

# 基于 PFC<sup>2D</sup> 对煤柱工作面综放工艺优化分析

高李王

(山西煤炭运销集团锦瑞煤业有限公司, 山西 吕梁 033000)

**摘要:**以王庄煤矿 43M1 煤柱工作面为例,通过采用 PFC<sup>2D</sup> 颗粒元程序对煤柱工作面开采时顶煤放出率进行模拟分析,进而优化综放工艺参数。得出双轮顺序顶煤放出率为 84.6%;单轮顺序顶煤放出率为 82.8%;单轮间隔顶煤放出率为 79.5%,故选用双轮顺序放顶煤。放煤步距为 0.8 m 时,顶煤放出率 85.22%;放煤步距为 1.6 m 时,顶煤放出率 81.31%;放煤步距为 2.4 m 时,顶煤放出率 74.47%,故选用一刀一放的放煤方式。经井下现场数据记录分析后,综放工作面的开采工艺采用单向割煤端部斜切进刀的方式将更利于生产。

**关键词:**综合放顶煤;PFC<sup>2D</sup>;采煤工艺

中图分类号:TD421

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Optimization Analysis of Fully Mechanized Caving Technology on Coal Pillar Working Face Based on PFC<sup>2D</sup>

GAO Liwang

(Jinrui Coal Industry Co., Ltd., Shanxi Coal Transportation and Sales (Group) Co., Ltd., Luliang 033000, China)

**Abstract:** Taking 43M1 coal pillar working face in Wangzhuang Coal Mine as an example, the PFC<sup>2D</sup> particle element program was used to simulate the top-coal recovery rate in the mining so as to optimize the technical parameters of the fully mechanized caving. It was concluded the top coal recovery rate in double-round sequence to be 84.6%, in single-round sequential 82.8%, in single-round interval caving 79.5%, so the double-round sequential top coal caving was selected. When the caving interval was 0.8 m, the top coal recovery rate would be 85.22%; when the caving interval was 1.6 m, the top coal recovery rate would be 81.31%; when the caving interval was 2.4 m, the top coal recovery rate would be 74.47%, so one-knife-one-caving method was selected. On the analysis of the underground field data, the fully mechanized top coal caving face could adopt the one-way coal cutting with oblique cutting, which would be more beneficial to the production.

**Key words:** comprehensive top coal caving; PFC<sup>2D</sup>; coal mining technology

本文以王庄煤矿为例,因其采煤法为长壁综合采煤法,选用在煤层内开掘采区巷道,当工作面开采完成后,在采区内仍残留有大量的护巷煤柱<sup>[1-2]</sup>,造成超过 1 700 万 t 煤炭的损失。残留煤柱地质条件较为稳定,积极回收可用煤柱,可增加矿井收益,减少资源浪费,具有重要意义。43M1 煤柱工作面主

采 3# 煤,平均煤厚 6.8 m,平均煤层倾角为 3°,埋深 218 m~252 m,煤层底板所含矸石较为稳定,43M1 煤柱工作面绝对瓦斯涌出量为 6 m<sup>3</sup>/min,属低瓦斯矿井。由于工作面长度较短,在煤层开采两端头处顶煤回收率较小,本文主要采用离散元数值模拟软件 PFC<sup>2D</sup> 颗粒元程序对开采时顶煤的破碎运移规律

\* 收稿日期:2019-10-04

作者简介:高李王(1984-),男,山西吕梁人,硕士,工程师,从事采煤技术,一通三防、防治水工作。

进行模拟,对综放工艺参数进行优化<sup>[3-4]</sup>。

### 1 数值模拟顶煤的放出率

离散元软件 PFC<sup>2D</sup>主要用来模拟圆形颗粒之间相互作用与颗粒运动,将模拟物体分为数百颗具有代表性的颗粒,利用颗粒之间的介质特性得出模拟物体的力学特性进而解决包含复杂变形方式的真实问题。放顶煤的过程中煤岩体与破碎的顶板已表现出松散介质特性,不能传递煤层覆岩在运移后的压力,但是在自重的作用下向下垮落,故可视为松散块体的流动过程,因此选用离散元软件 PFC<sup>2D</sup>模拟放顶煤破碎垮落规律较为合理<sup>[5-6]</sup>。此软件在放顶煤中主要有两方面的研究:一是对煤层上方岩层的宏观运动形式与矿压显现的分析,二是对微观情况下颗粒体之间的运动模式。

#### 1.1 放煤方式对放出率的影响

为研究不同放煤方式时顶煤放出率的变化,利用 PFC<sup>2D</sup>建立以 43M1 煤柱工作面为模型,在模型中分别设置三种放煤方式(双轮顺序、单轮顺序与单轮间隔),对顶煤放出率模拟结果如图 1 与表 1 所示。

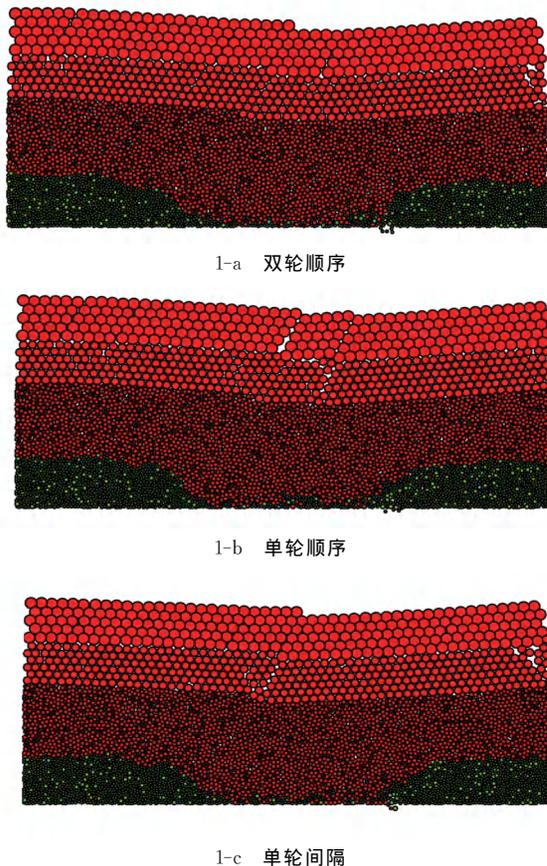


图 1 不同放煤方式顶煤垮落、放出及煤损状况  
Fig. 1 Top coal collapse, caving, and damaging of different coal caving methods

表 1 不同放煤方式顶煤放出率对比表

Table 1 Top coal recovery rate of different coal caving methods

放煤方式	单轮顺序	双轮顺序	单轮间隔
顶煤放出率/%	84.6	82.8	79.5

通过模拟可得:三种放煤方式之中,不同放煤方式会引起不同的顶煤与破碎矸石的运移情况,双轮顺序顶煤放出率比单轮顺序顶煤放出率高出 1.8%,比单轮间隔顶煤放出率高出 5.1%,为三种方式中顶煤放出率最大的,故选用双轮顺序放顶煤。

#### 1.2 放煤步距对放出率的影响

在采煤工作面,放煤步距的不同对顶煤的放出率也具有一定影响。利用 PFC<sup>2D</sup>建立以 43M1 煤柱工作面为模型,在模型中分别设置三种放煤步距(一刀一放、二刀一放和三刀一放),对顶煤放出率模拟结果如图 2 与表 2 所示。

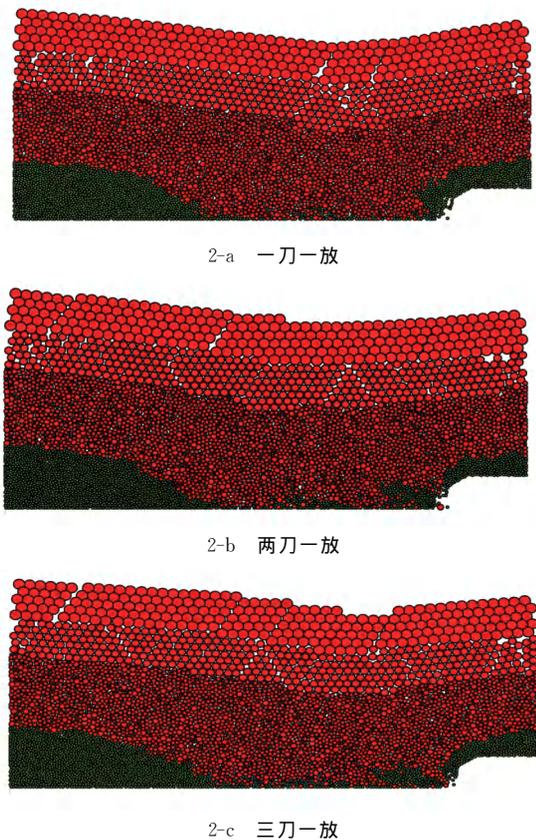


图 2 不同放煤步距顶煤垮落、放出及煤损状况  
Fig. 2 Top coal collapse, caving and damaging at different caving intervals

表 2 不同放煤步距顶煤回收率对比表

Table 2 Top coal recovery rate at different caving intervals

放煤步距/m	0.8	1.6	2.4
顶煤放出率/%	85.22	81.31	74.47

通过模拟可得:

1)如图 2 所示,采用一刀一放时,仅在煤层上方老顶中部出现弯曲下沉,模型顶部岩层下沉趋势较为平滑缓和,破碎煤体在整体破碎岩石中占比较大;

采用两刀一放时,老顶破断情况发育至模型端部,模型顶部出现破断,与之相比三刀一放的破断程度加剧,模型顶部出现台阶式下沉,但是这两种放煤方式均会使煤损增高,含矸率增加。

2)如表 2 所示,设置 0.8 m、1.6 m 与 2.4 m 三种放煤步距,相对于前者的放煤步距,后两者的放煤步距顶煤放出率分别减少 3.91% 与 10.75%,步距显著增大,顶煤放出率却在减小,0.8 m 为合理方放煤步距。

故在 43M1 煤柱综放面条件下,选用 0.8 m 的放煤步距采用一刀一放的放煤方式。

因此,由 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟程序可将顶煤的放出方式选为双轮顺序,将顶煤的放煤步距选为一刀一放的循环工作方式。

## 2 高效回采工艺技术研究

### 2.1 开采工艺参数实测分析

#### 1) 采煤机运行速度

因为在井下煤岩体开挖过程中会面临众多因素限制,采煤机在割煤时始终处于时快时慢时开时停的状态。根据现场实测数据,采煤机的割煤状态较为随机,正太分布可描述采煤机的割煤速度。图 3 为 43M1 工作面采煤机工作时的运行速度直方图,割煤时可采用平均行进速度 5 m/min,可用  $\mu = 5 \text{ m/min}, \delta = 0.92 \text{ m/min}$  描述。

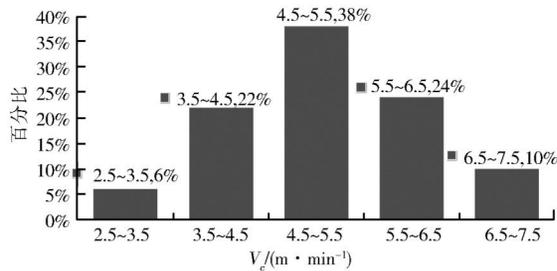


图 3 采煤机运行速度直方图

Fig. 3 Histogram of shearer operation speed

#### 2) 支架移架速度

综合放顶煤的支架移架速度在监测后发现也为随机变量,利用正态分布对其进行分析。图 4 为 43M1 工作面支架移架速度分布图,可用测得均值  $\mu = 5.2 \text{ m/min}, \delta = 0.54 \text{ m/min}$  来描述。

#### 3) 端头等待时间

因综放工作面切眼处测得长度为 71.7 m,采煤机采用两端部斜切进刀的方式在左右两侧进刀,随后待其余工序全部完成后,开始进行工作,这就导致端头等待时间不等,负指数分布可描述其规律。图

5 为采煤机端头等待时间直方图,可用均值  $\lambda = 15.15 \text{ min}$ 。

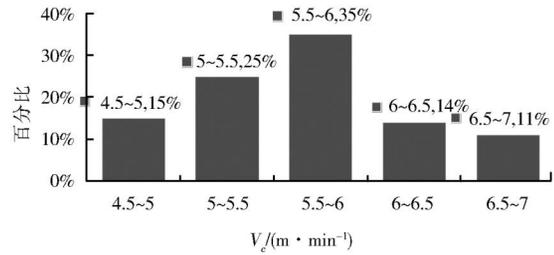


图 4 支架移架速度分布图

Fig. 4 Speed distribution of support moving

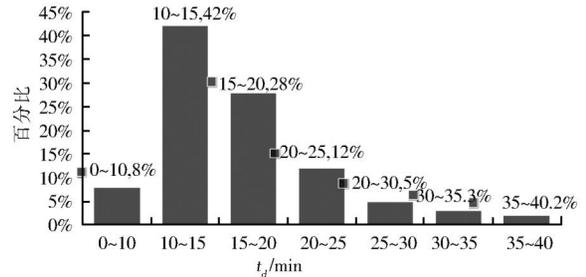


图 5 采煤机端头等待时间直方图

Fig. 5 Histogram of end waiting time of shearers

#### 4) 放煤时间

煤层的厚度、硬度、结构、放煤作业的方式及其他人为因素都可对放煤时间产生干扰。可采用正态分布对放煤时间进行描述。图 6 为单架放煤作业时间分布直方图,可用  $\mu = 0.5 \text{ min}, \delta = 0.31 \text{ min}$  表示。

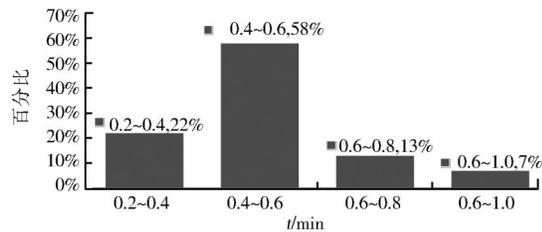


图 6 支架放煤作业时间分布直方图

Fig. 6 Time distribution of support caving operation

#### 5) 刮板输送机推移速度

在对刮板输送机的推移速度采用从正态分布描述后,测得工作面前部刮板输送机的推移速度为  $\mu_{前} = 7.01 \text{ m/min}, \delta_{前} = 0.79 \text{ m/min}$  表示;后部刮板输送机的推移速度可用  $\mu_{后} = 6.48 \text{ m/min}, \delta_{后} = 0.64 \text{ m/min}$  表示。

6) 工作面开机率  $K$  平均  $\mu = 0.82, \delta = 3.5$ , 图 7 为工作面主要故障分布直方图。

根据以上实测数据可得出,在满足 5 540 t 为工作面日产要求的前提下,所使用的各个器械可在平均参数内正常稳定运行,但割煤速度和放煤速度的

方差值较大,其相互作用影响后会导致刮板输送机及转载机的过载运行。在工作面日产量增加后,各工序之间也应调整,保证正常生产,增加平均值。

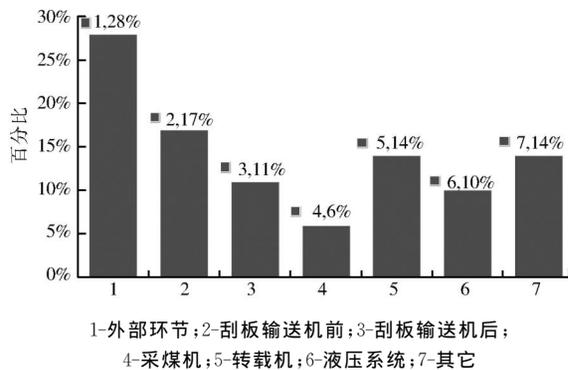


Fig. 7 Distribution of major failures on the working face

## 2.2 采煤机割煤工艺方式优化

采煤机的运行速度会直接影响工作面的日产量,端头等待时间过长也会影响工作面的采煤效率,所以这两个因素对采煤机割煤方式有很大影响。双向割煤优点是可以减少工作面的一个空行割煤时间,提高效率;单向割煤优点为端头等待时间短,利于工作面装煤、移架。相对于单向割煤,双向割煤在工作面长度增加后,更具优势。

图8是根据43M1煤柱综放工作面不同割煤方式下其应速度的关系循环变化曲线。图像表明,在采煤机采煤速度低于3.9 m/min时,双向采煤方式

采煤效率较高,出煤量较大,反之,在采煤机采煤速度高于3.9 m/min时,双向采煤方式采煤效率略低于单向采煤方式。因43M1煤柱综合放顶煤工作面采煤机所测得的平均割煤速度为4.8 m/min,所以单向割煤端部斜切进刀割煤工艺方式更利于作为工作面的出煤方式。

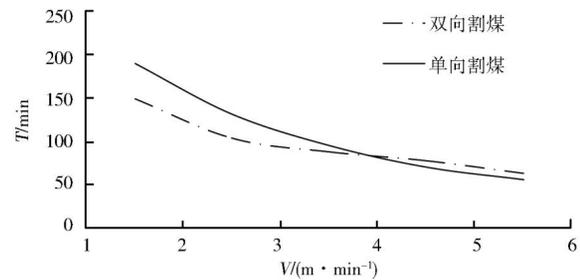


图8 V-T关系曲线

Fig. 8 V-T correlation curves

## 3 结论

1)在使用PFC<sup>2D</sup>数值模拟程序对多种放煤步距与放煤方式的对比分析后,结合多种因素,为使顶煤放出率最大,工作面采用双轮顺序放煤、一刀一放,放煤步距为0.8 m。

2)通过现场实测数据,进一步分析了单向割煤与双向割煤的利弊,43M1综放工作面的开采工艺采用单向割煤端部斜切进刀的方式将更利于出煤。

### 参考文献:

- [1] 崔满堂. 资源枯竭型矿井残留煤柱群安全高效回收技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.
- [2] 王航龙,王鹏,王渊. 回收残留煤柱巷道布置方式与控制技术研究[J]. 中国煤炭,2014,40(6):62-66.  
WANG Hanglong, WANG Peng, LUO Yuan. Research on Layout and Control Technology of Roadway for Recovering Residual Coal Pillar[J]. China Coal, 2014, 40(6): 62-66.
- [3] 陈鹏宇. PFC~(2D)模拟裂隙岩石裂纹扩展特征的研究现状[J]. 工程地质学报,2018,26(2):528-539.  
CHEN Pengyu. Research Status of PFC~(2D) Simulation of Crack Propagation Characteristics in Fractured Rock[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 528-539.
- [4] 周健,池永,池毓蔚,等. 颗粒流方法及PFC<sup>2D</sup>程序[J]. 岩土力学,2000(3):271-274.  
ZHOU Jian, CHI Yong, CHI Yuwei, et al. Particle Flow Method and PFC<sup>2D</sup> Program[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000(3): 271-274.
- [5] 胡燊. 基于PFC<sup>2D</sup>的综放工作面放煤步距研究[J]. 中国煤炭,2017,43(3):70-73.  
HU Ju. Research on Coal Caving Step Distance of Fully Mechanized Caving Face Based on PFC<sup>2D</sup>[J]. China Coal, 2017, 43(3): 70-73.
- [6] 刘胜志. 综放工作面开采工艺参数对顶煤冒放性的影响研究[J]. 中国煤炭,2010,36(10):56-57,59.  
LIU Shengzhi. Study on Influence of Mining Process Parameters on Caving Property of Top Coal in Fully Mechanized Caving Face[J]. China Coal, 2010, 36(10): 56-57, 59.

(编辑:薄小玲)