

酸刺沟煤矿综放工作面放煤工艺优化研究^{*}

刘俊余¹, 杜永威², 于斌¹, 王亮², 刘文娟²

(1.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2.内蒙古伊泰京粤酸刺沟煤矿有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯市 010399)

摘要:为优化酸刺沟煤矿特厚煤层综放工作面放煤工艺,提高工作面放顶煤采出率,降低混矸率,以酸刺沟煤矿 6_上108 工作面为研究背景,运用 PFC2D 颗粒流软件建立工作面放煤的数值模型,对 5 种不同的放煤工艺进行了模拟分析,并进行了现场试验。研究表明,当煤层厚度大于 20 m 时,群组多轮放煤工艺的放煤效果最好;当煤层厚度小于 20 m 时,采用双轮间隔放煤工艺最为合理。

关键词:特厚煤层;放煤工艺;采出率

中图分类号:TD823.49 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)04-0019-06

0 引言

由于综放开采技术的适用性强、成本低、效率高,我国从 20 世纪 80 年代初就开始进行综合机械化放顶煤开采技术的试验研究,并且在厚、特厚煤层的开采中,这一技术得到了广泛应用。王家臣、谢和平等^[1-2]通过对放顶煤散体介质流的分析,认为这种采煤方法非常适合开采厚及特厚煤层,其主要特点是在保证低成本、安全可靠的条件下,可获得较高的产量及效益。然而,在综合机械化放顶煤过程中,顶煤的损失占总损失的 65% 以上,成为降低煤炭采出率的主要因素^[3-4]。这主要是由于在放煤过程中充满不确定性因素^[5],在不同的煤层赋存条件下,顶煤运移及放出规律表现出不同的特点^[6],导致综放开采理论在现场生产中难以得到有效应用。李明忠、张奇亮、王金华等^[7-9]提出,综放工作面生产的关键环节在于放煤,可以提高工作面放煤效率,提高顶煤采出率,从而对放煤工艺进行优化。本文以内蒙古酸刺沟煤矿的煤层赋存条件和工作面特点为背景,以酸刺沟煤矿 6_上108 工作面为研究对象,采用

数值模拟和现场监测相结合的方式,对顺序放煤、间隔放煤、双轮顺序放煤、双轮间隔放煤、群组多轮放煤 5 种不同的放煤工艺进行优化研究。

1 酸刺沟煤矿 6_上工作面概况

酸刺沟煤矿 6_上煤层是该矿主要可采煤层之一,位于石炭系上统太原组第二岩段上部,煤层埋藏深度为 122.10~629.19 m,平均为 364.02 m,煤层平均厚度为 11.61 m,最厚处超过 20 m,平均倾角为 4°,煤层结构简单,含 0~12 层夹矸,夹矸岩性多为泥岩、炭质泥岩,煤层顶板多为粗粒砂岩和细粒砂岩,局部为泥岩;底板为泥岩和砂质黏土岩。6_上108 工作面位于井田东北部一盘区北翼:即矿井一盘区北翼三条大巷及哈尔乌素煤矿铁路煤柱以北至井田北部边界。6_上108 工作面布置如图 1 所示。工作面长为 244.6 m,煤层厚度为 6.92~30.02 m,平均厚度为 15.10 m。煤层中含夹矸 2~6 层,平均 4 层,厚度为 1.78 m。设计采煤高度为 3.8 m,最大放煤高度为 24.2 m,采放比为 1:6.36。

在 6_上108 工作面现场生产的放煤过程中,大量矸石容易混入煤流,存在顶煤采出率偏低且矸石含量较高的问题。针对此问题,研究对比了 5 种放煤方式,从而对 6_上108 工作面放煤工艺进行优化。

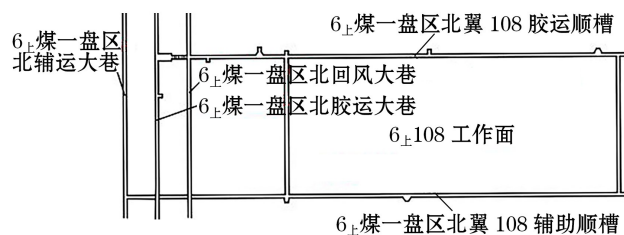


图 1 6_上108 工作面布置

Fig.1 6_{upper} 108 working face layout

^{*} 收稿日期:2023-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52204127);重庆市科学家包干制项目(CSTC2022YCJH-BGZXMM0005)。

作者简介:刘俊余(1999—),男,内蒙古赤峰人,硕士,从事矿山压力与岩层控制方面的研究,E-mail:1098397557@qq.com。

通信作者:于斌(1962—),男,黑龙江海伦人,教授,高级工程师,从事与矿山岩层控制方面的研究,E-mail:yubin0352@163.com。

2 特厚煤层综放工作面放煤数值模拟

根据酸刺沟煤矿 6_上 煤层厚度分布规律,采用 PFC2D 软件建立煤层厚度为 30 m、20 m、10 m 3 种数值模拟模型,分别模拟顺序放煤、间隔放煤、双轮顺序放煤、双轮间隔放煤以及群组多轮放煤,分析 5 种放煤工艺的煤流形态,并对比分析采出率及混矸率^[10-11]。考虑到边界效应的影响,模型的两端分别保留 20 m 的顶煤,设置长度为 120 m 的煤层模型进行放煤作业,煤层厚度 20 m 模型如图 2 所示,总长 160 m,模型的组成主要包括煤层、夹矸层、砂岩层、泥岩层等,根据现场地质条件,设定煤岩体物理力学参数,见表 1。

模型底部及两侧均有助于支撑和固定模型颗粒的墙体,在模型顶部施加 2.4 MPa 的载荷,用于模拟岩层上方的压力。在模型开始放煤时,通过将底部墙体进行移除,从而形成放煤口,模拟工作面放煤,同时对支架尾梁墙体进行加载,放煤结束后自动移动一个放煤步距,完成一次放煤过程,然后进入下一个循环,进行下一次放煤。根据煤层开采条件,设置 3.8 m 的采煤高度,采用一采一放的放煤步距为 0.8 m,在工作面 15 m 的长度上对 5 种放煤方式进行模拟分析,统计顶煤的放出率^[12]。

表 1 煤岩层物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of coal rock 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/ (°)
岩石	2.56	2.85	0.12	0	0	25.80
顶煤	1.44	2.50	0.24	0	0	22.50

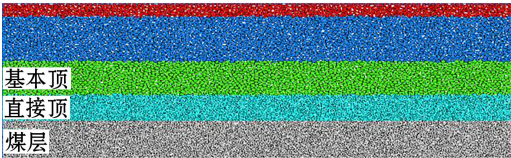


图 2 厚度 20 m 煤层初始模型

Fig.2 Initial model of 20 m thick coal seam

3 特厚煤层放顶煤模拟结果分析

3.1 顺序放煤法

3.1.1 放煤方法

将液压支架顺序布置,按顺序依次打开放煤口进行放煤,当有矸石流出时,立即关闭放煤口。

3.1.2 放煤效果分析

在 3 种煤层厚度的数值模拟中选取煤层厚度为

20 m 的单轮顺序放煤模拟进行分析,如图 3 所示。进行单轮顺序放煤时,在相邻放煤口处,顶煤相互作用的区域较大,相邻支架的顶煤容易流向相邻放煤口,形成左低右高的长条畸形顶煤区域,残留在架间不可放出的顶煤较多^[13]。根据实际工程状况,当工人看到矸石即关闭放煤口,必然丢失较多顶煤,如继续放煤,则含矸量大幅度增加,尤其是当煤层厚度较大或煤层较软且顶板为随采随冒不稳定时,这种现象尤为突出。对该工艺的顶煤放出率进行统计,煤层厚度为 30 m、20 m、10 m 时顶煤采出率分别为 81.3%、83.53%、84.25%,混矸率分别为 14.65%、12.47%、12.36%,平均支架放煤时间分别为 184.2 s、122.6 s、61.3 s。

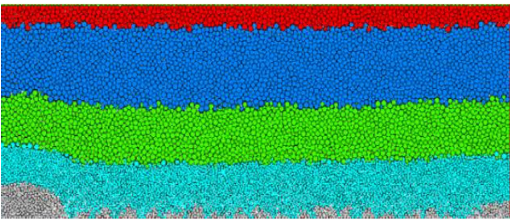


图 3 顺序放煤数值模拟

Fig.3 Numerical simulation of sequential coal caving

3.2 间隔放煤法

3.2.1 放煤方法

将液压支架顺序布置,依次打开奇数支架放煤口,见矸石后关闭放煤口,留一定的脊煤在间隔处,再打开偶数支架,依次将脊煤放出。

3.2.2 放煤效果分析

在 3 种煤层厚度的数值模拟中选取煤层厚度为 10 m 的单轮间隔放煤模拟进行分析,如图 4 所示。采用间隔放煤法时,放煤时单号支架放下的煤比双号支架放下的煤多,且单号支架和双号支架间的煤流系统中混入大量矸石。在放煤时,如果煤完全放下,煤流中会混入大量矸石,从而降低精煤产率;如果严格执行“见矸封窗的原则”,就会遗弃大量顶煤,严重降低煤炭采出率。对该工艺的顶煤放出率进行统计,煤层厚度为 30 m、20 m、10 m 时顶煤采出率分别为 77.35%、79.54%、80.87%,混矸率分别为 14.43%、15.78%、15.45%,平均支架放煤时间分别为 204.2 s、135.2 s、68.1 s。

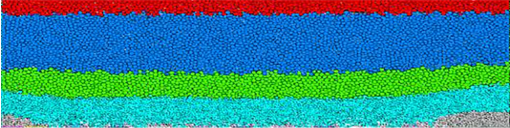


图 4 间隔放煤数值模拟

Fig.4 Numerical simulation of interval coal caving

3.3 双轮顺序放煤

3.3.1 放煤方法

分两轮放煤,第一轮按顺序进行放煤,一次放出支架上方顶煤量的一半,再按顺序进行第二轮放煤,直到见矸石后停止。

3.3.2 放煤效果分析

在 3 种煤层厚度的数值模拟中选取煤层厚度为 10 m 的双轮顺序放煤模拟进行分析,如图 5 所示。采用双轮顺序放煤时,在放煤口边界上的煤岩形成的拱形不会受到破坏,煤岩颗粒的流动不足,由于顶板矸石随着顶煤迅速落入放煤口中,造成相邻支架处的脊背煤无法有效放出,顶煤的放出率较低,对双轮顺序放煤顶煤放出量进行统计,煤层厚度为 30 m、20 m、10 m 时顶煤采出率分别为 82.95%、83.82%、84.65%,混矸率分别为 14.43%、15.46%、14.84%,平均支架放煤时间分别为 201.1 s、134.1 s、67.2 s。

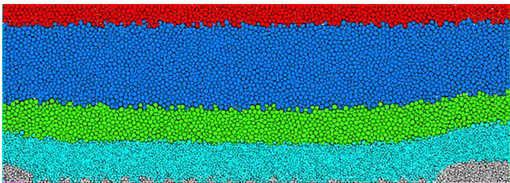


图 5 双轮顺序放煤数值模拟

Fig.5 Numerical simulation of two-wheel sequential coal caving

3.4 双轮间隔放煤

3.4.1 放煤方法

分两轮放煤,第一轮放奇数支架的顶煤,按顺序放出顶煤量的一半,再放残留在偶数支架的脊煤,重复一轮放煤,见矸石后停止。

3.4.2 放煤效果分析

在 3 种煤层厚度的数值模拟中选取煤层厚度为 20 m 的双轮顺序放煤模拟进行分析,如图 6 所示。在采用双轮间隔放煤时,煤矸界面的下降比较平稳,不会产生煤拱现象,顶板的矸石在首轮放煤作业没有落入放煤口中,第二轮放煤作业时,顶煤的放出率较高,但同时由于煤量的减少,混矸量有一定的增加,且尾部支架上方的顶煤放出率较低。对该工艺的顶煤放出率进行统计,煤层厚度为 30 m、20 m、10 m 时顶煤采出率分别为 84.56%、86.32%、87.52%,混矸率分别为 11.32%、12.35%、13.34%,平均支架放煤时间分别为 245.3 s、167.5 s、87.3 s。

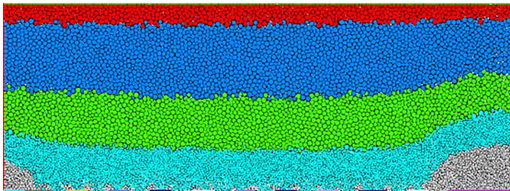


图 6 双轮间隔放煤数值模拟

Fig.6 Numerical simulation of two-round interval coal caving

3.5 群组多轮放煤

3.5.1 放煤方法

分两轮放煤,将液压支架分组,两个为一组,第一轮进行顺序放煤,一次放出支架上方顶煤量的一半,再按顺序进行下一轮放煤,见矸石后停止放煤。

3.5.2 放煤效果分析

在 3 种煤层厚度的数值模拟中选取煤层厚度为 30 m 的群组多轮放煤模拟进行分析,如图 7 所示。这种方式的放煤作业操作简单,放煤所需的时间较短,放煤过程中,放煤口周边的煤岩颗粒能够迅速放出,但矸石冒落较快,容易混入顶煤,从而导致含矸量增加,且尾部支架上方的顶煤难以放出。当煤层厚度较大时,采出率也随之增加。对该工艺的顶煤放出率进行统计,煤层厚度为 30 m、20 m、10 m 时顶煤采出率分别为 90.44%、88.82%、86.46%,混矸率分别为 12.22%、13.39%、13.55%,平均每组支架放煤时间分别为 160.2 s、89.51 s、56.2 s。

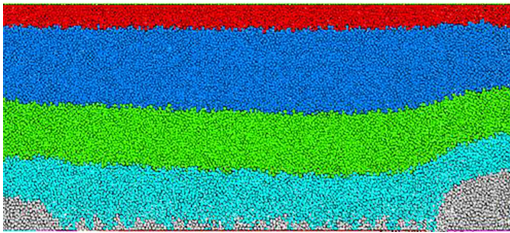


图 7 群组多轮放煤数值模拟

Fig.7 Numerical simulation of group multi-round coal caving

4 顶煤模拟结果分析

根据模拟结果,对顶煤采出率及混矸率进行统计分析,得到 5 种放煤方法的平均顶煤采出率和平均混矸率,如图 8 和 9 所示。在设定采高为 3.8 m,采用一采一放的放煤步距为 0.8 m 的开采工况下,间隔放煤法的采出率最低且混矸率最高,将间隔放煤法优先排除。为了进一步验证模拟结果,确定不同煤层厚度下对应的最优放煤工艺,分别采用顺序放煤法、双轮顺序放煤法、双轮间隔放煤和群组多轮

放煤法在酸刺沟煤矿 6_上108 工作面各进行一周的试验,并统计 4 种放煤方式的精煤产率^[14-17]。现场实施过程如下。

(1) 顺序放煤法。安排 3 名编号为 1, 2, 3 号的放煤工,分别负责 1~60 号架、61~100 号架、101 号尾架的放煤工作,按顺序依次将支架上面的顶煤全部放完。

(2) 双轮顺序放煤法。安排 4 名编号为 1, 2, 3, 4 号的放煤工,分别负责 1~30 号架、31~70 号架、71~100 号架、101 号尾架的放煤工作,按顺序依次将每个放煤口一半顶煤全部放完,再按照顺序进行第二轮放顶煤,直到见矸石后停止放煤。

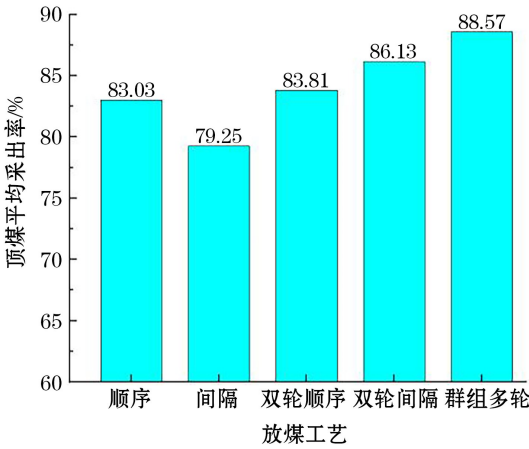


图 8 5 种放煤工艺的顶煤平均采出率

Fig.8 The average recovery rate of top coal in 5 kinds of coal caving processes

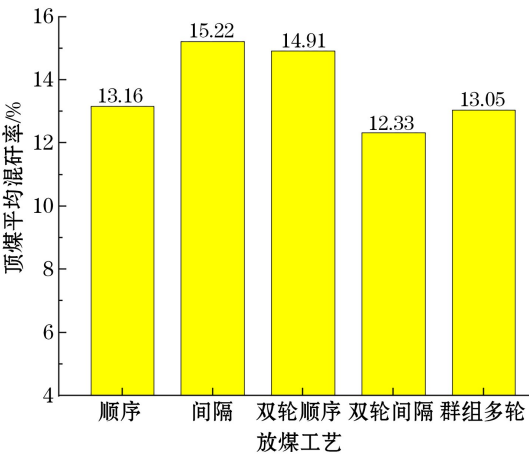


图 9 5 种放煤工艺的顶煤平均混矸率

Fig.9 The average mixed gangue rate of top coal in 5 kinds of coal caving processes

(3) 双轮间隔放煤法。安排 4 名编号 1, 2, 3, 4 号的放煤工,分别负责 1~30 号架、31~70 号架、71~100 号架、101 号尾架的放煤工作,首先采用间隔放煤法的放煤顺序,但只放出一半的顶煤,然后重复间隔放煤法,直到将全部顶煤放出。

(4) 群组多轮放煤。将支架两两划分为一组,安排 6 名放煤工,两两一组,分别负责 1~60 号架、61~100 号架、101 号尾架,按组号依次进行放煤,一次放出支架上方顶煤的一半,再进行下一轮放煤,见矸石后停止。

各放煤方法的精煤产率见表 2,现场试验结果表明,在顺序放煤法的放煤过程中,相邻放煤漏斗互相影响较大^[17],残留在支架之间不可放出的顶煤较多;双轮顺序放煤在第二轮放煤时,大量矸石会流入煤流中,导致精煤产率降低;双轮间隔放煤的精煤产率较前两种放煤工艺有明显提高,但放顶煤时间与采煤机割煤时间不匹配,出现了停机等待的现象,不利于工作面生产的连续进行;群组多轮放煤工艺的精煤产率最高,且在保证高采出率的同时保证了放煤时间与采煤机割煤时间的一致性。

根据模拟结果及现场试验结果可知,顶煤厚度越大,放煤时间越长,因此,需要简化放煤工艺,加快放煤速度,这样才能在整体上保证放煤速度与采煤机割煤速度相匹配。当煤层厚度大于 20 m 时,最合理的放煤工艺是群组多轮放煤,在保证高采出率的同时,保证工作面连续生产。当煤层厚度小于 20 m 时,为保证较低的混矸率,同时保证放煤与割煤所需时间的一致性,采用双轮间隔放煤法最为合理。

表 2 各放煤方法的精煤产率

Table 2 The clean coal yield of each coal caving method			
放煤方法	毛煤入洗量/t	折算精煤量/t	精煤产率/%
顺序放煤	323 505	259 451	80.20
双轮顺序放煤	332 514	273 659	82.30
双轮间隔放煤	343 621	297 915	86.70
群组多轮放煤	358 572	317 336	88.50

5 结论

(1) 以酸刺沟煤矿 6_上108 综放工作面为研究对象,建立了 5 种放煤方法的数值模拟模型,分别模拟了顺序放煤、间隔放煤、双轮顺序放煤、双轮间隔放煤和群组多轮放煤 5 种放煤过程。模拟结果表明,群组多轮放煤可以实现顶煤的最大程度回采,减少顶煤遗漏,提高顶煤采出率,降低混矸率。

(2) 现场试验结果表明,每进行一次放煤工艺的优化,精煤产率都会提高 2% 左右,优化效果明显。

(3) 综合分析数值模拟和现场试验可知,以煤

层厚度 20 m 为分界线,当煤层厚度大于 20 m 时,采用群组多轮放煤法可缩短整个作业循环时间;当煤层厚度小于 20 m 时,采用双轮间隔放煤法可以保证放煤与割煤所需时间的一致性并有较高的顶煤采出率。

参考文献(References):

- [1] 王家臣.我国综放开采 40 年及展望[J].煤炭学报,2023(1): 83-99.
WANG Jiachen. 40 years and prospect of fully-mechanized caving mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023(1):83-99.
- [2] 谢和平,王家臣,陈忠辉,等.坚硬厚煤层综放开采爆破破碎顶煤技术研究[J].煤炭学报,1999(4):351-354.
XIE Heping, WANG Jiachen, CHEN Zhonghui, et al. Study on blasting broken top coal technology in fully-mechanized caving mining of hard thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society,1999(4):351-354.
- [3] 王家臣.我国放顶煤开采的工程实践与理论进展[J].煤炭学报,2018,43(1):43-51.
WANG Jiachen. Engineering practice and theoretical progress of top coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):43-51.
- [4] 王家臣.我国综放开采技术及其深层次发展问题的探讨[J].煤炭科学技术,2005,33(1):14-17.
WANG Jiachen. Discussion on fully-mechanized caving mining technology and its deep development in China[J]. Coal Science and Technology,2005,33(1):14-17.
- [5] 阎少宏,吴健.放顶煤开采顶煤分区的力学方法[J].煤炭科学技术,1995,23(12):33-37.
YAN Shaohong, WU Jian. Mechanics method of top coal partition in top coal caving mining [J]. Coal Science and Technology,1995,23(12):33-37.
- [6] 王家臣,白希军,吴志山,等.坚硬煤体综放开采顶煤破碎块度的研究[J].煤炭学报,2000,25(3):238-242.
WANG Jiachen, BAI Xijun, WU Zhishan, et al. Study on the fragmentation of top coal in fully-mechanized caving mining of hard coal[J]. Journal of China Coal Society,2000, 25(3):238-242.
- [7] 李明忠,刘珂珉,曾明胜,等.大采高放顶煤开采技术及其发展前景[J].煤矿开采,2006,11(5):28-29.
LI Mingzhong, LIU Kemin, ZENG Mingsheng, et al. Large mining height top coal caving mining technology and its development prospect[J].Coal Mining,2006,11(5):28-29.
- [8] 张奇光.提高综放工作面单产关键技术[J].煤,2019(2): 24-25.
ZHANG Qiguang. Key technologies to improve the yield per unit area of fully mechanized caving face[J].Coal,2019(2): 24-25.
- [9] 王金华.我国大采高综采技术与装备的现状与发展趋势[J].煤炭科学技术,2006,34(1):4-7.
WANG Jinhua. Present situation and development trend of fully-mechanized mining technology and equipment with large mining height in China [J]. Coal Science and Technology,2006,34(1):4-7.
- [10] 靳钟铭,张惠轩,宋选民,等.综放采场顶煤变形运动规律研究[J].矿山压力与顶板管理,1992(1):26-31.
JIN Zhongming, ZHANG Huixuan, SONG Xuanmin, et al. Study on the deformation law of top coal in fully mechanized caving face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 1992(1):26-31.
- [11] 富强,陈学华.综放开采松散顶煤落放规律的离散元模拟研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),1999,18(6): 570-573.
FU Qiang, CHEN Xuehua. Discrete element simulation study on caving law of loose top coal in fully-mechanized caving mining[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),1999,18(6):570-573.
- [12] 吴健,张勇.关于长壁放顶煤开采基础理论的研究[J].中国矿业大学学报,1998,27(4):331-335.
WU Jian, ZHANG Yong. Research on basic theory of longwall top coal caving mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology,1998,27(4):331-335.
- [13] 谢耀社,宋晓波,胡艳峰,等.缓倾斜厚煤层综放开采顶煤采出率数值模拟[J].煤炭科学技术,2008,36(6):19-22.
XIE Yaoshe, SONG Xiaobo, HU Yanfeng, et al. Numerical simulation of top coal recovery rate in fully-mechanized caving mining of gently inclined thick coal seam [J]. Coal Science and Technology,2008,36(6):19-22.
- [14] 王家臣,杨建立,刘颢颢,等.顶煤放出散体介质流理论的现场观测研究[J].煤炭学报,2010(3):353-356.
WANG Jiachen, YANG Jianli, LIU Haohao, et al. Field observation and study on the theory of granular medium flow in top-coal drawing[J]. Journal of China Coal Society, 2010(3):353-356.
- [15] 赵伏军,李夕兵,胡柳青.巷道放顶煤法的顶煤破碎机理研究 [J].岩石力学与工程学报,2002,21(增刊 2):2309-2313.
ZHAO Fujun, LI Xibing, HU Liuqing. Study on the top coal crushing mechanism of roadway caving method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002, 21(S2):2309-2313.
- [16] 魏锦平,李胜利,靳钟铭.综放采场顶煤压裂机理的实验研究 [J].岩石力学与工程学报,2002,21(8):1178-1182.
WEI Jinping, LI Shengli, JIN Zhongming. Experimental study on mechanism of top coal fracturing in fully mechanized caving face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(8):1178-1182.
- [17] 祝凌甫,闫少宏.大采高综放开采顶煤运移规律的数值模拟研究[J].煤矿开采,2011,16(1):11-13.
ZHU Lingfu, YAN Shaohong. Numerical simulation of top coal migration law in fully mechanized caving mining with large mining height[J].Coal Mining,2011,16(1):11-13.

Study on Optimization of Coal Caving Process in Fully Mechanized Caving Working Face of Suancigou Coal Mine*LIU Junyu¹, DU Yongwei², YU Bin¹, WANG Liang², LIU Wenjuan²*

(1.State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2.Inner Mongolia Yitaijingyue Suancigou Mining Industry Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010399, China)

Abstract: In order to optimize the coal caving process of the fully mechanized caving working face in the extra-thick coal seam of Suancigou Coal Mine, improve the top coal recovery rate of the working face and reduce the mixed gangue rate, the 6_{upper} 108 working face of Suancigou Coal Mine was taken as the research background. The numerical model of coal caving in working face was established by using PFC2D particle flow software. Five different coal caving processes were simulated and analyzed, and field tests were carried out. The results show that when the thickness of the coal seam is greater than 20 m, the coal caving effect of the group multi-round coal caving process is the best; when the thickness of the coal seam is less than 20 m, the two-round interval coal caving process is the most reasonable.

Key words: Extra-thick coal seam, Coal caving process, Recovery rate