



基于双向耦合法的采煤机螺旋滚筒振动特性分析

张美晨 赵丽娟 李明昊 田震

引用本文:

张美晨, 赵丽娟, 李明昊, 等. 基于双向耦合法的采煤机螺旋滚筒振动特性分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 200–216.
ZHANG Meichen, ZHAO Lijuan, LI Minghao. Analysis and experimental study on the vibration characteristics of the spiral drum of a shearer based on two-way coupling method[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 200–216.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0452>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于DEMMFBD双向耦合技术的采煤机摇臂壳体疲劳寿命预测

Fatigue life prediction of shearer rocker shell based on DEMMFBD bidirectional coupling technology

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 252–258 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1908>

夹矸煤层采煤机斜切进刀过程滚筒载荷特性研究

Research on drum load characteristics in oblique cutting process of shearer with coal containing parting

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fde0a4d5-de54-4fc9-836e-491a43e4edff>

新型指向式旋转导向钻井工具导向轴振动特性研究

Study on vibration characteristics of guiding shaft of new directional rotary steering drilling tool

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 177–184 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e61a2287-800e-42ee-894a-1af5c8b0ce2c>

采煤机惯性传感器的减振方法与装置

Vibration reduction method and device of shearer inertial measurement unit

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 219–228 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0257>

基于EDEM的边帮采煤机螺旋输送性能研究

Study on spiral conveying performance of side shearer based on EDEM

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/970aec12-47c2-4c44-a7cf-0e7520f9de5d>

采煤机平滑靴平动固-热-力耦合特性分析

Analysis of solid-thermal-mechanical coupling characteristics of shearer smooth boots

煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/85d4db3e-1d5e-41a5-8046-a500e2632908>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

机电工程与智能化



移动扫码阅读

张美晨,赵丽娟,李明昊,等. 基于双向耦合法的采煤机螺旋滚筒振动特性分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 200–216.

ZHANG Meichen, ZHAO Lijuan, LI Minghao, *et al.* Analysis and experimental study on the vibration characteristics of the spiral drum of a shearer based on two-way coupling method[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 200–216.

基于双向耦合法的采煤机螺旋滚筒振动特性分析

张美晨¹, 赵丽娟^{2,3}, 李明昊⁴, 田震⁵

(1. 常熟理工学院 机械工程学院, 江苏 苏州 215500; 2. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000; 3. 辽宁省大型矿山装备重点实验室, 辽宁 阜新 123000; 4. 沈阳理工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 5. 周口师范学院 机械与电气工程学院, 河南 周口 466000)

摘要: 为研究采煤机螺旋滚筒在多种赋存条件下的振动特性, 以 MG2×55/250-BWD 型薄煤层采煤机为工程对象, 优化煤岩接触模型, 建立与实际赋存条件相似的多种不同截割工况下煤壁离散元模型。结合 DEM-MFBD(Discrete Element Method-Multi Flexible Body Dynamics) 双向耦合数值模拟方法搭建采煤机截割部刚柔耦合虚拟样机模型与煤壁离散元模型的双向耦合试验平台, 通过仿真试验得到不同煤岩工况下螺旋滚筒的截割过程, 并分别对其振动特性的变化规律展开分析。研究结果表明: 螺旋滚筒在截割过程中, 三向均出现不同程度的振动, 其中截割阻力方向振动加速度最大, 牵引阻力方向振动加速度次之, 侧向力方向振动加速度最小。随着模型中夹矸硬度以及层数比例的增加, 截割过程中螺旋滚筒的振动强度不断加剧, 最大振动加速度有效值的差值达到 4 403.149 mm/s²。利用短时傅里叶变换将一维振动信号转化为二维时频谱图像, 得到不同煤岩工况下振动信息变化特征在时频域中完成较好保留, 其时频谱图像的特征样本效果优于各工况的时域一维信号曲线, 主频能量位置、范围大小、特征团形状等信息具有明显区别, 即使遇到夹矸层数不同, 夹矸坚固性系数也存在差异的复杂工况, 其时频谱图像中能量特征的分布形式也具有显著差别。通过振动模态分析发现, 随着煤壁中含有夹矸硬度的增加, 各部位的变形量均发生变化, 其中截齿部位变化最为强烈。基于相似理论搭建采煤机振动信号测试试验平台, 对不同煤岩工况条件下螺旋滚筒截割过程进行了测试研究, 通过追踪螺旋滚筒的振动状态, 发现其振动变化规律与双向耦合数值模拟一致。试验测试得到 DEM-MFBD 数值模拟方法获取的螺旋滚筒振动加速度有效值与依据相似比反推的试验数据之间的误差小于 DEM 离散元数值模拟方法与实验数据之间的误差, 验证了 DEM-MFBD 数值模拟方法的准确性。研究结果对于提升螺旋滚筒工作可靠性具有重要意义, 同时也为采煤机智能化开采的煤岩截割状态识别系统搭建过程中数据信息的获取提供了一种新的方法。

关键词: 双向耦合法; 离散元-多柔体动力学; 螺旋滚筒; 振动特性; 模态

中图分类号: TD421

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)03-0200-17

Analysis and experimental study on the vibration characteristics of the spiral drum of a shearer based on two-way coupling method

ZHANG Meichen¹, ZHAO Lijuan^{2,3}, LI Minghao⁴, TIAN Zhen⁵

(1. College of Mechanical Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou 215500, China; 2. College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. Liaoning Provincial Key Laboratory of Large-Scale Mining Equipment, Fuxin 123000, China; 4. College of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China; 5. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhoukou Normal University, Zhoukou 466000, China)

收稿日期: 2023-03-31

责任编辑: 常琛

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0452

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674134); 教育部科技发展中心“数启科教 智见未来”教育技术研究基金资助项目(2018A04025); 博士科研启动基金资助项目(KYZ2022052Q)

作者简介: 张美晨(1992—), 女, 辽宁朝阳人, 讲师, 博士。E-mail: 1183478444@qq.com

通讯作者: 赵丽娟(1964—), 女, 辽宁阜新人, 教授, 博士。E-mail: zlj2120@163.com

Abstract: In order to study the vibration characteristics of shearer's spiral drum under various occurrence conditions, the coal-rock contact model was optimized by taking the MG2×55/250-BWD thin seam shearer as the engineering object, and discrete element model of the coal wall under various cutting conditions similar to the actual occurrence conditions were established. Combined with DEM-MFBD (Discrete Element Method-Multi Flexible Body Dynamics) two-way coupling numerical simulation method, the two-way coupling simulation platform of the rigid-flexible coupling virtual prototype model of the shearer cutting section and the discrete element model of the coal wall was built. Through simulation, the cutting process of the spiral drum under different coal wall working conditions was obtained, and the variation law of the vibration characteristics of the spiral drum under different occurrence conditions was analyzed. The results show that: during the cutting process, the spiral drum vibrates to different degrees in three directions, of which the vibration acceleration in the cutting resistance direction is the largest, the vibration acceleration in the traction resistance direction is the second, and the vibration acceleration in the lateral force direction is the smallest. With the increase of the hardness of the gangue and the proportion of the number of layers in the model, the vibration intensity of the spiral drum during the cutting process continues to increase, and the difference between the effective values of the maximum vibration acceleration reaches $4\,403.149\text{ mm/s}^2$. The short-time Fourier transform was used to convert one-dimensional vibration signal into two-dimensional time-frequency spectrum image, and the characteristics of vibration information change under different working conditions were well preserved in time-frequency domain. The feature sample effect of time-frequency spectrum image is better than that of time-domain one-dimensional signal curve under various working conditions. The information such as the location, scope and shape of feature cluster of dominant frequency energy have obvious differences. Even if the number of rock parting is different, the distribution form of energy characteristics in the time-frequency spectrum image is also significantly different under complex working conditions where there are differences in the firmness coefficient of the rock parting. Through vibration modal analysis, it is found that with the increase of the hardness of the gangue in the coal wall, the deformation of each part changes, and the change of the pick part is the strongest. Building a vibration signal testing experimental platform for shearer based on similarity theory. The cutting process of spiral drum under different working conditions was tested experimentally. By tracking the vibration state of the spiral drum, it is found that the vibration change law is consistent with the results of the two-way coupling numerical simulation. The error between the effective value of the vibration acceleration of the spiral drum obtained by the DEM-MFBD numerical simulation method and the experimental data inferred based on similarity ratio is smaller than the error between the DEM discrete element numerical simulation method and the experimental data, which verifies the accuracy of the DEM-MFBD numerical simulation method. The research results are of great significance for the working reliability of the lifting spiral drum, and also provide a new method for obtaining data signals during the construction of the coal and rock cutting state recognition system for "unmanned" intelligent mining.

Key words: two-way coupling method; discrete element method-multi flexible body dynamics; spiral drum; vibration characteristics; modal

0 引言

采煤机螺旋滚筒高效截割、破落夹矸煤岩是一个复杂的演化过程,是多因素耦合作用的结果^[1-3],被截割煤岩的物理、力学性质的改变使其螺旋滚筒所受载荷具有非线性、时变性的特点,会导致螺旋滚筒产生振动与变形的程度随之发生变化,过于强烈的振动会降低采煤机的工作性能,因此分析多种不同截割工况下的螺旋滚筒振动特性对于提升采煤机工作可靠性具有重要意义,同时为采煤机智能开采中煤岩截割状态识别系统的构建奠定基础^[4-5]。近年来众多学者针对采煤机螺旋滚筒振动特性展开大量深入的研究。辛红宝等^[6]采用有限元分析法对不同齿座排列方式的端盘模态进行分析,最终获取混合排列方式的端盘可降低滚筒的振动;田震^[7]等利用多软件协同仿真平台对采煤机模型进行振动特性仿真,对比分析了前后滚筒的振动强烈程度,结果显示前

滚筒的振动明显大于后滚筒;杨琳琳等^[8]采用非线性振动理论,分析截割转速的变化对滚筒振动的影响,得到合理的截割转速可减少滚筒的振动;王海舰等^[9]利用试验测试方法提取了不同煤岩比工况下的滚筒振动信号,将其作为特征信息之一进行煤岩识别系统的搭建;陈洪月等^[10]以试验测试得到的滚筒轴向截割载荷作为激励,分析了采煤机前后滚筒的振动量,得到了前滚筒的振动量高于后滚筒。上述研究成果为采煤机螺旋滚筒的设计提供了丰富的理论依据,但通过构建螺旋滚筒高效截割时与夹矸煤岩相互作用的双向耦合模型,开展其作用机理及动力传递规律的研究较少。

采煤机的截割过程可看作是由一系列离散介质组成的非连续整体在外界作用下发生移动的过程,而通过对离散介质的追踪能够有效获取外界作用下煤岩的变形及运动特征。双向耦合法由于可进行实时传递、交互、有效监测到离散介质行为信息而被广

泛应用到不同生产领域,其中赵丽娟等^[11]采用双向耦合法对摇臂壳体的疲劳寿命进行了分析;金鑫等^[12]对采煤机螺旋滚筒的磨损特性展开了分析。以上研究对采煤机设计具有重要的指导意义,但其多是从数值模拟分析方面对采煤机性能展开讨论,且研究工况较为单一,对模拟分析和试验研究之间相互印证的研究较少。与此同时,对螺旋滚筒多种不同截割工况下工作过程中振动特性全面系统性的研究以及对产生的振动数据实施分析的同时,如何使其转换为可被智能化开采利用的有效信息也有待进一步深入探讨。

为此,基于项目组前期研究的基础,以 MG2×55/250-BW 型薄煤层采煤机螺旋滚筒为研究对象,利用采煤机截割含夹矸煤岩的双向耦合作用机理,搭建其与多种不同截割工况下煤壁的双向耦合模拟试验平台,完成对物理样机的真实映射,通过仿真试验得到滚筒截割过程中受力及煤岩颗粒运行形态,提取不同煤岩工况下滚筒截割过程的振动信号,并采用 STFT 算法将一维信号数据转化为二维时频谱图像,分析了煤壁中夹矸硬度以及层数的变化对螺旋滚筒振动特性的影响;通过采煤机截割煤岩试验平台对螺旋滚筒振动特性进行试验测试,对 DEM-MFBD 双向耦合数值模拟方法的准确性进行了验证,为实现煤矿智能化开采过程中的煤岩截割状态识别系统构建提供有效数据支撑。

1 螺旋滚筒截割煤岩的双向耦合模型建立

1.1 煤岩离散元模型建立

1.1.1 颗粒自定义接触模型

实际煤岩体表面呈现凹凸不平的特征,仅依靠离散元软件内部的传统 Hertz-Mindlin 接触模型中定义的颗粒间摩擦力难以充分表征煤岩颗粒间的咬合作用,因此在其基础上,根据煤岩实际特征,添加煤岩体颗粒之间扭转力,通过构建自定义接触模型模拟其表面粗糙度。借助外部 API 功能,创建新的源文件,将构建仿真模型过程中需要的头文件包含在源文件中,利用 visual studio 外部编译环境对源文件进行编译,并将其定义为.dll 库文件,将库文件添加到 EDEM 目录下的 src 文件夹内,实现对插件的读取,完成自定义颗粒接触方式模型的构建^[13]。煤层自定义接触模型中,接触单元由法向、切向及转动 3 部分组成,如图 1 所示。煤岩颗粒接触参数,见表 1。

1.1.2 离散元模型建立

材料参数的选择对于离散元模型的求解具有重

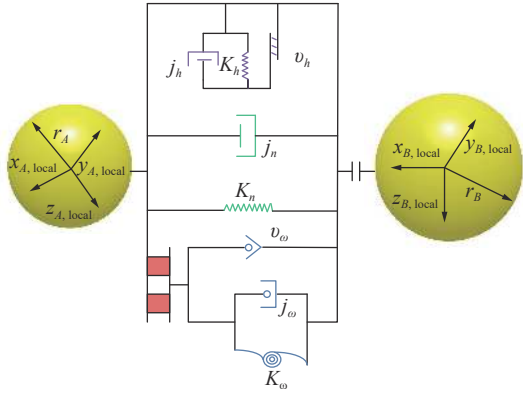


图 1 颗粒接触模型

Fig.1 Particle contact model

表 1 煤岩颗粒接触参数

Table 1 Contact parameters between coal-rock particles

颗粒接触参数	煤	夹矸	硬夹矸
颗粒接触防转系数	0.7	0.85	0.97
局部阻尼系数	0.667	0.346	0.239
黏滞阻尼系数	0.101	0.316	0.421
法向黏滞阻尼系数	0.417	0.803	0.844
切向黏滞阻尼系数	0.365	0.941	0.989
切向静滑动摩擦因数	0.672	0.459	0.372
静滚动摩擦阻力系数	0.051	0.124	0.268

要影响,为了使所建模型更接近实际煤壁性质,需对煤岩颗粒材料进行测试。兖州矿区 17 层煤平均厚度 1 m,煤层倾角 5°~13°,分布范围广,赋存稳定。但煤层结构复杂,煤层含夹矸 1~2 层,厚度为 0.02~0.44 m,岩性为炭质砂岩。按取样原理及检测标准对兖州矿区煤层进行取样测试,相关试验如图 2 所示,表 2 为试验所获取的煤岩具体物理力学性能参数。

分别构建全煤、含一层夹矸、含一层硬夹矸、含两层不同硬度夹矸的 4 种工况下煤壁离散元模型。模型构建过程中煤岩颗粒的数目直接影响仿真效率,为了缩短计算时间,同时保证离散元模型能够实现对不同煤岩工况下螺旋滚筒截割煤岩的双向耦合过程进行仿真,煤壁模型尺寸设置为 1 500 mm×1 500 mm×1 000 mm,并且虚拟煤壁模型对应滚筒的稳定截割状态,即煤壁表面已呈滚筒包络面形状,煤层、夹矸层具体厚度如图 3 所示。

1.2 采煤机截割部刚柔耦合虚拟样机模型建立

利用 Pro/E 软件建立采煤机截割部各零件刚性模型,再进行无干涉装配。以 stp*格式将截割部装配体导入 RecurDyn 中,定义各零件质量的同时根据截割部实际工作原理添加约束、驱动。采煤机



图2 煤岩物理、力学性能测试试验

Fig.2 Tests of the physical and mechanical parameters of coal-rock

表2 煤岩试样的基本物理、力学性质参数

Table 2 Basic physical and mechanical property parameters of the coal and rock samples

材料	煤	夹矸	硬夹矸
弹性模量/MPa	2 010	3 260	12 100
密度/(kg·m ⁻³)	1 280	2 460	2 630
泊松比 μ	0.28	0.24	0.23
单向抗拉强度/MPa	0.3	1.19	4.23
单向抗压强度/MPa	12	30	42
内摩擦角/(°)	20.48	33.25	36.17
坚固性系数 f	1.4	3.5	5.1

截割部刚柔耦合虚拟样机模型建立过程比较重要的两个部分分别为：接触的计算与柔性零件的生成。

1.2.1 接触的计算

接触的计算是模型不断进行自检的过程,通过检查几何位置是否处于接触状态去进行每一增量步的计算^[14-15]。采用相对坐标系的接触分析算法^[16],其接触力模型如图4所示,计算过程由式(1)确定:

$$F = K\delta + C\vec{v} \quad (1)$$

式中: δ 为穿透深度, mm; K 为接触刚度, N/mm; \vec{v} 为接触点的相对速度, mm/s; C 为接触阻尼, (N·s)/mm。

接触的添加需确定穿透深度、接触刚度以及接触阻尼。其中穿透深度通过有限元法进行求解,对采煤机截割部中相接触的零件体进行材料赋予、网格划分以及载荷的施加,求解后其后处理模块便可输出零件各节点的最大穿透深度。

接触刚度的计算则如式(2)—(5)^[17-18]:

$$K_t = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{\frac{1}{k_{h,i}} + \frac{1}{k_{b1,i}} + \frac{1}{k_{f1,i}}} + \frac{1}{\frac{1}{k_{h,i}} + \frac{1}{k_{b2,i}} + \frac{1}{k_{f2,i}}} \right) \quad (2)$$

$$K_h = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{4 \left[(1 - \mu_{1,i}^2) E_2 + (1 - \mu_{2,i}^2) E_1 \right]}{3\pi^2 E_{1,i} E_{2,i}} \times \left[\frac{R_{1,i} R_{2,i}}{R_{1,i} + R_{2,i}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{1}{K_b} = \int_{-\beta_1}^{\beta_2} \left[3 + 3\cos\beta_1 \times \frac{[(\beta_2 - \beta_1)\sin\alpha - \cos\alpha]^2}{2EB[\sin\alpha + (\beta_2 - \alpha)\cos\alpha]^3} \times \frac{(\beta_2 - \alpha)}{2EB[\sin\alpha + (\beta_2 - \alpha)\cos\alpha]^3} \times \frac{\cos\alpha}{2EB[\sin\alpha + (\beta_2 - \alpha)\cos\alpha]^3} d\alpha \right] \quad (4)$$

$$\frac{1}{K_f} = \frac{\cos^2\alpha}{EB} \left[l \left(\frac{w_f}{b_f} \right)^2 + m \left(\frac{w_f}{b_f} \right) + n(1 + p \tan^2\alpha) \right] \quad (5)$$

式中: K_t 为接触总刚度, 其由赫兹刚度 K_h , 弯曲刚度 K_b , 接触体变形刚度 K_f 组成; E 为弹性模量; μ 为泊松比; R 为接触半径; B 为齿宽; α 为压力角; β_1 为齿顶渐开线与齿形中线夹角的余角; β_2 为齿形渐开线在基圆上所成弧夹角的一半; w_f 为初始啮合点曲率线和齿形中心线交点到齿根圆的距离; b_f 为齿根圆上的齿形宽; l 、 m 、 n 和 p 为接触变形刚度相关系数。

接触阻尼^[19-20]的选取可根据式(6)—式(7)确定。

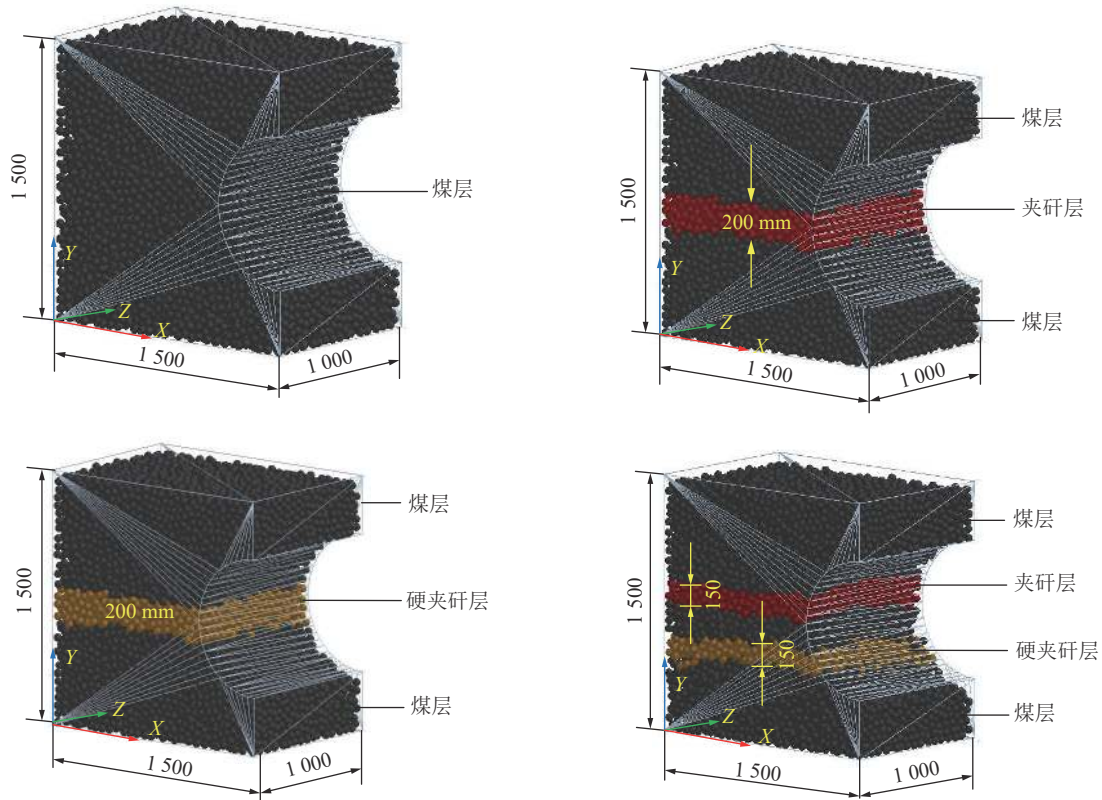


图3 煤壁离散元模型

Fig.3 Discrete element model of coal wall

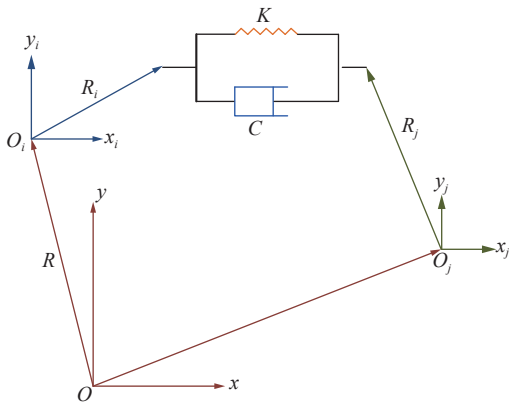


图4 接触力模型

Fig.4 Contact force model

$$C_{\max} = 14 \times 10^9 \frac{E}{2.1 \times 10^{11}} w s \quad (6)$$

$$C_{\min} = \gamma C_{\max} \quad (7)$$

式中: w 为接触体有效接触面积; s 为变形系数; γ 为刚度比。

根据采煤机截割部零件的结构与材料, 得到接触力计算模型中的接触刚度、阻尼、最大穿透量、非线性指数的取值见表3。

1.2.2 柔性零件的生成

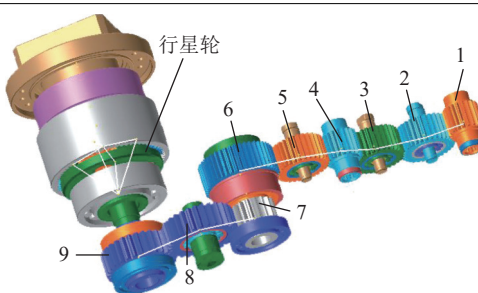
采煤机在实际工作过程中, 由于煤层赋存条件

复杂, 螺旋滚筒将受到来自煤壁的高冲击、非线性载荷而出现应力集中和不同程度的变形。因此为了满足对这一过程的精准分析, 将螺旋滚筒进行柔性化处理。最终将刚性滚筒替换成柔性件, 形成截割部刚柔耦合虚拟样机模型如图5所示。

1.3 截割部 DEM-MFBD 双向耦合模型建立

采煤机截割部截割过程的双向耦合模型通过 EDEM-RecurDyn 之间的耦合接口建立可实现煤壁仿真模型与截割部刚柔耦合虚拟样机模型之间的关联, 其采煤机截割部截割过程中 EDEM-RecurDyn 双向耦合的交互过程如图6所示。由图6可知, RecurDyn 将采煤机截割部动力学模型的平移与旋转运动信息传递给 EDEM 中对应的几何体, 几何体的位置发生改变导致煤层工作面受力的位置、方向以及大小发生变化, EDEM 计算出此时煤壁对几何体的作用力并将数据回传至 RecurDyn 中, 在下一个时间步起始, RecurDyn 根据回传载荷信息与内部驱动信息计算出新的运动信息传递给 EDEM, 实现煤壁仿真模型与采煤机截割部相互作用过程中载荷与运动位移等数据的实时双向传递。采煤机截割部截割过程的双向耦合模型结构复杂, 数据占比空间大, 在 EDEM 中仅导入螺旋滚筒, 这可在不影响仿真精度的同时有效保证仿真速度, 与此同时, 螺旋滚筒作为采煤

表 3 采煤机截割部接触参数
Table 3 Contact parameters of shearer cutting part

零件编号	接触刚度/(N·mm ⁻¹)	阻尼/((N·s)·mm ⁻¹)	最大穿透量	非线性指数	模型显示
齿轮1与2,3与4,4与5	788 530	788.53	0.1	1.5	
齿轮2与3	890 370	890.37	0.1	1.5	
齿轮5与6	964 460	964.46	0.1	1.5	
齿轮7与8	891 780	891.78	0.1	1.5	
齿轮8与9	1 019 000	1 019.00	0.1	1.5	
行星轮与太阳轮	713 420	713.42	0.1	1.5	
行星轮与内齿轮	977 010	977.10	0.1	1.5	

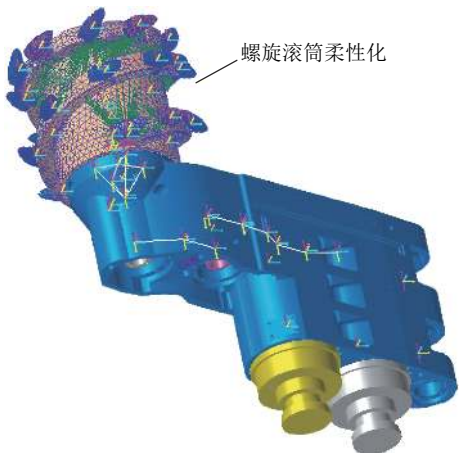


图 5 采煤机截割部刚柔耦合虚拟样机模型
Fig.5 Rigid-flexible coupling virtual prototype model of shearer cutting section

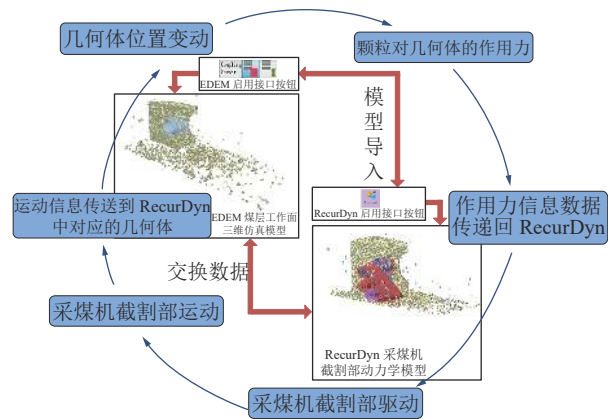


图 6 截割部 DEM-MFBD 双向耦合模型
Fig.6 Bidirectional coupling model of DEM-MFBD in cutting section

机工作机构安装至摇臂与煤岩直接接触,滚筒位置发生变化后,煤岩颗粒直接对滚筒产生作用力,这种作用力直接回传至 RecurDyn 中,可完成对截割部动力信息的实时监控,提升仿真效率同时有利于对大量的煤岩截割状态实施仿真。

2 仿真分析

2.1 螺旋滚筒截割过程分析

对采煤机截割部以转速为 90 r/min,牵引速度为 4 m/min 时的截割过程进行仿真,得到截割过程中煤岩颗粒的运动状态,以全煤工况为例,如图 7 所示。由图 7 可知,滚筒截割煤壁后,大部分颗粒在滚筒作用力下获得一个初速度从煤壁上脱落下来,靠近装煤区一侧由于自由表面的存在,抛出的煤岩颗粒所受轴向阻力较小,在空中受重力影响直接落入装煤区。远离装煤区一侧,抛出的煤岩颗粒在运动过程中若具有较大径向速度则向采空区做抛物线运动,若获得较小径向速度的颗粒则在轴向速度的共同作用下抛向装煤区。还有部分被截落的颗粒碰到截齿

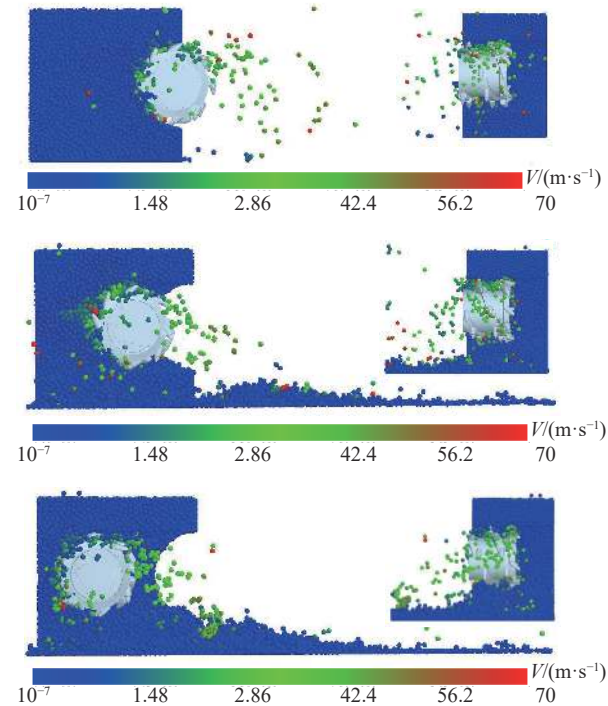


图 7 截割过程中煤岩颗粒的运动状态
Fig.7 Movement state of the coal and rock particles during cutting

和煤壁后会落入叶片作用范围外,在叶片下方形成堆积,由于滚筒的连续转动,螺旋叶片使处于稳定堆积状态的煤岩颗粒间接触和作用力发生改变,堆积的颗粒打破稳定状态后再次沿滚筒轴线方向抛向装煤区。滚筒截割过程还会出现少量的煤岩颗粒不是正常剥落,而是被齿尖崩出使其向四周散落。

分别对上述4种工况的双向耦合仿真数据进行提取,得到截煤过程中螺旋滚筒的受力,与单向耦合进行对比,如图8所示。由图8可知,螺旋滚筒在与煤壁接触后,受力急剧增长,并出现明显的非线性变化。每种工况下双向耦合与单向耦合的变化存在差异。双向耦合过程全煤工况、含一层夹矸工况、含一层硬夹矸工况、含两层不同硬度夹矸工况下的螺旋滚

筒载荷平均值分别为21 509.422 4、35 952.317 9、56 533.400 9、77 628.977 2 N,载荷波动系数分别为0.255 4、0.351 6、0.471 1、0.561 9;对应着4种工况下,单向耦合过程中螺旋滚筒载荷平均值分别为19 791.178 7、31 326.560 1、51 448.825 6、71 388.187 4 N,载荷波动系数分别为0.207 2、0.297 5、0.411 9、0.483 4。由此可以看出随着煤壁中夹矸硬度与层数的增加,螺旋滚筒载荷平均值、载荷波动系数均增加。基于双向耦合法的仿真结果其螺旋滚筒载荷平均值与载荷波动系数均比单向耦合仿真结果有所提升,4种工况下螺旋滚筒载荷平均值分别提升了8.68%、14.76%、9.89%、8.74%,载荷波动系数分别提升了23.26%、20.13%、14.37%、16.24%。

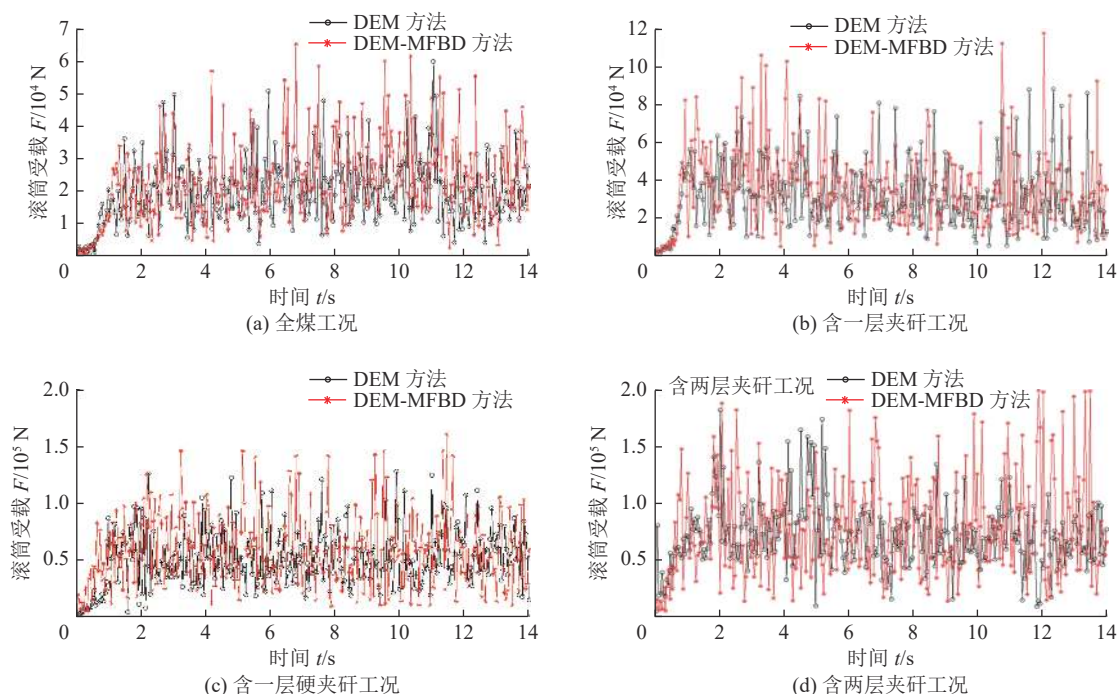


图8 不同煤岩工况下滚筒受载的单双向耦合对比

Fig.8 Comparison of single and bidirectional coupling of drum load under different coal-rock working conditions

2.2 螺旋滚筒振动加速度频率响应分析

采煤机螺旋滚筒所受载荷具有非线性、时变性和强耦合性等特点,在截割过程中会产生强烈的振动和较大的变形,为了提高采煤机工作过程中的可靠性,根据双向耦合法的仿真结果分析螺旋滚筒在不同煤岩工况下的振动特性,提取4种工况下螺旋滚筒的三向振动加速度曲线,如图9所示。统计得到滚筒质心三向加速度数值见表4。螺旋滚筒在截割过程中,X、Y、Z方向均出现不同程度的振动,其中Y方向(截割阻力方向)振动加速度最大,Z方向(牵引阻力方向)振动加速度次之,X方向(侧向力方向)振动加速度最小。截割全煤工况过程中螺旋滚

筒截割阻力方向的振动加速度在 $-15\ 781.121 \sim 22\ 258.997\ \text{mm/s}^2$ 范围内波动,有效值为 $2\ 642.139\ \text{mm/s}^2$;截割含一层夹矸、含一层硬夹矸、含两层夹矸工况过程中,截割阻力方向的振动加速度分别在 $-20\ 908.425 \sim 26\ 134.872$ 、 $-30\ 727.719 \sim 35\ 583.154$ 、 $-35\ 853.527 \sim 42\ 751.179\ \text{mm/s}^2$ 范围内波动,有效值分别为 $3\ 811.396$ 、 $5\ 632.322$ 、 $7\ 045.288\ \text{mm/s}^2$ 。由此可知,随着试件模型中夹矸硬度以及层数比例的增加,截割过程中螺旋滚筒的振动不断增大,最大振动加速度有效值的差值为 $4\ 403.149\ \text{mm/s}^2$,并且其振动变化趋势与载荷变化具有一定的相似性,说明滚筒截齿、端盘、叶片、筒毂受载是影响螺旋滚筒振

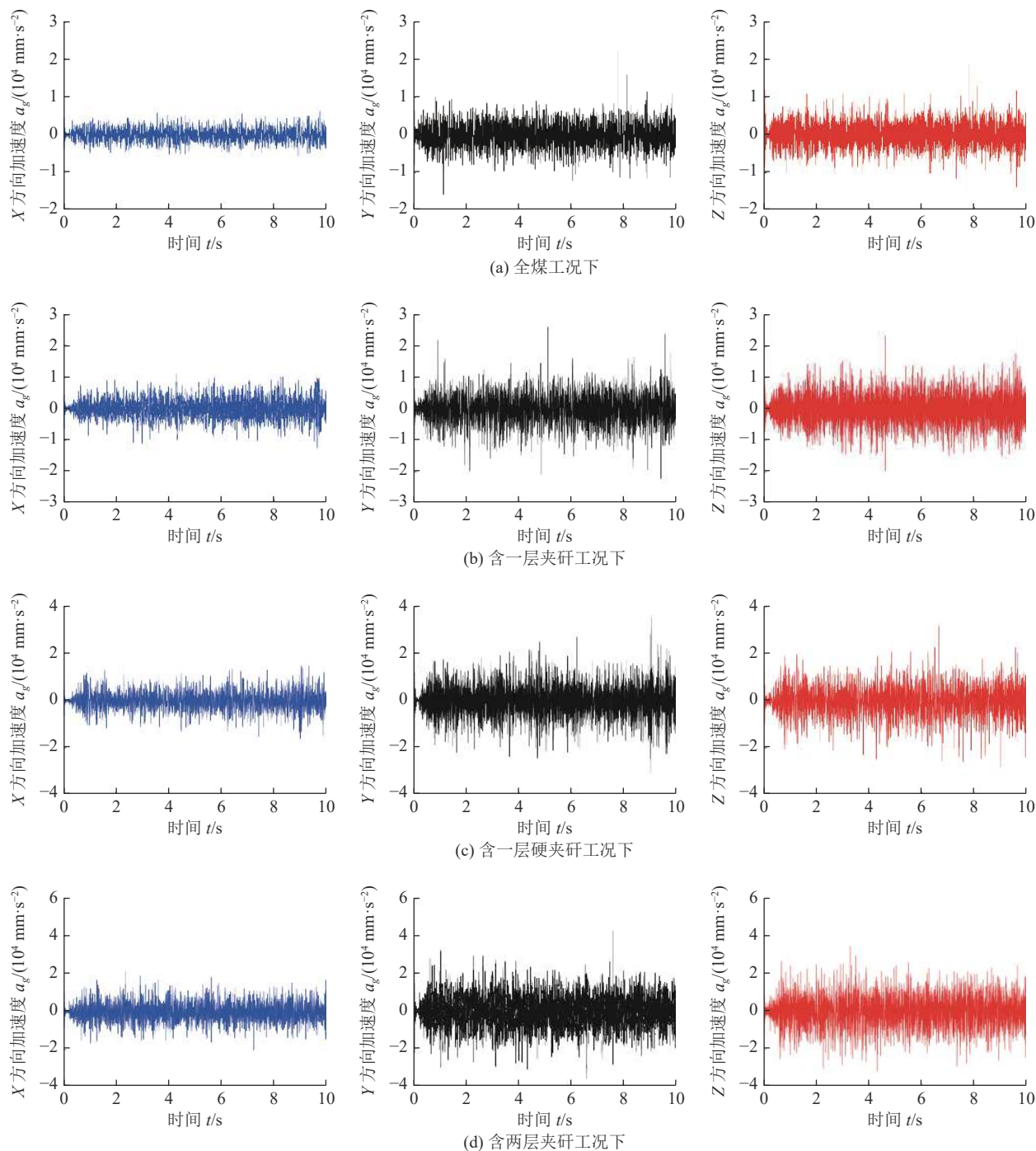


图9 不同煤岩工况下螺旋滚筒三向振动加速度曲线

Fig.9 Three direction vibration acceleration curve of spiral drum under different the coal and rock conditions

动的一个因素。

通过上述图9与表4对采煤机截割部截割过程中螺旋滚筒所受振动信号的时域信息分析可知,当含夹矸层数相同时,煤岩坚固性系数较大的工况其振动加速度波动的幅度较大,当含夹矸层数不同时,夹矸层数越多其振动加速度波动变化幅度越大,但不同种煤岩工况下其振动加速度的波形相似,差异信息少,并且其波动范围呈现无规则变化,仅依靠螺旋滚筒振动信号的一维时域特征会造

成频域信息的丢失,难以反映煤岩截割状态与其相对应振动信息之间的非线性关系,无法对智能化无人开采中煤岩详细截割状态的准确辨别提供准确的振动特征信息。因此选择可将判别煤岩截割状态信息的振动信号从时域转换为时频域的短时傅里叶变换(STFT)方法,将螺旋滚筒在截割阻力方向的振动加速度一维曲线转化为二维时频谱图像,防止振动特征信息丢失,为后续的智能化无人开采奠定基础^[21]。

表 4 滚筒质心三向加速度数值
Table 4 Three direction acceleration value of spiral drum centroid

工况	全煤工况	含一层夹矸工况	含一层硬夹矸工况	含两层夹矸工况
x 方向加速度响应有效值	1 564.210	2 688.084	3 489.092	4 397.371
x 方向加速度响应最大值	7 058.725	11 855.365	16 704.896	21 310.057
x 方向加速度响应最小值	-8 614.392	-11 388.514	-16 089.212	-20 162.186
y 方向加速度响应有效值	2 642.139	3 811.396	5 632.322	7 045.288
y 方向加速度响应最大值	22 258.997	26 134.872	35 583.154	42 751.179
y 方向加速度响应最小值	-15 781.121	-20 908.425	-30 727.719	-35 853.527
z 方向加速度响应有效值	2 532.141	3 685.561	5 308.049	6 808.726
z 方向加速度响应最大值	18 660.201	23 264.498	31 748.155	34 405.143
z 方向加速度响应最小值	-13 833.302	-19 587.958	-28 148.117	-32 084.474

STFT 将煤岩截割过程中产生的非平稳振动信号进行分割,使其变换为多个近似的平稳信号,多个近似平稳的信号经短时傅里叶变换后通过窗覆盖的方式将其进行整合,实现煤岩截割振动信号从时域特征到时频域特征的映射。STFT 变换以傅里叶作为基本算法,有效避免了变换后的时频谱图像出现交叉项等问题,更易于说明图像本身所表示的物理意义。通过 STFT 方法在对反映煤岩截割状态的振动信号进行转换的过程中,需重点考虑窗函数类型^[22]、窗函数的长度 L_t ^[23] 和窗的重叠量 L_n ^[24]。

1)窗函数类型的选取。STFT 变换中包含多种不同的窗函数,其中凯塞窗可通过对 β 参数的选择实现主瓣宽和旁瓣衰减之间的平衡,数学模型为

$$w(n) = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} \left[\left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{n}{L_t/2} \right)^2} \right)^i / i! \right]^2}{\sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{(\beta/2)^i}{i!} \right]^2} \quad (8)$$

式中: L_t 为窗的长度; $-(L_t-1)/2 \leq n \leq (L_t-1)/2$, i 为修正的阶数。当参数 β 的数值越大,主瓣越宽,旁瓣衰减速度越大;当参数 β 的数值越小,主瓣越窄,但其旁瓣衰减速度则减小。

煤岩截割过程中,振动信号的波形并非呈完全稳定状态,当振动信号呈非稳定状态时,需降低 $w(n)$ 窗的长度,主瓣则随之变宽,那么此时为了保持频域分辨率,减少频域的特征的丢失,需降低 β 值,而凯塞窗的旁瓣衰减速度就要随之下降,完成匹配;当振动信号呈较稳定状态时,可选取较大的 $w(n)$ 窗长度,主瓣变窄,此时提高 β 值既可保留频域特征能量,又可获得较好的通道抗干扰能力。因此,采用凯塞窗

平衡煤岩截割状态信号处理中频域特征信息保留与抗干扰性之间的权重。

2)窗长度 L_t 的确定。振动信号转换过程中频域特征信息的保留效果除受窗函数类型的影响之外,窗的长度也对其产生影响,当窗的长度值越大则主瓣越窄,反之会使主瓣的宽度 L_b 增加,降低频域特征效果,其可表示为

$$L_t = \frac{Nf_s}{L_b} \quad (9)$$

式中: N 为主瓣的离散频率大小; f_s 为信号的采样频率, Hz; $L_b \leq \Delta f$, 因此窗长度 L_t 的取值需满足

$$L_t \geq \frac{Nf_s}{\Delta f} \quad (10)$$

式中: $\Delta f = f_{n+1} - f_n$, f_n 和 f_{n+1} 为相连的两个谐频率。

3)窗的重叠量 L_n 。在 STFT 频谱合成过程中,窗重叠量根据恒定重叠约束法构建的数学模型为

$$H_a(n) = \sum_{a=-\infty}^{\infty} w(n-aS) \quad (11)$$

$$L_m = \frac{\max_n [H_a(n)] - \min_n [H_a(n)]}{\max_n [H_a(n)]} \times 100 \quad (12)$$

式中: $H_a(n)$ 为最终的包络; $w(n)$ 为窗; a 为帧索引; S 为步长; L_m 为重叠量的振动幅度偏移量。

综合上述式 (13)—式 (17) 分析,对不同工况下的煤岩截割过程中螺旋滚筒的振动信号进行 STFT 转换,其参数设置见表 5。经过 STFT 分解合并后,得到不同截割状态下大小为 128×128 的螺旋滚筒振动信号二维时频谱图像如图 10 所示。

图 10 中,煤的坚固性系数为 1.4 的全煤工况 (图 10a) 其主频处的能量特征集中分布在 60、210 Hz 处;煤的坚固性系数为 1.4、夹矸的坚固性系数为

表5 STFT变换的参数设置
Table 5 Parameter setting of STFT transform

参数	参数选取
窗类型	凯塞窗
样本长度 L	1 025
窗函数的长度 L_w	256
窗的重叠量 L_o	248

3.5的含一层夹矸工况(图10b)其主频处的能量特征集中分布在50、270 Hz处;煤的坚固性系数为1.4、硬夹矸的坚固性系数为5.1的含一层硬夹矸的工况

(图10c)其主频处的能量特征集中分布在20、520 Hz处;煤的坚固性系数为1.4、夹矸的坚固性系数为3.5、硬夹矸的坚固性系数为5.1的含两层夹矸工况(图10d)其主频处的能量特征集中分布在620 Hz处。由此可知,随着煤和岩的坚固性系数的改变,4种工况下振动信息在周期、振幅等特性方面具有明显不同,STFT将此种差异凸显后集中显示在时频谱的主频处。产生此种差异主要是由于随着煤壁含有夹矸类型以及数量的不同,螺旋滚筒在截割时煤壁硬度发生了改变,螺旋滚筒所受瞬时载荷发生突变,因此滚筒存在明显振动的幅值发生变化,截割稳定性降低,采煤机的工作可靠性降低。

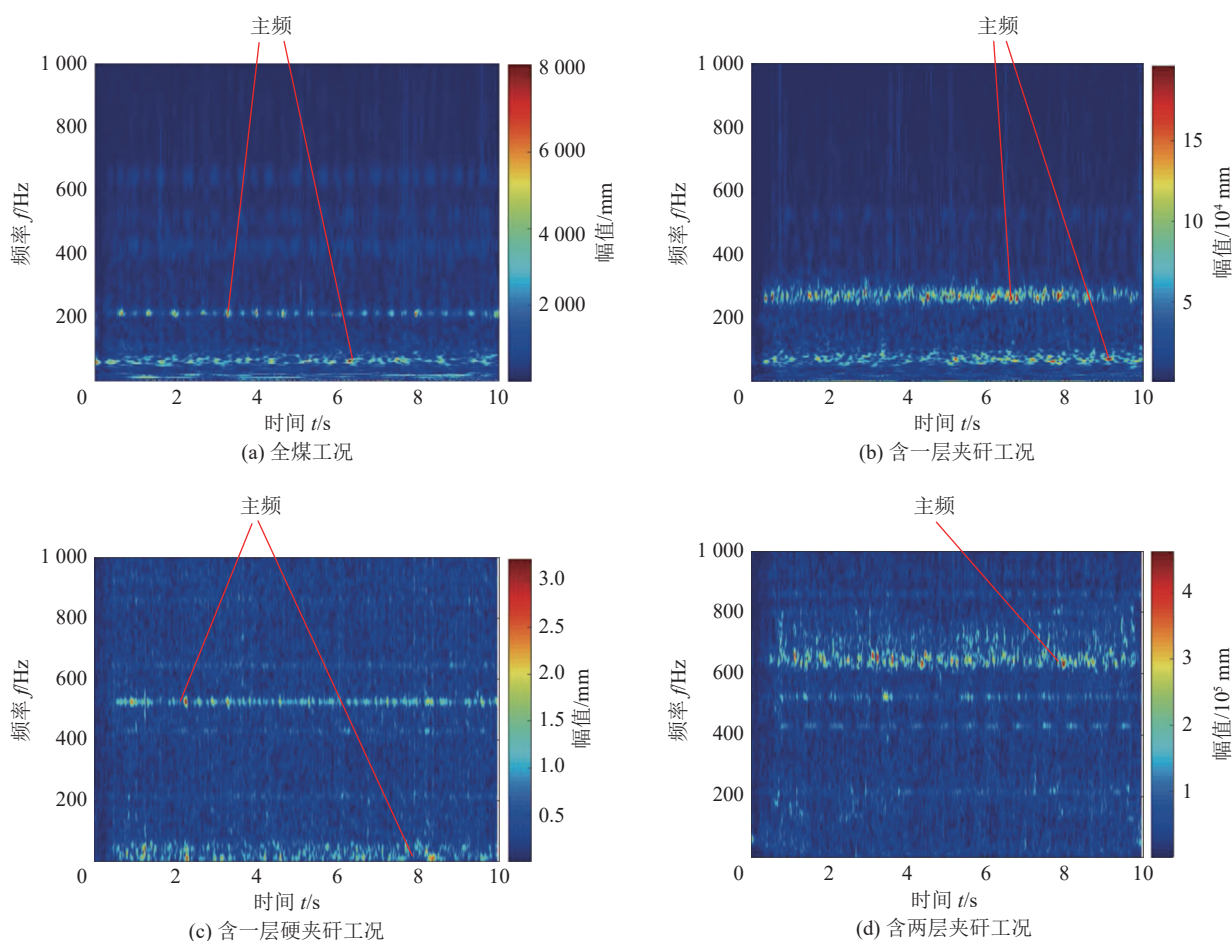


图10 螺旋滚筒振动信号二维时频谱图像

Fig.10 Time-spectrum image of vibration information of spiral drum

2.3 螺旋滚筒模态振型分析

为了进一步全面分析螺旋滚筒的振动特性,通过模态分析模块结合螺旋滚筒模型属性,计算得到其各阶模态频率及相应振型特征,见表6。由表6可知,截割全煤工况过程中,螺旋滚筒1~10阶固有频率变化范围为10.41~70.16 Hz,最大变形量为9.7 mm,最小变形量为3.1 mm;截割含一层夹矸、含

一层硬夹矸、含两层夹矸工况过程中,螺旋滚筒1~10阶固有频率变化范围分别为12.46~73.94, 13.87~75.78, 14.14~77.71 Hz,最大变形量分别为10.1、11.2、11.7 mm,最小变形量分别为4.1、4.6、4.9 mm。4种不同工况下,螺旋滚筒各阶模态振型存在相似规律,分别提取4种煤岩工况的第8阶模态振型,如图11所示。第8阶模态振型特征主要显现

表 6 各阶模态频率及相应振型特征
Table 6 Modal frequency of each order and corresponding vibration mode characteristics

阶数	全煤工况		含一层夹矸工况		含一层硬夹矸工况		含两层夹矸工况		振型特征
	频率/Hz	变形/mm	频率/Hz	变形/mm	频率/Hz	变形/mm	频率/Hz	变形/mm	
1	10.41	3.1	12.46	4.1	13.86	4.6	14.39	4.9	端盘扩张变形
2	21.97	4.6	27.94	4.7	29.65	5.3	30.12	5.7	端盘扩张变形
3	29.13	5.1	35.21	6.2	37.82	6.6	39.64	6.9	端盘扭转变形
4	31.26	9.7	46.89	10.1	50.97	11.2	54.63	11.7	螺旋叶片振动强烈, 叶片发生扭转偏移和变形
5	42.65	6.1	49.13	8.9	55.13	9.1	61.22	10.3	螺旋叶片、截齿发生变形
6	53.17	4.7	65.17	5.6	69.71	6.3	70.15	7.2	螺旋叶片、截齿发生变形
7	62.18	5.2	70.46	5.9	72.04	6.1	73.89	6.8	整个滚筒发生组合变形,且8,9阶的振动程度有所降低
8	63.43	3.6	71.13	4.2	73.21	5.7	75.71	6.2	整个滚筒发生组合变形,且8,9阶的振动程度有所降低
9	65.74	3.4	72.69	5.1	74.11	5.4	76.33	5.3	整个滚筒发生组合变形,且8,9阶的振动程度有所降低
10	70.16	6.8	73.93	7.7	75.77	7.9	77.71	8.1	端盘扭转变形

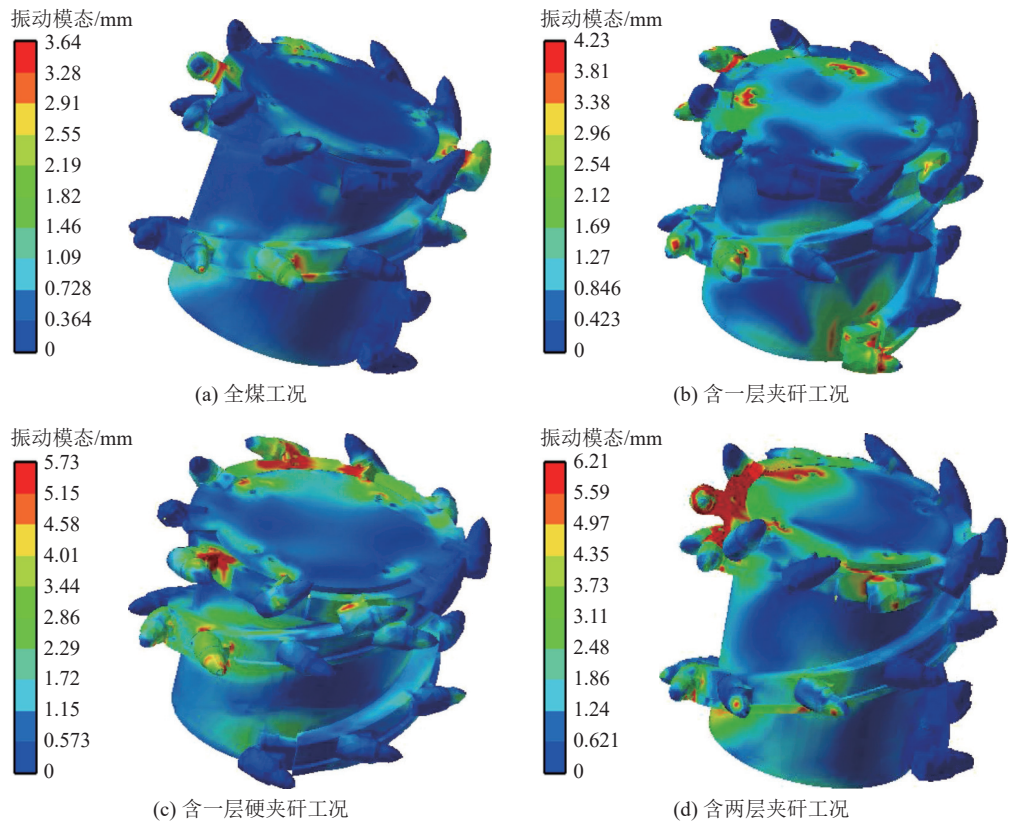


图 11 不同煤岩工况下螺旋滚筒第 8 阶振动模态

Fig.11 8th order vibration mode of spiral drum under different the coal and rock conditions

为整个螺旋滚筒组合变形, 变形的位 置主要集中在截齿部位, 截齿与叶片、端盘 焊合处出现明显变形量, 齿尖部分变形最大、 振动最为强烈, 叶片与筒毂焊合处的变形量相 对较小、振动较为平稳。随着煤壁中含有夹矸 硬度的增加, 各部位的变形量均发生变化, 其中 截齿部位变化最为强烈。煤壁硬度的变化引发的 螺旋滚筒振动变形会导致截齿磨损, 严重甚至脱

落, 影响螺旋滚筒的生产效率; 叶片发生的变形会 使其装煤作用减弱, 严重会加剧磨损直接致使螺旋 滚筒的装煤率大大降低, 影响采煤机的工作性能。

3 基于相似理论的采煤机振动信号测试试验

为测试上述研究方法、研究结果的正确性, 在大 型工矿装备重点实验室对采煤机螺旋滚筒的截割过

程开展试验测试。基于实验室原有的采掘设备改造现有采煤机截割煤岩试验平台。

3.1 基于相似理论的拟实煤岩壁、滚筒构建方法

3.1.1 量纲分析

为使采煤机截割煤岩试验平台能够准确模拟采煤机原型的实际截割过程、与仿真试验参数相匹配,需保证相似采煤机模型与原型结构几何相似、运动学参数相似、截割性能参数相似,煤壁与天然煤岩的物理力学性质相似。因此在相似准则推导中,需同时考虑到采煤机结构参数及运动学参数、煤壁物理力学性质参数。基于此,选取滚筒直径、滚筒转速、牵引速度、力、力矩、截割功率、振动加速度、密度、强度作为相似参数。运用 MLT(质量系统)量纲分析法,根据夹矸煤岩各项参数,建立夹矸煤岩的各项参数量纲,见表 7。

表 7 参数量纲			
Table 7 Parameter dimension			
参数	<i>M</i>	<i>L</i>	<i>T</i>
滚筒直径 <i>D</i> /mm	0	1	0
滚筒转速 <i>n</i> /(r·min ⁻¹)	0	0	-1
牵引速度 <i>v_q</i> /(m·min ⁻¹)	0	1	-1
密度 <i>ρ</i> /(kg·m ⁻³)	1	-3	0
强度 <i>σ</i> /MPa	1	-1	-2
滚筒作用力 <i>F</i> /N	1	1	-2
力矩 <i>T</i> /(N·m)	1	2	-2
截割功率 <i>P</i> /kW	1	2	-3
振动加速度 <i>a</i> /(mm·s ⁻²)	0	1	-2

依据相似第 2 定理,π 法则(相似准则)的数目等于相似系统中所有物理量个数之和减去基本量纲的参数个数,因此相似准则数目为 6 个。根据质量量

表 8 量纲矩阵指数
Table 8 Dimensional matrix index

参数	指数	<i>M</i>	<i>L</i>	<i>T</i>
<i>D</i>	<i>a</i> ₁	0	1	0
<i>n</i>	<i>a</i> ₂	0	0	-1
<i>v_q</i>	<i>a</i> ₃	0	1	-1
<i>ρ</i>	<i>a</i> ₄	1	-3	0
<i>σ</i>	<i>a</i> ₅	1	-1	-2
<i>F</i>	<i>a</i> ₆	1	1	-2
<i>T</i>	<i>a</i> ₇	1	2	-2
<i>P</i>	<i>a</i> ₈	1	2	-3
<i>a</i>	<i>a</i> ₉	0	1	-2

纲系统,以质量 *M*、长度 *L* 和时间 *T* 为基本量进行研究,夹矸煤岩各项参数的指数设置为 *a*₁, *a*₂, *a*₃, ⋯, *a*₉, 列出量纲矩阵见表 8。

根据表 8 中各个量纲指数值,由量纲关系可得到其次线性方程,如式(13)~式(15)所示:

$$M : a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 = 0 \quad (13)$$

$$L : a_1 + a_3 - 3a_4 - a_5 + a_6 + 2a_7 + 2a_8 + a_9 = 0 \quad (14)$$

$$T : a_2 + a_3 + 2a_5 + 2a_6 + 2a_7 + 3a_8 + 2a_9 = 0 \quad (15)$$

建立夹矸煤岩各项参数的 π 矩阵,见表 9。

3.1.2 相似系数确定

相似模型设计中,以长度 *L* 为基准量,设几何相似比 *C_L*=*K*₁=0.5;考虑截割速度 *v_i* 为截齿齿尖线速度,其式为

$$v_j = \frac{\pi D n}{60 \times 1\,000} \quad (16)$$

截割速度 *v_j*=3~4 m/min,抗压强度 *σ*≈10*f*,因此确定相似系数见表 10。

表 9 夹矸煤岩各项参数的 π 矩阵
Table 9 π matrix of various parameters of gangue coal and rock

参数	<i>D</i>	<i>n</i>	<i>v_q</i>	<i>ρ</i>	<i>σ</i>	<i>F</i>	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>a</i>
指数	<i>a</i> ₁	<i>a</i> ₂	<i>a</i> ₃	<i>a</i> ₄	<i>a</i> ₅	<i>a</i> ₆	<i>a</i> ₇	<i>a</i> ₈	<i>a</i> ₉
π ₁	1	0	0	0	0	0	-2	2	1
π ₂	0	1	0	0	0	0	1	-1	0
π ₃	0	0	1	0	0	0	-1	1	-1
π ₄	0	0	0	1	0	0	7	-8	5
π ₅	0	0	0	0	1	0	5	-6	3
π ₆	0	0	0	0	0	1	1	-2	1

表 10 相似系数
Table 10 Similarity coefficient

相似系数	数值
C_n	$K_2=1.2$
C_ρ	$K_3=1$
C_D	K_1
C_v	$K_1 K_2$
C_σ	$K_1^2 K_2^2 K_3$
C_F	$K_1^4 K_2^2 K_3$
C_T	$K_1^5 K_2^2 K_3$
C_P	$K_1^5 K_2^3 K_3$
C_a	$K_1 K_2^2$
C_f	$K_1^2 K_2^2 K_3$

根据相似原理设计的滚筒三维实体模型以及加工出来的实际模型如图 12 所示。按相似比计算出相似含夹矸煤壁(试验用煤壁)对应的原型数值结果,见表 11。将相似模型和原型数值结果进行对比,依据相似理论,得到黏结参数相似反推结果,原型黏结参数和相似模型反推之后的结果误差在允许范围内^[25-27],均小于 3.5%,验证了黏结参数相似准则推导的正确性,即依据相似理论制作煤壁的方法可行,其



图 12 滚筒模型
Fig.12 Drum model

具体制作的过程如图 13 所示。

3.2 采煤机截割煤岩试验平台搭建

煤岩截割综合试验系统主要包括机械、液压、试验台操控、监控系统及传感器、数据传输以及上位机部分,其中试验台机液系统主要由试件夹持装置、截割装置以及泵站等辅助元器件组成,搭建过程如图 14 所示。

3.3 试验方案设计

试验通过对煤壁的分层分段处理设定 4 种与仿真工况一致的煤岩截割状态,见表 12,通过调整螺旋滚筒的位置对不同煤岩工况实施截割试验。为了保持试验系统与虚拟仿真系统的高度一致性,将 DH311E 型三向压电式振动加速度传感器安装在采煤机螺旋滚筒后端,通过信号数据采集处理系统采集其在截割过程中的振动信号,其本次试验的现场测试工作状态如图 15 所示。

表 11 原型和相似模型黏结参数对比验证
Table 11 Comparison and verification of prototype and artificial coal wall model parameters

黏结参数	原型	相似模型	相似反推结果	误差/%
煤~煤法向刚度 $K_n/(N\cdot m^{-3})$	$1.109\ 8\times 10^8$	$5.556\ 6\times 10^7$	$1.085\ 3\times 10^8$	2.21
煤~夹矸法向刚度 $K_n/(N\cdot m^{-3})$	$1.415\ 8\times 10^8$	$7.227\ 7\times 10^7$	$1.411\ 6\times 10^8$	0.30
夹矸~夹矸法向刚度 $K_n/(N\cdot m^{-3})$	$1.954\ 8\times 10^8$	$9.922\ 4\times 10^7$	$1.938\ 0\times 10^8$	0.86
煤~煤切向刚度 $K_s/(N\cdot m^{-3})$	$8.510\ 4\times 10^7$	$4.305\ 2\times 10^7$	$8.409\ 7\times 10^7$	1.18
煤~夹矸切向刚度 $K_s/(N\cdot m^{-3})$	$1.085\ 7\times 10^8$	$5.466\ 8\times 10^7$	$1.067\ 8\times 10^8$	1.65
夹矸~夹矸切向刚度 $K_s/(N\cdot m^{-3})$	$1.498\ 9\times 10^8$	$7.609\ 6\times 10^7$	$1.486\ 3\times 10^8$	0.84
煤~煤法向应力 σ/Pa	$8.001\ 7\times 10^6$	$4.045\ 8\times 10^6$	$7.902\ 2\times 10^6$	1.24
煤~夹矸法向应力 σ/Pa	$1.635\ 6\times 10^7$	$8.087\ 2\times 10^6$	$1.579\ 5\times 10^7$	3.43
夹矸~夹矸法向应力 σ/Pa	$2.537\ 5\times 10^7$	$1.286\ 7\times 10^7$	$2.513\ 1\times 10^7$	0.96
煤~煤切向应力 τ/Pa	$2.223\ 2\times 10^6$	$1.121\ 5\times 10^6$	$2.190\ 5\times 10^6$	1.47
煤~夹矸切向应力 τ/Pa	$7.074\ 3\times 10^6$	$3.592\ 4\times 10^6$	$7.016\ 1\times 10^6$	0.82
夹矸~夹矸切向应力 τ/Pa	$1.253\ 9\times 10^7$	$6.242\ 6\times 10^6$	$1.219\ 3\times 10^7$	2.76



图 13 煤壁制作过程
Fig.13 Coal wall production process

3.4 结果分析

试验前通过采煤机的往复空载运行对其采煤机、工作台的运转、导轨、信号的测试与接收等设备实施检测,确认各系统无误后进入截割试验。试验中,采煤机的牵引速度为 2.417 m/min,螺旋滚筒的转速为 113.57 r/min。试验结束后,其煤壁状态如图 16 所示,通过 DH5922D 型信号测试分析仪获取 DH311E 型三向压电式振动加速度传感器采集到的螺旋滚筒三向振动信号,根据相似比将信号转化处理后绘制为一维时域图,得到相似反推结果曲线如图 17 所示。由图 17 可知,测试螺旋滚筒在截割过程中振动信号呈现明显的非线性变化,其呈现的振动强烈表现为截割阻力方向最大、牵引阻力方向次之、侧向力方向最小,DEM-MFBD 数值模拟方法获取的振动加速度三向之间的仿真结果与此试验实测反推结果相吻合。



图 14 试验系统
Fig.14 Experimental system

表 12 试验工况
Table 12 Experimental conditions

工况编号	工况类型
1	全煤, $f_{\text{coal}}=0.5$ (原型 $f_{\text{coal}}=1.4$)
2	含一层夹矸, $f_{\text{coal}}=0.5, f_{\text{rock}}=1.3$ (原型 $f_{\text{coal}}=1.4, f_{\text{rock}}=3.5$)
3	含一层硬夹矸, $f_{\text{coal}}=0.5, f_{\text{rock}}=1.8$ (原型 $f_{\text{coal}}=1.4, f_{\text{rock}}=5.1$)
4	含两层夹矸, $f_{\text{coal}}=0.5, f_{\text{rock1}}=1.3, f_{\text{rock2}}=1.8$ (原型 $f_{\text{coal}}=1.4, f_{\text{rock1}}=3.5, f_{\text{rock2}}=5.1$)

为了进一步验证 DEM-MFBD 数值模拟方法的准确性,计算统计 4 种不同煤岩截割工况下的螺旋滚筒振动信号,得到测试滚筒三向振动加速度有效



图 15 现场测试
Fig.15 On site testing

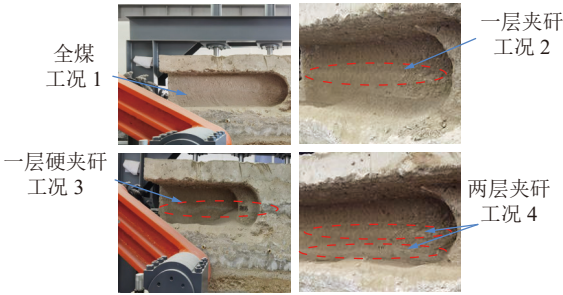


图 16 截割后煤壁状态
Fig.16 Coal wall state after cutting

值见表 13。

由表 13 可知,截割含不同夹矸煤壁时的滚筒振动响应与 DEM-MFBD 数值模拟仿真结果之间存在的误差较小,DEM-MFBD 数值模拟仿真结果与测试反推结果变化规律一致。4 种工况下牵引阻力、侧向力和截割阻力方向加速度误差随着煤岩硬度的增大而出现增加的趋势,其中三向振动加速度最大误差分别为 3.16%、4.89% 和 6.40%。由于仿真煤壁是颗粒黏结形成的均匀煤岩,试验煤壁是由石膏、水泥

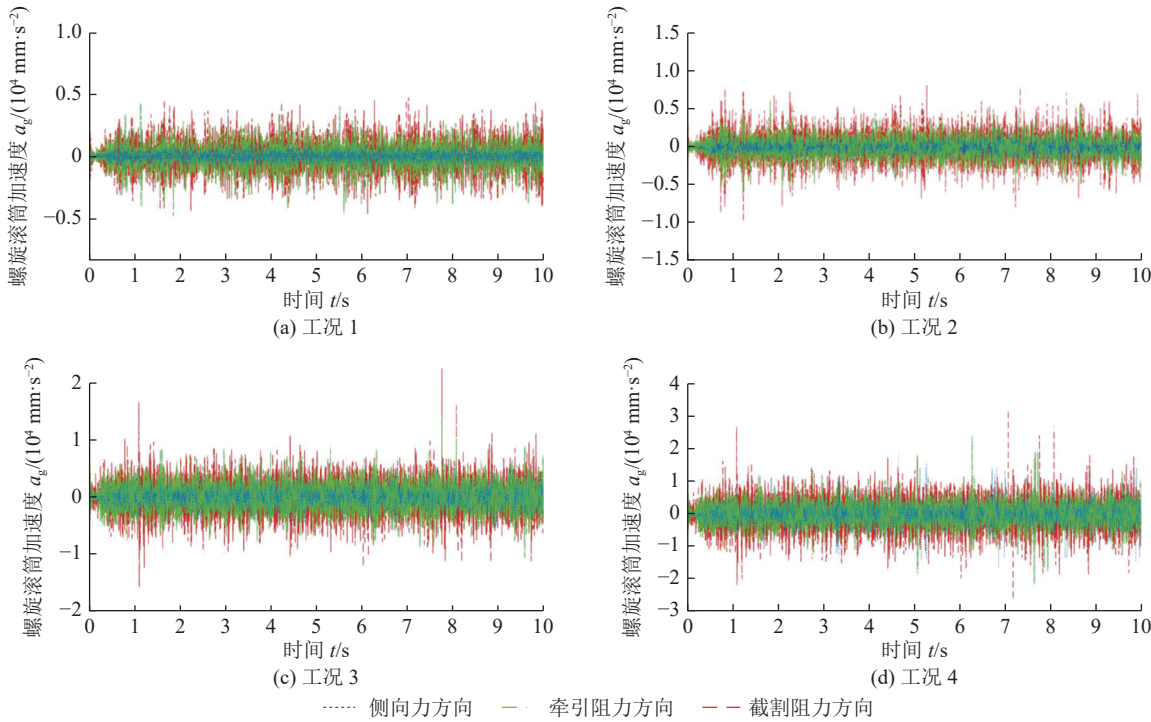


图 17 螺旋滚筒三向振动信号试验反推曲线
Fig.17 Experimental inversion curve of three direction vibration signal of spiral drum

表 13 试验与仿真结果对比

Table 13 Comparison of experimental and simulation results

项目	方向	工况1	工况2	工况3	工况4
试验实测反推结果 三向加速度/(mm·s ⁻²)	牵引阻力方向	2 559.995	3 615.167	5 176.949	7 030.686
	侧向力方向	1 600.499	2 746.684	3 618.532	4 623.396
	截割阻力方向	2 725.102	3 847.082	5 871.696	7 527.186
与DEM-MFBD误差/%	牵引阻力方向	1.09	1.95	2.53	3.16
	侧向力方向	2.28	2.13	3.58	4.89
	截割阻力方向	3.04	4.20	4.08	6.40
与DEM误差/%	牵引阻力方向	7.06	7.81	10.36	12.41
	侧向力方向	7.91	8.34	12.57	12.69
	截割阻力方向	9.27	9.34	12.78	15.72

等原料搅拌制作,因此结果存在不同程度的误差。与此同时,试验装置结构与实际采煤机截割部结构存在差异性,这也是造成不同程度误差的原因。然而,虽然采煤机截割部结构不同,导致振动模态不同,固有频率不同,产生的振动信号不同。但基于虚拟样机的仿真及试验研究均与实际工况一致,无论什么样的结构参数对研究的结果影响不大。DEM数值模拟仿真结果与测试反推结果相差较大,其中三向振动加速度最大误差分别为12.41%、12.69%和15.72%,与DEM-MFBD数值模拟仿真结果误差分别相差73.73%、59.49%、69.81%。4种工况下三向振动加速度DEM-MFBD数值模拟的仿真结果与试验实测反推结果之间的误差均小于DEM离散元数值模拟的仿真结果,因此采用基于双向耦合作用机理的数值模拟方法提取的振动信号更加符合螺旋滚筒实际工作状态。

4 结 论

1) 利用DEM-MFBD数值模拟搭建采煤机截割部与煤壁的双向耦合平台,对采煤机螺旋滚筒的截割过程进行模拟试验,试验结果表明DEM-MFBD仿真下螺旋滚筒载荷平均值与载荷波动系数均比DEM仿真结果有所提升。

2) 截割过程中不同煤岩工况条件下螺旋滚筒所受到的截割阻力和牵引阻力方向的振动明显高于侧向力方向;随着煤壁中夹矸硬度以及层数比例的增加,螺旋滚筒三向的振动信号以及最大振动信号幅值均不断增大,并且其振动变化趋势与载荷变化具有一定的相似性。利用短时傅里叶变换将其转化为二维时频谱图像,结果表明:不同工况下时频谱图像的特征样本效果优于各工况的时域一维信号曲线,主频能量位置、范围大小、特征团形状等信息具有明显区别。通过不同煤岩工况条件下的螺旋滚筒模态分析得到螺旋滚筒的变形量随煤壁中含夹矸种类的不同发生变化,其中截齿部位变化最为强烈。

3) 试验结果表明:4种不同煤岩工况下,DEM-MFBD数值模拟结果与试验实测反推滚筒截割阻力方向振动信号最大误差分别为3.04%、4.20%、4.08%、6.40%;DEM数值模拟结果误差分别为9.27%、9.34%、12.78%、15.72%。DEM-MFBD数值模拟方法更能准确获取螺旋滚筒截割过程中的振动特征,为煤岩截割状态识别系统数据信号的获取提供了一种新的方法。同时利用DEM-MFBD双向耦合作用机理能够有效地反映出采煤机实

际工作状态,为螺旋滚筒的强度以及可靠性分析提供了新平台。

参考文献(References):

- [1] 赵丽娟,范佳艺,罗贵恒,等.采煤机螺旋滚筒振动可靠性分析[J].振动工程学报,2020,33(1):82-87.
ZHAO Lijuan, FAN Jiayi, LUO Guiheng, *et al.* Vibration reliability analysis of shearer's spiral drum[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(1): 82-87.
- [2] 田震,荆双喜,赵丽娟,等.薄煤层采煤机螺旋滚筒截割性能研究[J].河南理工大学学报,2020,39(2):80-84,109.
TIAN Zhen, JING Shuangxi, ZHAO Lijuan, *et al.* Research on cutting performance of spiral drum of thin coal seam shearer[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2020, 39(2): 80-84,109.
- [3] 赵丽娟,王雅东,王斌.含夹矸煤层条件下采煤机螺旋滚筒工作性能分析与预测[J].中国机械工程,2021,32(8):976-986.
ZHAO Lijuan, WANG Yadong, WANG Bin. Analysis and prediction of working performance of shearer spiral drums under coal seam with gangue[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(8): 976-986.
- [4] 赵丽娟,王雅东,张美晨,等.复杂煤层条件下采煤机自适应截割控制策略[J].煤炭学报,2022,47(1):541-563.
ZHAO Lijuan, WANG Yadong, ZHANG Meichen, *et al.* Research on self-adaptive cutting control strategy of shearer in complex coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 541-563.
- [5] 王雅东,赵丽娟,张美晨.采煤机自适应调高控制策略[J].煤炭学报,2022,47(9):3505-3522.
WANG Yadong, ZHAO Lijuan, ZHANG Meichen. Research on self-adaptive height adjustment control strategy of shearer[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3505-3522.
- [6] 辛红宝,杨忠印.不同齿座安装角度的螺旋滚筒端盘模态分析[J].机械工程与自动化,2018,1(2):105-107.
XIN Hongbao, YANG Zhongyin. Modal analysis on screw drum end plate in different tooth holder mounting angles[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2018, 1(2): 105-107.
- [7] 田震,高珊,李晋,等.采煤机振动特性研究[J].制造业自动化,2019,41(4):30-35.
TIAN Zhen, GAO Shan, LI Jin, *et al.* Study on vibration characteristics of shearer[J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(4): 30-35.
- [8] 杨琳琳,张闯.螺旋滚筒的非线性动态特性分析[J].中国重型装备,2013,19(2):37-39.
YANG Linlin, ZHANG Chuang. Analysis on nonlinear vibration of spiral drum in operation[J]. China Heavy Equipment, 2013, 19(2): 37-39.
- [9] 王海舰.煤岩界面多信息融合识别理论与实验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2017:57-59.
WANG Haijian. Theoretical and experimental study on coal-rock interface identification based on multi information fusion[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017: 57-59.
- [10] 陈洪月,杨辛未,毛君,等.滚筒实验载荷采煤机斜切工况下振动特性分析[J].振动测试与诊断,2018,38(2):240-247,414.

- CHEN Hongyue, YANG Xinwei, MAO Jun, *et al.* Vibration characteristics analysis of shearer under oblique cut on drum test load[J]. *Vibration test and diagnosis*, 2018, 38(2): 240–247, 414.
- [11] 赵丽娟, 杨世杰, 张海宁, 等. 基于 DEM-MFBD 双向耦合技术的采煤机摇臂壳体疲劳寿命预测 [J/OL]. *煤炭科学技术*: 1–7[2024-03-29]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1908>.
- ZHAO Lijuan, YANG Shijie, ZHANG Haining, *et al.* Fatigue life prediction of shearer rocker shell based on DEM–MFBD bidirectional coupling technology[J/OL]. *Coal Science and Technology*, 1–7[2024-03-29]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1908>.
- [12] 金鑫. 采煤机螺旋滚筒截割含夹矸煤岩双向耦合作用机理及磨损特性研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020: 42–51.
- JIN Xin. Study on the two-way coupling mechanism and wear characteristics of shearer drum cutting coal-rock with gangue[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020: 42–51.
- [13] ZHAO Lijuan, ZHANG Meichen, JIN Xin. Construction and application of a high precision 3D simulation model for geomechanics of the complex coal seam[J]. *Scientific reports*, 2021, 11(10): 21374–21387.
- [14] 张强, 刘伟, 张润鑫, 等. 分离式螺旋钻具截割与输送协同优化研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(11): 179–189.
- ZHANG Qiang, LIU Wei, ZHANG Runxin, *et al.* Research on collaborative optimization of cutting and conveying of separated auger drill[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(11): 179–189.
- [15] 李曼, 郑思雨, 刘浩东, 等. 采煤机滚筒高度测量传感器工作环境磁场仿真与屏蔽研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(8): 204–209.
- LI Man, ZHENG Siyu, LIU Haodong, *et al.* Study on magnetic field simulation and shielding design of shearer drum height measurement sensor working environment [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 204–209.
- [16] 李明昊, 赵丽娟, 乔捷. 薄煤层采煤机截割部齿轮疲劳可靠性分析[J]. *山西焦煤科技*, 2022, 46(3): 10–13.
- LI Minghao, ZHAO Lijuan, QIAO Jie. Fatigue reliability analysis of gears in cutting section of shearer for thin coal seam[J]. *Shanxi Coking Coal Science & Technology*, 2022, 46(3): 10–13.
- [17] TIAN Xinhao. Dynamic simulation for system response of gearbox including localized gear faults[D]. Canada Alberta: University of Alberta, 2004: 33–41.
- [18] 张振, 陈春俊, 孙琦. 双齿根裂纹下的齿轮啮合刚度劣化特性研究[J]. *中国测试*, 2020, 46(5): 127–133.
- ZHANG Zhen, CHEN Chunjun, SUN Qi. Research on gear stiffness degradation characteristics of gear with double root cracks[J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(5): 127–133.
- [19] 曹东江, 尚鹏, 赵阳. 基于 Matlab 的渐开线变位直齿轮时变啮合刚度计算分析[J]. *机械传动*, 2022, 46(5): 100–107.
- CAO Dongjing, SHANG Peng, ZHAO Yang. Calculation and analysis of modified gear time-varying meshing stiffness based on matlab[J]. *Mechanical drive*, 2022, 46(5): 100–107.
- [20] 汪峰, 李春清, 刘章军, 等. 考虑附加刚度的黏滞阻尼器-斜拉索参数振动模型及控制分析[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(22): 183–191.
- WANG Feng, LI Chunqing, LIU Zhangjun, *et al.* Parametric vibration model for a viscous damper-cable system considering the effect of additional stiffness[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(22): 183–191.
- [21] 张美晨, 赵丽娟, 王雅东. 基于 CPS 感知分析的煤岩截割状态识别系统[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(12): 4071–4087.
- ZHANG Meichen, ZHAO Lijuan, WANG Yadong. Recognition system of coal-rock cutting state based on CPS perception analysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 4071–4087.
- [22] 谢玲芳, 孟令军. 基于 Zynq 的振动信号采集及频谱分析[J]. *仪表技术与传感器*, 2020, 23(11): 116–119, 126.
- XIE Lingfang, MENG Lingjun. Vibration signal acquisition and spectrum analysis based on Zynq[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020, 23(11): 116–119, 126.
- [23] 同晓荣. 基于短时傅里叶时频分析的声信号盲分选仿真系统研究[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(2): 353–359.
- TONG Xiaorong. Blind separation simulation system of sound signals based on time-frequency analysis of short time fourier transformation[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(2): 353–359.
- [24] 万显荣, 谢德强, 易建新, 等. 基于 STFT 谱图滑窗相消的微弱杂波去除方法[J]. *雷达学报*, 2022, 11(5): 794–804.
- WAN Xianrong, XIE Deqiang, YI Jianxin, *et al.* Microdoppler clutter removal method based on the cancelation of sliding STFT spectrogram[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(5): 794–804.
- [25] 文立望, 郭金星, 任航, 等. 基于相似理论的采煤机滚筒截割煤岩仿真分析[J]. *煤矿机械*, 2019, 40(9): 81–84.
- WEN Likun, GUO Jinxin, REN Hang, *et al.* Simulation analysis of coal rock cutting by shearer drum based on similarity theory[J]. *Coal Mine Machinery*, 2019, 40(9): 81–84.
- [26] 赵丽娟, 范思民, 刘晓东. 基于相似理论的采煤机调高机构优化设计[J]. *机械设计*, 2017, 34(5): 94–98.
- ZHAO Lijuan, FAN Simin, LIU Xiaodong. Optimization design of coal mining height-regulating mechanism based on similarity theory[J]. *Machine design*, 2017, 34(5): 94–98.
- [27] 赵丽娟, 赵名扬. 相似理论在采煤机螺旋滚筒结构设计中的应用[J]. *机械科学与技术*, 2018, 37(1): 63–69.
- ZHAO Lijuan, ZHAO Mingyang. Similarity theory application in structure design of shearer drum[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2018, 37(1): 63–69.