

# 钻锚机钻臂动力学仿真分析

张幼振,石智军

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

**摘要:**基于多体系统动力学理论,建立某型号钻锚机钻臂的动力学模型,应用 LMS Virtual. Lab Motion 多体动力学仿真模块对钻臂进行了钻进工况下的动力学仿真分析。将钻臂中的拖板作为钻臂多体系统中的柔性体进行了刚柔耦合仿真分析,得出拖板的应力变化规律,实现拖板结构的优化;应用 LMS Virtual. Lab AMESim 液压仿真模块联合 Motion 中的多体动力学模型对钻臂进行机液耦合仿真分析,结果表明,在钻进工况下钻臂主、副给进油缸进出口压力与速度波动在合理范围之内;仿真环境中,钻锚机钻臂举升平稳,钻进正常。仿真分析有效评价了钻锚机钻臂系统动力学特性,为钻臂结构的优化设计提供了参考。

**关键词:**钻锚机钻臂;多体动力学;刚柔耦合;机液耦合

中图分类号:TD421 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2014)02-0058-05

## Dynamics Simulation and Analysis on Drilling Boom of Crawler Roof Bolter

ZHANG You-zhen, SHI Zhi-jun

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Based on the theory of multi-body dynamics, a dynamical model of drilling boom of crawler roof bolter had been built for the simulation under various working conditions using LMS Virtual. Lab Motion. Then the stress distribution of carriage was obtained through rigid-flexible coupling dynamics simulation, in which the carriage was taken as a flexible body. The structure of carriage was subsequently optimized. The hydraulic-mechanical coupling simulation implementation was combined LMS Virtual. Lab AMESim and the Motion model. The results showed that the pressure and velocity of feeding cylinder were fluctuated within a reasonable range under the working conditions and the crawler roof bolter's drilling boom working status was normal in simulation environment. The simulation could effectively evaluate the dynamic characteristics of drilling boom system, and provide a reference for structure optimization.

**Key words:**drilling boom of crawler roof bolter; multi-body dynamics; rigid-flexible coupling; hydraulic-mechanical coupling

## 0 引言

钻锚机(锚杆钻车)是煤矿井下用于巷道锚杆支护的施工设备。钻臂是钻锚机的关键部件,其动力学性能的好坏直接影响整机工作效率和可靠性。钻臂主要执行钻具旋转及给进动作,其运动速度、作用力和输出转矩等参数一方面受到孔内情况以及钻探工艺的影响,同时也影响钻孔质量及施工效率。动力学仿真分析是一种基于产品仿真模型的数字化设计方法,能够部分代替物理样机进行早期产品性

能测试和设计优化,从而有效提升产品设计质量<sup>[1-5]</sup>。锚杆支护设备的动力学仿真分析研究近些年取得了一些成果<sup>[6-8]</sup>,为这类设备的研制提供了有力支撑。对相关研究成果进行分析得出:①针对锚杆支护设备典型工况建立了工作部件的结构静力学模型,从不同侧重点对锚杆支护设备进行仿真研究,提出了改进方案;②较少涉及工作机构在钻进工况下应力变化规律的研究,未考虑柔性体对多体系统动力特性的影响;③作为执行机构控制和动力传递的液压系统,在以往的研究中未能将其与机械系

收稿日期:2013-08-03;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2014.02.017

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275061);陕西省自然科学基金资助项目(2011JM7017)

作者简介:张幼振(1976—),男,宁夏石嘴山人,副研究员,博士。Tel:029-81778210, E-mail:zhangyouzhen@cctegxian.com

引用格式:张幼振,石智军.钻锚机钻臂动力学仿真分析[J].煤炭科学技术,2014,42(2):58-62.

ZHANG You-zhen, SHI Zhi-jun. Dynamics Simulation and Analysis on Drilling Boom of Crawler Roof Bolter [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 58-62.

统进行耦合分析。笔者以多体系统动力学为理论基础,利用动力学分析软件——LMS Virtual.Lab 虚拟实验室作为机构动力学的仿真分析平台,对钻锚机钻臂进行动力学仿真研究,重点研究了钻臂中的拖板作为柔性件的刚柔耦合仿真以及联合给进液压系统的机液耦合仿真,得出了钻锚机钻臂在钻进工况下的动力学特性。

## 1 钻锚机钻臂动力学模型

钻锚机钻臂主要由机身底座、滑动机身、主给进油缸、副给进油缸、链轮机构、拖板以及动力头等组成,在钻锚机前端钻架油缸的作用下实现对煤矿巷道顶板及边帮的锚固施工。钻锚机钻臂的动力学模型如图 1 所示。依据多刚体系统动力学的笛卡尔方法<sup>[9-10]</sup>,建立钻臂的运动学约束方程。

$$\Phi = (\Phi_1 \ \Phi_2 \ \Phi_3 \ \Phi_4 \ \Phi_5 \ \Phi_6 \ \Phi_7)^T$$

式中: $\Phi_1$  为机身底座绝对  $x$  位置约束方程; $\Phi_2$  为机身底座绝对  $y$  位置约束方程; $\Phi_3$  为机身底座绝对角约束方程; $\Phi_4$  为滑动机身滑移约束方程; $\Phi_5$  为链轮机构滑移约束方程; $\Phi_6$  为拖板滑移约束方程; $\Phi_7$  为倍速机构拖板的滑移约束方程。

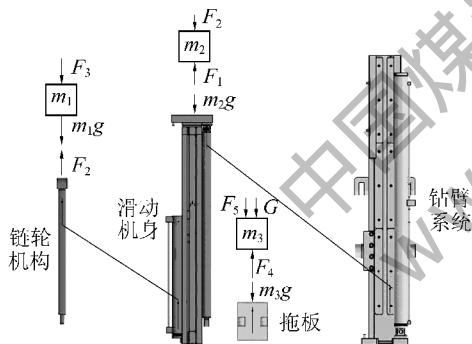


图 1 钻锚机钻臂动力学模型

对各组件进行力学分析,滑动机身、链轮机构和拖板在  $y$  轴方向的受力如图 1 所示,根据牛顿-欧拉方法,可得出各组件的刚体动力学方程,即

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{r}_1 &= \begin{pmatrix} 0 \\ F_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -m_1 g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -F_2 \end{pmatrix} \\ m_2 \ddot{r}_2 &= \begin{pmatrix} 0 \\ F_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -m_2 g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -F_3 \end{pmatrix} \\ m_3 \ddot{r}_3 &= \begin{pmatrix} 0 \\ F_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -m_3 g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -G \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -F_5 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

式中: $m_1$  为滑动机身质量; $\ddot{r}_1$  为滑动机身动基矢径对时间的二阶绝对导数; $F_1$  为主给进油缸对滑动机身的作用力; $g$  为当地重力加速度; $F_2$  为副给进油缸

对滑动机身的作用力; $m_2$  为链轮机构质量; $\ddot{r}_2$  为链轮机构动基矢径对时间的二阶绝对导数; $F_3$  为来自拖板作用在副给进油缸的作用力; $m_3$  为拖板的质量; $\ddot{r}_3$  为拖板动基矢径对时间的二阶绝对导数; $F_4$  为来自链轮机构作用在拖板的作用力; $G$  为动力头质量; $F_5$  为岩层对拖板的作用力。

## 2 钻锚机钻臂仿真模型

1) 仿真模型建立。LMS Virtual.Lab 虚拟实验室可作为系统多体动力学、结构优化集成的多功能仿真平台<sup>[11]</sup>。钻锚机钻臂的数值仿真应用该软件中的 Motion 模块。根据钻锚机的运动机理,将钻锚机钻臂进行简化,其中主给进油缸缸筒固定在机身底座上,活塞固定在滑动机身上;副给进油缸缸筒固定在滑动机身上,活塞固定在链轮组件上。链轮组件将副给进油缸活塞位移以 1:2 的比例传送给动力头拖板,在仿真中利用三体相对约束(Three-Body Relative Constraint)等效比例函数链轮模型。

在 Motion 中导入部件时添加 2 个虚拟体。设置虚拟体 1 用于等效动力头拖板与链轮组件的相对运动;虚拟体 2 代替动力头所驱动的钻具,与拖板固接,承受外部环境施加的载荷。考虑到拖板在链轮组件作用下,沿滑动机身导轨同向运动,并且钻具与拖板固接,因此定义虚拟体 1 与链轮组件间的运动为沿机身导轨方向的滑动。假设链轮组件和虚拟体 1 相对滑动机身的距离分别为  $l_1$  和  $l_2$ 。根据链轮机构设计原理,链轮组件单位时间给进长度为拖板单位实际给进长度的  $1/2$ ,即  $2\Delta l_1 = \Delta l_2$ 。

2) 外部载荷的添加。在钻锚机施工过程中,钻臂与钻具之间构成了一个多体动力学系统,作用在钻锚机钻臂上的外部载荷是钻锚机工作机构设计的依据,载荷的定义直接影响钻臂的动态特性仿真效果。通过对钻进过程的动态仿真分析,可得出锚杆钻头在旋转钻进过程中的载荷变化规律<sup>[12]</sup>。截取多个锚杆钻头上的指定点沿时间的受力值,可得到钻具承受载荷的变化曲线,为确保零件工作的安全性,对应钻进过程中的不同时段,添加载荷系数  $K_w$ 。

$$K_w = F_c / F$$

式中: $F_c$  为实际工作载荷; $F$  为名义载荷。

载荷系数、工作载荷的类型与机器受载状态有关,当有动态过载的危险时,一般使用名义载荷加静态附加力和动态附加力;当有静态过载危险时,按最不利的条件下计算的最大力作为  $F_c$ 。钻锚机属于

旋转式钻凿机械设备,依据文献[13],取 $K_w=1.3\sim1.5$ 。对应钻进过程中的不同时段,定义5 s时开始钻进,在5.27 s时, $K_w$ 取1.3;5.27~5.54 s时, $K_w$ 取1.4;5.54~5.81 s时, $K_w$ 取1.5。通过多项式拟合而成的钻进轴向载荷曲线如图2所示,作用在钻头上的转矩为200 N·m,载荷作用在虚物体2上,通过固接运动副传递给拖板。

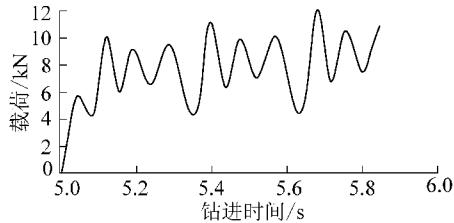


图2 钻进轴向载荷曲线

### 3 刚柔耦合仿真分析

拖板是钻锚机钻臂的重要零件,拖板的弹性变形会对钻臂系统整体运动及动力特性产生影响。在实际钻进过程中,拖板既承受转矩及推拉力的共同作用,还承受动力头带来的反转矩及外部载荷激励,所以选取拖板作为钻臂多体动力系统中的柔性体来进行刚柔耦合分析,这类异构系统信息的耦合仿真,能有效提高仿真分析的精度和效率<sup>[14-16]</sup>。

拖板主要由耳座、拖板体、堵头、导轨以及摩擦条等组成。在有限元模型中对其做必要简化,忽略螺钉、垫圈及弹簧等次要结构,在LMS Virtual. Lab Motion中对其添加属性:弹性模量210 GPa;泊松比0.33;密度 $7.89\times10^3$  kg/m<sup>3</sup>。选择刚性支撑面,虚物体2与动力头拖板连接点的支撑面选择回转器耳座的内壁,虚物体1与拖板连接点的支撑面选择滑槽内壁。最终建立的有限元模型如图3所示。

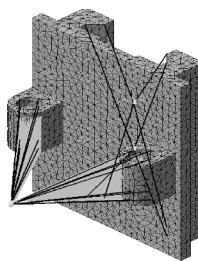


图3 LMS Virtual. Lab Motion中拖板的有限元模型

将拖板柔性部件替换多刚体动力学模型的刚性构件,依据第2.2节提到的外部载荷,在LMS Visual. Lab Motion中驱动Nastran求解器进行求解,计算钻进过程中拖板的应力变化。计算结果表明,应力的集中部位在耳座附近,对应的最大载荷系数为

1.5时,最大Mises等效应力为79.4 MPa,小于所选材料的屈服极限235 MPa,拖板强度设计偏于安全。但鉴于该零件的重要性,对拖板采取一定的技术措施改善耳座附近的应力集中现象,并提高其整体刚度。具体技术措施有以下3点:①确定耳座焊接合理的坡口参数,包括坡口角、根部间隙和钝边角度等,以改善耳座焊接工艺性;②改变拖板体材料,由Q235改为45钢;③加大堵头弹簧的刚度,以降低摩擦板与机身导轨间的接触间隙,提高整体刚性。

通过以上的技术改进措施,对拖板进一步分析表明,改进后拖板所受的最大应力都有不同程度的降低,应力集中现象明显减缓,对应的载荷系数为1.5时,最大Mises等效应力降为67.5 MPa,应力集中处的位置没有大的变化。改进后拖板在3个载荷系数下的等效应力结果如图4所示。拖板改进前后3个不同载荷系数下最大应力的对比如图5所示,改进措施在拖板结构强度上的改善是明显的。

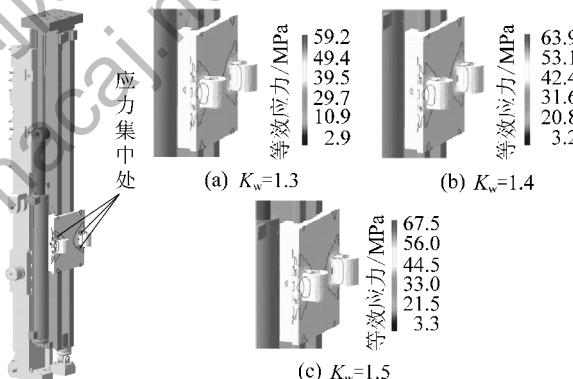


图4 改进后拖板不同载荷系数下的等效应力云图

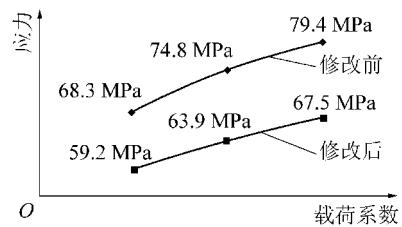


图5 拖板改进前后不同载荷系数下最大应力对比

### 4 机液耦合仿真分析

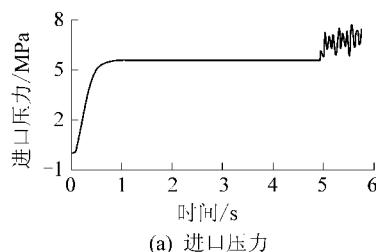
#### 4.1 机液耦合模型建立

钻锚机钻臂由机械执行子系统和液压执行子系统组成,考虑液压系统作为驱动机构的非线性过程及流体和液压元件特性在动态过程中的影响,应用LMS Virtual. Lab所集成的AMESim液压仿真模块,在Motion中添加AMESim模型,分别设置主、副给进油缸的缸筒和活塞,实现多工况下机液耦合仿真。

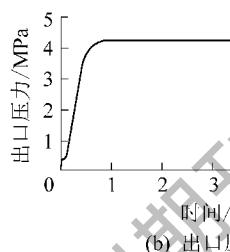
根据液压系统工作原理确定液压系统和元件的结构特征参数,如质量、容积、弹簧刚度、阀口面积等,并确定系统和元件的性能参数,如摩擦因数、阻尼系数、阀口流量系数、瞬态及稳态液动力系数、摩擦阻力等,建立钻锚机钻臂的 AMESim 一维模型如图 6 所示。完成各部件的实际参数赋值,进入 Simulation Mode 模式,进行仿真。

## 4.2 仿真结果与分析

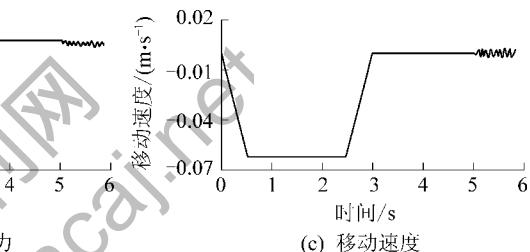
钻臂主给进油缸的主要功能是举升滑动机身至井下巷道高度所限的位置,是钻进作业中的准备步骤。根据钻进实际工况,0~0.5 s 液压阀逐渐打开,0.5~2.5 s 液压阀全开,5.0 s 时开始钻进。主给进油缸压力与移动速度变化曲线如图 7 所示,考虑液压油的弹性,油缸初始运动时速度有停滞,由图 7a



(a) 进口压力



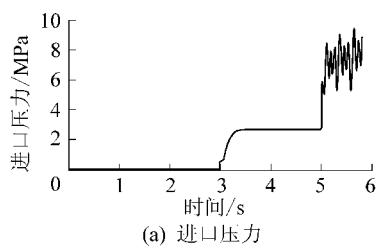
(b) 出口压力



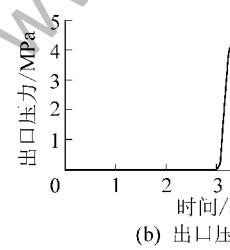
(c) 移动速度

图 7 钻臂主给进油缸进出口压力与移动速度变化曲线

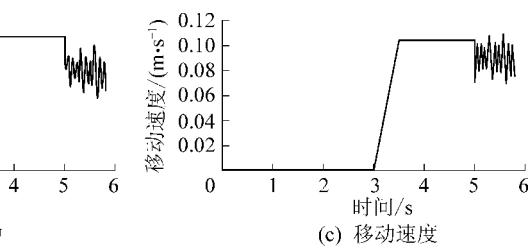
钻臂副给进油缸直接参与钻进过程,受钻进负载影响较主给进油缸明显。5.0 s 时钻头与岩层接触,开始钻进,对应前文所取的 3 个载荷系数  $K_w$ ,分别设置钻进过程中的 3 个时段,仿真结果如图 8 所示。由图 8a 可知,5.0 s 后在外部钻进负载激励作



(a) 进口压力



(b) 出口压力



(c) 移动速度

图 8 钻臂副给进油缸进出口压力与移动速度变化曲线

给进油缸压力的波动,主要是由于负载的变化引起的,也与液压系统建模时的元件反应时间和迟滞现象等原因有关,在外部负载一定的基础上,改变系统的有效体积弹性模数可以达到提高反应速度的目的。钻锚机给进液压系统在其他阶段没有出现大的压力、速度波动,举升平稳。仿真分析结果表明,系统仿真所得的曲线特性与钻锚机实际工作状态相符,设计的给进液压系统工作可靠,能够满足钻锚机数字化虚拟样机模拟给进工况的需求。

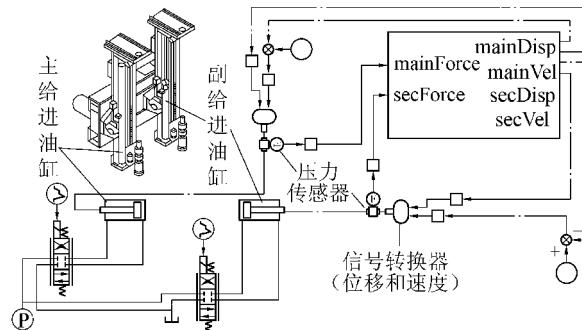
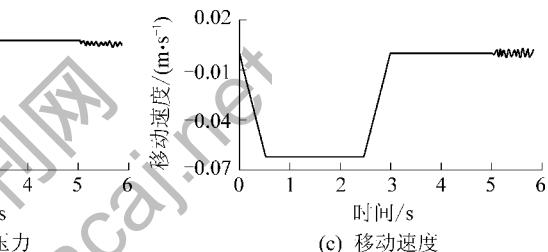
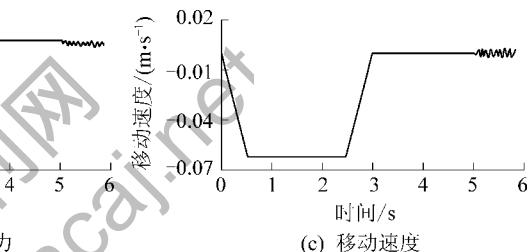


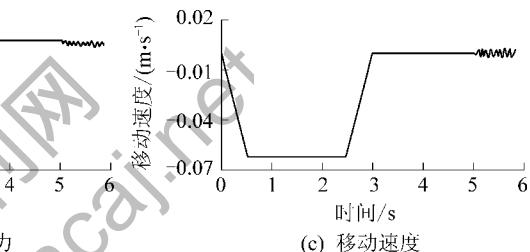
图 6 钻锚机钻臂的 AMESim 一维模型  
油缸进出口压力变化仿真曲线中可以看出,钻进工作时,压力波动较小,油缸进口压力在 6~8 MPa 波动;图 7b 显示出口压力在 4.0~4.1 MPa 波动;图 7c 显示开始钻进时,主给进油缸移动速度波动范围为 0~0.01 m/s。主给进油缸液压稳定性较好。



(a) 进口压力

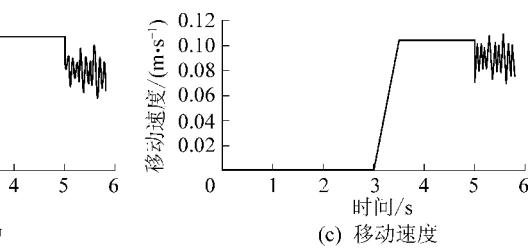


(b) 出口压力

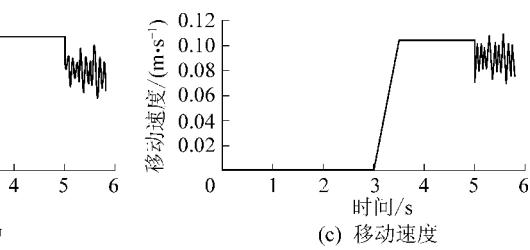


(c) 移动速度

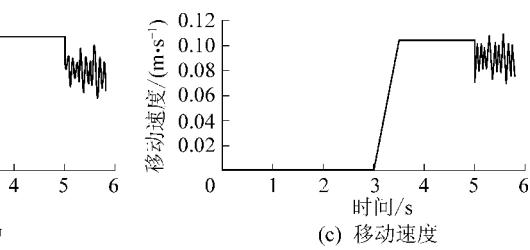
用下,副给进油缸进口压力最大 9.5 MPa,波动范围 4.5~10.0 MPa。由图 8b 可知,副给进油缸出口压力随钻进负载有着相应的变化,波动范围 2.5~4.5 MPa。由图 8c 可知,副给进油缸移动速度最大 0.11 m/s,钻进过程中在 0.07~0.11 m/s 变动。



(a) 进口压力



(b) 出口压力



(c) 移动速度

## 5 结论

1) 以多体动力学理论为指导,建立了钻锚机工作装置中钻臂系统多体运动学及动力学数学模型,为钻臂的动力学分析提供了基础。

2) 应用 LMS Visual. Lab Motion 分析了钻臂的结构动力特性,并将拖板作为多体动力系统中的柔性体,进行了刚柔耦合仿真。得到了钻臂在钻进工况下拖板的等效应力,提高了分析精度和效率,在此

基础上,提出了改进措施,优化了拖板的结构。

3)应用LMS Virtual. Lab集成的AMESim液压仿真模块,对钻锚机给进液压系统进行了机液耦合仿真分析。在外部载荷激励下,全面分析了给进液压系统特性,获取了系统中主副两级给进油缸的动态响应,掌握了给进液压系统的动态性能,为后续优化提供了基础。

## 参考文献:

- [1] 姚咏,范文慧,熊光楞.复杂产品开发过程仿真及其优化方法研究[J].系统仿真学报,2006,18(3):726-730.
- [2] 赵志平,李新勇.虚拟样机技术及其应用和发展[J].机械研究与应用,2006,19(1):6-7.
- [3] ZHANG You-zhen, ZHANG Jian-ming, SHI Zhi-jun. Application and Development of Numerical Simulation for Underground Horizontal Directional Drilling[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2012, 18(1):101-107.
- [4] 董磊,任家骏,王喜胜,等.悬臂式掘进机回转机构的建模与动力学仿真[J].煤炭科学技术,2009,37(6):83-85.
- [5] 朱卫波,杨兆建,王义亮.采煤机截割部行星齿轮动力学仿真[J].煤炭科学技术,2010,38(5):80-82.

(上接第46页)

客观条件,故可在相似条件下的矿井中推广应用。

## 参考文献:

- [1] 俞启香,程远平,蒋承林.高瓦斯特厚煤层煤与卸压瓦斯共采原理及实践[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):128-131.
- [2] 国家煤矿安全监察局.防治煤与瓦斯突出规定[M].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [3] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2011.
- [4] 颜智,李树清,汤铸.瓦斯抽采“一巷两用”技术[J].矿业工程研究,2010,25(4):33-35.
- [5] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].北京:煤炭工业出版社,2003.

(上接第57页)

- [7] 皮亚利,彭勃,赵永鸿,等.高压下二氧化碳—盐水体系pH值变化规律研究[J].应用化工,2009,38(4):469-473.
- [8] 朱子涵,李明远,林梅钦,等.储层中CO<sub>2</sub>—水—岩石相互作用研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2011,30(1):104-112.
- [9] 叶建平,张兵,Sam Wong.山西沁水盆地柿庄北区块3号煤层注入埋藏CO<sub>2</sub>提高煤层气采收率试验和评价[J].中国工程科学,2012,14(2):38-44.
- [10] 降文萍,崔永君.深部煤层封存CO<sub>2</sub>的地质主控因素探讨[J].中国煤炭地质,2010,22(11):1-6.
- [11] 杨涛,杨栋,康志勤,等.注入超临界CO<sub>2</sub>对提高煤层渗透性的影响[J].煤炭科学技术,2010,38(4):108-110.

- [6] 赵伟民,迟云萍,张春莹,等.液压锚杆钻机变幅机构动态仿真分析[J].建筑机械化,2008(7):40-44.
- [7] 刘忠,刘卫萍.液压凿岩机推进系统建模与控制及仿真研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2008,23(4):23-27.
- [8] 李天全.基于ADAMS的巷道锚杆钻机工作机构的仿真分析[J].煤矿机械,2010,31(9):79-81.
- [9] 洪嘉振.计算多体系统动力学[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [10] 齐朝晖.多体系统动力学[M].北京:科学出版社,2008.
- [11] 万晓峰,刘岚.LMS Virtual.lab Motion入门与提高[M].西安:西北工业大学出版社,2010.
- [12] 张幼振.双臂窄体履带式钻锚机设计及动态特性研究[D].北京:煤炭科学研究院,2012:42-55.
- [13] 成大先.机械设计手册[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [14] 林小夏,张树有,陈婧,等.多体动力学与有限元联合仿真的时变载荷历程模型[J].浙江大学学报:工学版,2011,45(5):1643-1649.
- [15] Hanson D, Winton M, Randall R B, et al. An In-Service Dynamic Model of a Diesel Railcar from Operational Modal Analysis and Finite-Element Model Updating[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2008, 222(4):313-320.
- [16] 曹旭阳,王国彪,徐进永,等.基于机液耦合的装载机工作装置仿真与实验研究[J].中国工程机械学报,2008,6(1):28-32.

- [6] 斯钟铭,徐林生.煤矿坚硬顶板控制[M].北京:煤炭工业出版社,1994.
- [7] 于不凡.煤矿瓦斯灾害防治及利用手册[M].北京:煤炭工业出版社,2005.
- [8] 张铁岗.矿井瓦斯治理技术[M].北京:煤炭工业出版社,2001.
- [9] 袁亮.松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M].北京:煤炭工业出版社,2004.
- [10] 俞启香.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992.
- [11] 周世宁,林柏泉.煤层瓦斯赋存与流动理论[M].北京:煤炭工业出版社,1999.
- [12] 汪有清.底板巷上向穿层钻孔抽采远程卸压瓦斯技术研究[D].淮南:安徽理工大学,2006.
- [13] 邹友峰,胡友健.采动损害与防护[M].徐州:中国矿业大学出版社,1996:37-38.

- [12] 姜玲.CO<sub>2</sub>地质储存对地下水的环境影响研究[D].北京:中国地质大学(北京),2010.
- [13] Ryoji S, Thomas L D. Experimental Study on Water-rock Interactions During CO<sub>2</sub> Flooding in the Tensleep Formation, Wyoming, USA[J]. App Geochem, 2000, 15(3):265-279.
- [14] Robert J R, Tamer K, James L P. Experimental Investigation of CO<sub>2</sub>-brine-rock Interactions at Elevated Temperature and Pressure: Implications for CO<sub>2</sub> Sequestration in Deep Saline Aquifers [J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86:1581-1597.
- [15] 张松航.鄂尔多斯盆地东缘煤层气储层物性研究[D].北京:中国地质大学(北京),2008.