

复杂夹矸煤层三维孪生模型的构建与修正

张美晨 赵丽娟 王雅东 张凯

引用本文:

张美晨, 赵丽娟, 王雅东, 等. 复杂夹矸煤层三维孪生模型的构建与修正[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 40–53.

ZHANG Meichen, ZHAO Lijuan, WANG Yadong, et al. Construction and correction of a 3D digital twin for a complex gangue-bearing coal seam[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(12): 40–53.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.09.0568>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑煤厚煤质变异性煤层价值模型构建与应用

Construction and engineering applications of block model for coal seam value considering the variations in coal seam thickness and quality

煤田地质与勘探. 2023, 51(7): 72–79 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.12.0991>

采掘工作面地质信息数字孪生技术

Digital twin technology of geological information in mining and excavation working face

煤田地质与勘探. 2022, 50(11): 174–186 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.04.0225>

智能开采工作面三维地质模型构建及误差分析

3D geological model construction and error analysis of intelligent mining working face

煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 93–101,109 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.012>

西山煤田岩矿标本精细化三维建模及其虚拟仿真平台建设

Refined 3D modeling of rock and mine specimens in Xishan Coalfield and its virtual simulation platform construction

煤田地质与勘探. 2022, 50(4): 70–76 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.08.0458>

基于数字孪生的智能钻探服务平台架构

Architecture of intelligent service platform for drilling based on digital twin

煤田地质与勘探. 2023, 51(9): 129–137 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.04.0179>

数字孪生驱动的掘锚设备跟踪定位与碰撞检测方法研究

Research on digital twin-driven tracking, positioning and collision detection method of excavating and anchoring equipment

煤田地质与勘探. 2024, 52(5): 160–173 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.02.0097>



移动阅读

张美晨, 赵丽娟, 王雅东, 等. 复杂夹矸煤层三维孪生模型的构建与修正[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 40–53. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.09.0568

ZHANG Meichen, ZHAO Lijuan, WANG Yadong, et al. Construction and correction of a 3D digital twin for a complex gangue-bearing coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 40–53. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.09.0568

复杂夹矸煤层三维孪生模型的构建与修正

张美晨^{1,2}, 赵丽娟¹, 王雅东¹, 张凯²

(1. 矿山液压技术与装备国家地方联合工程研究中心(辽宁工程技术大学), 辽宁 阜新 123000;
2. 常熟理工学院 机械工程学院, 江苏 苏州 215500)

摘要: 【目的】复杂夹矸三维孪生煤层要实现对物理煤层的信息化描述, 真实映射物理煤层的虚拟形态, 构建模型是研究智能化采煤机高效截割的必要前提, 同时也为实现“无人化”开采提供有效的数据保障。【方法】以山东兖矿能源集团股份有限公司 17 层工作面采样数据为基础, 研究了融合更多煤层地质结构条件信息的方法。采用不规则颗粒建模技术, 孪生硫化铁结核; 优化煤岩层颗粒填充技术; 建立自定义接触模型模拟煤岩颗粒表面的粗糙度。以所构建的煤层三维孪生初始静态模型为基础, 完成煤层应用插件的编译, 根据地质特征为煤岩颗粒及结构体添加新属性实现孪生模型结构的修正; 开展采煤机截割实验验证孪生模型的可行性。【结果和结论】结果显示: (1) 实现了硫化铁结核、断层、顶底板构造的添加, 完成煤层工作面三维孪生初始静态模型构建。(2) 获得了可实现修正替换颗粒集的动态复杂夹矸煤层三维孪生模型。(3) 采煤机截割实验的开展验证了其物理性能与实际煤岩的接近程度, 截割复杂夹矸煤层三维孪生模型过程滚筒受载与实际煤岩之间的误差更小。(4) 该模型在煤岩截割双向耦合试验中投入应用后, 其优化后的重构煤层工作面三维孪生模型真实地反映了工作面煤层的形态, 具有修正替换颗粒集功能的动态复杂夹矸煤层三维孪生模型可更准确快速地表达真实工作面的各种地质结构信息, 提升煤岩截割数据信息获取的有效性。

关 键 词: 三维孪生模型; 颗粒集的修正替换; 虚拟映射; 煤岩截割信息; 离散元; 复杂夹矸煤层

中图分类号: TD421 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)12-0040-14

Construction and correction of a 3D digital twin for a complex gangue-bearing coal seam

ZHANG Meichen^{1,2}, ZHAO Lijuan¹, WANG Yadong¹, ZHANG Kai²

(1. Mining Hydraulic Technology and Equipment Engineering Research Center, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;
2. School of Mechanical Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou 215500, China)

Abstract: [Objective] 3D digital twin for complex gangue-bearing coal seams are designed to achieve an information-based description of physical coal seams and faithfully map their virtual forms. digital twin is identified as a prerequisite for exploring the efficient cutting of intelligent shearers while providing an effective data guarantee for achieving unmanned mining. [Methods] Using data on samples from the mining face of coal seam 17 in the Yankuang Energy Group Co., Ltd. Shandong Province, this study proposed a methodology that integrates more information about the geological structural conditions of coal seams. Specifically, digital twining of iron sulfide nodules was performed using the irregular particle modeling technology, the coal-rock particle filling technology for coals was optimized, and the surface roughness of coal-rock particles was simulated using a user-defined contact model. Based on the constructed initial static 3D digital twin for a coal seam, this study compiled the application plugin for coal seams and added new attributes to coal-rock particles and structures according to geological characteristics, thus correcting the digital twin structure. The feasibility of the digital twin was verified using the cutting experiment with a shearer. [Results and Conclusions] The

收稿日期: 2024-09-09; 接收日期: 2024-11-01

基金项目: 矿山液压技术与装备国家地方联合工程研究中心重点项目(MHTE23-R02); 国家自然科学基金项目(51674134); 教育部科技发展中心“数启科教 智见未来”产教联合基金项目(2018A04025); 博士科研启动基金项目(KYZ2022052Q)

第一作者: 张美晨, 1992 年生, 女, 辽宁朝阳人, 博士, 讲师。E-mail: 1183478444@qq.com

© Editorial Office of *Coal Geology & Exploration*. OA under CC BY-NC-ND

results indicate that the initial static 3D digital twin for the coal-seam mining face was constructed by adding iron sulfide nodules, faults, and coal seam roofs and floors. The dynamic 3D digital twin for a complex gangue-bearing coal seam was established, enabling the correction and replacement of the particle set. The cutting experiment with a shearer demonstrates the similarity of physical properties between the modeled coal seam and actual coals and rocks, yielding minor errors in drum load during coal-rock cutting between the 3D digital twin for a complex gangue-bearing coal seam and actual coals and rocks. The 3D digital twin was applied to the bidirectional coupling test of coal-rock cutting, demonstrating that the optimized, reconstructed 3D digital twin for coal-seam mining face faithfully reflected the coal seam morphology of the mining face. The dynamic 3D digital twin for a complex gangue-bearing coal seam, allowing for the correction and replacement of the particle set, can reflect the information about various geological structures in actual mining face more accurately and rapidly, enabling more effective acquisition of coal-rock cutting information.

Keywords: 3D digital twin; correction and replacement of a particle set; virtual mapping; coal-rock cutting information; discrete element; complex gangue-bearing coal seam

煤矿智能化和煤炭产业数字化转型是行业高质量发展的必由之路^[1], 实现煤矿开采的“无人化”是现阶段国内外煤炭开采领域共同追求的前沿技术^[2-3], 而保证采煤机智能高效的截割则是“无人化”最终要达到的目的。采煤机智能高效截割、破落夹矸煤岩是一个复杂的^[4], 具有非平衡、非线性、时变性和强耦合特点的演化过程, 是多因素耦合作用的结果, 其中被截割煤岩的赋存条件、螺旋滚筒与煤岩相互作用关系等都会直接或间接地影响采煤机的截割、破碎过程及其动力传递规律, 进而影响采煤机的动力学行为, 使得采煤机的智能化设计依据难以量化, 识别煤层与决策控制理论尚不完善, 动态可靠性较差。因此, 基于矿区实际地质条件与煤岩参数, 依托离散单元法, 构建复杂夹矸煤层三维孪生模型, 对于研究螺旋滚筒截割时与煤岩相互作用机理及动力传递规律, 形成结构进化的螺旋滚筒设计理论具有重要价值, 同时可为智能化采煤机截割状态的精准识别与决策控制的实现奠定基础。

近年来诸多学者结合煤矿勘测资料, 通过三维建模技术构建煤层模型, 结合算法优化煤层表面精度^[5-7]。利用状态空间矩阵方法, 基于数字孪生概念, 模拟开采地质结构, 为智能化开采领域煤层三维模型的构建提供了系统框架^[8-10]。复杂夹矸煤层三维孪生模型要实现物理煤层信息化描述, 真实映射物理煤层的虚拟形态, 并通过采煤机截割复杂夹矸煤层的动态过程, 来获取采煤机截割状态的有效信息。因此, 复杂夹矸煤层三维孪生模型的构建是保障实现“无人化”开采的前提条件, 同时也是研究智能化采煤安全高效截割的数据保障之一。但仿真孪生过程中简化的煤层工作面三维模型不能真实地反映其复杂夹矸煤层结构复杂多变的赋存条件, 忽略断层等地质构造, 造成煤层状态信息的反馈存在较大误差, 间接致使智能化采煤机的截割状态精准识别与决策控制的实现陷入瓶颈^[11]。

在前人研究的基础上详尽分析矿区煤层赋存条件,

通过离散单元法的二次开发将硫化铁结核、断层、顶底板的构造添加至煤层三维模型的孪生过程中, 提高其构造的准确度, 即首先利用 UDF(user-defined functions) 法孪生硫化铁结核模型; 自定义颗粒工厂, 优化煤岩层颗粒填充技术, 实现颗粒材料随机多样化; 自定义接触模型, 在颗粒之间添加抗转动因素, 模拟煤岩颗粒表面的凹凸不平, 使其更加接近真实煤岩状态。同时编译煤层外部应用插件, 完成对复杂夹矸煤层三维孪生初始静态模型替换修正, 为采煤机“无人化”开采过程中煤岩截割状态识别提供高效率高准确性的基础数据样本。

1 复杂夹矸煤层三维孪生模型构建的整体方案

1.1 不准确性影响因素

复杂夹矸煤层工作面三维孪生模型是利用矿区真实煤岩的赋存条件以及煤岩物理力学性能等参数建立一个反映煤层结构特征和分布状态的虚拟模型^[12-13], 其构建的准确性是研究采煤机“无人化”开采过程中数据有效反馈的关键影响因素。近年来随着数字矿山等概念的提出, 对煤层客观实体近似再现等问题受到越来越多的关注^[14-15]。然而, 煤层模型孪生过程中, 易受到煤层结构复杂多变、建模数据准确度差以及主观理想化煤岩体存在状态等多方面因素的影响, 导致其模型在一定程度上与实际煤层之间存在不可避免的偏差, 这些偏差会造成无效数据反馈使得智能化采煤机煤岩截割状态等研究受阻^[16]。

复杂夹矸煤层工作面三维孪生模型构建的不准确性主要表现为:(1)在分析煤层基础资料时, 受建模人员对资料分析主观性的影响, 简化煤层工作面的地质构造, 导致孪生模型与煤层原始信息不一致。(2)不同的建模方法在构建煤层结构模型与属性模型过程中, 受自身方法局限性影响会导致模型的不准确性。(3)其构建煤岩体接触形式算法的局限性会影响虚拟的煤岩形态与实际存在差异。(4)不同的建模软件受使用标准的影响会

造成其模型的不准确性。

离散元法将不连续体看作具有一定形状和质量的刚性颗粒单元的集合,通过各个单元的运动和相互位置来描述整个系统的演化过程,其内部可存在大位移、旋转和滑动乃至块体的分离,可以较真实地模拟节理岩体中的非线性大变形特征。因此,基于以上煤层工作面三维孪生模型不准确性分析以及离散元技术优势,以实验室原形成的简化煤层工作面三维模型为基础^[17-18],开发提升建模准确度的应用程序,利用开采探测的最新数据,形成可更准确表达实际工作面结构信息的初始静态煤

层孪生模型,与此同时,在初始模型的基础上完成颗粒集的修正替换,为智能化采煤机的动力学行为分析、可靠性分析等提供高精度与高效率的数据样本。

1.2 方案设计

煤层工作面三维孪生模型基于离散单元法构建,但离散元 EDEM 中存在的自身颗粒模型较为理想与实际的煤岩介质相差较大,因此借助 Application Program Interface^[19-21],根据煤层工作面的赋存条件,编写应用插件,开发煤岩颗粒填充模型、接触模型、修正替换模型等。其整体方案如图 1 所示。

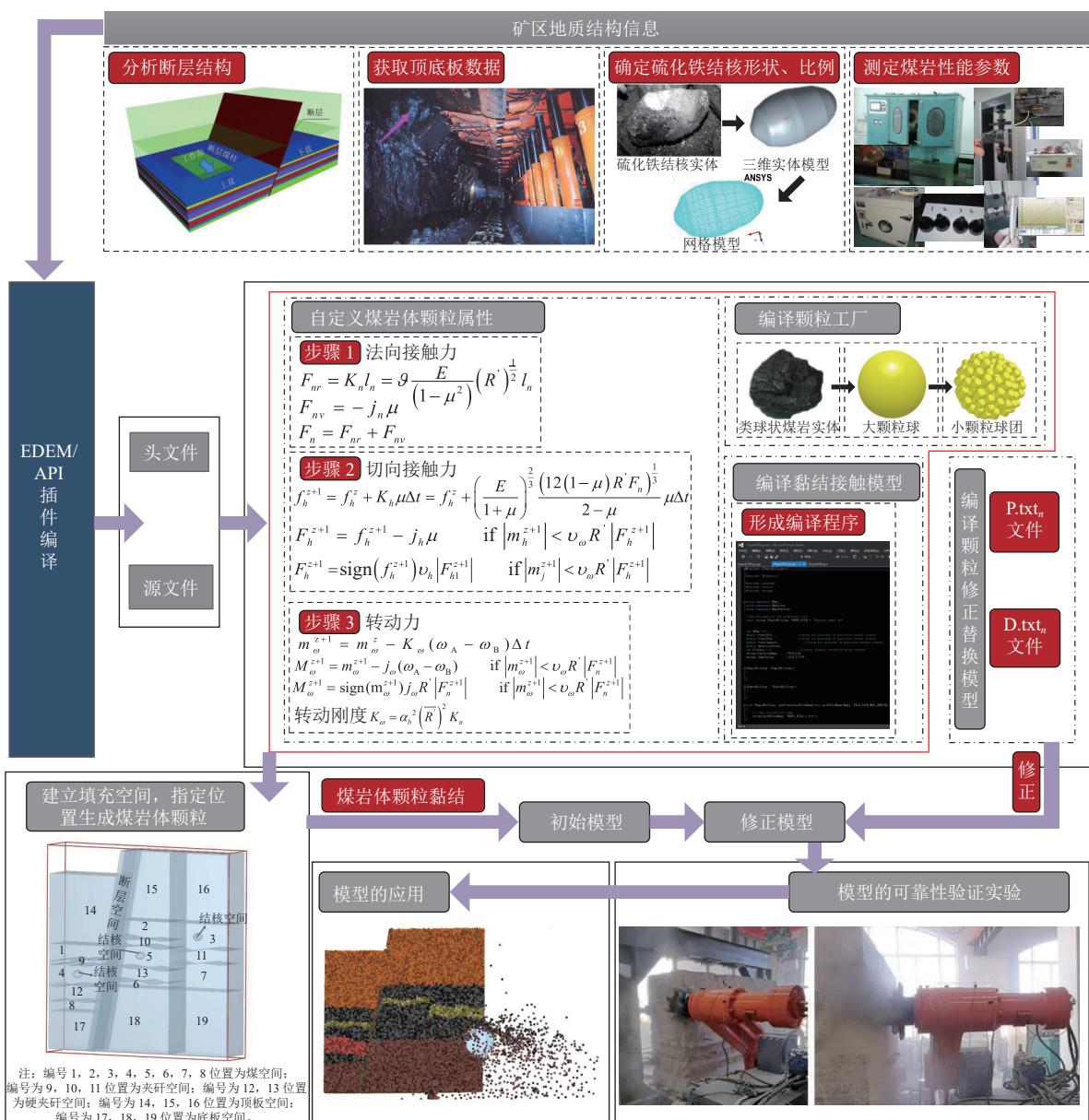


图 1 复杂夹矸煤层三维孪生模型构建整体方案

Fig.1 Overall solution for constructing a 3D digital twin for a complex gangue-bearing coal seam

(1) EDEM/API 插件的编译。编译源文件与库文件,将库文件添加到指定文件夹下,通过 Option-File Locations 进行设置修改,实现对插件的读取。

(2) 开发设计颗粒填充模型。获取煤岩体颗粒参数信息,编译颗粒工厂插件。插件文件中包含颗粒球数量、尺寸、位置和时间以及颗粒的初始运动信息。对于构

建不同材料参数的颗粒模型并使其按照指定的位置、数量、大小、速度、角速度生成颗粒集合体其预置文件中参数的确定是关键。

(3) 开发设计黏结接触模型。通过添加 EDEM 头文件及源文件建立黏结颗粒模型插件 Bonded Particle Model.dll 和一个可编辑的预置文件 Bonded_Particle_Model.txt。将抗转动模型编译到插件 Bonded Particle Model.dll 中, 增加煤岩体颗粒接触的精确度。

(4) 开发设计颗粒修正替换模型。通过编译 EDEM 外部 P.txt_n、D.txt_n 和 PR.dll 文件实现煤层结构替换修正。P.txt_n 和 D.txt_n 记录被替换结构颗粒与替换后结构颗粒的名称、数量、坐标位置以及实现替换的节点时间, 是替换结构的颗粒工厂信息文件; PR.dll 文件为 EDEM/API 中实现颗粒替换功能的扩展库, 形式为动态, 可根据孪生时间点赋予的指令调用颗粒工厂文件信息, 完成结构之间的替换修正。

2 初始静态模型构建的关键技术

2.1 不规则颗粒硫化铁结核的孪生

2.1.1 硫化铁结核孪生过程

硫化铁结核外形近似椭圆, 表面凹凸不平, 呈现不规则性, 采用不规则颗粒建模技术可较好地实现对硫化铁结核外形的刻画。其不规则颗粒孪生过程具体步骤为:

(1) 对不规则颗粒硫化铁结核三维模型划分网格, 对外部离散点坐标数据进行处理: 利用函数 GetMinD() 首先计算外部离散点集沿 X、Y、Z 轴的跨度, 即:

$$\begin{cases} X_{\max} - X_{\min} \\ Y_{\max} - Y_{\min} \\ Z_{\max} - Z_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

其次通过对比筛选得到点集的最长轴跨度, 以最长轴中值为分界点将所有点集划分成两个新的点集。设点集分割后剩余的长度、宽度、高度分别为 r_l、r_w、r_h, 即:

$$\begin{cases} r_l = l_{\text{node}} - l \\ r_w = w_{\text{node}} - w \\ r_h = h_{\text{node}} - h \end{cases} \quad (2)$$

若 r_h < r_w, 且 r_h < r_l, 则新生成的点集空间可由下式表示为:

$$\begin{aligned} L &= \{x_{\text{node}}, y_{\text{node}}, z_{\text{node}}, r_l, w_{\text{node}}, h_{\text{node}}\} \\ S &= \{x_{\text{node}} + l, y_{\text{node}}, z_{\text{node}} + h, r_l, w_{\text{node}}, r_h\} \\ H &= \{x_{\text{node}} + l, y_{\text{node}}, z_{\text{node}} + h, l_{\text{node}}, w_{\text{node}}, r_h\} \end{aligned} \quad (3)$$

若 r_w < r_h, 且 r_w < r_l, 则新生成的点集空间可由下式表示为:

$$\begin{aligned} L &= \{x_{\text{node}}, y_{\text{node}} + w, z_{\text{node}}, l_{\text{node}}, r_w, h_{\text{node}}\} \\ S &= \{x_{\text{node}} + l, y_{\text{node}}, z_{\text{node}} + h, r_l, w_{\text{node}}, r_h\} \\ H &= \{x_{\text{node}} + l, y_{\text{node}}, z_{\text{node}} + h, l_{\text{node}}, r_w, h_{\text{node}}\} \end{aligned} \quad (4)$$

若 r_h < r_w, 且 r_h < r_l, 则新生成的点集空间可由下式表示为:

$$\begin{aligned} L &= \{x_{\text{node}}, y_{\text{node}}, z_{\text{node}} + h, l_{\text{node}}, w_{\text{node}}, r_h\} \\ S &= \{x_{\text{node}} + l, y_{\text{node}} + w, z_{\text{node}}, r_l, r_w, h_{\text{node}}\} \\ H &= \{x_{\text{node}} + l, y_{\text{node}} + w, z_{\text{node}}, l_{\text{node}}, w_{\text{node}}, r_h\} \end{aligned} \quad (5)$$

(2) 以内部离散点为球心, 其到表面离散点最小距离为半径, 生成的所有球体的组合可以刻画硫化铁结核颗粒的外形, 如图 2 所示。

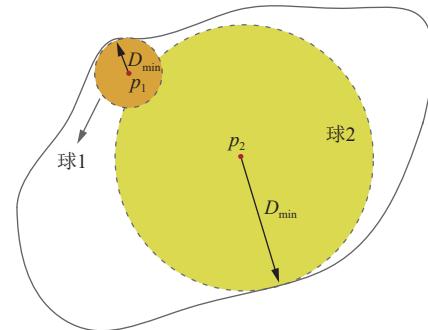


图 2 内部离散点到表面离散点最短距离

Fig.2 Diagram showing the shortest distance from internal to surface discrete points

根据图 2 所示最短距离关系, 利用函数 CalNearPoint() 计算某内部离散点到每个表面离散点的距离, 并存储最短距离, 其具体算法如图 3 所示。

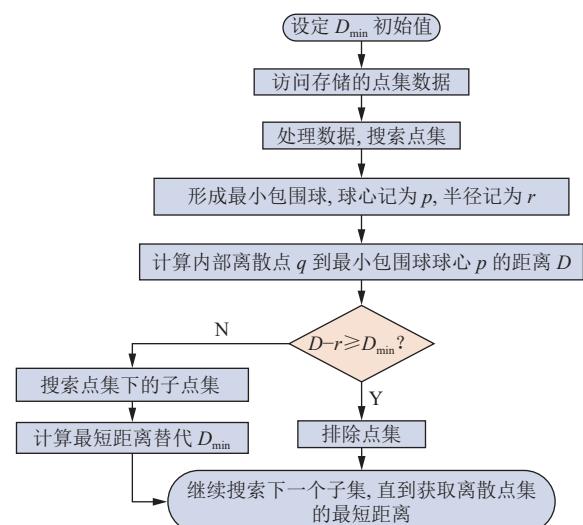


图 3 获取最短距离算法流程

Fig.3 Flow chart of the algorithm used to determine the shortest distance

(3) 当步骤(2)对几何体不规则性地刻画存在颗粒球体与球体之间大量重叠与包含关系的问题, 如图 4 所示, 采用数字对颗粒球体进行编号。

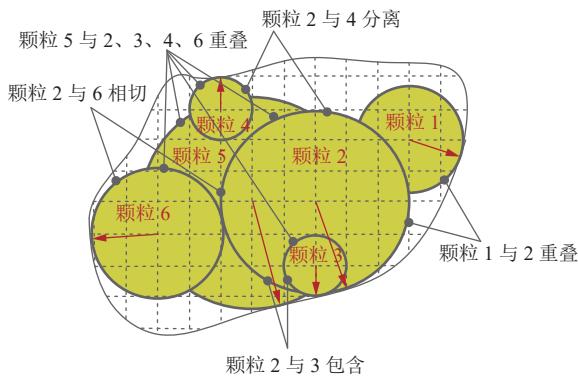


图 4 颗粒填充重叠、包含关系

Fig.4 Overlapping and inclusion of particles filled

如图 4 所示的大量重叠、包含关系会造成填充的球体较多, 计算量大。因此在降低球体数目同时, 为了保证几何体外形的精度, 引入系数 μ , 作用机理如下式:

$$d_{1,2} + \min(R_1, R_2) > \mu \max(R_1, R_2) \quad (6)$$

当不等式成立时, 球 1、球 2 均保留; 当不等式不成立时, 删减两球中较小者。

2.1.2 硫化铁结核孪生效果

为实现硫化铁结核的孪生过程, 对其三维模型进行分析。依据硫化铁结核实体形状特征, 构建其三维实体模型, 并对其三维模型进行网格划分, 通过计算获取结核颗粒内部离散点 77 026 个, 表面外部离散点 62 068 个。将其节点坐标数据保存后, 编译结核颗粒离散元填充程序, 计算获取所有填充球的球心与坐标, 去掉重叠与包含的小球, 将其导入 API 配置文件中, 实现硫化铁结核离散元孪生模型的构建, 如图 5 所示。

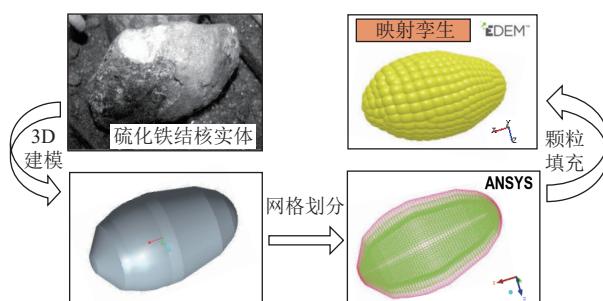


图 5 形成硫化铁结核孪生模型

Fig.5 Formation of a digital twin for iron sulfide nodules

2.2 颗粒填充技术优化

煤岩体物质结构复杂, 各向异性。传统的离散元煤层工作面填充技术未考虑同一种煤或岩石其材料参数在一定范围内变化的问题^[22-23], 这将导致其黏结后的各煤层硬度为固定常数, 与实际煤层存在误差。因此, 为提高煤层三维仿真模型的精度, 借助 EDEM 离散元二次开发功能, 优化煤岩层颗粒填充技术, 以全煤层生成为例, 其具体的填充流程如图 6 所示。

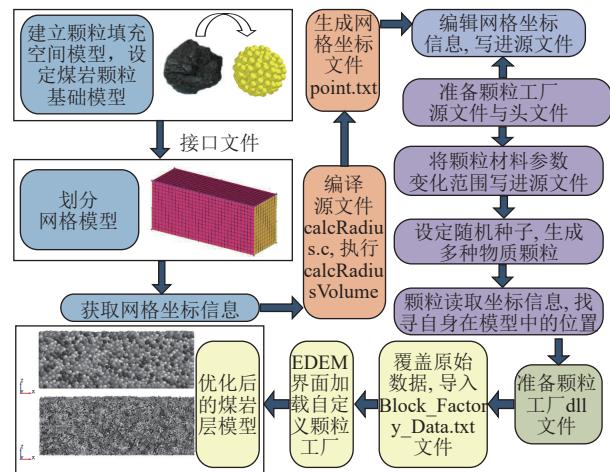


图 6 颗粒填充流程

Fig.6 Flow chart of particle filling process

(1) 构建颗粒填充的空间模型, 将其导入 ANSYS 中进行网格划分, 生成结构网格后导出 msh 文件。

(2) 设定煤颗粒基准模型。煤颗粒基准模型复杂程度对离散元计算的速度呈正相关影响趋势, 虽然真实的煤层被开采后产生的煤块形状各异, 但为了提升了巨大颗粒群之间接触状态检测的便捷性、降低运算量, 采用典型类球状煤体作为构建煤层的原型颗粒模型进行填充。利用小颗粒球团快速黏结刻画类球状煤实体。

(3) 生成的结构网格转化为离散点坐标并以 msh 文件形式导出, 小颗粒球团则可根据 msh 文件提供的 X、Y、Z 三方向坐标信息获取其在空间模型中的具体位置。

(4) 设置煤层颗粒材料属性, 给定合理参数变化范围, 在同一煤颗粒属性内其不同位置的小颗粒球团获取的材料参数值不同, 打破生成煤颗粒材料的固值化, 使其与实际的煤物质结构组成相近。设在空间内需填充的小颗粒球团总数为 Y , 小颗粒球团在空间内填充充分的结束时间为 a , 依据时间先后顺序对生成小颗粒球团 b 的进行排列, 输出的形式为行向量, 其数学模型为:

$$\mathbf{M}_{bt} = (\mathbf{M}_{b,1}^t, \mathbf{M}_{b,2}^t, \dots, \mathbf{M}_{b,a}^t) \quad (7)$$

设可表示同一煤颗粒属性的材料参数值为 n 组, 则小颗粒球团在完全静止时刻 t 范围内排列的位置顺序可通过构造矩阵为:

$$\mathbf{MV}_t \in \mathbb{C}^{n \times a} \quad (8)$$

将矩阵 \mathbf{MV}_t 进行 n_1 次的复制, 得到 $\mathbf{MV}'_t \in \mathbb{C}^{(n \times P) \times a}$, 即:

$$\mathbf{MV}'_t = \begin{bmatrix} \mathbf{MV}_t \\ \mathbf{MV}_t \\ \vdots \\ \mathbf{MV}_t \end{bmatrix}_{(n \times P) \times a} \quad (9)$$

$$n_1 = [n_2/n] \quad (10)$$

通过改变 P 的数值大小使小颗粒球团随机匹配材料参数值后搜索位置坐标自动填满整个空间填充模型。

由于 EDEM 软件目前无法实现颗粒随机分布的需求, 因此将通过上述步骤获取的位置坐标信息写入颗粒工厂的源文件, 颗粒读取坐标信息后自动找寻在填充空间的位置。

2.3 煤层工作面自定义接触模型计算技术

2.3.1 自定义接触模型

真实煤岩表面凹凸不平, 颗粒间具有咬合作用, 而仅依靠颗粒间的摩擦力难以完全反映此种咬合性质。基于此, 在传统 Hertz-Mindlin 接触模型的基础上, 添加颗粒间的扭转力, 建立自定义接触模型模拟煤岩颗粒表面的粗糙度。自定义接触模型中, 每个接触单元都由 3 部分组成: 法向接触单元、切向接触单元及转动接触单元, 如图 7 所示。

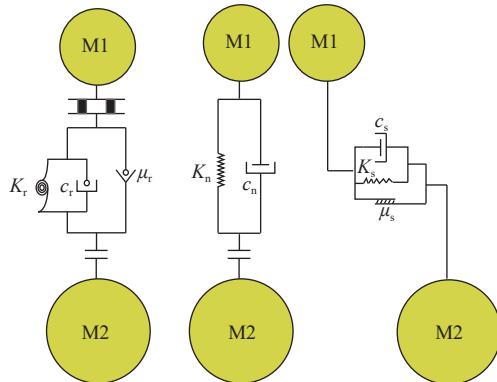


图 7 颗粒接触模型
Fig.7 Particle contact model

其中煤岩颗粒间构建添加的扭转力基于扭转弹簧-滚动力学模型进行计算, 同时在模型中添加 Coulomb 定律的选择器来判断颗粒间的接触类型是否为滚动摩擦, 其抗转动弯矩的数学模型为:

$$m_r^{n+1} = m_r^n - K_r(\omega_A - \omega_B)\Delta t \quad (11)$$

$$M_r^{n+1} = m_r^{n+1} - c_r(\omega_A - \omega_B) \\ \text{if } |m_r^{n+1}| < \mu_r R^* |F_n^{n+1}| \quad (12)$$

$$M_r^{n+1} = \text{sign}(m_r^{n+1})\mu_r R^* |F_n^{n+1}| \\ \text{if } |m_r^{n+1}| < \mu_r R^* |F_n^{n+1}| \quad (13)$$

滚动扭转刚度由抗转系数及法向接触刚度确定^[24-25], 数学模型为:

$$K_r = \frac{K_n R^* \beta^2}{12} \quad (14)$$

2.3.2 滚动扭转刚度元素有效性验证

为验证自定义接触模型颗粒间添加的滚动扭转刚度的有效性, 将建立的接触力模型通过编译写入接触模型子类中。采用分层次填充方法生成均匀且密实的虚拟煤岩样, 填充颗粒过程中使颗粒相互接触并达到平衡, 且保证颗粒之间黏结, 其颗粒填充试验过程如图 8 所示。

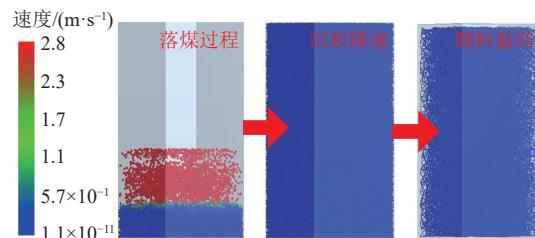


图 8 颗粒填充试验过程
Fig.8 Process of the particle filling test

利用图 8 所示方式黏结煤岩样 4 个, 其煤岩试样具体参数见表 1。待煤岩样黏结充分后利用其进行单轴压缩对比试验, 试验中, 为验证煤岩材料物理力学性能, 根据单轴压缩试验环境要求, 建立一个自上而下运动速度 v 为 0.15 m/s 的平面模拟试验机的压头, 为保证仿真效率和精度, 设置保存时间间隔为 0.001 s, 煤岩样的破坏过程如图 9 与图 10 所示。

通过图 9 与图 10 可以看出, 4 组煤岩样在压板的作用下均出现不同程度的轴向变形, 煤样 1 与煤样 2 在

表 1 煤岩试样参数
Table 1 Parameters of coal and rock samples

| 样品 | 密度/(kg·m ⁻³) | 弹性模量/10 ⁹ Pa | 泊松比 | 切向静滑动摩擦因数 | 切向接触刚度/(10 ⁷ N·m ⁻¹) | 切向黏滞阻尼系数 |
|-----|--------------------------|-------------------------|---|-----------|---|----------|
| 煤样1 | 1 280 | 2.01 | 0.28 | 0.672 | 8.510 4 | 0.365 |
| 煤样2 | 1 280 | 2.01 | 0.28 | 0.672 | 8.510 4 | 0.365 |
| 岩样1 | 2 610 | 18.30 | 0.21 | 0.459 | 74.702 0 | 0.941 |
| 岩样2 | 2 610 | 18.30 | 0.21 | 0.459 | 74.702 0 | 0.941 |
| 样品 | 局部阻尼系数 | 黏滞阻尼系数 | 法向接触刚度/(10 ⁸ N·m ⁻¹) | 法向黏滞阻尼系数 | 抗转动系数 | 静滚动摩阻因数 |
| 煤样1 | 0.667 | 0 | 1.109 8 | 0.417 | 0 | 0.051 |
| 煤样2 | 0.667 | 0.101 | 1.109 8 | 0.417 | 0.70 | 0.051 |
| 岩样1 | 0.346 | 0 | 9.741 4 | 0.803 | 0 | 0.124 |
| 岩样2 | 0.346 | 0.316 | 9.741 4 | 0.803 | 0.85 | 0.124 |

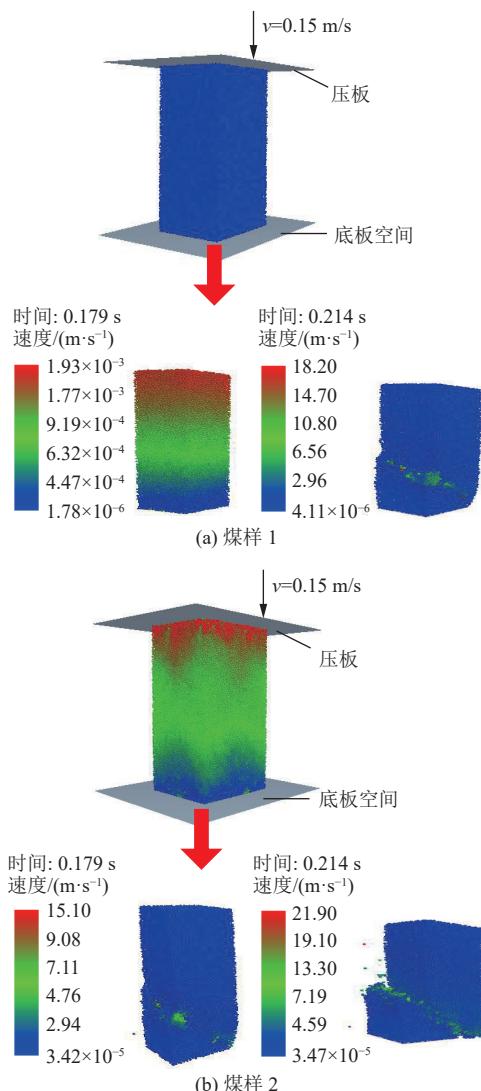


图 9 煤样颗粒在轴向应力下破坏过程

Fig.9 Failure process of coal sample particles under axial stress

同一仿真时刻达到相同轴向变形时,添加滚动扭转刚度的煤样 2 产生的裂纹程度大于未添加滚动扭转刚度的煤样 1。同时对比岩样 1 与岩样 2,可以看出添加滚动扭转刚度的岩样 2 在同一仿真时刻其裂纹程度也明显大于未添加滚动扭转刚度的岩样 1。根据试验过程中 4 组煤岩样的变形情况,提取并计算其加载过程中的应力应变关系,如图 11 所示。

由图 11a、图 11c 煤岩样的应力-应变关系可知,含有滚动扭转刚度的煤样与岩样其峰值强度均高于不含有滚动扭转刚度的试样,并且含有滚动扭转刚度的试样其峰值后的弹性变形能力更强,呈现应变软化。基于图 11a、图 11c 煤岩样的应力-应变关系绘制其强度包线图,其中由于不含有滚动扭转刚度的煤岩试样其达到峰值强度后几乎无弹性变形能力,因此,峰值强度包线与残余强度包线重合,最终 4 组试样的峰值强度与残余强度表达如图 11b、图 11d 所示。而根据摩尔库伦定律^[26]可知:

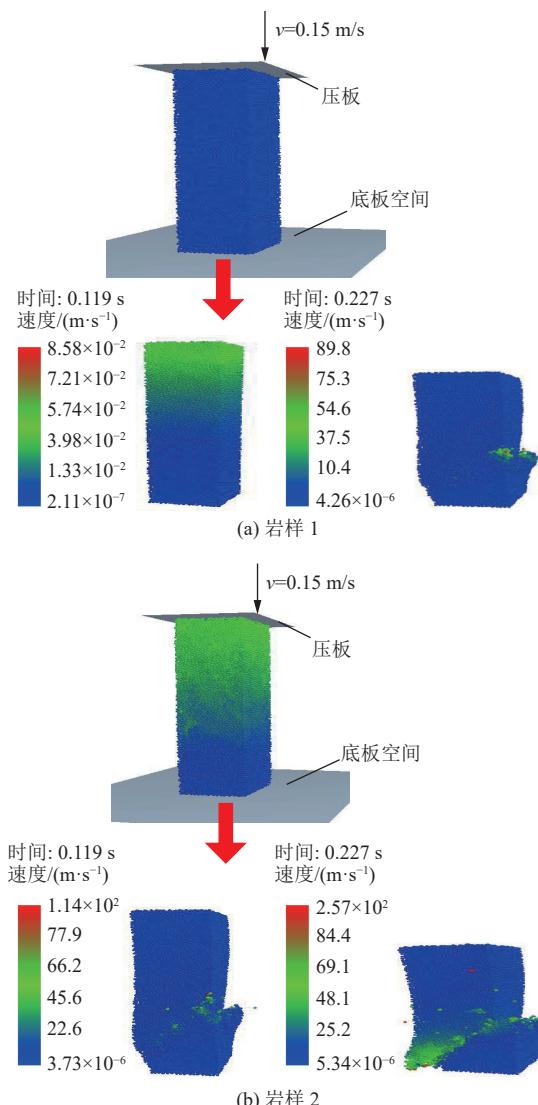


图 10 岩样颗粒在轴向应力下破坏过程

Fig.10 Failure process of rock sample particles under axial stress

$$\sin\varphi = \tan\theta \quad (15)$$

因此根据图 11b、图 11d 所示强度包线及式(14),计算统计得到各组煤岩样的内摩擦角数据见表 2。通过表 2 的对比结果可知,含有滚动扭转刚度试样的内摩擦角均大于无滚动扭转刚度试样的内摩擦角,因此证明了添加滚动扭转刚度模拟其煤岩体之间凹凸不平现象的能力得到了提升,验证了自定义接触模型的可行性。

3 模型构建

3.1 初始静态模型构建

山东児州矿区杨村矿 17 层工作面含夹矸、硬结核及小断层,赋存稳定,但煤层结构复杂,为充分发挥复杂夹矸煤层三维孪生模型构建的技术优势,以此典型复杂煤层为工程对象。児州矿区 17 层工作面煤层平均厚度 1 m,煤层倾角 5°~13°,煤层坚固性系数为 2.38,分布范围广,普遍含有硫化铁结核,厚度一般为 100~200 mm,

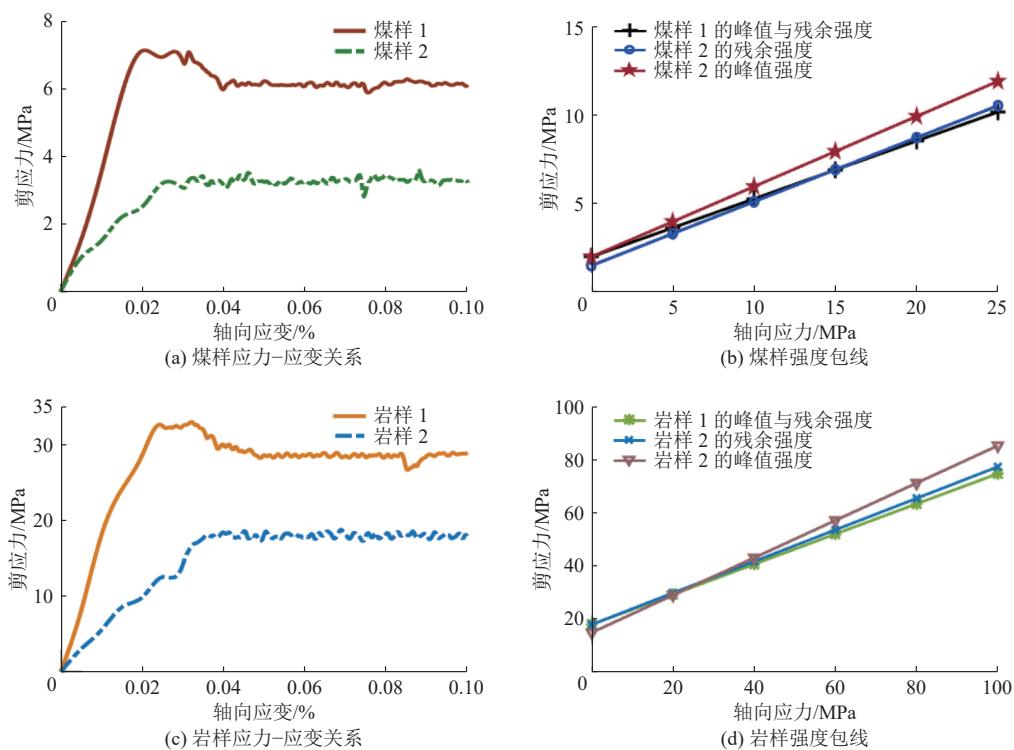


图 11 煤岩样的应力-应变关系

Fig.11 The stress-strain relationships of coal and rock samples

表 2 煤岩样的内摩擦角数据

Table 2 Internal friction angles of coal and rock samples

| 样品 | 残余强度线 倾角/(°) | 峰值强度线 倾角/(°) | 残余 内摩擦角/(°) | 峰值 内摩擦角/(°) |
|-----|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 煤样1 | 18.56 | 18.56 | 19.61 | 19.61 |
| 煤样2 | 20.19 | 22.41 | 21.58 | 24.35 |
| 岩样1 | 28.96 | 28.96 | 33.61 | 33.61 |
| 岩样2 | 31.33 | 33.24 | 37.49 | 40.95 |

长度为 200~300 mm, 结核的煤岩坚固性系数达到 8.4, 分布的密度为 0.88 个/m²^[27]。煤层含夹矸 1~2 层, 厚度为 0.02~0.44 m, 岩性为炭质砂岩, 其较硬的夹矸层岩性为石灰岩, 建模过程中定义为硬夹矸。煤层顶板为下灰岩, 坚固性系数为 7.4, 平均厚度 5.85 m; 底板为铝质泥岩, 坚固性系数为 6.8, 平均厚度 1.17 m。

以兖州矿区 17 层工作面地质条件为基础, 采用物理力学性能测试试验、参数标定试验^[28] 获取煤岩性能参数等数据, 基于离散单元法, 以 EDEM/API 二次开发为建模工具, 根据提出的方案添加自定义填充方式、颗粒工厂、接触模型等, 实现复杂煤层工作面三维孪生模型的构建, 最终形成初始静态模型, 其构建过程如图 12 所示。

3.2 模型结构的动态修正替换

复杂夹矸煤层地质结构多变, 根据煤层数据信息的变化需对三维孪生模型进行重构, 实现数据化建模, 为采煤机智能开采过程中煤岩截割状态识别提供可靠数

据信息。因此对所构建的煤层三维孪生初始基础模型的结构进行替换修正, 形成可替换颗粒集的数字化动态复杂夹矸煤层模型, 其结构替换修正过程如图 13 所示。

在图 13 中, 煤层的颗粒集替换可通过外部的编译文件模型 P.txt_n、D.txt_n 和 PR.dll 实现。P.txt_n 和 D.txt_n 记录被替换结构颗粒与替换后结构颗粒的名称、数量、坐标位置以及实现替换的仿真节点时间, 是替换结构的颗粒工厂信息文件; PR.dll 文件为 EDEM/API 中实现颗粒替换功能的扩展库, 形式为动态, 可根据仿真时间点赋予的指令调用颗粒工厂文件信息, 完成结构之间的替换修正。

复杂夹矸煤层三维孪生模型的修正替换过程需实现多种结构颗粒同步替换, 因此需基于初始静态模型中的颗粒属性信息控制颗粒集群的生成。首先分别调用煤层初始静态模型中全部颗粒种类的属性信息, 为多颗粒种类集群替换文件的编译提供数据。多颗粒种类集群替换的 API 需准备 PR.dll、P.txt_n 和 D.txt_n 外部文件, P.txt_n 和 D.txt_n 文件中提供的信息其内容如图 14 所示。

由图 14 可知, P.txt_n 和 D.txt_n 文件中包含 6 类被替换结构的颗粒工厂信息, 由于数据量巨大, 受篇幅所限, 仅显示一轮循环的数据。以第一类为例, P.txt_n 文件中表述第一类被替换结构的颗粒工厂中待替换的结构单元类型为 Coal(煤), 需替换的颗粒数量为 316 418 个, 替换煤颗粒的 Gangue'(夹矸)、Hard Gangue'(硬夹矸)、Inclusion'(硫化铁结核)、Roof'(顶板)、Floor'(底板)以及

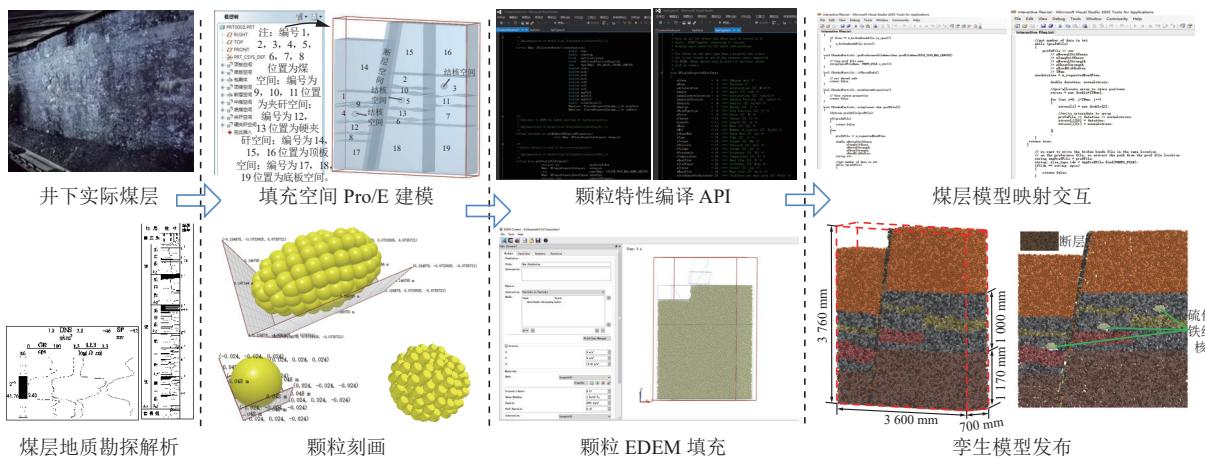


图 12 复杂煤层工作面三维孪生初始静态模型形成过程

Fig.12 Formation of the initial static 3D digital twin for the mining face of a complex coal seam

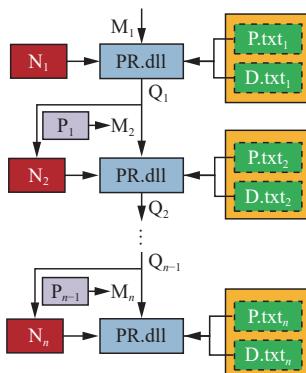
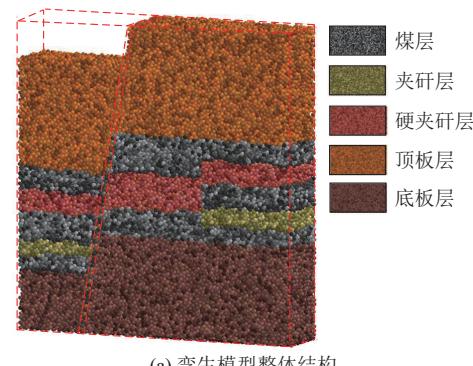
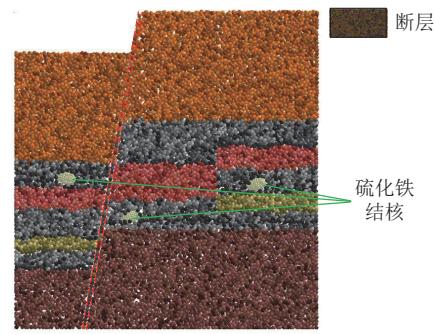


图 13 煤层结构替换修正过程

Fig.13 Replacement and correction of the coal seam structure



(a) 孪生模型整体结构



(b) 内部切片结构模型

图 15 结构替换后煤层孪生模型

Fig.15 Digital twin of a coal seam after structural replace

| P.txt - Microsoft Visual Studio 2005 Tools for Applications | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|
| D.txt - Microsoft Visual Studio 2005 Tools for Applications | | | |
| Part | | | |
| Coal | | | |
| Soil | | | |
| Hard Gangue' | -231.68134 | -471.39237 | 254.14119 |
| Indusion | -1280.11462 | -122.4158 | 191.82161 |
| Floor | -187.28944 | -31.67158 | 10.10219 |
| Fault' | -2461.31767 | -167.37116 | -60.02109 |
| Roof' | -2794.21996 | -251.64481 | 116.49521 |
| Gangue | | | |
| Soil4 | -215.51466 | -1531.11967 | 865.1759 |
| Hard Gangue' | -298.12291 | -2716.33471 | 229.72218 |
| Fault' | -2515.15787 | -456.11121 | 447.51631 |
| Hard Gangue | | | |
| Soil2 | -351.44761 | -471.11821 | -104.11784 |
| Gangue' | -2821.11695 | -10.69416 | -494.16776 |
| Fault' | -212.32641 | -318.41568 | 516.32191 |
| Floor | | | |
| Soil3 | -577.15943 | -677.12476 | 10231.95861 |
| Fault' | -2118.36184 | -412.89145 | 12387.21441 |
| Floor | | | |
| Soil2 | -2601.11606 | -110.68416 | -494.16775 |
| Fault' | -2077.51425 | -322.15419 | -416.33197 |
| Indusion | | | |
| Coal | -161.59131 | -957.16622 | 24.19621 |

图 14 煤层结构修正替换文件信息

Fig.14 File information for the correction and replacement of the coal seam structure

Fault'(断层)结构颗粒。根据图 14 中 $P.txt_n$ 文件显示的前 3 列 X 、 Y 、 Z 坐标自动找寻其填充的位置。在 Visual Studio 环境下运行 EDEM/API 中的插件 PR.dll 文件, 当仿真时间运行到 0.38 s 时, PR.dll 将调用 $P.txt_n$ 和 $D.txt_n$ 文件, 完成结构颗粒的替换。以此编译的多颗粒种类集群的替换 API 为例, 完成对煤层孪生初始静态模型各结构的修正替换, 如图 15 所示。

由图 15 可知, 复杂夹矸煤层以初始静态模型为模

板, 通过颗粒集的修正替换实现了模型的重构, 其中硫化铁结核的位置、夹矸、硬夹矸以及断层等结构的厚度均发生了变化, 保证模型精度的同时改变了复杂夹矸煤层的结构单元, 实现了结构属性的替换。模型在写进 API 文件的仿真时间节点处完成结构替换, 有效解决了离散单元体积庞大、重构时间长的问题, 提高了建模效率的同时解决了复杂夹矸煤层地质结构多变性的问题, 为煤岩截割状态识别中丰富的数据信息来源提供可靠的建模方法。

3.3 模型可靠度实验验证

通过煤层物理模型验证其三维孪生模型虚拟元素的准确性和可靠度。

利用所浇筑煤壁在辽宁省大型工矿装备重点实验室开展采煤机截割实验, 其采煤机截割煤岩实验平台组成如图 16 所示。

实验前, 首先将采煤机在导轨上往复移动 5 次, 检查采煤机、导轨、转载台以及测试采集系统的运行状态。

在确认系统正常工作后, 使采煤机螺旋滚筒截齿与煤壁接触, 启动测试系统, 其中切割深度、牵引速度、滚筒转速和信号采样频率分别设置为 315 mm、4 m/min、95 r/min 和 1 000 Hz。

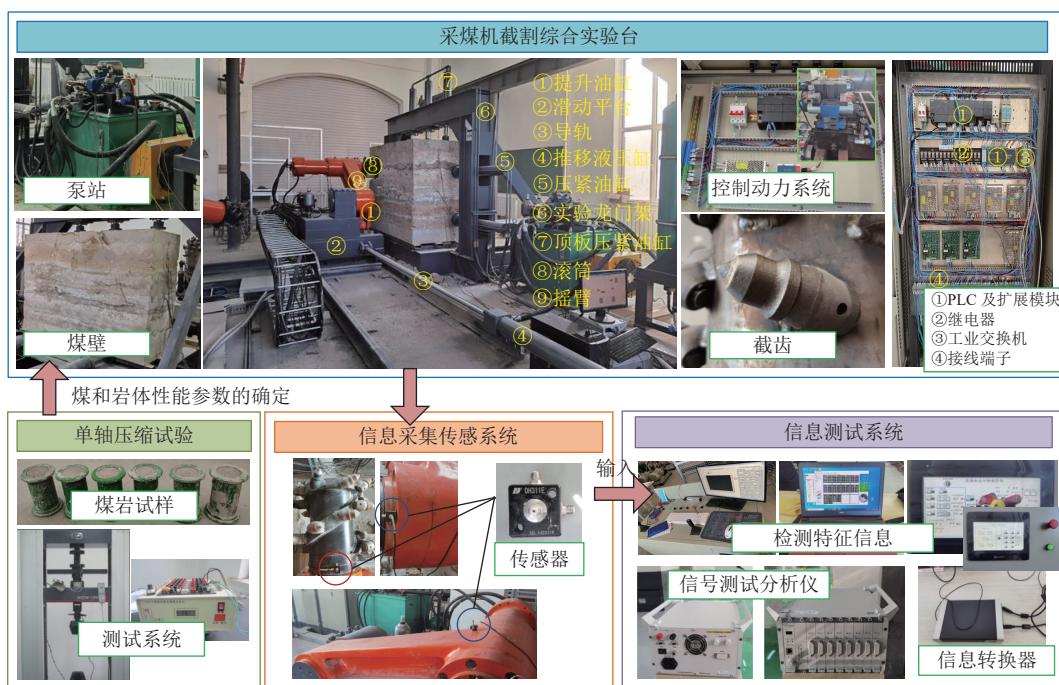


图 16 实验平台
Fig.16 Experimental platform

为了与工程对象兗州矿区 17 层工作面煤岩硬度保持高度一致性, 通过对煤壁的分层分段处理设定 5 种不同煤岩硬度与比例的实验工况, 以突出复杂夹矸煤层三维孪生模型准确性的普适度, 其工况表述见表 3。通过信息测试系统对不同截割硬度条件下的螺旋滚筒受力数据进行统计, 得到对比结果见表 4。

表 3 实验工况
Table 3 Experimental conditions

| 工况编号 | 煤的坚固性系数 | 岩的坚固性系数 | 煤岩比例 |
|------|---------|---------|-------|
| 1 | 2.38 | 3.5 | 3 : 1 |
| 2 | 2.38 | 5.1 | 3 : 1 |
| 3 | 2.38 | 3.5 | 1 : 1 |
| 4 | 2.38 | 6.8 | 1 : 1 |
| 5 | 2.38 | 7.4 | 1 : 1 |

通过表 4 统计结果可以看出截割复杂夹矸煤层三维孪生模型仿真下滚筒受载的均值与载荷波动系数均比截割传统仿真煤壁模型仿真结果有所提升。随着截割硬度的增加滚筒受载与载荷波动系数误差均出现增加的趋势, 这主要由于截割实验中螺旋滚筒通过方头与输出轴进行联接, 之间存在一定的接触间隙, 造成滚筒

运动过程中产生剧烈的振动, 且截割过程中随着煤岩硬度的增加, 使得滚筒在截割阻力与牵引阻力方向的波动范围增加, 截割深度不稳定性提升。而由于基于离散单元法构建的仿真煤壁是具有黏性颗粒结构的煤岩体, 而实验所用实际煤壁是基于相似理论模拟实际煤岩硬度由煤、石膏和水泥等原料混合制成的, 制作过程中硬度分布会出现分布不均现象, 因此实验结果与仿真结果之间存在不同程度的误差。但是经分析结果可知不同工况下截割复杂夹矸煤层三维孪生模型过程滚筒受载与实际煤岩之间的误差均更小, 从而间接验证了构建的复杂夹矸煤层三维孪生模型物理性能与实际煤岩更为接近。

4 复杂夹矸煤层三维孪生模型的应用

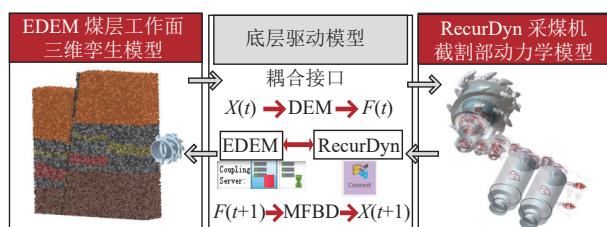
采煤机截割部在截割工作过程中受到冲击作用导致其产生振动, 且随工况的变化其剧烈程度存在明显差异。采煤机截割部振动信息的差异是实现采煤机智能开采过程中煤岩截割状态识别的关键, 而对振动信号精确提取则是构建识别系统的重要基础。煤岩截割状态识别系统构建过程中需要大量样本数据, 样本数据的数

表 4 不同工况实验数据统计结果
Table 4 Statistics of experimental data under different operating conditions

| 结果来源 | 结果信息 | 工况1 | 工况2 | 工况3 | 工况4 | 工况5 |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| A过程 | 滚筒受载均值/N | 35 952.317 9 | 56 533.400 9 | 77 628.977 2 | 89 417.266 4 | 97 247.117 2 |
| | 载荷波动系数 | 0.351 6 | 0.471 1 | 0.561 9 | 0.732 2 | 0.890 1 |
| B ^[29] 过程 | 滚筒受载均值/N | 32 510.718 3 | 50 289.229 2 | 66 047.022 7 | 75 702.604 1 | 80 776.739 9 |
| | 载荷波动系数 | 0.319 5 | 0.419 6 | 0.485 4 | 0.610 1 | 0.701 1 |
| A结果与C结果之间的误差 | 滚筒受载均值误差/% | 1.26 | 1.67 | 2.01 | 2.71 | 3.24 |
| | 载荷波动系数误差/% | 0.98 | 1.09 | 1.41 | 2.37 | 4.45 |
| B与C结果之间的误差 | 滚筒受载均值误差/% | 9.21 | 10.57 | 15.22 | 15.91 | 20.39 |
| | 载荷波动系数误差/% | 8.94 | 11.07 | 14.16 | 17.22 | 21.54 |
| A结果相对于B仿真结果的提升量 | 滚筒受载的均值提升量/% | 9.57 | 11.05 | 14.92 | 15.34 | 16.94 |
| | 载荷波动系数提升量/% | 9.13 | 10.93 | 13.44 | 16.68 | 21.23 |

注: A为螺旋滚筒截割复杂夹矸煤层三维孪生模型; B为螺旋滚筒截割传统仿真煤壁模型^[29]; C为螺旋滚筒截割真实煤壁模型。

量与其系统识别的准确性成正比。在数据信息集构建过程中,由于井下复杂恶劣的实际环境造成获取大量数据信息难度增加、实验室测试进行数据信息集的构建引发系统搭建效率降低等弊端,因此利用虚拟空间运行能力的特点,将构建的复杂夹矸煤层三维孪生模型应用于煤岩截割双向耦合仿真试验中,提升振动信号采集精确性的同时可完成孪生煤层模型的快速更替。基于EDEM-RecurDyn 双向耦合技术,实现煤层工作面与采煤机截割部交互过程的孪生,其数据交换过程如图 17 所示。



注: MFBD 为 discrete element method-multi flexible body dynamics。

图 17 煤岩截割双向耦合数据交互

Fig.17 Data exchange in coal-rock cutting based on bidirectional coupling

RecurDyn 通过底层驱动模型耦合接口,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,截割破落煤岩, EDEM 计算出此时煤层工作面对几何体的作用力并将数据回传到 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,使两者空间的采煤机接受相同的规则约束,实现煤层工作面三维孪生模型与采煤机截割部孪生体之间相互作用过程中载荷与运动位移

等数据的实时双向交互传递,基于交互过程获取截割关键信息。以表 5 所示的 8 组典型工况为例,通过颗粒替换修正煤壁模型,快速获取不同工况下双向耦合过程中复杂夹矸煤层孪生模型,完成双向耦合仿真测试,其截割过程如图 18 所示,交互过程螺旋滚筒获取的振动信息如图 19 所示。

表 5 模型应用过程中典型工况
Table 5 Typical operating conditions during model application

| 工况 | 煤岩比例 | 坚固性系数 |
|----|---------------|------------------------|
| 1 | 全煤 | 煤的坚固性系数为 1.4 |
| 2 | 全煤 | 煤的坚固性系数为 2.38 |
| 3 | 全岩 | 岩的坚固性系数为 3.5 |
| 4 | 煤 : 岩 = 1 : 3 | 煤和岩的坚固性系数分别为 2.38, 3.5 |
| 5 | 煤 : 岩 = 3 : 1 | 煤和岩的坚固性系数分别为 3.8, 5.1 |
| 6 | 煤 : 岩 = 1 : 1 | 煤和岩的坚固性系数分别为 3.8, 6.8 |
| 7 | 遇硫化铁结核 | 煤的坚固性系数为 2.38 |
| 8 | 过断层 | 煤的坚固性系数为 2.38 |

三维孪生复杂夹矸煤层要实现对物理煤层的信息化描述,真实映射物理煤层的虚拟形态,使采煤机滚筒计算更加便捷地获得真实的边界条件,并通过采煤机截割复杂夹矸煤层的动态过程获取采煤机截割状态的有效信息。通过上述获取的信息结果,可明显发现可修正替换颗粒集的动态复杂夹矸煤层三维孪生模型可更准确快速地表达真实工作面的各种地质结构信息,打破了传统煤壁地质结构单一的弊端。与此同时,将其应用至双向耦合仿真实验过程中,获取的数据信息为煤岩截割状态识别的实现奠定基础,为“无人化”开采提供可靠有效的基础数据。

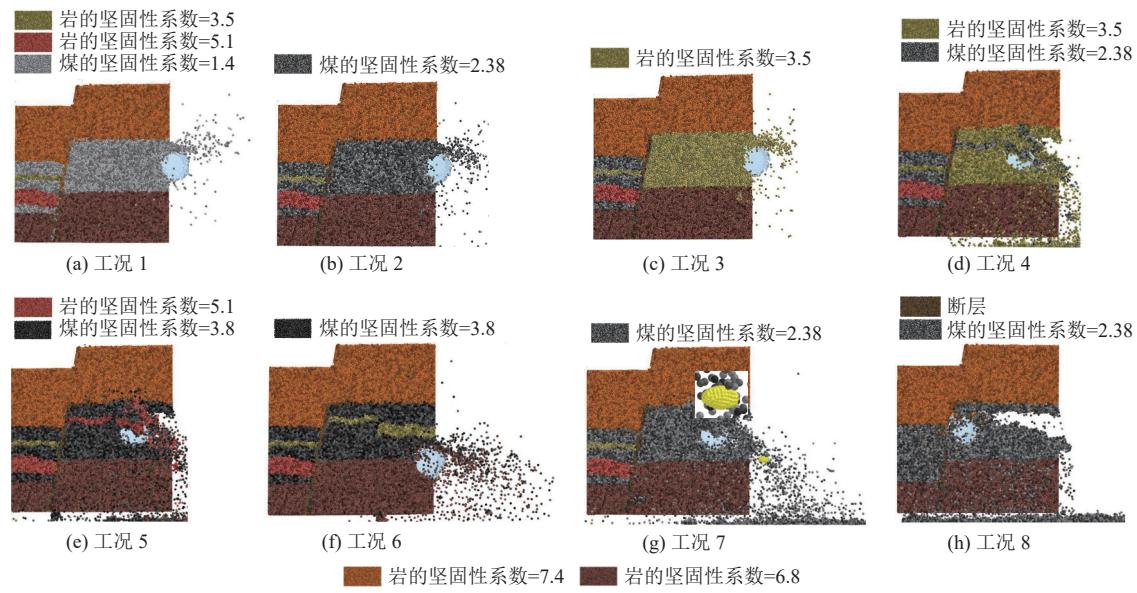


图 18 截割过程

Fig.18 Coal-rock cutting process

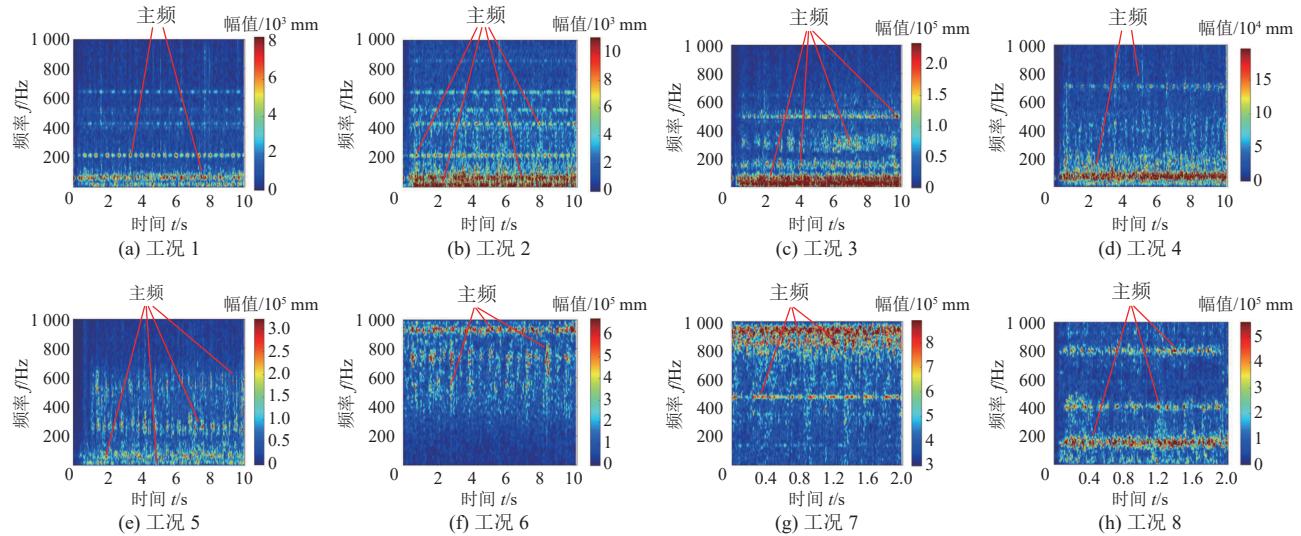


图 19 交互过程螺旋滚筒获取的振动信息

Fig.19 Vibration information obtained by the spiral drum in the interactive process

5 结论

(1) 基于不规则颗粒建模技术完成硫化铁结核模型的孪生; 优化煤岩层颗粒填充技术, 试验结果表明该方法实现了煤岩层物质结构复杂性的模拟; 建立自定义接触模型模拟煤岩颗粒表面的粗糙度, 试验结果表明添加滚动扭转刚度试样的内摩擦角均大于无滚动扭转刚度试样的内摩擦角, 验证了添加滚动扭转刚度模拟其煤岩体之间凹凸不平现象的能力得到了提升。

(2) 融合多种煤层地质条件信息, 建立硫化铁结核、断层、不同硬度夹矸岩层、顶底板的结构单元, 得到复杂夹矸煤层三维孪生初始静态模型。根据初始静态模型, 对多颗粒种类集群的替换 API 实施编译, 模拟实验结果表明最终成功完成了可实现修正替换颗粒集的动

态复杂夹矸煤层三维孪生模型的构建。

(3) 开展截割实验, 将构建的复杂夹矸煤层三维孪生模型应用于煤岩截割双向耦合仿真试验中, 实验、应用结果表明: 截割复杂夹矸煤层三维孪生模型仿真下滚筒受载的均值与载荷波动系数均比截割传统仿真煤壁模型仿真结果有所提升, 与此同时截割复杂夹矸煤层三维孪生模型过程滚筒受载与实际煤岩之间的误差更小。信息采集过程中孪生模型结构的快速更替, 大大缩短了煤层模型的孪生时间, 快速准确地为煤岩截割状态识别过程中信息库构建环节提供丰富数据, 为采煤机智能化发展奠定建模基础。

符号注释:

$d_{1,2}$ 为球 1 的球心到球 2 的球心距离, mm; F_n^{n+1} 为

t^{n+1} 时刻煤岩颗粒间的法向受力, N ; l 、 w 、 h 分别为点集的长度、宽度与高度, mm; l_{node} 、 w_{node} 、 h_{node} 分别为当前点集代表的长度、宽度与高度, mm; m_r^{n+1} 为 t^{n+1} 时刻两煤岩颗粒接触时抗转动弯矩的预估值, N/mm; m_r^n 为 t^n 时刻两煤岩颗粒接触时抗转动弯矩的预估值, N/mm; $M_{b,1}^t, M_{b,2}^t, \dots, M_{b,a}^t$ 为小颗粒球团在空间填充模型中的位置点; M_r^{n+1} 为 t^{n+1} 时刻两煤岩颗粒接触时抗转动弯矩, N/mm; M_1 为初始基础模型中待替换的结构颗粒; M_n 为第 n 次待替换的结构颗粒; N_n 为替换的次数; P_{n-1} 为第 n 次替换的颗粒具有的属性文件; Q_{n-1} 为第 $n-1$ 次替换后的结构颗粒; r_l 、 r_w 、 r_h 分别为点集分割后剩余的长度、宽度与高度, mm; r 为接触颗粒的平均半径, mm; R^* 为接触颗粒的平均半径, mm; x_{node} 、 y_{node} 、 z_{node} 分别为当前点集代表的空间 x 、 y 、 z 坐标; X_{\max}, X_{\min} 分别为离散点集沿 X 轴的最长、最短跨度, mm; Y_{\max}, Y_{\min} 分别为离散点集沿 Y 轴的最长、最短跨度, mm; Z_{\max}, Z_{\min} 分别为离散点集沿 Z 轴的最长、最短跨度, mm; $\min(R_1, R_2)$ 与 $\max(R_1, R_2)$ 分别为 1、2 两球之间半径的最小值与最大值; ω_A 、 ω_B 分别为相互接触两煤岩颗粒的转动速度, r/s; β 为抗转动系数; θ 为线倾角, ($^\circ$); φ 为内摩擦角, ($^\circ$); Δt 为颗粒之间初始接触到完全接触的时间差, s。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 王国法, 刘合, 王丹丹, 等. 新形势下我国能源高质量发展与能源安全[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 23–37.
WANG Guofa, LIU He, WANG Dandan, et al. High-quality energy development and energy security under the new situation for China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 23–37.
- [2] 王国法. 煤炭产业数字化转型和智能化建设支撑新质生产力发展[J]. 中国煤炭工业, 2024(6): 6–9.
WANG Guofa. Digital transformation and intelligent construction of coal industry support the development of new quality productivity[J]. China Coal Industry, 2024(6): 6–9.
- [3] 葛世荣, 张晞, 薛光辉, 等. 我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 146–156.
GE Shirong, ZHANG Xi, XUE Guanghui, et al. Development of intelligent technologies and machinery for coal mining in China's underground coal mines[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 146–156.
- [4] TIAN Zhen, JING Shuangxi, GAO Shan. Dynamic stress and fatigue life analysis of a coal plow bit[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(11): 8235–8241.
- [5] 韩金伟, 崔毅斌, 张传良, 等. 基于 3DMine 煤矿矿体三维可视化模型建构研究[J]. 煤炭技术, 2024, 43(8): 261–265.
HAN Jinwei, CUI Yibin, ZHANG Chuanliang, et al. Research on 3D visualization model construction based on 3DMine coal ore body[J]. Coal Technology, 2024, 43(8): 261–265.
- [6] 张健, 李春永, 许尚博. 基于钻孔数据的煤岩层三维数值模型构建与应用[J]. 能源技术与管理, 2022, 47(5): 1–4.
ZHANG Jian, LI Chunyong, XU Shangbo. Construction and application of three-dimensional numerical model of coal and rock strata based on borehole data[J]. Energy Technology and Management, 2022, 47(5): 1–4.
- [7] 张小艳, 朱圣凯, 杨鑫磊. 采煤工作面煤层三维地质建模[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 4049–4055.
ZHANG Xiaoyan, ZHU Shengkai, YANG Xinlei. Three-dimensional geological modeling of coal seam in mining face[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 4049–4055.
- [8] WELIVITIYA W D D P, WILLGOOSE G R, HANCOCK G R. Evaluating a new landform evolution model: A case study using a proposed mine rehabilitation landform[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2021, 46(11): 2298–2314.
- [9] ROY A, KUMAR T S, SHARMA R K. Structure estimation of 2D listric faults using quadratic bezier curve for depth varying density distributions[J]. Earth and Space Science, 2022, 9(2): e2021EA002061.
- [10] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1925–1936.
GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workface: Technological frame and construction[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925–1936.
- [11] BEDNARZ T, JAMES C, WIDZYK-CAPEHART E, et al. Distributed collaborative immersive virtual reality framework for the mining industry[M]//Machine vision and mechatronics in practice. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015: 39–48.
- [12] 孙亮. 井下煤矿综采智能协同关键技术研究[J]. 自动化应用, 2024(7): 46–47.
SUN Liang. Research on key technologies of intelligent collaboration for comprehensive mining in underground coal mines[J]. Automation Application, 2024(7): 46–47.
- [13] 王国法, 杜毅博. 煤矿智能化标准体系构建与建设内容解析[J]. 智能矿山, 2024, 5(5): 2–12.
WANG Guofa, DU Yibo. Coal mine intelligent standard system framework and construction ideas[J]. Journal of Intelligent Mine, 2024, 5(5): 2–12.
- [14] CHEN Junchao, ZHOU Lei, CHEMENDA A I, et al. Numerical modeling of fracture process using a new fracture constitutive model with applications to 2D and 3D engineering cases[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(7): 2628–2647.
- [15] 李娟莉, 姜朔, 谢嘉成, 等. 基于采煤机截割路径的动态三维地质模型构建方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 706–712.
LI Juanli, JIANG Shuo, XIE Jiacheng, et al. Construction method of the dynamic 3-D geological model based on shearer cutting path[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(5): 706–712.
- [16] WU Yuqi, TAHMASEBI P, YU Hao, et al. Pore-scale 3D dynam-

- ic modeling and characterization of shale samples: Considering the effects of thermal maturation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(1): e2019JB018309.
- [17] 田震, 荆双喜, 赵丽娟, 等. 基于离散单元法的刨煤机刨削性能分析及试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(10): 261–268.
TIAN Zhen, JING Shuangxi, ZHAO Lijuan, et al. Performance analysis and experimental investigation of coal plow based on discrete element method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(10): 261–268.
- [18] 赵丽娟, 罗贵恒, 刘旭南. 夹矸煤层采煤机斜切进刀过程滚筒载荷特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 218–223.
ZHAO Lijuan, LUO Guiheng, LIU Xunan. Research on drum load characteristics in oblique cutting process of shearer with coal containing parting[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 218–223.
- [19] 蔡改贫, 宣律伟, 张雪涛, 等. 多尺度内聚颗粒模型破碎过程研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1809–1817.
CAI Gaipin, XUAN Lüwei, ZHANG Xuetao, et al. Investigation into the crushing process in multi-scale cohesive particle model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 1809–1817.
- [20] 蔡改贫, 年顺, 郭晋. 基于多尺度内聚颗粒模型的轴压破碎过程研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(2): 150–155.
CAI Gaipin, NIAN Shun, GUO Jin. Visualization of the crushing process of multi-scale cohesive rock particle model[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(2): 150–155.
- [21] 钱万雄. 基于 EDEM 的黏土三维离散元模拟程序开发[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
QIAN Wanxiong. Development of 3D discrete element simulation program for clay based on EDEM[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [22] 彭继慎, 何武林. 基于离散元分析的夹矸煤层硬岩掘进机载荷分析[J]. 机械设计, 2020, 37(6): 65–70.
PENG Jishen, HE Wulin. Load analysis on the hard-rock tunneling machine of coal seam with gangue based on the discrete element simulation[J]. *Journal of Machine Design*, 2020, 37(6): 65–70.
- [23] 毛君, 刘思阳, 张坤, 等. 基于 EDEM 的放顶煤液压支架放煤过程的仿真研究[J]. 机械强度, 2019, 41(2): 468–472.
MAO Jun, LIU Siyang, ZHANG Kun, et al. Simulation study on caving process of caving coal hydraulic supports based on edem[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2019, 41(2): 468–472.
- [24] 蒋明镜, 陈意茹, 卢国文. 一种实用型深海能源土多场耦合离散元数值方法[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(8): 1391–1398.
JIANG Mingjing, CHEN Yiru, LU Guowen. A practical multi-field coupling distinct element method for methane hydrate bearing sediments[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(8): 1391–1398.
- [25] 蒋明镜, 庞红星, 王华宁, 等. 复合岩体中深埋隧道开挖破坏机理离散元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊 2): 702–709.
JIANG Mingjing, PANG Hongxing, WANG Huaning, et al. Discrete element analysis of failure mechanism of deep-buried tunnel excavation in composite rock mass[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(Sup.2): 702–709.
- [26] 翟继红, 白新理. 地基土抗剪强度与极限平衡条件的评价分析[J]. *铁道建筑*, 2005, 45(4): 55–57.
Zhai Jihong, BAI Xinli. Assessment analysis on shear strength and limit equilibrium of subsoil[J]. *Railway Engineering*, 2005, 45(4): 55–57.
- [27] 张崇宏. 兖州矿区含硫化铁硬结核体薄煤层工作面综合机械化开采成套装备研究与应用[J]. *山东煤炭科技*, 2010, 28(2): 144–145.
ZHANG Chonghong. Yanzhou Mining Area TB hard body iron sulfide thin seam of mechanized mining equipment and application packages[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2010, 28(2): 144–145.
- [28] 赵丽娟, 金鑫, 赵宇迪, 等. 含夹矸煤层滚筒磨损特性离散元模拟试验分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3341–3350.
ZHAO Lijuan, JIN Xin, ZHAO Yudi, et al. Discrete element simulation analysis on the wear characteristics of drum in coal seam with gangue[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3341–3350.
- [29] 赵丽娟, 闻首杰, 刘旭南. 仿真颗粒半径对模拟滚筒截割复杂煤层的影响研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(1): 52–57.
ZHAO Lijuan, WEN Shoujie, LIU Xunan. The influence of simulated particle radius on complex coal seam of drum cutting[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(1): 52–57.

(责任编辑 郭东琼)