.8	4.1	3.4	9.9	11.4	12.3
13号煤厚/m	8.0	7.4	8.8	8.1	7.4	13.9	15.4	16.3
放煤方式	单轮顺序		单轮间隔			多轮顺序	多轮间隔	多轮顺序
推进度/m	122.0	126.0	62.0	125.0	105.5	97.2	94.2	77.9
放出煤量/万t	13.7	23.0	9.4	17.8	19.7	31.3	31.9	30.5
探顶煤量/万t	22.4	26.0	10.9	22.4	21.7	36.0	40.3	36.0
顶煤放出率/%	61	89	86	79	91	87	79	85

由表4可知,对比2021年1月和2月的数据,单轮顺序放煤的顶煤放出率明显低于单轮间隔放煤。除去需要考虑初次使用综放工艺时工人熟练度低、初采初放阶段顶煤损失量大的2个主要因素,但在相近的月推进度下,相差28%的顶煤放出率仍可以说明顶煤厚度 ≤ 5 m条件下采用单轮间隔式放煤效果较好,顶煤放出率为80%~90%。对比2021年12月至2022年2月的数据,顶煤厚度 > 5 m时,采用多轮顺序放煤比多轮间隔放煤的顶煤放出率高约7%。

5 结论

(1) 当不同放煤方式间的含矸率差别较小时,应当优选顶煤放出率最高的放煤方式,提高煤炭的资源采出率。顶煤厚度较小时宜采取单轮放煤方式,顶煤厚度较大时宜采取多轮放煤方式。

(2) 建立了2种煤厚的地质模型,得到了煤层分叉条件下最优的放煤方式。当顶煤厚度 ≤ 5 m时,单轮间隔1架放煤的顶煤放出率为63.5%,高于单轮顺序和单轮间隔2架放煤时61.3%、61.2%的顶煤放出率,此时宜采用单轮间隔1架放煤方式;当顶煤厚度 > 5 m时,3种多轮放煤方式含矸率相差较小,顶煤放出率由大到小的顺序为:多轮顺序放煤时74.9%、多轮间隔2架放煤时73.5%、多轮间隔1架放煤时69.9%,最大和最小顶煤放出率相差约5%。

(3) 实测数据表明,单轮间隔1架放煤和多轮顺序放煤的顶煤放出率最好,与数值模拟分析结果一致性较好。顶煤厚度 ≤ 5 m时采用单轮间隔式放煤效果较好,顶煤放出率为80%~90%;顶煤厚度 > 5 m时,采用多轮顺序放煤比多轮间隔放煤的顶煤放出率高约7%。

致 谢

感谢山西晋神沙坪煤业有限公司生产技术科彭洋洋、史育龙和辛毅工程师在现场实测中给予的大力支持;感谢技术员郭健伟在放煤试验中的付出;感谢北京极道成然科技有限公司 2021 年对 GDEM 软件的公益推广和培训活动。

参考文献(References):

- [1] 宋选民,朱德福,王仲伦,等. 我国煤矿综放开采40年:理论与技术装备研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3):1-29.
SONG Xuanmin, ZHU Defu, WANG Zhonglun, et al. Advances on longwall fully-mechanized top-coal caving mining technology in China during past 40 years: Theory, equipment and approach[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (3): 1-29.
- [2] WANG Jiachen, YANG Shengli, WEI Weijie, et al. Drawing mechanisms for top coal in longwall top coal caving (LTCC): A review of two decades of literature[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2021, 8(6): 1171-1196.
- [3] 康红普,徐刚,王彪谋,等. 我国煤炭开采与岩层控制技术40a及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(1):013501.
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1):013501.
- [4] 庞义辉,王国法. 坚硬特厚煤层顶煤冒放结构及提高采出率技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4):817-824.
PANG Yihui, WANG Guofa. Top-coal caving structure and technology for increasing recovery rate at extra-thick hard coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 817-824.
- [5] 康天合,柴肇云,李义宝,等. 底层大采高综放全厚开采20 m特厚中硬煤层的物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1065-1072.
KANG Tianhe, CHAI Zhaoyun, LI Yibao, et al. Study on physical simulation of full-seam mining for a 20 m very thick and medium hard seam by sub-level caving mining with high bottom cutting height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1065-1072.
- [6] LIU Chuang, LI Huamin. Numerical simulation of realistic top coal caving intervals under different top coal thicknesses in longwall top coal caving working face[J/OL]. Scientific Reports, 2021, 11: 13254. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92624-y>, 2021-06-24.
- [7] 翟景辉,任帅,王方田,等. 综放开采矿压显现与瓦斯运移响应规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1):013013.
ZHAI Jinghui, REN Shuai, WANG Fangtian, et al. Response of ground pressure behavior and gas migration in fully mechanized top coal caving mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(1):013013.
- [8] BAI Qingsheng, TU Shihao. A general review on longwall mining-induced fractures in near-face regions[J]. Geofluids, 2019, 2019: 1-22.
- [9] 余学义,王昭舜,杨云,等. 大采深综放开采覆岩移动规律离散元数值模拟研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(1):013533.
YU Xueyi, WANG Zhaoshun, YANG Yun, et al. Numerical study on the movement rule of overburden in fully mechanized caving mining with thick depth and high mining height[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1):013533.
- [10] 郭焘,张坤铭. 浅埋双向倾斜工作面综放开采矿压显现规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3):53-60.
GUO Tao, ZHANG Kunming. Study on ground pressure behavior law of fully-mechanized top-coal caving mining in shallow buried two-way inclined working face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 53-60.
- [11] 史久林. 不同覆岩条件特厚煤层综放开采放煤规律研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院, 2021.
- [12] 白庆升. 复杂结构特厚煤层综放面围岩采动影响机理与控制[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.
- [13] 霍昱名. 厚煤层综放开采顶煤破碎机理及智能化放煤控制研究[D]. 太原:太原理工大学, 2021.
- [14] 张锦旺,王家臣,魏炜杰. 工作面倾角对综放开采散体顶煤放出规律的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 805-814.
ZHANG Jinwang, WANG Jiachen, WEI Weijie. Effect of face dip angle on the drawing mechanism in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 805-814.
- [15] 刘长友,张宁波,郭凤岐,等. 特厚煤层综放煤-矸-岩放落流动的时序规律及识别方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 137-151.
LIU Changyou, ZHANG Ningbo, GUO Fengqi, et al. Sequential rules and identification method of coal-gangue-rock caving flow in fully mechanized top-coal-caving workface of extra thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 137-151.
- [16] LIANG Minfu, HU Chengjun, RUI Yu, et al. Optimization of the process parameters of fully mechanized top-coal caving in thick-seam coal using BP neural networks[J/OL]. Sustainability, 2022, 14(3): 1340. <https://doi.org/10.3390/su14031340>, 2022-01-25.
- [17] 康红普. 煤炭开采与岩层控制的空间尺度分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(2): 023538.
KANG Hongpu. Spatial scale analysis on coal mining and strata control technologies[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(2): 023538.
- [18] 杨秀宇,刘帅,刘清,等. 智能化综放工作面顶煤厚度探测方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(6): 79-83.
YANG Xiuyu, LIU Shuai, LIU Qing, et al. Top coal thickness detection method for intelligent fully-mechanized working face[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(6): 79-83.
- [19] 极道成然. GDEM力学分析系列软件之GDEM-PDyna[EB/OL]. <http://www.gdem-tech.com/product.html>, 2022-08-29.