



移动扫码阅读

李东辉, 李东印, 王 伸, 等. 液压支架放煤机构安全过煤临界准则及放煤口精准控制方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 251-260.

LI Donghui, LI Dongyin, WANG Shen, *et al.* Safe passing critical criterion for drawn top-coal on rear conveyor and accurate control approach for drawing opening dimension[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 251-260.

液压支架放煤机构安全过煤临界准则及放煤口精准控制方法研究

李东辉¹, 李东印^{1,2}, 王 伸^{1,2}, 黄志增³, 刘 清⁴, 张学亮⁴, 郑立军⁵, 张旭和⁶, 朱时廷⁷

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003; 3. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 4. 北京天玛智控科技股份有限公司, 北京 100020; 5. 河南焦煤能源有限公司 古汉山矿, 河南 焦作 454350; 6. 郑州煤矿机械集团股份有限公司, 河南 郑州 450000; 7. 晋能控股煤业集团 同忻煤矿山西有限公司, 山西 大同 037199)

摘要: 综采放顶煤技术已成为我国特厚煤层高产高效开采的主流方式, 放煤机构的精准控制是实现放顶煤开采自动化与智能化的重要基础, 掌握放煤机构的空间运动规律是实现对其精准控制的前提。液压支架放煤机构的即时形态受支架支撑高度、支架姿态、插板伸出长度、后部刮板机相对位置共同控制, 对放煤机构安全过煤高度和放煤口开口度有重要影响。以 ZF15000/27.5/42 型支架为研究对象, 采用有限元分析软件 ABAQUS 建立了三维四柱式放顶煤液压支架多体动力学仿真模型, 分别采用 Hinge, Translator 连接器模拟支架各铰接点的旋转行为及支架立柱、插板的伸缩行为。以支架支撑高度 H 、尾梁摆动角度 α 、插板伸出长度 l 为控制变量, 开展了三因素多状态数值模拟试验, 研究了掩护梁-尾梁铰接点、插板末端的空间运动规律, 运用 Levenberg-Marquardt 拟合迭代法得出了放煤机构安全过煤临界准则, 建立了插板末端坐标、放煤口开口度与 H 、 α 、 l 的标定关系数据库。推荐了用于感知与控制放煤机构姿态的传感器类型及安装位置, 推导了基于行程传感器的尾梁角度计算方法, 提出了放煤口开口度精准控制方法。通过现场验证对比放煤机构开口度计算值与现场放煤口实测值, 得出两者相对误差符合现场精度要求。该控制方法为智能决策与控制系统(软件)研发提供了理论支持, 在现场得到成功应用。

关键词: 液压支架; 放煤机构; 智能放煤; 放煤口开口度; 临界准则; 精准控制

中图分类号: TD823 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)09-0251-10

Safe passing critical criterion for drawn top-coal on rear conveyor and accurate control approach for drawing opening dimension

LI Donghui¹, LI Dongyin^{1,2}, WANG Shen^{1,2}, HUANG Zhizeng³, LIU Qing⁴, ZHANG Xueliang⁴, ZHENG Lijun⁵, ZHANG Xuhe⁶, ZHU Shiting⁷

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Collaborative Innovation Center for Safe Production and Clean and Efficient Utilization of Coal, Jiaozuo 454003, China; 3. Mining Design Division, Tiandi Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 4. Beijing Tiandi-Marco Electro-Hydraulic Control System Co., Ltd., Beijing 100013, China; 5. Guhanshan mine of Henan Coking Coal Energy Co., Ltd., Jiaozuo 454350, China; 6. Zhengzhou Coal Mining Machinery Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 7. Jinneng Holding Coal Industry Group Tongxin Coal Mine Shanxi Co., Ltd., Datong 037199, China)

Abstract: Fully mechanized top coal caving technology has become the mainstream way of high yield and high efficiency mining in extra thick coal seams in China. The accurate control of the top-coal drawing mechanical parts is of significance to realize the automation and intellectualization of top-coal caving mining. Mastering the spatial motion law of the coal caving mechanism is the premise of accurate

收稿日期: 2022-08-10 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1010

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(52204090); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)资助项目(212102210230); 国家能源集团重点项目“5G+工业互联网”无人化矿井关键技术研发与工程示范资助项目(GJNY-21-25)

作者简介: 李东辉(1997—), 女, 山东淄博人, 硕士研究生。E-mail: lidonghui0806@163.com

通讯作者: 王 伸(1991—), 男, 河南修武人, 副教授, 博士。E-mail: wangshen@hpu.edu.cn

control. The immediate shape of the hydraulic support coal caving mechanism is jointly controlled by the support height, support attitude, extension length of the plug plate, and the relative position of the rear scraper, which has an important impact on the coal caving opening and the coal-passing height of the support. This study establishes a 3-D numerical model of four-legs top-coal caving hydraulic support (No. ZF15000/27.5/42) by using the finite element software ABAQUS. Hinge and translator connectors are used to simulate the rotation behavior and expansion-contraction behavior for hinge point and plug plate, respectively. Taking the support height (H), tail beam swing angle (α), and the plug plate extension length (l) as control variables, the spatial motion law of the hinge point between shield beam and tail beam and the end of the plug plate are modeled. The critical security equation for evaluating collision between top-coal drawing mechanical parts and rear scraper is obtained by using Levenberg-Marquardt fitting iteration method. A database for describe the calibration relationship, which contains the end coordination of plug plate, the dimension of the top-coal drawing opening, and H , α , and l , is established. The sensor type and installation position for sensing and controlling the attitude of the top-coal drawing mechanism are recommended, the approach for calculating the tail beam angle based on travel sensor is derived. Through field verification of top-coal drawing opening width, it is concluded that the relative error between measured value and calculated value meets the requirements for accurate control of top-coal drawing mechanism. The approach for controlling the top-coal drawing opening dimension is proposed, which has been successfully applied in the field.

Key words: hydraulic support; coal drawing mechanism; intelligent top-coal drawing; top-coal drawing opening; critical criterion; accurate control

0 引 言

煤矿智能化开采是煤炭工业高质量发展的核心技术支撑^[1]。为实现厚煤层智能放顶煤开采,除了掌握顶煤运移与放出规律,解决煤矸识别等技术难题外,还需要借助高精度传感器、人工智能、控制算法等,实现数据采集、命令决策精准执行。放顶煤液压支架的掩护梁、尾梁、插板组成的放煤机构与后部刮板输送机共同决定了放煤过程中放煤口的即时形态。准确掌握支架放煤机构的运动规律,是智能放煤决策软件研发与放煤命令精准执行的必要条件,也是在智能放煤过程避免发生插板误入刮板机,造成刮板断链、支架损坏等安全事故的前提。

综采工作面装备的合理选型与配套是实现四柱式放煤机构的精准控制首要条件。工作面“三机”配套旨在确定刮板输送机、采煤机和液压支架的设备相互配合尺寸,主要包括梁端距、过煤高度和放煤口尺寸等参数的匹配^[2-4],国内外学者从放煤工艺、放煤设备优化及设备间的相互配合等方面不断探索改进。胡相捧等^[5]研究了支架位姿与推移机构之间的约束关系,构建了支架位姿的调整策略。章之燕^[6]针对大倾角放顶煤支架的受力情况,提出了防止液压支架倾倒的技术措施。张金虎等^[7]分析了四柱综放支架的适应性,总结了支架压死和立柱受力不均的主要原因。徐亚军^[8]对液压支架顶梁外载荷作用位置进行研究,推导出支架顶梁长度确定原则。王国法和庞义辉^[9-11]提出了“悬臂梁+砌体梁”结构模型及支架-围岩动力学模型和支架工作阻力确定方法,进行了液压支架结构优化设计及适应性分析。

黄庆享等^[12]基于“支架-煤壁-顶板”采场结构力学模型,给出了基于片帮控制的合理支架初撑力确定方法。尹希文等^[13]建立了基于支架载荷的矿压双周期分析预测方法,构建了液压支架载荷拟合预测模型。张强等^[14]通过构建运动模型及立柱载荷,求解出了支架平衡方程,阐述了液压支架工作阻力的影响因素。谢生荣等^[15]对四柱式支架空间承载特性进行了研究,发现适当增大立柱间距不会改变支架的整体支撑效率。李伟^[16]研究了液压支架控制系统,解决了鲍店煤矿7302工作面端头作业程序复杂、时序放煤参数优化等问题。

此外,王树仁等^[17]应用 UDEC2D 计算程序模拟了折线型综采面,并采用 FLAC3D 对沿折线型综采面布置的支架受力及其运移特征进行了分析。何柏岩等^[18]针对刮板输送机在满载启动、载荷异常等多种工况下链条卡链等现象,利用 Matlab/Simulink, ABAQUS 等仿真软件模拟刮板输送机链传动特性及参数匹配问题。谢苗等^[19]对重型刮板输送机在特定的卡链、断链故障工况下的链传动系统,利用现代值分析软件 Matlab 建立刮板输送机动力学模型。JUAREZ-Ferrerasl 等^[20]通过使用 ADAMS 软件构建了液压支架上升运动过程中各构件的相互位置关系,得出了液压支架各主要部件的质心速度和加速度变化的情况及计算结果。王学文等^[21]利用 Unity3D 分别建立了液压支架多销轴约束模型,实现了不同销轴间隙下液压支架姿态求解及其监测。万丽荣等^[22]利用 ADAM 分析软件和 Hertz 接触理论,分析了尾梁动态响应,同时对放煤机构进行强度校核及结构优化。

上述研究成果涉及支架顶梁、刮板输送机、前后立柱等结构,并取得了系列研究成果,但对放煤机构的运动规律尚不明确。以 ZF15000/27.5/42 型液压支架为研究对象,采用有限元分析软件 ABAQUS 建立四柱式支架动力学仿真三维模型,研究放煤机构的精准定位,探索支架顶梁、掩护梁、尾梁、插板等机构之间的运动规律,为实现智能化高效放煤、精准控制和安全预警提供理论支撑。

1 放顶煤液压支架有限元模型建立

1.1 支架参数及建模假设

塔山矿四柱式液压支架支撑高度为 2.75 ~ 4.2 m,支架中心距为 1.75 m,工作阻力为 15 000 kN,支护强度为 1.45 MPa。

支架模型主要由护帮、前梁、顶梁、掩护梁、尾梁、插板,前后立柱、前后连杆、底座、刮板 10 个部件构成,对模型进行如下假设:①支架升降过程中顶梁始终保持水平状态;②护帮、前梁、掩护梁、液压缸、四连杆及底座只保留铰接形式,无复杂受力;

③支架底座与后部刮板输送机位于同一水平面,两设备间相距 1.3 m。

1.2 基于连接器单元的支架有限元模型建立

采用 ABAQUS 软件建立液压支架有限元模型,支架各部件尺寸及倾角按 1 : 1 建立,以模型全局坐标系为研究的基础坐标 (图 1),其中,实体单元类型为 C3D8(实体三维 8 结点单元),共计 16 161 个,单元特征长度为 10 mm。为描述部件间的相对运动和约束关系,采用 ABAQUS 的连接器 (Connector) 对支架各部件的连接状态进行建模。连接器位于 ABAQUS 的 Interaction 模块,计算速度快、收敛性良好。本液压支架模型中,使用 Hinge 连接器^[23]模拟部件连接处的相对转动,其原理如图 2 所示。Hinge 连接器是 Join 和 Revolute 连接器的组合,可用的自由度为 UR_1 ,即绕其局部坐标系 x 轴旋转;该局部坐标系的方位由全局坐标系旋转得到。支架尾梁插板处连接器为 Translator^[23],是 Join 和 Align 连接器的组合,可用自由度为 U_1 ,即沿 x 轴方向移动,其原理如图 3 所示。

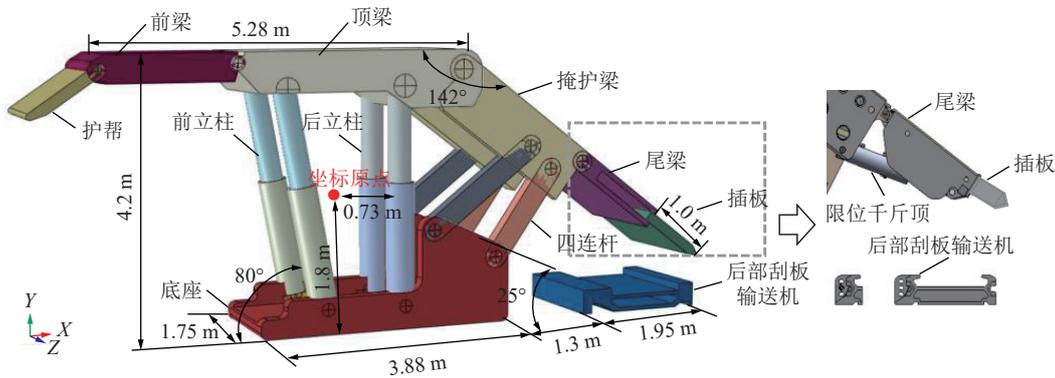


图 1 液压支架结构及数值模型

Fig.1 Structure and numerical model of hydraulic support

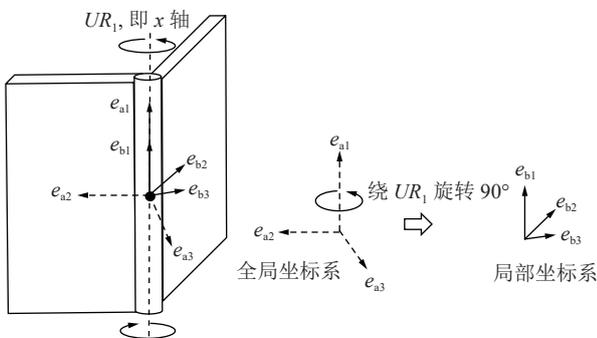


图 2 Hinge 连接器示意

Fig.2 Schematic of Hinge connector

支架活柱与下方的固定柱间采用面面接触 (Surface-to-surface contact) 以模拟支架立柱升降。支架

力学参数为:弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 800 kg/m³。

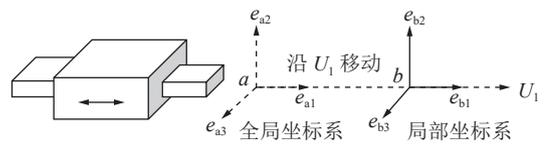


图 3 Translator 连接器示意

Fig.3 Schematic of Translator connector

2 放煤机构多体动力学数值模拟

2.1 数值模拟试验方案

为分析支架支撑高度对尾梁空间位态的影响机制、探究插板末端的安全过煤临界准则、构建支架各

部件的姿态与放煤口开口尺寸的数学关系,开展顶梁为水平状态下放煤机构的多体动力学数值模拟试验。将支撑高度、尾梁摆动角度、插板伸出长度作为影响因素,设置如下完全 3 因素多状态数值模拟试验方案:

1) 支架支撑高度范围为 2.8 ~ 4.2 m, 模拟梯度 0.2 m, 共设置 8 个状态。

2) 插板伸缩长度范围为 0 ~ 1 m, 模拟梯度 0.005 m, 共设置 201 个状态。

3) 尾梁摆动范围为 $[-40.7^\circ, 20^\circ]$, 约定“逆时针上摆为正, 顺时针下摆负”; 模拟梯度 1° , 共设置 61 个状态。

每组数值模拟试验中的坐标原点(图 4)及坐标系保持不变。

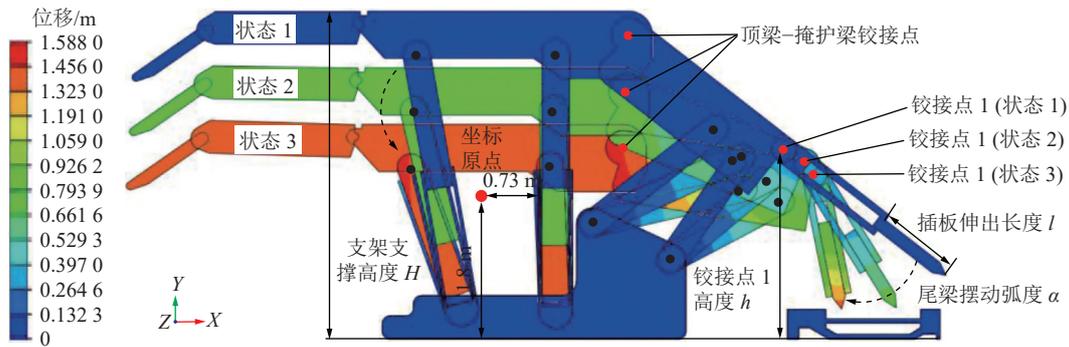


图 4 支架支撑高度对掩护梁的影响
Fig.4 Influence of support height on shield beam

2.2 支撑高度对掩护梁-尾梁铰接点运动轨迹的影响

掩护梁-尾梁铰接点(图 4 中铰接点 1)的高度随支架支撑高度的变化而变化。记支架支撑高度为 H , 铰接点 1 高度为 h ; 两者的相关性如图 5 所示。

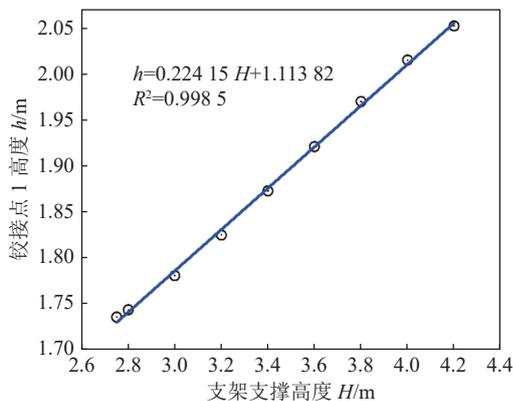


图 5 支架支撑高度 H 与铰接点 1 高度 h 关系
Fig.5 Relationship between support height H of support and height h of hinge point 1

由图 5 可知, 支架支撑高度 H 与铰接点 1 高度 h 呈高度线性关系, 回归公式为

$$h = 0.224 15 H + 1.113 82 \quad (1)$$

在放顶煤现场, 实时监测 H 通常比直接监测 h 方便容易。根据式 (1), 当现场测得 H 后, 即可计算出掩护梁-尾梁铰接点的高度值及空间位置, 可为进一步解放煤机构的实时位置提供依据。

2.3 放煤机构安全过煤临界准则分析

当支架处于某一支撑高度时, 尾梁若进行充分下摆可能会导致插板插入后部刮板输送机或其运输的煤块, 易导致放煤机构卡死发生故障, 造成工作面停产检修。因此, 研究放煤机构的合理过煤高度对于保障自动化放煤的连续性及安全性具有重要价值。

根据塔山矿 8222 综放工作面顶煤破碎程度及煤矸块度, 将过煤高度安全线设置在刮板输送机上方 0.2 m 处(图 6), 并统计插板末端触及该线时(即安全过煤临界条件)的铰接点 1 高度 h 、尾梁下摆角度 θ (相应的弧度值 $\alpha = 180^\circ\theta/\pi$)、插板伸出长度 l , 表 1 和图 7 所示。

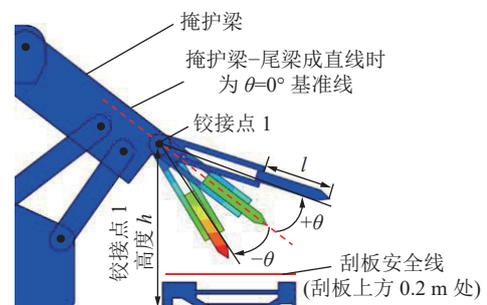


图 6 尾梁摆动角度及插板伸出长度示意
Fig.6 Schematic of tail beam angles and extension length of plug plate

由表 1 和图 7 可知, h 、 α 、 l 三者呈非线性曲面关系, 插板末端是否有足够的安全过煤高度取决于

表 1 安全过煤临界条件下的 H, θ, l 值
Table 1 H, θ, l values under safe coal-passing critical condition

铰接点1高度 h/m	尾梁摆动角度 $\theta/(^\circ)$	插板伸出长度 l/m
2.052	-40.7	0.505
	-35	0.57
	-30	0.635
	-25	0.725
	-20	0.845
	-12	1.05
2.015	-40.7	0.47
	-35	0.53
	-30	0.59
	-25	0.68
	-20	0.8
	-13	1.02
1.97	-40.7	0.43
	-35	0.48
	-30	0.545
	-25	0.63
	-20	0.745
	-13.7	0.94
1.921	-40.7	0.38
	-35	0.425
	-30	0.49
	-25	0.58
	-20	0.69
	-14.2	0.86
1.873	-40.7	0.33
	-35	0.38
	-30	0.44
	-25	0.525
	-20	0.63
	-14.4	0.79
1.825	-40.7	0.285
	-35	0.33
	-30	0.39
	-25	0.47
	-20	0.57
	-14.3	0.72
1.781	-40.7	0.24
	-35	0.28
	-30	0.34
	-25	0.42
	-20	0.52
	-14.2	0.67
1.744	-40.7	0.2
	-35	0.24
	-30	0.3
	-25	0.38
	-20	0.48
	-14.1	0.63

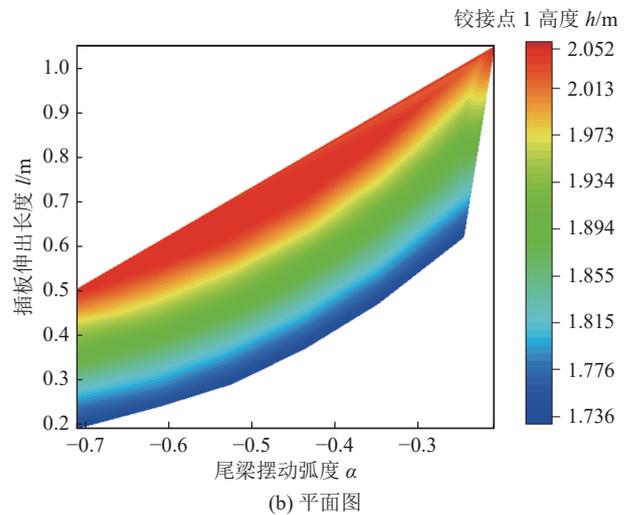
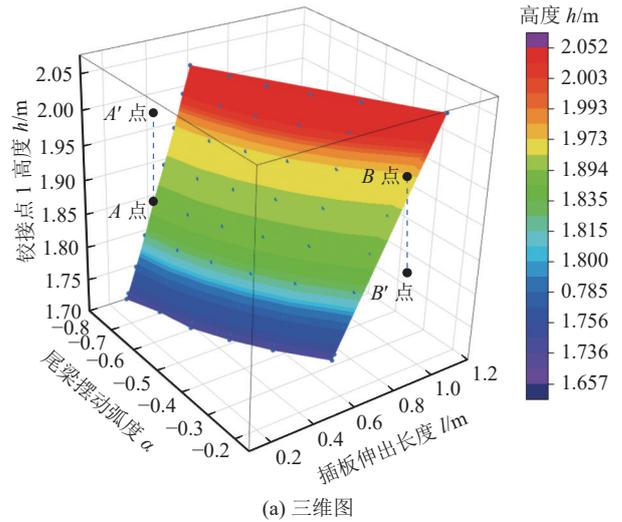


图 7 安全过煤临界条件下的 h, θ, l 三维曲面图
Fig. 7 3D surface of h, θ, l under safe coal-passing critical condition

支架支撑高度、尾梁角度和插板伸出长度。反之，只要能够测得上述三者的值即可根据图 7 判别过煤高度是否足够。为实现智能安全预警，需要对 $h-\alpha-l$ 所表征的安全过煤临界准则进行拟合。

采用最小二乘法拟合 $h-\alpha-l$ 安全过煤临界准则。Gauss-Newton 迭代法与 Levenberg-Marquardt(L-M 算法)^[24] 为最经典的最小二乘法，L-M 算法是梯度下降法和 Gauss-Newton 迭代法相综合的一种方法。通过对比多种拟合结果发现，L-M 算法拟合出的方程 $R^2=0.9973$ ，相关性最高，故采用 L-M 进行数据拟合。

在 L-M 算法中，梯度下降法用于初期求解，初步得出最优值的取值范围。Gauss-Newton 迭代法用于后期精确求解。对于可线性化的非线性回归模型，可以通过最小二乘法求初始值，然后通过泰勒级数展开式近似代替非线性回归方程，设置残差(实际值与估计值差)平方和 χ^2 ，经过多次迭代和修正，使回

归系数逼近非线性回归模型的最佳回归系数,残差平方和 χ^2 达到最小。

通过L-M算法实现模型优化,拟合得 h, l, α 三者的函数关系为

$$h = 0.149\ 73 + 3.709\ 88 \times \exp \left\{ -0.5 \left[\frac{(\alpha - 0.868\ 37)}{0.887\ 536} \right]^2 - 0.5 \left[\frac{(l - 2.999\ 49)}{2.178\ 48} \right]^2 \right\} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可推得临界支撑高度 H_0 与 l, α 关系式为

$$H_0 = \frac{3.709\ 88e \left\{ -0.5 \left[\frac{(\alpha - 0.868\ 37)}{0.887\ 536} \right]^2 - 0.5 \left[\frac{(l - 2.999\ 49)}{2.178\ 48} \right]^2 \right\} - 0.964\ 09}{0.224\ 15} \quad (3)$$

如图7所示,点 A, B 为 $h-\alpha-l$ 面上的点,分别对应面外任意点 A', B' ,即分别与 A, B 有相同插板伸出长度和尾梁摆动角度,但对应不同支架支撑高度,令 A', B' 对应支架支撑高度为 $F(x) = f(\alpha, l)$ 。

令 $F(x) = f(\alpha, l) - H_0$,因此,支架运行状态安全判据为

$$F(x) = \begin{cases} f(\alpha, l) - H_0 > 0, \text{安全} \\ f(\alpha, l) - H_0 < 0, \text{不安全} \end{cases} \quad (4)$$

当 $F(x) > 0$ 时,为安全状态,如图7a中的点 A' ,即处于临界安全曲面上方的点为安全状态,在当前支撑高度及尾梁摆动角度下,插板不会与后部刮送机或上方煤块发生碰撞;相反,如点 B' ,插板会与后部刮板输送机发生碰撞,导致安全事故。

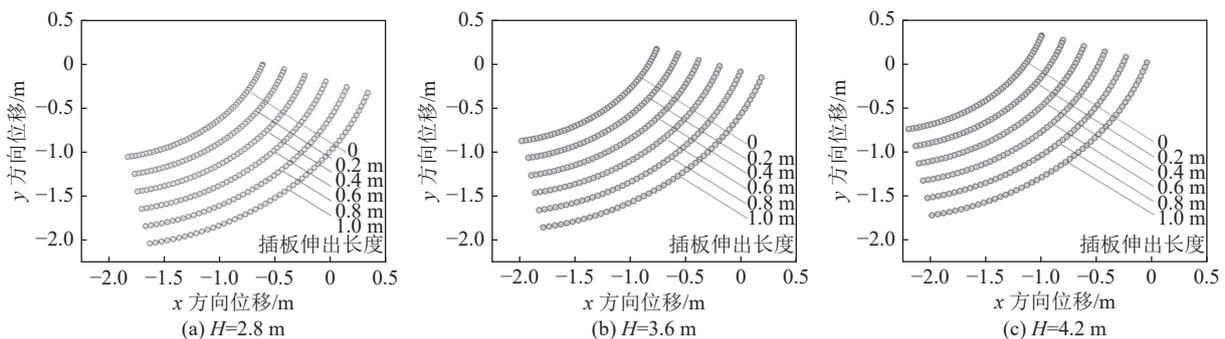


图9 插板末端运动轨迹

Fig.9 Movement track of plug plate end

3 放煤口开口度精准控制方法

3.1 传感器类型及安装位置

基于上述研究结果可知要实现放煤机构的精准控制需要感知及控制支架支撑高度 H 、尾梁摆动角

2.4 放煤口开口度与支架姿态的关系

图8中,定义插板末端与刮板输送机中部槽内沿之间的距离为放煤口开口度,放煤口开口度 D 大小为

$$D = |x_e - x_c| \quad (5)$$

式中: x_e 为插板末端 x 坐标; x_c 为刮板输送机中部槽内沿 x 坐标。

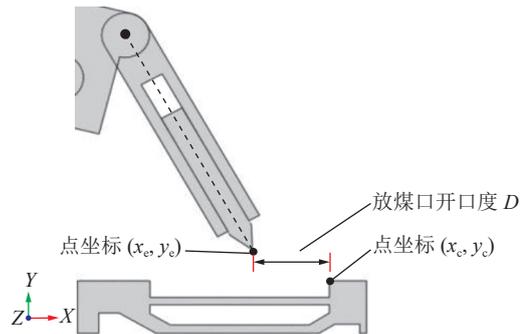


图8 插板末端与刮板输送机形成的放煤口开口度示意

Fig.8 Schematic of top-coal drawing opening

图9展示了部分因素水平条件下的插板末端运动轨迹。由图可知,向量 (H, α, l) 与插板末端坐标呈一一对应关系,即只要能够测得 H, α, l ,即可求出插板位置,进而求出放煤口开口度。基于数值模拟对放煤口开口度 D 与向量 (H, α, l) 的数值模拟标定试验,本文研究得出的放煤口开口度与 H, α, l 的标定关系试验数据公开于网站 <https://pan.baidu.com/s/1pEellmKxBxeyHVJhAseZg?pwd=1234>,见表2。

度 α 、插板伸出长度 l 三者参数的实时变化。根据感知参数的特性,选用磁致伸缩位移传感器。实物图与安装位置如图10,图11所示,在后立柱和尾梁-插板中安装磁致伸缩位移传感器,分别实时获取顶梁支撑高度、插板伸出长度;在掩护梁与尾梁间安装限

表 2 部分放煤口开口度标定数据库

Table 2 Dimension calibration database of partial coal caving opening

H (支架支撑高度)/m	l (插板伸出长度)/m	x_0 (插板末端初始坐标)	y_0 (插板末端初始坐标)	U_1 (插板末端x方向位移)	U_2 (插板末端y方向位移)	x_c (插板末端位移变化后x坐标)	y_c (插板末端位移变化后y坐标)
4.2	0.6	6.355 79	-0.174 94	0	0	6.355 79	-0.174 94
	0.6	6.355 79	-0.174 94	-0.000 362 93	-0.001 122 32	6.355 427 07	-0.176 062 32
	0.6	6.355 79	-0.174 94	-0.000 420 681	-0.000 674 095	6.355 369 319	-0.175 614 095
	0.6	6.355 79	-0.174 94	-0.000 124 502	0.000 234 69	6.355 665 498	-0.174 705 31
	0.6	6.355 79	-0.174 94	0.000 426 093	0.001 882 59	6.356 216 093	-0.173 057 41
	0.6	6.355 79	-0.174 94	0.000 426 093	0.001 882 59	6.356 216 093	-0.173 057 41
	0.6	6.355 79	-0.174 94	-0.427 679	0.139 972	5.928 111	-0.034 968
	0.6	6.355 79	-0.174 94	-0.427 625	0.140 14	5.928 165	-0.034 8

位千斤顶，控制尾梁摆动，在限位千斤顶内部安装磁致伸缩位移传感器。



图 10 磁致伸缩位移传感器实物

Fig.10 Photo of magnetostrictive displacement sensor

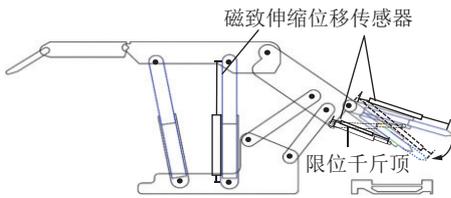


图 11 传感器安装布置

Fig.11 Sensor installation layout

3.2 基于位移传感器的尾梁角度计算方法

如图 12 所示，顶梁与掩护梁铰接点为 A ，掩护梁与尾梁铰接点为 B ，限位千斤顶与掩护梁、尾梁铰接点分别为 C, D 。 $\triangle BCD$ 的 3 条边长分别为 b, c, d ；其中， $BD=c=1.58$ m，为尾梁长度； $BC=d=0.9$ m，为掩护梁高度； $CD=b$ 为限位千斤顶的伸缩行程； $\angle CBD$ 为 γ 。以掩护梁与尾梁成直线时为基准线， φ 为尾梁从基准线摆动角度。 $\angle ABC$ 为为掩护梁两边所形成的角，记为 β 。 β 与 φ 的关系为

$$\varphi = |180 - \beta - \gamma| \quad (6)$$

根据余弦定理可求出 γ ，为

$$\gamma = \arccos \frac{c^2 + d^2 - b^2}{2dc} \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (7)，可得限位千斤顶伸缩行程 b 与尾梁摆动角度 φ 间的关系为

$$\varphi = \left| 180 - \beta - \arccos \frac{c^2 + d^2 - b^2}{2dc} \right| \quad (8)$$

其中， β, c, d 为已知量，尾梁摆动角度 φ 只与限位千斤顶伸缩行程 b 有关。因此，可通过控制限位千斤顶的伸缩行程实现对尾梁摆动角度的监测与控制。

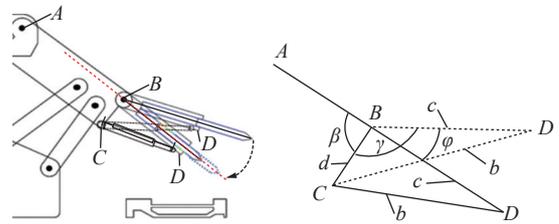


图 12 千斤顶伸缩行程与尾梁摆动角度关系

Fig.12 Relationship between telescopic stroke of jack and swing angle of tail beam

3.3 放煤口开口度精准控制方法

图 13 描述了将放煤口开口度控制到 D_g 的插板和尾梁“监测-反馈-精准控制”流程。首先，通过后立柱、限位千斤顶、尾梁-插板间安装行程传感器，实时监测支架支撑高度 H_t 、尾梁摆动角度 α_t 和插板伸出长度 l_t 。其次，将实时监测数据与放煤口开口度标定数据库进行比对，获得 H_t, α_t, l_t 三者的取值区间，根据区间上下限构造 8 个数组，并找到上述 8 个数组对应的放煤口开口度的最小值 D_{min} 和最大值 D_{max} ，通过计算得到 x_{et}, y_{et} 和该时刻的放煤口开口度 D_t 。最后，将 D_t 与放煤口的目标开口度 D_g 进行对比得出两者差值绝对值。若 $|D_t - D_g|$ 小于等于设定误差 $\Delta \varepsilon$ ，

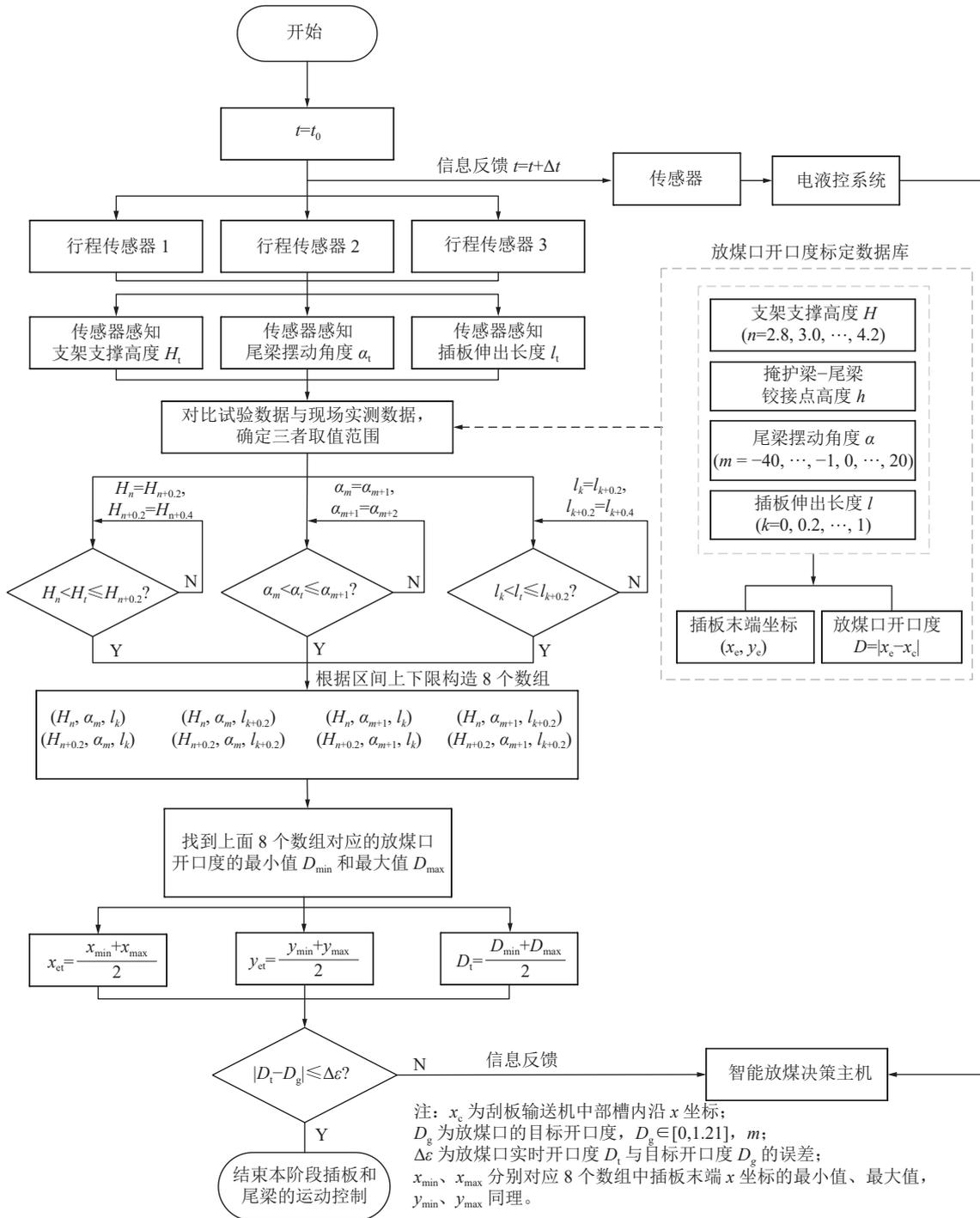


图 13 放煤口开口度精准控制方法流程

Fig.13 Control flow of top-coal opening dimension

则结束本阶段插板和尾梁的运动控制；若 $|D_i - D_g| > \Delta \varepsilon$ ，则继续通过智能放煤决策系统对插板伸出长度和尾梁角度进行调整，直至 (H_i, α_i, l_i) 所对应的 D_i 满足误差要求。

为验证放煤机构开口度控制方法的准确性，将放煤机构开口度计算值与现场实际放煤口开口度值进行误差计算。表 3 为支架支撑高度 $H=4.2$ m，插板

伸出长度 $l=0.2$ m 条件下放煤口开口度测试结果表。由表可知，两者之间的相对误差为 0.366% ~ 0.982%，平均为 0.79%。

基于国家重点研发计划项目，提出的精准感知与控制方法依托智能放煤决策软件，在塔山矿 8222 智能放煤工作面得到成功应用，放煤效率达到 2 982 t/h。

表3 部分放煤口开口度测试结果

Table 3 Test Results of partial top-coal opening dimensions

序号	尾梁角度/(°)	放煤口开口度		误差/%
		计算值/m	实测值/m	
1	-5°	0.514	0.519	0.963
2	-10°	0.605	0.611	0.982
3	-15°	0.726	0.719	-0.974
4	-20°	0.817	0.820	0.366
5	-25°	0.968	0.961	-0.728
6	-30°	1.089	1.097	0.729

4 结 论

1) 从智能控制与安全预警角度,采用 $L-M$ 算法拟合得出了由支架支撑高度 H 、尾梁摆动角度 α 及插板伸出长度 l 三因素控制的保障放煤机构安全过煤临界准则。

2) 阐明了支架姿态对放煤机构运动规律的影响机制,建立了放煤口开口度的计算模型及方法,构建了由支架支撑高度 H 、尾梁摆动角度 α 、插板伸出长度 l 、放煤口开口度 D 组成的多元关系数据库。

3) 推荐了用于感知与控制放煤机构姿态的传感器型式与安装位置,推导了基于行程传感器的尾梁角度计算方法,提出了基于行程传感器的放煤口开口度精准控制方法,在现场得到成功应用。

参考文献(References):

- [1] 王国法,徐亚军,张金虎,等.煤矿智能化开采新进展[J].煤炭科学技术,2021,49(1):1-10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinhu, *et al.* New development of intelligent mining in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 1-10.
- [2] 马英.综采工作面三机成套技术[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(5):672-675.
MA Ying. Three machines support technology in fully mechanized face[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2013, 32(5): 672-675.
- [3] 黄炳香,刘长友,程庆迎.低位综放开采顶煤放出率与含矸率的关系[J].煤炭学报,2007,32(8):789-793.
HUANG Bingxiang, LIU Changyou, CHENG Qingying. Relation between top-coal drawing ratio and refuse content for fully mechanized top coal carving[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 789-793.
- [4] 曹善华,王丽,李加林,等.一种薄煤层综采设备的特点及开采效果[J].煤矿开采,2011,16(5):63-64,70.
CAO Shanhua, WANG Li, LI Jialin, *et al.* Characteristic and mining effect of a full-mechanized mining equipment for thin coal seam[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(5): 63-64, 70.
- [5] 胡相捧,刘新华.初撑阶段的支架位姿与驱动千斤顶——映射及

调整策略[J].采矿与安全工程学报,2021,38(4):666-677.

HU Xiangpeng, LIU Xinhua. One-to-one mapping between powered support posture and actuating rams and its adjustment strategy during setting stage[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 666-677.

- [6] 章之燕.大倾角综放液压支架稳定性动态分析和防倒防滑措施[J].煤炭学报,2007,32(7):705-709.

ZHANG Zhiyan. Dynamic analysis on stability of hydraulic powered support in deep inclined fully mechanized wall and prevention slips measures[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 705-709.

- [7] 张金虎,王国法,杨正凯,等.高韧性较薄直接顶特厚煤层四柱综放支架适应性和优化研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(6):1164-1169,1176.

ZHANG Jinhu, WANG Guofa, YANG Zhengkai, *et al.* Adaptability analysis and optimization study of four-leg shield caving support in ultra thick seam with high toughness and thinner immediate roof[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6): 1164-1169, 1176.

- [8] 徐亚军.液压支架顶梁外载作用位置理论研究与应用[J].煤炭科学技术,2015,43(7):102-106.

XU Yajun. Theoretical study and application on external load function location of canopy in hydraulic powered support[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(7): 102-106.

- [9] 王国法,庞义辉.特厚煤层大采高综采综放适应性评价和技术原理[J].煤炭学报,2018,43(1):33-42.

WANG Guofa, PANG Yihui. Full-mechanized coal mining and caving mining method evaluation and key technology for thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 33-42.

- [10] 庞义辉,王国法.基于煤壁“拉裂-滑移”力学模型的支架护帮结构分析[J].煤炭学报,2017,42(8):1941-1950.

PANG Yihui, WANG Guofa. Hydraulic support protecting board analysis based on rib spalling “tensile cracking-sliding” mechanical model[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 1941-1950.

- [11] 庞义辉,王国法.大采高液压支架结构优化设计及适应性分析[J].煤炭学报,2017,42(10):2518-2527.

PANG Yihui, WANG Guofa. Hydraulic support with large mining height structural optimal design and adaptability analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2518-2527.

- [12] 黄庆享,徐璟,杜君武.浅埋煤层大采高工作面支架合理初撑力确定[J].采矿与安全工程学报,2019,36(3):491-496.

HUANG Qingxiang, XU Jing, DU Junwu. Determination of support setting load of large-mining-height longwall face in shallow coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3): 491-496.

- [13] 尹希文,徐刚,刘前进,等.基于支架载荷的矿压双周期分析预测方法[J].煤炭学报,2021,46(10):3116-3126.

YIN Xiwen, XU Gang, LIU Qianjin, *et al.* Method of double-cycle analysis and prediction for rock pressure based on the support load[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3116-3126.

- [14] 张强,武中亚,杜二宝,等.充填采煤液压支架工作阻力设计

- 方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 118-127.
ZHANG Qiang, WU Zhongya, DU Erbao, *et al.* Working resistance design method of backfilling shield[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(1): 118-127.
- [15] 谢生荣, 王 龙, 陈冬冬, 等. 四柱支撑掩护式支架空间承载特性研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1): 56-65.
XIE Rongsheng, WANG Long, CHEN Dongdong, *et al.* Spatial load-bearing characteristics of four-pillar chock-shield support[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(1): 56-65.
- [16] 李 伟. 综放开采智能化控制系统研发与应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 128-135.
LI Wei. Research and application of intelligent control system for full-mechanized caving mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(10): 128-135.
- [17] 王树仁, 王金安, 戴 涌. 折线型综放面开采顶煤运移破坏规律及支架受力特征的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(S1): 4531-4534.
WANG Shuren, WANG Jin'an, DAI Yong. Numerical analysis on movement and failure of coal and stress condition of support structures in mechanized top-coal caving in steep thick seam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004(S1): 4531-4534.
- [18] 何柏岩, 孙阳辉, 聂 锐, 等. 矿用刮板输送机圆环链传动系统动力学行为研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 50-56.
HE Baiyan, SUN Yanghui, NIE Rui, *et al.* Dynamic behavior analysis on the ring chain transmission system of an armoured face conveyor[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(17): 50-56.
- [19] 谢 苗, 毛 君, 许文馨. 重型刮板输送机故障载荷工况与结构载荷工况的动力学仿真研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(10): 1200-1204.
XIE Miao, MAO Jun, XU Wenxin. Dynamics simulation of heavy scraper conveyor in working condition of failure-load and structural load[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(10): 1200-1204.
- [20] JUAREZ-FERRERAS R, GONZALEZ-NICIEZA C, MENENDEZ-DIAZ A, *et al.* Measurement and analysis of the roof pressure on hydraulic props in longwall[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 75(1): 49-62.
- [21] 王学文, 崔 涛, 谢嘉成, 等. 考虑销轴间隙的液压支架运动虚拟仿真方法[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 186-193.
WANG Xuewen, CUI Tao, XIE Jiacheng, *et al.* Virtual simulation method of hydraulic support motion considering pin shaft clearance[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(2): 186-193.
- [22] 万丽荣, 陈 博, 杨 扬, 等. 单颗粒煤岩冲击放顶煤液压支架尾梁动态响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2905-2913.
WAN Lirong, CHEN Bo, YANG Yang, *et al.* Dynamic response of single coal-rock impacting tail beam of top coal caving hydraulic support[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2905-2913.
- [23] 齐 威. ABAQUS 6.14超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016: 606-673.
- [24] PRESS W H, TEUKOLSKY S A, VETTERLING W T, *et al.* Numerical recipes in C: The art of scientific computing. second edition[J]. *IEEE Concurrency*, 2002, 6(4): 79-79.