

文章编号: 1671-251X(2023)03-0093-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022090062

矸石层形态对掘锚机截割特性影响仿真分析

梁旭¹, 郭佳毫¹, 常毛毛¹, 曲兴家², 张黎²

(1. 陕西小保当矿业有限公司, 陕西 榆林 719000;

2. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 巷道实际掘进过程中掘进工作面除全煤层外还有各种矸石层, 矸石层的存在会影响掘锚机掘进效率。然而目前大多以全煤层工作面为研究背景对滚筒截割特性进行分析, 或考虑的矸石层形态较为单一。针对上述问题, 以 MB670-1 型掘锚机为研究对象, 利用 Pro/E 软件绘制掘锚机三维模型, 将模型导入 RecurDyn 软件并添加相应的运动副, 之后再导入 EDEM 软件, 建立 EDEM-RecurDyn 耦合仿真模型。从滚筒截割性能、滚筒位移和滚筒振动 3 个方面仿真分析了水平矸石层、斜矸石层、半矸石层 3 种矸石层形态对掘锚机截割特性的影响, 结果表明: ① 与全煤层相比, 在矸石层条件下滚筒截割阻力、载荷波动系数、截割比能耗均有所增加, 尤其在斜矸石层条件下增加最明显, 截割阻力均值增大了 35.61%, X 轴(沿掘锚机掘进方向)、 Y 轴(垂直于巷道底板方向)、 Z 轴(与滚筒轴平行方向)载荷波动系数分别增大了 26.79%, 25.39%, 61.28%, 截割比能耗增大了 37.21%。② 矸石层的存在使滚筒位移有所减小, 相比于全煤层, 在水平矸石层、斜矸石层、半矸石层条件下滚筒位移分别缩短了 53, 89, 14 mm。③ 滚筒在截割含矸石层工作面时产生的振动幅度远大于截割全煤层工作面时。④ 矸石层形态对掘锚机截割特性的影响程度为斜矸石层>水平矸石层>半矸石层。

关键词: 掘锚机; 滚筒截割; 矸石层; EDEM-RecurDyn 耦合; 载荷波动系数; 截割比能耗; 滚筒位移; 滚筒振动

中图分类号: TD421

文献标志码: A

Simulation analysis of the influence of gangue layer morphology on the cutting characteristics of the roadheader bolter

LIANG Xu¹, GUO Jiahao¹, CHANG Maomao¹, QU Xingjia², ZHANG Li²

(1. Shaanxi Xiaobaodang Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China;

2. CCTEG Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China)

Abstract: In the actual excavation process of the roadway, besides the coal seam, there are various types of gangue layers on the working face. The existence of these gangue layers will affect the cutting efficiency of the roadheader bolter. However, most current studies analyze the cutting characteristics of the drum with the background of a fully-coal working face or consider a relatively simple morphology of the gangue layer. To solve the above problems, taking the MB670-1 roadheader bolter as the research object, a 3D model of the roadheader bolter is created using Pro/E software. The model is input into RecurDyn software and the corresponding motion pair is added. The model is then input into EDEM software to establish an EDEM-RecurDyn coupling simulation model. The influence of three types of gangue layers, horizontal gangue layers, inclined gangue layers, and semi-gangue layers, on the cutting characteristics of the roadheader bolter is simulated and analyzed from three aspects: drum cutting performance, drum displacement and drum vibration. The results show the following points.

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2023-03-14; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4703605)。

作者简介: 梁旭(1985—), 男, 陕西渭南人, 高级工程师, 硕士, 现主要从事煤矿管理及生产工作, E-mail: liangxucumt@163.com。通

信作者: 郭佳毫(1996—), 男, 河北邢台人, 助理工程师, 现主要从事煤矿现场管理及生产工作, E-mail: 2547427148@qq.com。

引用格式: 梁旭, 郭佳毫, 常毛毛, 等. 矸石层形态对掘锚机截割特性影响仿真分析[J]. 工矿自动化, 2023, 49(3): 93-99.

LIANG Xu, GUO Jiahao, CHANG Maomao, et al. Simulation analysis of the influence of gangue layer morphology on the cutting characteristics of the roadheader bolter[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(3): 93-99.



扫码移动阅读

① Compared with the full coal seam, under the conditions of gangue layers, the drum cutting resistance, load fluctuation coefficient, and cutting specific energy consumption all increase. They increase most significantly under the condition of inclined rock layers. The average cutting resistance increases by 35.61%. The load fluctuation coefficients along the X -axis (along excavation direction of the roadheader bolter), Y -axis (perpendicular to the roadway bottom direction), and Z -axis (parallel to the drum axis direction) increase by 26.79%, 25.39%, and 61.28% respectively. The cutting specific energy consumption increases by 37.21%. ② The existence of gangue layers causes a decrease in the displacement of the drum. Compared with the full-coal seam, the displacement of the drum is reduced by 53, 89, 14 mm in the horizontal gangue layer, inclined gangue layer, and gangue layer respectively. ③ The vibration amplitude generated by the drum when cutting a working face containing gangue is much greater than when cutting a working face containing full-coal seams. ④ The influence of the morphology of the gangue layer on the cutting characteristics of the roadheader bolter is in the order of inclined gangue layer > horizontal gangue layer > semi-gangue layer.

Key words: roadheader bolter; drum cutting; gangue layer; EDEM-RecurDyn coupling; load fluctuation coefficient; cutting specific energy consumption; drum displacement; drum vibration

0 引言

掘锚机作为煤矿主要掘进设备负责掘进、支护等任务^[1-6],而滚筒作为掘锚机的主要截割部件,其性能直接影响掘锚机掘进效率。在实际工作过程中掘锚机所处工作面并非只有全煤层,由于国内各个矿区情况不同,部分工作面还存在不同形态的矸石层,在该工况下对掘锚机的掘进效率会产生一定影响。由于掘锚机发展时间较短,对掘锚机滚筒截割性能方面的仿真分析较少,而采煤机滚筒截割性能方面的研究较多,所以可通过借鉴采煤机滚筒截割相关文献开展掘锚机截割特性仿真研究。张敬东^[7]以采煤机螺旋滚筒为对象建立了数学模型,分析了采煤机螺旋滚筒的机械性能。刘伟^[8]根据煤岩性质,分析了切削厚度、滚筒转速、截齿安装角等因素对滚筒截割性能的影响,确定了适合采煤机工作的参数。张强等^[9-10]分析了不同工况对采煤机截割性能的影响,并分析了转速、截齿安装角、截齿齿尖尖角等对滚筒机械性能的影响程度。毛君等^[11-12]利用 EDEM 软件研究了采煤机截割煤岩的动态过程,对采煤机装煤率、截割阻力及截割比能耗等因素进行分析,为实现采煤机高效截割提供了参考。万理想^[13]利用 EDEM 软件分析了不同厚度矸石层对采煤机螺旋滚筒截割性能的影响,为滚筒在不同夹矸煤层条件下的工作参数选择提供了数据支撑。

上述文献大多是以全煤层工作面为研究背景对滚筒截割特性进行分析,虽有部分文献研究了滚筒在含矸石层工作面下的截割特性,但考虑的矸石层形态较为单一,而实际工况中矸石层形态多样,对滚筒截割特性的影响也不同。本文通过 EDEM 与 RecurDyn 软件耦合,对掘锚机滚筒截割过程进行动

态仿真,分析不同形态矸石层对掘锚机滚筒截割特性的影响。

1 仿真模型建立

1.1 颗粒粘结模型建立

以某矿区 5^{-2} 煤层为研究背景,该煤层为特厚煤层,整体赋存较稳定,且煤层中含有矸石层^[14]。为减少仿真时间,在 EDEM 软件中分别定义半径为 25 mm 的煤颗粒模型和半径为 20 mm 的矸石颗粒模型,如图 1 所示。

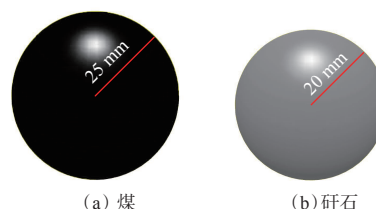


图 1 颗粒模型

Fig. 1 Particle model

根据实际物体特性,设置煤岩材料参数,见表 1,掘锚机各部分材料参数见表 2。由于仿真分析的主

表 1 煤岩材料参数

Table 1 Material parameters of coal and rock

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切模量/Pa
煤	1 420	0.32	1.9×10^8
矸石	2 350	0.10	1.2×10^9

表 2 掘锚机材料参数

Table 2 Material parameters of roadheader bolter

名称	材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切模量/Pa
截齿	42CrMo	7 800	0.3	8.2×10^{10}
筒毂	16Mn	7 800	0.3	8.4×10^{10}
其余部分	合金钢	7 800	0.3	7.0×10^{10}

要部件为滚筒, 所以将掘锚机其余部分材料统一设置为合金钢。

根据煤、矸石和滚筒三者之间的作用情况, 设置接触参数, 见表3。

表3 接触参数

Table 3 Contact parameters

颗粒-颗粒	恢复因数	静摩擦因数	动摩擦因数
煤-煤	0.5	0.6	0.05
煤-矸石	0.5	0.7	0.08
煤-滚筒	0.5	0.4	0.05
矸石-矸石	0.6	0.8	0.10
矸石-滚筒	0.6	0.5	0.07

为便于更好地模拟煤岩及矸石的物理状态, 采用 Hertz-Mindlin Bonding 模型建立颗粒粘结模型, 如图2所示, 颗粒间相互接触并承受一定的切向运动和法向运动^[15-18]。 O_1 、 O_2 分别为颗粒1、颗粒2的圆心; R_1 、 R_2 分别为颗粒1、颗粒2的半径, mm; O_B 为粘结键截面的圆心; l 为粘结键长度, mm; R_B 为颗粒粘结半径, mm; F_n 、 F_t 分别为颗粒间的法向粘结力、切向粘结力, N; T_B 为粘结键力矩, N·m。

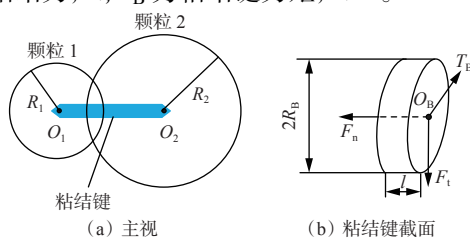


图2 颗粒粘结模型

Fig. 2 Particle bonding model

通过在 EDEM 软件中设置单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、法向应力和切向应力这4种参数, 使颗粒间产生粘结键相互粘结, 当作用力超过粘结强度时, 颗粒粘结键将发生破坏。

法向应力与切向应力最大值应满足以下条件^[19]:

$$\begin{cases} \sigma_{n\max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2T_n}{J}R_B \\ \sigma_{t\max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{T_t}{J}R_B \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \pi R_B^2 \quad (2)$$

$$J = \frac{1}{2} \pi R_B^4 \quad (3)$$

$$R_B = \sqrt{R_1 R_2} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{n\max}$ 、 $\sigma_{t\max}$ 分别为颗粒间的法向应力、切向应力最大值, MPa; A 为单位接触面积, mm²; T_n 、 T_t 分别为颗粒间的法向力矩、切向力矩, N·m; J 为极惯性矩, mm⁴。

颗粒间的粘结力和力矩随时间步变化的数学表达式为^[20]

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n S_n A \delta t \\ \delta F_t = -v_t S_t A \delta t \\ \delta T_n = -\omega_n S_n J \delta t \\ \delta T_t = -\omega_t S_t \frac{J}{2} \delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_n 、 v_t 分别为颗粒间的法向速度、切向速度, m/s; S_n 、 S_t 分别为颗粒间的法向接触刚度、切向接触刚度, N/m; t 为时间, s; ω_n 、 ω_t 分别为颗粒间的法向角速度、切向角速度, rad/s。

将煤与矸石的参数代入式(1)~式(5), 计算出颗粒粘结参数, 见表4。

表4 颗粒粘结参数

Table 4 Particle bonding parameters

颗粒-颗粒	单位面积法向刚度/(N·m ⁻³)	单位面积切向刚度/(N·m ⁻³)	法向应力/Pa	切向应力/Pa
煤-煤	6.0×10 ⁸	1.8×10 ⁹	4.0×10 ⁴	6.0×10 ⁵
煤-矸石	1.0×10 ⁹	2.4×10 ⁹	6.8×10 ⁴	8.0×10 ⁶
矸石-矸石	2.8×10 ⁹	2.7×10 ⁹	1.9×10 ⁵	9.0×10 ⁶

1.2 煤岩模型建立

以 MB670-1 型掘锚机为例, 其工作高度为 2.8~5.0 m, 工作宽度为 5.0~6.2 m^[21]。因此, 在 EDEM 软件中建立 5.5 m×1.5 m×3.0 m(长×宽×高)的箱体作为掘进工作面, 建立 5.5 m×8.0 m×0.3 m(长×宽×高)的箱体作为巷道底板。实际煤层中主要分布水平矸石层、斜矸石层、半矸石层3种形态的矸石层, 为确保仿真的准确性, 使模拟不同矸石层形态的箱体体积保持统一, 具体参数见表5。

表5 不同形态矸石层参数

Table 5 Parameters of different gangue layer

矸石层形态	箱体尺寸/m			箱体体积/m ³	矸石颗粒数量/个
	长	宽	高		
水平矸石层	5.50	1.5	0.3		18 954
斜矸石层	5.50	1.5	0.3	2.475	19 026
半矸石层	2.75	1.5	0.6		19 105

矸石颗粒数量偏差为

$$\eta = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\min}} \quad (6)$$

式中 N_{\max} 、 N_{\min} 分别为最大、最小矸石颗粒数量。

通过式(6)计算出3种矸石层形态下生成的矸石颗粒数量偏差为0.8%, 在误差允许范围内, 可忽略不计。

通过多次静态颗粒填充后生成3种含矸石层工作面模型, 如图3所示。

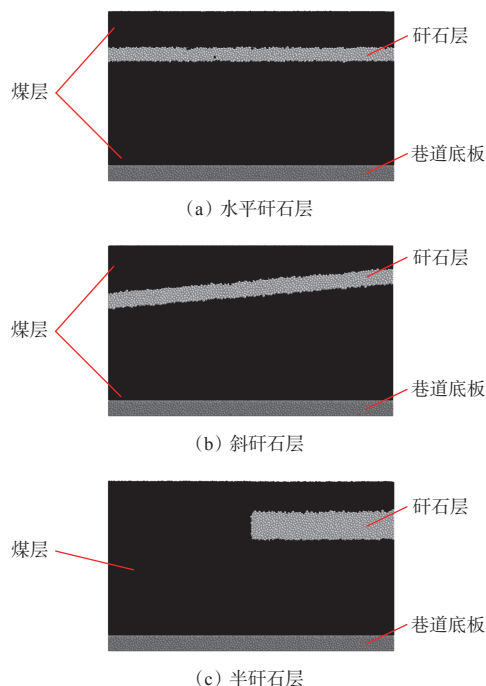


图 3 含矸石层工作面模型

Fig. 3 Working face model of gangue bearing layer

2 EDEM-RecurDyn 耦合仿真模型建立

通过 Pro/E 软件对 MB670-1 型掘锚机进行三维建模, 如图 4 所示。沿掘锚机掘进方向为 X 轴, 垂直于巷道底板方向为 Y 轴, 与滚筒轴平行方向为 Z 轴。

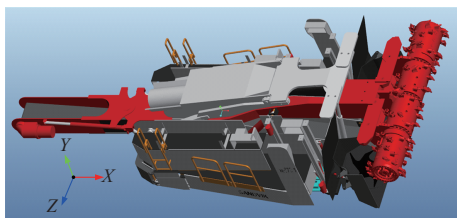


图 4 掘锚机三维模型

Fig. 4 3D model of roadheader bolter

将掘锚机三维模型导入 RecurDyn 软件并添加相应的运动副, 如图 5 所示。

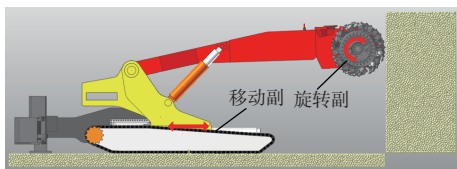


图 5 运动副

Fig. 5 Motion pair

在滚筒处添加旋转副, 保证滚筒完成截割运动, 在滑动支架处添加移动副, 保证滚筒完成掏槽运动。各运动对应的函数: 滚筒旋转, $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0.5, -3.22)$; 滚筒掘进, $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0.5, 50)$ 。

在 RecurDyn 软件中设置运动副后, 将模型保存为 .wall 文件并导入 EDEM 软件, 去除巷道底板、截

割面煤壁与掘锚机接触的面, 设置掘锚机材料为钢, 打开耦合接口, 建立 EDEM-RecurDyn 耦合仿真模型, 如图 6 所示。

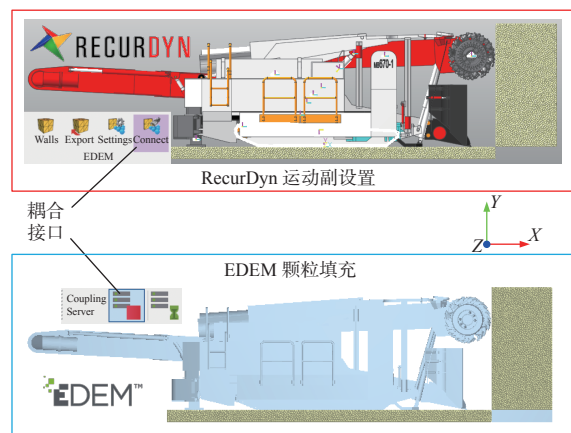


图 6 EDEM-RecurDyn 耦合仿真模型

Fig. 6 EDEM-RecurDyn coupling simulation model

3 仿真结果分析

在 EDEM 软件中设定网格尺寸为最小颗粒半径的 3 倍, 数据存储间隔为 0.1 s; 在 RecurDyn 软件中设定仿真步数为 40, 仿真时长为 10 s。

3.1 滚筒截割性能分析

3.1.1 截割阻力

截割阻力是滚筒截割过程中所有截齿沿 Y 轴所受载荷之和, 其表达式为

$$f = \sum_{i=1}^k L_i \quad (7)$$

式中: f 为截割阻力, N; L_i 为第 i ($i=1, 2, \dots, k$, k 为瞬时参与截割的截齿总数) 个截齿沿 Y 轴所受载荷, N。

不同形态矸石层下滚筒所受截割阻力如图 7 所示。

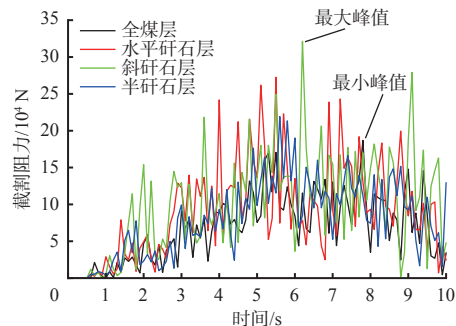


图 7 不同形态矸石层下滚筒所受截割阻力曲线

Fig. 7 Cutting resistance curves of drum under different gangue layers

由图 7 可知, 随着滚筒不断掘进, 截割阻力逐渐增加并在 5~6 s 达到峰值, 随后不断减小。不同形态矸石层下滚筒截割阻力均值见表 6。

表6 不同形态矸石层下滚筒截割阻力均值
Table 6 Mean cutting resistance of drum under different gangue layers

矸石层形态	截割阻力均值/N	截割阻力均值增长率/%
全煤层	6.74×10^4	—
水平矸石层	8.93×10^4	32.49
斜矸石层	9.14×10^4	35.61
半矸石层	8.48×10^4	25.82

由表6可知,矸石层的存在使滚筒截割阻力有所增加,矸石层形态对滚筒截割阻力的影响程度:斜矸石层>水平矸石层>半矸石层。当工作煤层为斜矸石层时,滚筒所受截割阻力均值相较于全煤层时增大了35.61%,斜矸石层对滚筒的影响较为严重。

3.1.2 载荷波动系数

载荷波动系数是指滚筒所受载荷的波动大小,其表达式为^[22]

$$\varepsilon = \frac{1}{\bar{L}} \sqrt{\frac{1}{c} \sum_{r=1}^c (L_r - \bar{L})^2} \quad (8)$$

$$\bar{L} = \frac{1}{c} \sum_{r=1}^c L_r \quad (9)$$

式中: ε 为载荷波动系数; \bar{L} 为滚筒载荷均值,N; L_r 为第 r ($r=1, 2, \dots, c$, c 为记录滚筒载荷的时刻点数)时刻滚筒瞬时载荷,N。

在EDEM的后处理模块,导出滚筒载荷数据,分别求出不同形态矸石层下滚筒载荷波动系数,见表7。

表7 不同矸石层形态下滚筒载荷波动系数
Table 7 Drum load fluctuation coefficient under different gangue layers

矸石层形态	方向	载荷均值/N	载荷波动系数	载荷波动系数增长率/%
全煤层	X轴	-9.46×10^4	0.56	—
	Y轴	6.74×10^4	0.63	—
	Z轴	3.19×10^3	4.52	—
水平矸石层	X轴	-1.24×10^4	0.58	3.57
	Y轴	8.93×10^4	0.68	7.94
	Z轴	5.14×10^3	5.46	20.79
斜矸石层	X轴	-1.49×10^4	0.71	26.79
	Y轴	9.14×10^4	0.79	25.39
	Z轴	3.56×10^3	7.29	61.28
半矸石层	X轴	-1.17×10^5	0.57	1.79
	Y轴	8.48×10^4	0.66	4.76
	Z轴	7.58×10^3	4.80	6.19

由表7可知,矸石层形态对滚筒载荷波动系数的影响程度:斜矸石层>水平矸石层>半矸石层。

滚筒在截割斜矸石层时,相比于全煤层时X、Y、Z轴载荷波动系数增长率分别达到了26.79%、25.39%、61.28%,此时滚筒截割性能受到严重影响。

3.1.3 截割比能耗

截割比能耗是指滚筒截割单位体积煤岩时所消耗的能量,其表达式为

$$H_w = \frac{\rho t_c n \bar{M}}{9550 \times 3600 m} \quad (10)$$

式中: H_w 为截割比能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; ρ 为煤岩密度, kg/m^3 ; t_c 为截割时间,s; n 为滚筒转速,r/min; \bar{M} 为滚筒转矩均值, $\text{N} \cdot \text{m}$; m 为截落煤岩质量,kg。

根据式(9)计算出不同形态矸石层下滚筒截割比能耗,见表8。

表8 不同形态矸石层下滚筒截割比能耗
Table 8 Specific cutting energy consumption of drum under different gangue layers

矸石层形态	截割比能耗/ $(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$	截割比能耗增长率/%
全煤层	3.01	—
水平矸石层	3.45	14.62
斜矸石层	4.13	37.21
半矸石层	3.15	4.65

由表8可知,矸石层形态对滚筒截割比能耗的影响程度:斜矸石层>水平矸石层>半矸石层。滚筒在截割斜矸石层时截割比能耗达到最大,为 $4.13 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,相较于截割全煤层时增长了37.21%;滚筒在截割半矸石层时截割比能耗最小,为 $3.15 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,相较于截割全煤层时增长了4.65%。

3.2 滚筒位移分析

在RecurDyn软件中导出不同形态矸石层下滚筒沿Y轴位移曲线,如图8所示。

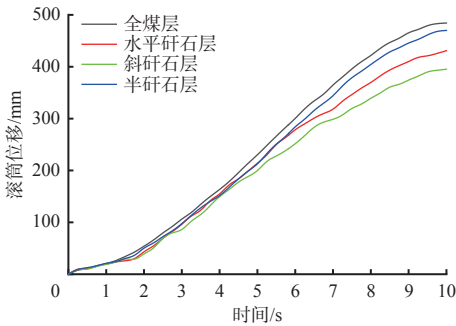


图8 不同形态矸石层下滚筒位移曲线

Fig. 8 Drum displacement curves under different gangue layers

由图8可知,矸石层形态对滚筒位移的影响程度:斜矸石层>水平矸石层>半矸石层。相比于全煤层,在水平矸石层、斜矸石层、半矸石层条件下滚筒位移分别缩短了53, 89, 14 mm,在斜矸石层条件下滚筒位移最短。

3.3 滚筒振动分析

滚筒在截割过程中受到载荷影响会产生振动现象^[23], 严重时会对滚筒造成一定危害。为分析不同形态矸石层对滚筒振动的影响, 在 RecurDyn 软件中导出不同形态矸石层下滚筒加速度曲线, 如图 9 所示(滚筒在截割初期未达到稳定截割状态, 因此加速度在 0~1 s 时出现大幅度变化, 随后波动逐渐稳定)。

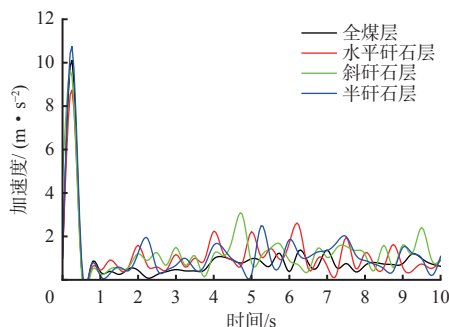


图 9 不同形态矸石层下滚筒加速度变化曲线

Fig. 9 Drum acceleration variation curves under different gangue layers

由图 9 可知, 矸石层形态对滚筒振动的影响程度: 斜矸石层 > 水平矸石层 > 半矸石层。滚筒在截割斜矸石层时振动幅度最大。

4 结论

1) 通过 EDEM-RecurDyn 耦合对滚筒在不同形态矸石层下截割过程进行动态仿真, 模拟掘锚机实际工作时可能会遇到的多种复杂煤层条件, 解决了传统仿真分析时截割煤岩属性单一和矸石层形态单一的问题。

2) 矸石层的存在使滚筒截割阻力、载荷波动系数、截割比能耗有所增加, 尤其在斜矸石层条件下增加最明显, 相比于在全煤层条件下, 截割阻力均值增大了 35.61%, X、Y、Z 轴载荷波动系数分别增大了 26.79%, 25.39%, 61.28%, 截割比能耗增大了 37.21%。

3) 矸石层的存在使滚筒位移有所减小, 尤其在斜矸石层条件下滚筒位移最短, 相较于全煤层条件下滚筒位移缩短了 89 mm。

4) 滚筒截割不同形态矸石层时产生的振动幅度不同, 滚筒截割全煤层工作面时产生的振动远小于含矸石层工作面。

参考文献(References):

[1] 刘畅, 姜鹏飞, 王子越, 等. 煤巷快速成巷技术现状及应用效果评价方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 26-33.
LIU Chang, JIANG Pengfei, WANG Ziyue, et al. Research on current situation of rapid driving technology

in coal roadway and its assessment method of application effect[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 26-33.

- [2] 李平. 煤矿巷道掘锚一体化快速掘进技术研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(2): 161-166.
LI Ping. Research on integrated rapid excavation technology of tunnel driving and anchoring in coal mine[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(2): 161-166.
- [3] 王涛, 石虎, 刘雷. 掘锚机在煤巷快速掘进中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2022(12): 87-89.
WANG Tao, SHI Hu, LIU Lei. Application of anchor digger in fast driving of coal roadway[J]. New Technology & New Products of China, 2022(12): 87-89.
- [4] 刘敏. 浅谈采矿新技术的应用现状及其发展趋势——以 MB670 掘锚机为例[J]. 世界有色金属, 2017(12): 91-93.
LIU Min. Application status and development trend of new mining technology-taking MB670 anchor & dig machine as an example[J]. World Nonferrous Metals, 2017(12): 91-93.
- [5] 苗圩巍, 颜世钊, 李纪强, 等. 国内外掘锚机组的发展现状及发展趋势[J]. 机械设计, 2020, 37(增刊1): 287-290.
MIAO Weiwei, YAN Shidang, LI Jiqiang, et al. Development status and trend of excavation equipment with bolting unit at home and abroad[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(S1): 287-290.
- [6] 姜建红. 掘锚机智能化综合控制技术研究[J]. 机械管理开发, 2021, 36(4): 232-233.
JIANG Jianhong. Research on intelligent integrated control technology of anchor excavator[J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(4): 232-233.
- [7] 张敬东. 矿井采煤机多工况下的机械性能分析[J]. 煤炭技术, 2013, 32(11): 37-39.
ZHANG Jingdong. Analysis of mechanical properties of coal machine under multiple working conditions[J]. Coal Technology, 2013, 32(11): 37-39.
- [8] 刘伟. 复杂煤层条件下滚筒截割性能影响分析[J]. 机械管理开发, 2022, 37(8): 99-100.
LIU Wei. Analysis of the influence analysis of drum cut-off performance under complex coal seam conditions[J]. Mechanical Management and Development, 2022, 37(8): 99-100.
- [9] 张强, 张晓宇. 不同工况下采煤机滚筒截割性能研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(6): 2360-2368.
ZHANG Qiang, ZHANG Xiaoyu. Cutting performance of shearer drum under different working conditions[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(6): 2360-2368.
- [10] 张强, 张晓宇. 采煤机滚筒截割性能数值模拟[J]. 辽

- 宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(4): 367-377.
- ZHANG Qiang, ZHANG Xiaoyu. Numerical simulation of shearer drum cutting performance[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 2021, 40(4): 367-377.
- [11] 毛君, 刘歆妍, 陈洪月, 等. 煤层倾角对滚筒工作性能影响的仿真研究[J]. 机械强度, 2019, 41(3): 673-681.
- MAO Jun, LIU Xinyan, CHEN Hongyue, et al. Simulation study on the effect of coal seam dip angle on drum work performance[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(3): 673-681.
- [12] 毛君, 刘歆妍, 陈洪月, 等. 基于EDEM的采煤机滚筒工作性能的仿真研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 1069-1077.
- MAO Jun, LIU Xinyan, CHEN Hongyue, et al. Simulation of shearer drum cutting performance based on EDEM[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 1069-1077.
- [13] 万理想. 不同厚度含夹矸煤层的采煤机螺旋滚筒截割性能研究[J]. 煤矿机械, 2022, 43(6): 39-44.
- WAN Lixiang. Study on cutting performance of shearer spiral drum in different thickness coal seam with gangue[J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(6): 39-44.
- [14] 杨霞. 张家峁煤矿 5^{-2} 煤综采面胶运顺槽锚杆支护技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- YANG Xia. Technological research on bolting for belt conveying crossheading on fully mechanized coal face of 5^{-2} coal in Zhangjiamao Coal Mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [15] SU O, AKCIN N A. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(3): 434-442.
- [16] 李磊. 离散元法在农业工程中的研究现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(5): 345-348.
- LI Lei. Research progress and prospects of DEM in agricultural engineering application[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 345-348.
- [17] 徐宝鑫. 截割头截齿安装参数的离散元仿真分析[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.
- XU Baoxin. DEM simulation analysis of pick assembly parameters of cutting head[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2015.
- [18] 包建华, 王阳阳, 张悦. 基于离散元的双滚筒采煤机截割过程仿真分析[J]. 煤矿机械, 2018, 39(7): 60-62.
- BAO Jianhua, WANG Yangyang, ZHANG Yue. Simulation analysis of working process for double drum-type shearer via discrete element method[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(7): 60-62.
- [19] LI Zhanfu, TONG Xin. A study of particles penetration in sieving process on a linear vibration screen[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(4): 299-305.
- [20] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在EDEM上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- WANG Guoqiang, HAO Wanjun, WANG Jixin. Discrete element method and its practice on EDEM[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010.
- [21] 张泽. 掘锚机在煤巷快速掘进中的应用[J]. 能源与节能, 2022(4): 209-211.
- ZHANG Ze. Application of alpine bolter miner in rapid tunneling of coal roadways[J]. Energy and Energy Conservation, 2022(4): 209-211.
- [22] 毛君, 刘歆妍, 陈洪月, 等. 不同截齿安装角对采煤机截割性能的影响[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 144-149.
- MAO Jun, LIU Xinyan, CHEN Hongyue, et al. Different installation angle of cutting picks affected to cutting performances of coal shearer[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 144-149.
- [23] 谢苗, 闫江龙, 毛君, 等. 采煤机截割部振动特性分析[J]. 机械强度, 2017, 39(2): 254-260.
- XIE Miao, YAN Jianglong, MAO Jun, et al. Analysis of vibration characteristics of shearer cutting unit[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(2): 254-260.
- 5 km distances[S].
- [21] ITU-T G. 698.4: multichannel bi-directional DWDM applications with port agnostic single-channel optical interfaces[S].
- [22] YD/T 4013.4—2022: 城域 $N \times 25$ Gbit/s波分复用(WDM)系统技术要求 第4部分: MWDM[S].
- YD/T 4013.4-2022: technical requirements for metropolitan $N \times 25$ Gbit/s wavelength division multiplexing (WDM) systems Part 4: MWDM[S].

(上接第 92 页)