

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0208-06

# 顶煤成拱机理的数值模拟研究

白庆升, 屠世浩, 王沉

(中国矿业大学矿业工程学院, 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 在分析支架后上方顶煤及直接顶破碎、冒落特性和运动准则的基础上, 建立了放顶煤的离散元数值模拟模型。从煤岩块体运动特性和接触力场演化规律2个方面论述了顶煤架后成拱机理: 1) 顶煤成拱的运动学机理为: 在放煤口上方存在一个顶煤运动高速区, 其两侧块体的运动速度较小, 局部顶煤块体在放煤口两侧产生“淤积”, 从而在放煤口上方形成不稳定接触力拱, 造成放煤口附近顶煤运移速度减小, 当更高层位的大块顶煤涌向放煤口时, 容易产生挤压成拱; 2) 顶煤成拱的力学机理为: 散体顶煤的放出过程, 可以看做是接触力拱不断形成和破坏的过程, 当上位接触压力大于成拱块体间由挤压而产生的摩擦阻力时, 接触力拱破坏, 否则, 形成稳定的接触力拱, 堵塞放煤口。现场观测验证了上述理论分析。

**关键词** 放顶煤; 成拱机理; 数值模拟; 现场观测

**中图分类号** TD 324

**文献标志码** A

## Numerical simulation on top-coal arching mechanism

BAI Qingsheng, TU Shihao, WANG Chen

(School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China,  
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** By analyzing the broken, caving characteristics and motion criterion of top coal and immediate roof behind the shield, the discrete element numerical simulation model for top coal was established in this paper. Meanwhile, from the moving characteristics of coal-rock blocks and evolvement rules of contact force, the top-coal arching mechanism behind shield was discussed. The kinematic mechanism of top coal arching is that there exists a high-speed area of top coal above the coal draw-point, and the moving speeds of coal-rock blocks on the two sides of high-speed area are smaller. The top coal silts at both sides of the coal draw-point, and develops unstable contact force arching above the coal draw-point, which can result in moving speed of top coal near the coal draw-point decreasing. When large-scale top coal blocks in the higher level surge up to the coal draw-point, they can be easily squeezed and form an arch in mining process. The mechanics mechanism of top coal arching is that the drawing process of granular top coal can be seen as a formation and destruction process of the contact force arch. When the upper contact pressure is greater than the frictional resistance formed by the arching extrusion blocks, the contact force arch may damage, otherwise the stable contact force arch appears, and the coal draw-point may be jammed. Field measurements have verified the theoretical analysis.

**Key words** top-coal caving; arching mechanism; numerical simulation; field measurement

收稿日期: 2012-12-18

基金项目: 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35); 江苏省研究生培养创新工程项目(CXZZ13\_0948); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012LWB42)

作者简介: 白庆升(1987-), 男, 江苏省徐州市人, 博士研究生, 从事矿山岩石力学和岩层控制方面的研究。

E-mail: bqshcumt2008@126.com

Tel: 13852489517

从 1982 年综采放顶煤技术引入我国, 至今已有 30 多年的历史。在此期间, 我国综放开采技术取得了很大进步, 并逐渐趋于成熟, 成为 6~12 m 厚煤层的主流开采技术, 并较广泛地推广使用<sup>[1-2]</sup>。顶煤回收率的高低是衡量综放开采成败的关键, 因此, 顶煤回收率始终是国内外工程与学术界研究的重点和难点<sup>[3]</sup>。综放面的顶煤损失主要有工艺损失、初末采损失和端头损失, 其中, 工艺损失约占总损失的 67%, 是顶煤损失的主要构成部分<sup>[4]</sup>。放煤口作为顶煤回收的唯一通道, 一旦放煤不畅, 不但影响顶煤的放出率, 而且影响工作面的生产效率。实验室试验和生产实践都表明, 放煤口经常发生堵塞

现象, 使顶煤以间断式和冲击式的状态放出。开采实践中一般采用反复摆动支架尾梁和增加放煤次数的方法提高顶煤放出率, 但是上述增加顶煤放出的措施, 不仅影响了生产的连续性和效率, 而且, 由于对顶煤放出规律难以做到科学预测, 往往凭借放煤作业人员的经验来控制放煤时间和放煤次数, 进一步增加了顶煤的损失和含矸率<sup>[5]</sup>。生产实践、实验室试验和数值模拟证实, 放煤过程中顶煤在支架后方成拱堵塞放煤口的情况普遍存在<sup>[2,6-9]</sup>, 如图 1<sup>[1,7-9]</sup>所示, 是造成顶煤工艺损失的一个主要原因。因此, 对顶煤架后成拱机理的研究是放顶煤开采亟待解决的关键问题之一。

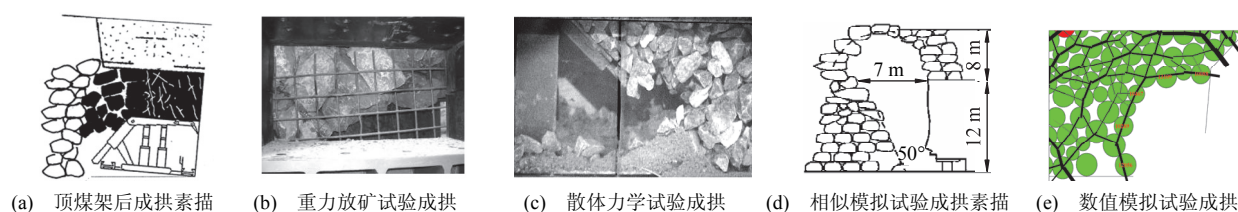


图 1 顶煤架后成拱情况

Fig.1 Arching of top coal behind the shield

针对此问题, 本文运用 PFC<sup>2d</sup> 离散元数值模型, 对散体顶煤的冒落和放出特性进行了数值模拟研究, 通过对其运移规律、运移速度及接触力等参数进行监测分析, 分别从运动学和力学 2 个方面阐述了顶煤的架后成拱机理, 并运用现场观测验证了数值模拟的研究成果。

## 1 数值模型

### 1.1 模型建立

顶煤块体在放出过程中不但受到重力作用、邻近块体突发性和随机性的碰撞、摩擦和滑动影响, 而且还受到支架掩护(尾)梁和后方堆积煤岩体的限制。可见, 散体顶煤在放出过程中的运动是极其复杂的, 进行理论研究十分困难, 所以, 现有理论研究成果与实验和现场情况尚不能很好地吻合。而离散元数值模拟技术可以较全面地考虑散体顶煤的运动及其相互作用, 已广泛应用于顶煤放出特性方面的研究<sup>[3,5,10-12]</sup>。

生产实践表明, 在矿山压力和支架反复卸载-加载作用下, 位于支架上方和后方的顶煤已呈现出松散介质特性, 且沿顶煤厚度方向, 顶煤破碎块度由下到上逐渐增大, 形状由近似球形或椭圆形逐渐变化为长条形<sup>[8]</sup>, 尽管散体顶煤性质、块度等有所

不同, 但为研究方便可简化为球状或由若干个球状颗粒组合成的散体介质。由于在综放采场上覆岩层中形成大小平衡结构, 直接顶以上岩层的重力不再完全传递到散体顶煤上, 故在散体模型中只需在顶煤之上加上直接顶岩层厚度的散体<sup>[13]</sup>。根据以上分析, 建立的模型长 50 m, 高 30 m, 模拟煤层厚度 9.0 m, 其中工作面采高 3.5 m, 顶煤厚 5.5 m, 直接顶厚 21 m。在模型中直接顶分为 5 层, 由下向上逐渐增大直接顶块度, 如图 2 所示。其中在直接顶的 3~5 层运用 FISH 语言将若干个圆形颗粒组合, 模拟上位直接顶规则的长条形垮落。试验过程中共模拟放煤 30 刀, 放煤步距 0.8 m。

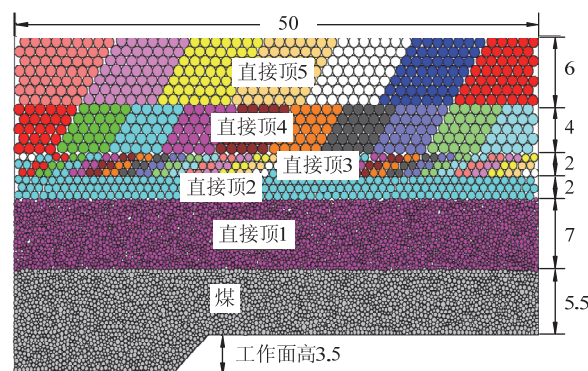


图 2 数值模型图 (m)

Fig.2 Schematic of numerical model

1.2 颗粒运动准则及参数

选择合适的颗粒运动准则是获得正确数值模拟结果的前提, 根据破碎顶煤在放出过程中的受力状态, 选择滑动(Slip Model)准则来定义顶煤运移和放出的特性。该准则采用限制剪切力, 在张拉时无法向强度(拉伸强度为零)的方式来定义颗粒与颗粒或

颗粒与墙体之间的力学关系, 即: 当 2 个接触实体分开(对应于拉伸状态)时, 2 个实体间的法向和切向接触力设为零; 当 2 个接触实体旋转或滑移(对应于滑移状态)时, 2 个实体间的切向接触力为法向接触力和摩擦因数的乘积。煤体和各分层直接顶的物理力学参数见表 1<sup>[3]</sup>。

表 1 物理力学参数  
Table 1 Physical-mechanical parameters

煤岩分层	厚度/m	块度/mm	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	法向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	切向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	摩擦因数	备注
煤层	9	100~250	1400	2×10 <sup>8</sup>	2×10 <sup>8</sup>	0.4	颗粒块度随机分布
直接顶 1	7	100~350	2500	4×10 <sup>8</sup>	4×10 <sup>8</sup>	0.4	颗粒块度随机分布
直接顶 2	2	400	2500	4×10 <sup>8</sup>	4×10 <sup>8</sup>	0.3	颗粒块度统一
直接顶 3	2	400	2500	4×10 <sup>8</sup>	4×10 <sup>8</sup>	0.3	2 个颗粒组成长条形块体
直接顶 4	4	500	2500	4×10 <sup>8</sup>	4×10 <sup>8</sup>	0.3	组合成 5 m 的长条形块体
直接顶 5	6	500	2500	4×10 <sup>8</sup>	4×10 <sup>8</sup>	0.3	组合成 7 m 的长条形块体

2 顶煤架后成拱机理

2.1 煤岩成拱状态

顶煤在放出过程中, 由于处于放煤口附近的煤岩块体相互挤压产生较大的接触力, 造成块体之间的摩擦阻力大于其上方的散体煤岩体对其压力, 从而在放煤口形成后拱脚位于采空区后方垮落的煤

岩体、前拱脚位于支架掩护梁(或尾梁)上的类似拱形桥结构的煤(岩)拱, 称为煤岩的架后成拱, 如图 3。按成拱的方式可分为纯煤成拱(图 3a, b)和煤矸混合成拱(图 3c); 按成拱位置可分为低位(图 3a, b)和高位成拱(图 3c)。图中颗粒之间的黑色线条表示顶煤块体之间的接触力, 线条越粗表明接触力越大。

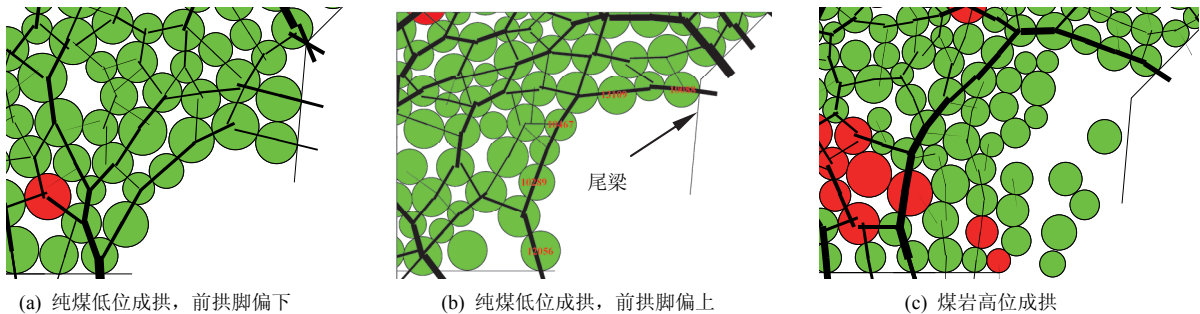


图 3 煤岩成拱形态  
Fig.3 Arching forms of coal and rocks

2.2 煤岩块体运动特性

了解破碎煤岩块体的架后运动特性对理解煤岩架后成拱机理有重要意义。如图 3b 所示, 选取煤岩架后成拱中编号分别为 10088, 13109, 10467, 10289 和 12056 的 5 个散体顶煤块体, 描绘其不同时刻相对于放煤口的位置, 如图 4 所示, 以分析顶煤块体相对于放煤口的运动特性。图 4 中编号 1~9<sup>#</sup>的虚线为同一时刻 5 个不同顶煤颗粒所在位置的连线, 2 条相邻虚线间的运动时间步相同, 都为 10 000 步, 从而可以反映不同时刻不同颗粒的运动速度。由图 4 可知, 各项煤颗粒基本沿最短路径向放

煤口运动, 由于颗粒在运移过程中的相互摩擦、碰撞和旋转, 运移路径有时会发生小的偏差, 如 13109<sup>#</sup>和 10289<sup>#</sup>顶煤颗粒。受支架掩护梁和尾梁的限制, 位于掩护梁上方的顶煤颗粒基本沿掩护梁和尾梁的倾斜方向运动, 如 10088<sup>#</sup>顶煤颗粒。位于放煤口正上方的 2 个顶煤颗粒(13109<sup>#</sup>和 10467<sup>#</sup>)的运动速度最快, 从放煤口正上方向放煤口边缘方向颗粒运移速度逐渐减小, 而位于支架正后方的 12056<sup>#</sup>顶煤颗粒基本为水平运动, 运移速度最小。当顶煤颗粒在放煤口附近形成接触力拱时, 顶煤颗粒下移速度受到限制, 运移速度减小, 如图 4



中 3~5<sup>#</sup>曲线所示, 各颗粒运移速度较 1~3<sup>#</sup>曲线和 5~9<sup>#</sup>曲线大幅度减小, 主因是在 3 133 650~3 153 650 步的运行过程中, 放煤口附近共形成 3 次接触力拱, 如图 5 中 A、C 和 E 所示(支架尾梁法向受力较大反映放煤口附近形成较强的接触力拱, 反之形成的接触力拱较弱, 下同)。而 5~9<sup>#</sup>曲线顶煤颗粒运移速度不断增加, 则是因为在 3 153 650~3 193 650 步的运行过程中放煤口附近形成的接触力拱较弱, 在上位散体煤岩体压力和自身重力作用下, 顶煤颗粒能够较快地向放煤口移动, 如图 5 中 E~F 点曲线所示。图 4 中 8~9<sup>#</sup>曲线间颗粒运移速度有所减小, 主要是因为此过程为颗粒形成稳定接触力拱的过程, 颗粒运移速度逐渐减小到 0。

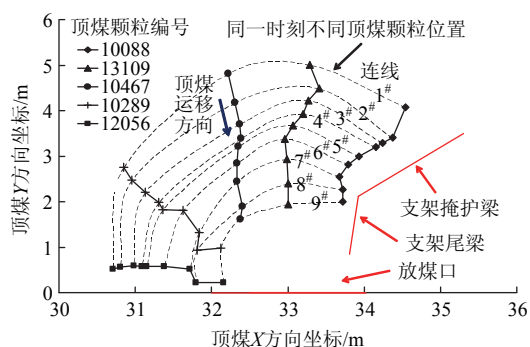


图4 煤岩块体架后运动历程

Fig.4 Motion courses of coal and rocks behind the shield

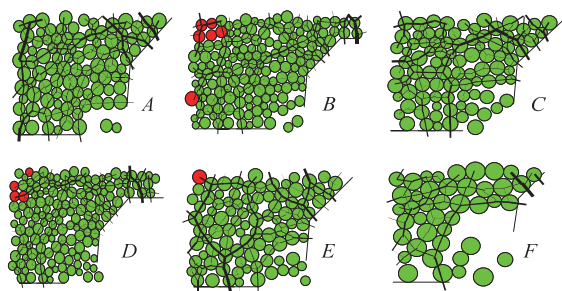
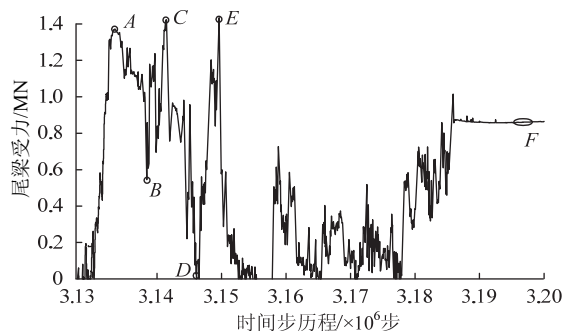


图5 支架尾梁受力及接触力场演化规律

Fig.5 Contact force on tail beam stress and evolution laws

放煤口附近散体顶煤的运移速度及运移方向如图 6 (图中颗粒中心的箭头表示运动方向及速度

的大小), 在放煤口正上方存在一个长轴为放煤口高度 5.3 倍、短轴为放煤口宽度 1.7 倍的近似椭圆形的顶煤运动高速区。受放煤口后方上位煤岩体压力作用, 位于高速区上部的顶煤块体运动方向为前下方; 靠近放煤口, 高速区块体运动方向逐渐变为向下, 这主要是因为越靠近放煤口, 水平方向运动限制越大、竖直方向运动限制越小的缘故。位于高速区内的顶煤块体, 运动速度明显大于其两侧同一高度的顶煤块体, 且向采空区方向速度逐渐减小。

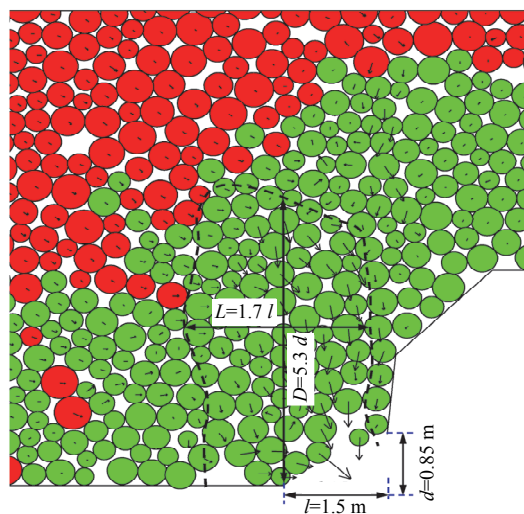


图6 顶煤运移速度及方向分布

Fig.6 Distribution of top-coal velocity and motion direction

由于上位顶煤块体相对较大, 放煤口正上方顶煤放出过程中, 其两侧块体的运动速度较小, 这样就会产生顶煤块体的不均匀下沉, 上位的大块煤体先于两侧同一高度的煤体到达放煤口, 正上方大块顶煤的提前到达, 容易产生挤压摩擦而成拱。

通过以上分析可知, 顶煤成拱的运动学机理为: 在放煤口存在一个顶煤运动高速区, 其两侧块体的运动速度较小, 这样就会产生顶煤块体的不均匀下沉, 造成局部顶煤块体首先在放煤口两侧形成“淤积”, 在放煤口上方形成不稳定接触力拱, 造成放煤口附近顶煤运移速度减小, 当放煤口正上方的大块煤体涌向放煤口时, 容易产生挤压成拱。

### 2.3 煤岩块体接触力场演化规律

由于接触力拱有一个拱脚位于支架尾梁上, 因此可以通过检测尾梁的法向受力来分析放煤口接触力场的演化规律。

放煤口打开后, 随着散体煤岩的不断放出, 放煤口附近煤岩块体之间的接触力场也不断发生变化, 当接触力场较大且相互联系在一起时, 就会形

成前拱脚位于支架尾(掩护)梁、后拱脚为采空区的接触力拱。位于接触力拱以内的顶煤块体间的接触力明显减小,如图 5 中 A, C, E 和 F 所示,顶煤容易放出,且下移(放出)速度较快;而处于接触力拱上方的顶煤块体由于受接触力拱的限制,块体移动速度变慢,甚至不动。更上位散体煤岩对接触力拱产生压力,当此压力大于成拱块体间由相互挤压而产生的摩擦力时,接触力拱破坏并上移,成拱煤岩块体下移、放出,如图 5 中 B 和 D 所示。放煤的过程可以看做是接触力拱的不断形成和不断破坏的过程,如图 5 中 A~E 所示,即煤流呈间歇式、脉冲式放出。当上位接触压力小于成拱块体间由挤压而产生的摩擦阻力时,就会在放煤口形成稳定的接触力拱,且拱上部的大块颗粒进一步相互嵌合,而较小颗粒则充填大块之间的空隙,使块体之间的咬合作用增强,增大了摩擦力,进一步增加了拱的稳定性,如图 5 中 F 所示。稳定的接触力拱限制了其上顶煤的下移和放出,降低了顶煤的放出率。

当在尾梁附近形成接触力拱时,尾梁受力大幅增加,普遍在 1 000 kN 以上,如图 5 中 A, C, E 和 F 点所示;而当接触力拱破坏上移时,尾梁法向受力迅速下降,一般在 500 kN 以下,如 B 和 D 点所示。支架尾梁法向受力的震荡变化,反映了放煤口附近煤岩块体不断接触成拱和破拱的演化过程。当形成稳定的接触力拱时,支架尾梁法向受力不再变化,如图中曲线 F 部分所示,一方面反映了所形成的接触力拱比较稳定,另一方面也说明上位煤岩体不再向放煤口移动,对接触力拱的压力没有增加。

通过以上分析可知,顶煤成拱的力学机理为:散体顶煤在放煤口的放出过程,可以看做是接触力拱的不断形成和不断破坏的过程。当上位接触压力大于成拱块体间由挤压而产生的摩擦阻力时,接触力拱被破坏,散体顶煤连续流动放出,否则形成稳定的接触力拱,堵塞放煤口。

### 3 现场观测研究

现场观测也表明,放煤口后上方顶煤运动速度明显大于其两侧顶煤运动速度,因而破碎的直接顶提前到达放煤口,造成放煤口堵塞或提前结束放煤,如图 7 所示。

在尾梁液压阀上安装压力监测仪,放煤过程中实时记录尾梁千斤顶压力变化曲线如图 8 所示。

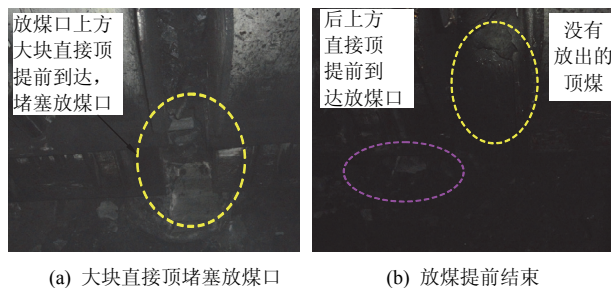


图 7 放煤口正上方顶煤运动速度快,破碎直接顶提前到达

Fig.7 The top coal above the coal draw-point move quickly, and the broken immediate roof arrive early

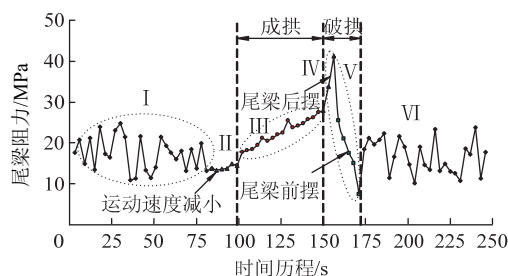


图 8 尾梁阻力随放煤变化曲线

Fig.8 Tail beam resistance curves with top coal caving

与数值模拟结果相同,受放煤过程中散体煤流对尾梁的冲击作用,尾梁千斤顶阻力在 10~20 MPa 之间震荡变化(图 8 中 I 区域),表明顶煤放出速度和其对尾梁的作用力都是在时刻变化着。随着正上方大块顶煤在放煤口淤积,顶煤放出速度变小,对尾梁的冲击作用降低,尾梁受力较小且趋于平稳(图 8 中 II 区域)。此后尾梁阻力呈线性增加(图 8 中 III 区域),顶煤在架后成拱。在支架尾梁之间可以观察到成拱的大块顶煤,如图 9 所示。



图 9 成拱的大块顶煤

Fig.9 The arch with big broken top-coal

采用尾梁摆动的方法破坏顶煤的架后成拱时,尾梁向后摆动,对成拱顶煤产生较大推力,尾梁受力快速增加(图 8 中 IV 区域),破坏了“拱”的稳定性;随着尾梁向前摆,成拱顶煤放出,支架尾梁受力大幅减小(图 8 中 V 区域)。此后顶煤顺利放出,尾梁受力恢复到震荡变化状态(图 8 中 VI 区域)。

## 4 结 论

1) 在分析支架后上方顶煤及直接顶破碎、冒落特性和运动准则的基础上, 建立了离散元数值模拟模型, 并选取了能反映散体顶煤和直接顶运移特性的准则及参数。

2) 在放煤口正上方存在一个顶煤运动高速区, 运动速度大于其两侧同一高度的顶煤块体, 造成上位的大块煤体提前达到放煤口, 造成顶煤放出速度降低, 容易堵塞放煤口。

3) 采用离散元数值模拟方法, 从煤岩块体运动特性和触力场演化规律 2 个方面论述了顶煤架后成拱机理。顶煤成拱的运动学机理为: 放煤口两侧顶煤运动速度小, 容易产生“淤积”, 当大块顶煤到达放煤口时, 产生挤压成拱; 顶煤成拱的力学机理为: 散体顶煤的放出过程可以看做是接触力拱不断形成和破坏的过程, 当煤拱上方的接触压力小于成拱块体间由挤压而产生的摩擦阻力时, 在放煤口形成稳定的接触力拱, 堵塞放煤口。

4) 从现场破碎煤岩放出状态和支架尾梁受力 2 个方面验证了数值模拟结果, 对提高顶煤放出率和支架掩护(尾)梁的结构与强度设计, 均有很重要的理论意义。

## 参考文献:

- [1] 谢和平, 赵旭清. 综放开采顶煤体的连续损伤破坏分析[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(4): 323-327.  
XIE Heping, ZHAO Xuqing. Analysis of continuous damage and failure of top-coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(4): 323-327.
- [2] 谢耀社, 赵阳升. 振动放顶煤技术机理研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 2): 443-446.  
XIE Yaoshe, ZHAO Yangsheng. A study of technique and mechanics of top-coal caving method with vibration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Sup 2): 443-446.
- [3] 张勇, 司艳龙, 石亮. 块度对顶煤放出率影响的数值模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 247-251.  
ZHANG Yong, SI Yanlong, SHI Liang. Numerical simulation of the effect of particle size on coal caving ratio[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 247-251.
- [4] 曹胜根, 郭金刚, 叶永红. 块度对顶煤放出率的影响分析[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(4): 61-63.  
CAO Shenggen, GUO Jingang, YE Yonghong. Analysis on coal size influenced to caving output rate[J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(4): 61-63.
- [5] 魏锦平. 综放面顶煤压裂规律及成拱机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- [6] 石平五. 急斜大段高放顶煤矿压显现及围岩控制[J]. 矿山压力与顶板管理, 1992, 9(4): 43-49.  
SHI Pingwu. Ground behavior and surrounding strata control in steep coal seam extracted by large sublevel height with caving[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1992, 9(4): 43-49.
- [7] 赵阳升, 谢耀社, 郭金刚, 等. 振动放顶煤技术原理与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 187-192.  
ZHAO Yangsheng, XIE Yaoshe, GUO Jingang, et al. Technical principle of top-coal caving with vibration and its practice[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 187-192.
- [8] 刘长友, 黄炳香, 吴锋锋, 等. 综放开采顶煤破断冒放的块度理论及应用[J]. 采矿安全与工程学报, 2006, 23(1): 56-61.  
LIU Changyou, HUANG Bingxiang, WU Fengfeng, et al. Fragment dimension theory and its application in fully mechanized top coal caving[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 56-61.
- [9] 白义如, 白世伟, 靳钟铭, 等. 特厚煤层分层放顶煤相似材料模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 365-369.  
BAI Yiru, BAI Shiwei, JIN Zhongming, et al. Testing study of similar material for layer-divided top coal caving in specially thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 365-369.
- [10] HABIB A, BRETT A P. Stress analysis of longwall top coal caving[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(1): 30-41.
- [11] 张会军, 闫少宏, 毛德兵, 等. 顶煤回收率与直接顶厚度关系的 PFC 数值模拟研究[J]. 煤矿开采, 2009, 14(6): 7-9.  
ZHANG Huijun, YAN Shaohong, MAO Debing, et al. Research on relationship of top-coal recovery ratio and height of immediate roof with PFC numerical simulation [J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(6): 7-9.
- [12] 杨胜利, 刘颢颢, 李杨, 等. 极近距离煤层合层综放技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 371-376.  
YANG Shengli, LIU Haohao, LI Yang, et al. The technology on full mechanized caving with combine-layers in very contiguous seams[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 371-376.
- [13] 黄炳香, 刘长友, 吴锋锋, 等. 极松散细砂岩顶板下放煤工艺散体试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 351-355.  
HUANG Bingxiang, LIU Changyou, WU Fengfeng, et al. Experimental research on drawing top-coal with loose medium-model under dead-unconsolidated sandstone roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(3): 351-355.